

## Ipotesi di rinaturalizzazione della spiaggia di Gabicce Mare

Elena Primavera<sup>1</sup> e Barbara Zanuttigh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Idraulica & Ambiente, Pesaro, E-mail: prielena@libero.it.

<sup>2</sup>DISTART Sede di Idraulica, Università di Bologna, Viale Risorgimento, 2 - 40136 Bologna, Tel. 0512093754, Fax 0516448346 E-mail: barbara.zanuttigh@mail.ing.unibo.it

### Sommario

Scopo del presente contributo è proporre un sistema di difesa sostenibile eco-compatibile per la spiaggia di Gabicce. Si è scelto questo sito a motivo delle sue peculiari caratteristiche ambientali: le protezioni costiere costruite negli anni hanno arrestato l'erosione della spiaggia e hanno permesso la realizzazione di una più ampia area adibita all'attività ricreativa, ma hanno ridotto la circolazione di acqua nello specchio protetto e quindi la sua qualità; l'instabilità della falesia, che racchiude ad Est la spiaggia, ha determinato un incremento del rischio dell'abitato; lo sviluppo di una prateria di fanerogame, protette dalle direttive Europee, ha peggiorato le condizioni della balneazione e le attività turistiche in generale, ma ha contribuito in modo significativo alla stabilità della spiaggia e all'ossigenazione dell'acqua. Si presenta uno schema di difesa alternativo rispetto alla situazione attuale, che intende ripristinare condizioni della spiaggia compatibili con la sua fruibilità; si effettua la progettazione di tale schema mediante formule ben note e si verificano i suoi effetti mediante simulazioni numeriche.

**Parole chiave:** spiaggia, erosione, fanerogame, turismo, costi, sostenibilità.

### Abstract

*This contribution is aimed at proposing a sustainable and eco-compatible defence system for Gabicce beach. This site was chosen because of its peculiar environmental characteristics: the defence works performed during the years stopped beach erosion and allowed a wider recreational area but reduced water circulation in the protected area and thus water quality; the instability of the cliff that closes the beach at the East side produced an increase in risk for the built-up area; the development of a phanerogam sea-grass, protected by European directives, worsened the conditions for bathing and tourism activities but significantly contributed to beach stability and to water oxygenation. An alternative defence to the present scheme, which intends to restore beach conditions compatible to its usage, is presented, designed with well-established formulae and verified through numerical simulations.*

**Keywords:** beach, erosion, phanerogams, tourism, cost, sustainability.

### Introduzione

La spiaggia di Gabicce Mare è racchiusa tra il molo del porto canale di Cattolica a Nord e la falesia del colle S. Bartolo a Sud. E' attualmente difesa da una serie di barriere foranee emerse, ad una distanza di circa 100 metri da riva, imbasate su fondale di diversa profondità e caratterizzate da altezze in sommità un poco differenti, costruite negli anni 1960-1970. Tali barriere, non perfettamente allineate e modificate nel corso degli anni per costituire un più ampio litorale sabbioso e proteggere la falesia a Sud dall'azione erosiva del mare, hanno generato uno squilibrio ambientale del tutto singolare. Infatti, a causa della completa chiusura verso il largo operata dalla difesa costiera, si sono create le condizioni ottimali per lo sviluppo delle fanerogame marine, piante acquatiche considerate elementi qualificanti dello stato dell'ambiente e protette dalla Direttiva 92/43 dell'Unione Europea. Tali piante hanno generato, però, problemi turistici correlati alla balneazione ed alla presenza di materia organica in

lento dissolvimento sulla spiaggia. Inoltre, la forte erosione del lato meridionale della spiaggia, indotta dalle mareggiate invernali, è proseguita ugualmente, con conseguente asportazione dei sedimenti più fini e annuale franamento della falesia (Nesci, 2003; Colantoni et al., 2004). Unitamente a tali aspetti, il peggioramento della qualità dell'acqua nei mesi estivi ha reso necessaria la valutazione di un intervento per ripristinare condizioni di spiaggia compatibili con le esigenze di sfruttamento economico della stessa.

Lo scopo del contributo è proporre, sulla base delle indicazioni tecniche ed economiche fornite dalla Regione Marche nel Piano di Gestione delle Aree Costiere (2003), un'alternativa progettuale alle esistenti barriere emerse, al fine di migliorare lo stato attuale del litorale tutelando il fragile ecosistema marino ivi creatosi.

Si presenta e si verifica dapprima l'alternativa progettuale strettamente basata sul progetto della Regione, composta da un'unica barriera sommersa, con una serie regolare di varchi, dal molo al San Bartolo, da realizzarsi dopo la rimozione integrale della attuali barriere.

Si evidenzia quindi una seconda alternativa progettuale, che ottimizza la precedente, in particolare dal punto di vista della economicità di realizzazione e della salvaguardia delle piante, da attuarsi mediante scapitozzamento delle barriere attualmente presenti e regolarizzazione parziale del loro tracciato.

Si modellano col codice MIKE21 le condizioni di onda, corrente e trasporto sedimentario per la condizione esistente e la soluzione progettuale proposta. Sulla base dei risultati delle simulazioni numeriche (Primavera, 2004), si tracciano scenari di impatto ambientale, con particolare riferimento alla sopravvivenza delle praterie di fanerogame marine ed alla pericolosità della zona in frana.

## Descrizione del territorio

### *Le spiagge di Gabicce Mare e Cattolica*

La spiaggia di Gabicce Mare ha una lunghezza totale di 1.75 Km; è delimitata a Nord dal molo del porto canale di Gabicce-Cattolica, che protegge l'uscita a mare del torrente Tavollo, e a Sud dalla falesia del Colle San Bartolo (Fig. 1).

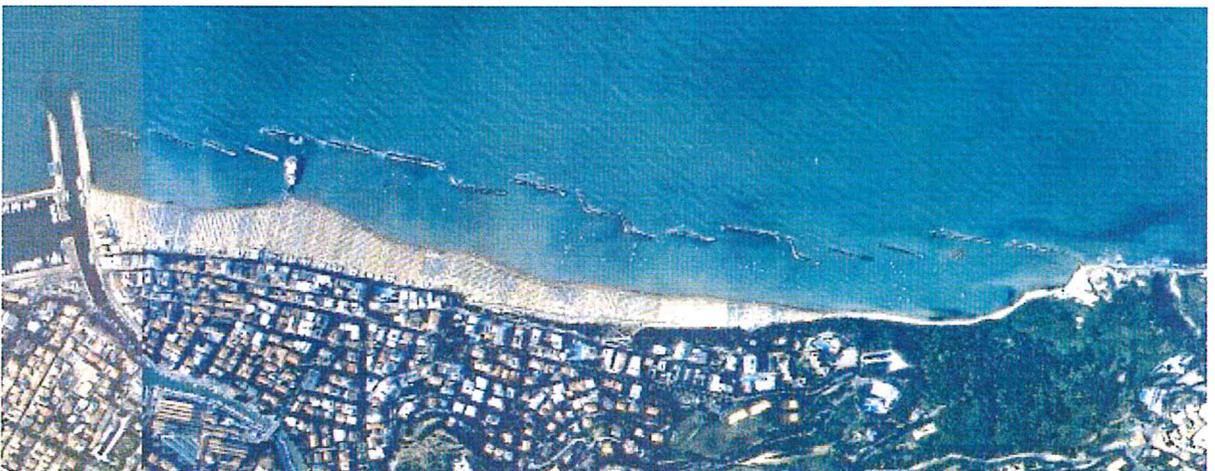


Figura 1 - Veduta aerea del litorale di Gabicce al 1998 (per concessione di ARPA Emilia-Romagna).

Le caratteristiche sedimentologiche della spiaggia emersa evidenziano la presenza del 94% di sabbia e del 6% di ghiaia. La sorgente principale di apporto solido è costituito dalla falesia del colle San Bartolo e, in minore misura, dal bacino del torrente Tavollo.

Le strutture aggettanti del porto canale di Gabicce-Cattolica, alla foce del Tavollo, sono state le prime opere artificiali realizzate a partire dalla fine dell'Ottocento. In seguito, si realizzò un pennello di scogli poi trasformato in molo e successivamente prolungato con un pontile su cui si costruì il locale Mississippi. Negli Anni '50, per limitare l'arretramento della parte centro-orientale della spiaggia, posta sottoflutto all'aggettante punta settentrionale del promontorio del San Bartolo, si posero dei piccoli pennelli e dei brevi tratti di scogliere foranee ad una distanza di circa 20 m dalla riva, poi salpati o rimasti sepolti sotto i sedimenti. Dagli Anni '60 alla fine dei '70, di fronte all'intero tratto di spiaggia fu realizzata una serie di scogliere foranee, a circa 100 m dalla

riva, modificate nel corso degli anni successivi al fine di costituire un più ampio litorale sabbioso. La spiaggia di Cattolica ha uno sviluppo di 2.1 km ed è interamente protetta da 18 scogliere parallele emerse realizzate nel periodo 1961-1971. Queste opere di difesa hanno permesso un notevole avanzamento della linea di battigia, che ha toccato l'attuale massimo storico, generando, però, il problema dei tomboli sabbiosi fino alle scogliere e conseguenti brevi bracci di mare e scarsa circolazione idrica davanti ai varchi. In particolare, nel primo tratto a Nord del porto, della lunghezza di oltre 1 km, si sono riscontrati avanzamenti di circa 6 m/anno nel periodo 1983-1991, mentre nel tratto restante si riscontra tutt'ora un sostanziale equilibrio della linea di riva. Attualmente, quindi, il litorale di Cattolica non presenta problemi dovuti all'erosione marina, ma al peggioramento della qualità delle acque intercluse tra scogliere e battigia, riscontrato specialmente nel periodo estivo, aspetto in comune con la spiaggia di Gabicce.

### ***Il promontorio del colle San Bartolo***

Parte del territorio del Comune di Gabicce Mare ricade all'interno del Parco Regionale del monte San Bartolo, che emerge dalle basse spiagge romagnolo-marchigiane come un susseguirsi ondulato di speroni e valli digradanti verso il mare. Alla base della falesia corre una sottile spiaggia di ghiaie e ciottoli, risultante dalla demolizione e dal franamento delle pareti sovrastanti, usata, in passato, come cava di ghiaie e di pietre per pavimentazione.

La falesia del colle San Bartolo evidenzia una successione di strati sedimentari piuttosto complessa (Colantoni et al., 2004); strutturalmente, la dorsale del monte San Bartolo è costituita da una coppia sinclinale-anticlinale delimitata a NE da un *thrust* frontale, ubicato a mare, e da un complesso sistema di retroscorrimenti a SW (De Donatis et al., 1995). Il substrato presenta faglie e fratture con direzioni preferenziali N-S nella parte meridionale, N60 e N120 nell'area centrale e E-W nella zona settentrionale.

La linea di costa subisce una netta flessione verso Est, in concomitanza della cosiddetta Punta del Gesso, e prosegue fino a Gabicce in direzione E-W. La spiegazione di questo cambiamento repentino di direzione è da attribuire primariamente all'andamento della struttura costiera, ma anche alla maggiore esposizione della costa, in questo settore, ai venti provenienti da Nord (Bora e Tramontana) che producono le mareggiate e le erosioni più intense. Nella dinamica della costa assume importante significato Punta del Gesso che costituisce una sorta di ostacolo naturale alla deposizione dei sedimenti provenienti da Sud, i quali oltrepassano il promontorio e sono spinti più al largo (Colantoni et al., 2004).

Il rilevamento geomorfologico della falesia costiera tra Pesaro e Gabicce Mare, eseguito per il Progetto Costa Italiane Protette (CIP), ha portato a riconoscere e cartografare più di 100 movimenti franosi classificati come scivolamenti traslativi e/o rotazionali, colamenti, crolli e frane complesse (Nesci, 2003). I dati ottenuti per il settore Punta del Gesso-Gabicce Mare hanno evidenziato che il 31.6 % di esso risulta in frana. La forte pendenza della costa, la morfologia del versante e le caratteristiche lito-strutturali delle formazioni geologiche che lo costituiscono sono i fattori che determinano l'instabilità della falesia; a questi si unisce l'erosione al piede del monte causata dal moto ondoso, che determina un continuo scalzamento alla base, richiamando movimenti franosi regressivi verso monte. Il tratto, attualmente considerato più critico, è quello immediatamente sottostante l'abitato di Gabicce Monte (Fig. 2), sia per l'evoluzione del fenomeno sia per



**Figura 2 - Zona in frana al piede della falesia del San Bartolo, all'estremità Sud.**

ché risulta coinvolto il centro abitato. Nell'autunno 2003 sono stati posizionati in mare alcuni tratti di grossi massi a ridosso della falesia, in direzione delle imboccature delle ultime tre scogliere, ed un piccolo pennello radicato a riva, in prossimità della punta della falesia stessa, per proteggerla dalle mareggiate invernali.

### ***Il Torrente Tavollo ed il porto canale di Gabicce***

Il Torrente Tavollo ha le sue origini a Mondaino sul monte Zaccarelli (421 m s.l.m), percorre 21 km per poi sfociare nell'Adriatico, presso il porto di Gabicce-Cattolica, rappresentando il confine naturale tra Marche ed Emilia Romagna. Il bacino del Tavollo risulta incuneato tra quelli del Ventena e del Foglia; l'unica confluenza di rilievo è quella della F.ssa Taviolo che si immette in destra idraulica poco prima dello sbocco a mare.

L'alveo, di ridotte dimensioni trasversali, risulta profondamente incassato rispetto alle aree collinari e pseudo-piagneggianti circostanti, salvo che nel tratto cittadino interno a Cattolica e Gabicce. In relazione all'antropizzazione del territorio, all'estensione delle aree inondate in anni recenti e alla consistenza degli elementi coinvolti, si determinano situazioni di rischio idraulico di scarso rilievo. Il trasporto solido è fisiologicamente di entità limitata.

Alla foce del Torrente Tavollo si trova il porto di Gabicce-Cattolica, classificato di seconda categoria e di terza classe; la parte del porto canale che ricade nel comune di Gabicce Mare è il molo di sovralfutto, in riva destra, che si protende di 170 m dall'attuale linea di spiaggia. Il porto, oltre ad essere legato all'attività peschereccia locale, viene utilizzato principalmente come approdo per le imbarcazioni turistiche. E' costituito da una darsena rettangolare di oltre 2.1 ettari ad Ovest, difesa da due moli guardiani paralleli e distanziati tra loro di 30 m con bocca rivolta verso Nord. I fondali sono costituiti da sabbia e fango. Le opere eseguite nel porto canale sono la sostituzione, da parte della Regione Emilia Romagna, della banchine su pali, già esistenti in riva sinistra, con diaframmi in conglomerato cementizio tirantati per consentire l'escavazione dei fondali a quattro metri. La Regione Marche sta, invece, completando il consolidamento della banchina in riva destra con l'infissione di palancole in cemento armato tirantate. La darsena lato Cattolica è in esecuzione.

### **Clima meteomarinario**

Per definire il clima meteomarinario relativo al litorale di Gabicce Mare, sono state utilizzate le registrazioni effettuate dalla boa ondometrica direzionale della Rete Ondometrica Nazionale posto al largo di Ancona nel periodo Marzo 1999 - Dicembre 2002. L'ondametro è stato varato inizialmente stato posto su una profondità di 55 metri, circa 15 miglia marine ad Est del porto di Ancona, in posizione di coordinate geografiche 43°51'30"N-13°51'04"E, dove ha funzionato fino al Maggio 2000. Poi è stato spostato sulla profondità di 70 metri, in prossimità dell'isola artificiale Clara Ovest della società AGIP, circa 15 miglia marine a NNE dal porto di Ancona, in posizione di coordinate geografiche 43°49,78'N-13°42,77'E, per ovviare al problema del frequente disancoraggio della boa riscontrato nel sito precedente.

I dati sono stati elaborati utilizzando il criterio di trasposizione basata sulla similitudine dei *fetches* efficaci. Si ipotizza che lo stesso evento climatico responsabile del moto ondoso registrato dall'ondametro di riferimento abbia interessato anche l'area di generazione delle mareggiate che investono il sito costiero in esame. Si suppone, inoltre, che le aree di generazione del moto ondoso possano essere descritte, per ciascun punto, utilizzando i concetti di *fetch* geografico ed efficace.

In bacini semichiusi, di estensione limitata come il Mar Adriatico, l'individuazione dei *fetches* può essere eseguita facendo ricorso al concetto di *fetch* geografico, poiché le dimensioni caratteristiche delle perturbazioni sono dello stesso ordine di grandezza dei valori massimi che caratterizzano i *fetches* geografici (circa 400÷500 km). Il valore del *fetch* efficace relativo ad una determinata direzione è funzione dei valori dei *fetch* geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata. In questo modo i *fetches* efficaci consentono di tener conto del fatto che il moto ondoso viene generato non solo nella direzione lungo la quale spira il vento, ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore di  $\pm 90^\circ$  rispetto alla direzione media di azione del vento. Per il calcolo dei *fetches* geografici si sono considerate, con l'ausilio di una carta nautica, le posizioni successive occupate dalla boa R.O.N. al largo di Ancona negli anni e quella del faro del porto di Cattolica-Gabicce come punto di trasposizione.

Si sono valutate poi le direzioni del vento, i *fetches* efficaci e le direzioni delle onde per i siti di interesse e, con interpolazioni successive, per il sito di Cattolica. Infine, si sono calcolate le altezze medie  $H_{m0}$  ed i periodi medi  $T_{m0}$  a Cattolica (pedice C nelle seguenti) sulla base di onde, periodi e *fetches* osservati F ad Ancona (pedice A nelle seguenti):

$$H_{m0C} = \left( \frac{F_C}{F_{A.}} \right)^{1/2} H_{m0A}, \quad T_{m0C} = \left( \frac{F_C}{F_{A.}} \right)^{1/3} T_{m0A}$$

Grazie al procedimento di trasposizione sono stati ricavati per il sito di Cattolica-Gabicce 9348 dati ondosi. Valutando l'andamento cronologico stagionale delle altezze medie delle onde (Fig. 3), si nota che la maggior parte degli eventi ondosi con altezza media superiore ai 3 metri sono concentrati nei mesi autunnali ed invernali, dove le mareggiate risultano essere più frequenti ed intense, mentre in primavera ed in estate i valori di  $H_{m0}$  tendono a mantenersi al di sotto dei 4 metri.

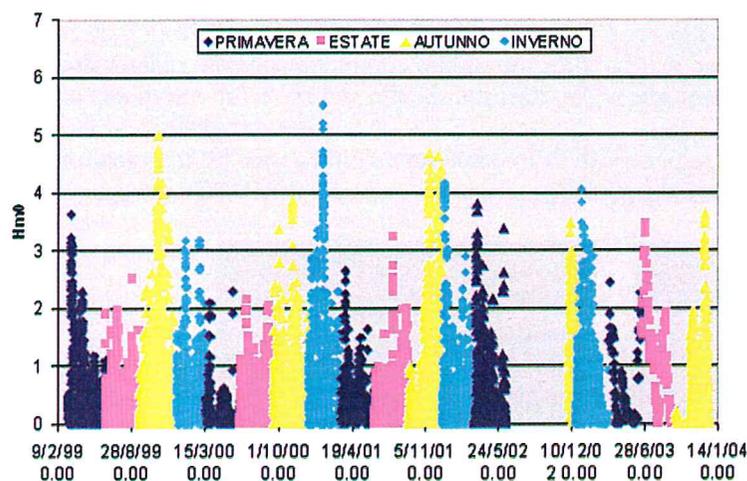


Figura 3 - Andamento cronologico delle altezze d'onda medie a Cattolica.

Suddividendo i 9348 dati in classi di altezza d'onda e settori di provenienza sono state calcolate le frequenze percentuali relative all'intero periodo (Tab. 1). Dall'analisi della Tabella 1 si nota che:

- il 66% degli eventi ha un'altezza media inferiore a 0.5 m;
- gli eventi con maggior frequenza di accadimento (prossima al 35%) sono relativi al settore di levante (75-105°N);
- gli eventi con maggior intensità ( $H_{m0} > 4m$ ) provengono esclusivamente da un limitato settore di traversia (15-75°N) e presentano una frequenza di accadimento molto limitata;
- non ci sono eventi con  $H_{m0} < 2m$  nel settore compreso tra 135 e 345°N.

Per quanto riguarda l'analisi statistica dei valori estremi delle altezze d'onda, per ogni mareggiata indipendente sono stati selezionati i valori massimi di  $H_{m0}$  sopra la soglia dei 2 metri in base alla direzione di provenienza.

Tabella 1 - Distribuzione delle frequenze per classi di altezza d'onda e settori di provenienza sulla base dei dati ondosi registrati e rielaborati nel periodo Marzo 1999-Dicembre 2002.

DIR ° N	$H_{m0}$ (m)											TOT
	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	> 5	
345-15	5.68	2.80	0.84	0.38	0.03	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	9.84
15-45	3.13	3.35	2.44	1.90	1.36	0.80	0.40	0.42	0.22	0.00	0.00	14.02
45-75	1.97	2.08	1.28	1.02	0.84	0.49	0.34	0.50	0.24	0.14	0.04	8.94
75-105	24.62	6.10	2.25	1.10	0.25	0.04	0.03	0.10	0.00	0.00	0.00	34.49
105-135	4.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.99
135-165	0.11	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12
165-195	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
195-225	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15
225-255	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16
255-285	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
285-315	9.75	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.76
315-345	15.03	2.11	0.10	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.26
TOT	65.81	16.49	6.92	4.42	2.48	1.41	0.81	1.02	0.46	0.14	0.04	100.00

Restano individuate 64 mareggiate tutte comprese nel settore direzionale 0°-70° e ciò come conseguenza della protezione esercitata dal Promontorio del colle S. Bartolo contro le mareggiate provenienti da S-E (Scirocco).

### Le praterie sommerse di Gabicce Mare

#### *Ruolo ecologico e caratteristiche delle fanerogame marine*

Le fanerogame marine sono vegetali dotati di radici, rizoma (fusto modificato in parte sotterraneo), fiori e foglie generalmente nastriformi. Queste piante colonizzano fondali sabbiosi e fangosi di ambienti marini, costieri e lagunari, e sono considerate elementi qualificanti dello stato dell'ambiente (Direttiva 92/43 Unione Europea).

Nel Mediterraneo esistono cinque specie di fanerogame: *Zostera marina*, *Zostera noltii*, *Cymodocea nodosa*, *Posidonia oceanica* e *Halophila stipulacela* (Fig. 4), tutte sottoposte a vincoli più o meno restrittivi di protezione. Le fanerogame sono importanti per l'ecosistema marino in quanto il loro complesso apparato radicale esercita un'azione di stabilizzazione dei fondali e, insieme alle foglie, contribuisce allo smorzamento idrodinamico del moto ondoso e delle correnti di fondo.

Calcoli teorici ed esperimenti condotti in vasca su praterie di fanerogame hanno dimostrato che la capacità di dissipazione per attrito di queste superfici elastiche è del 30-40% per il moto ondoso e del 60-70% per le correnti

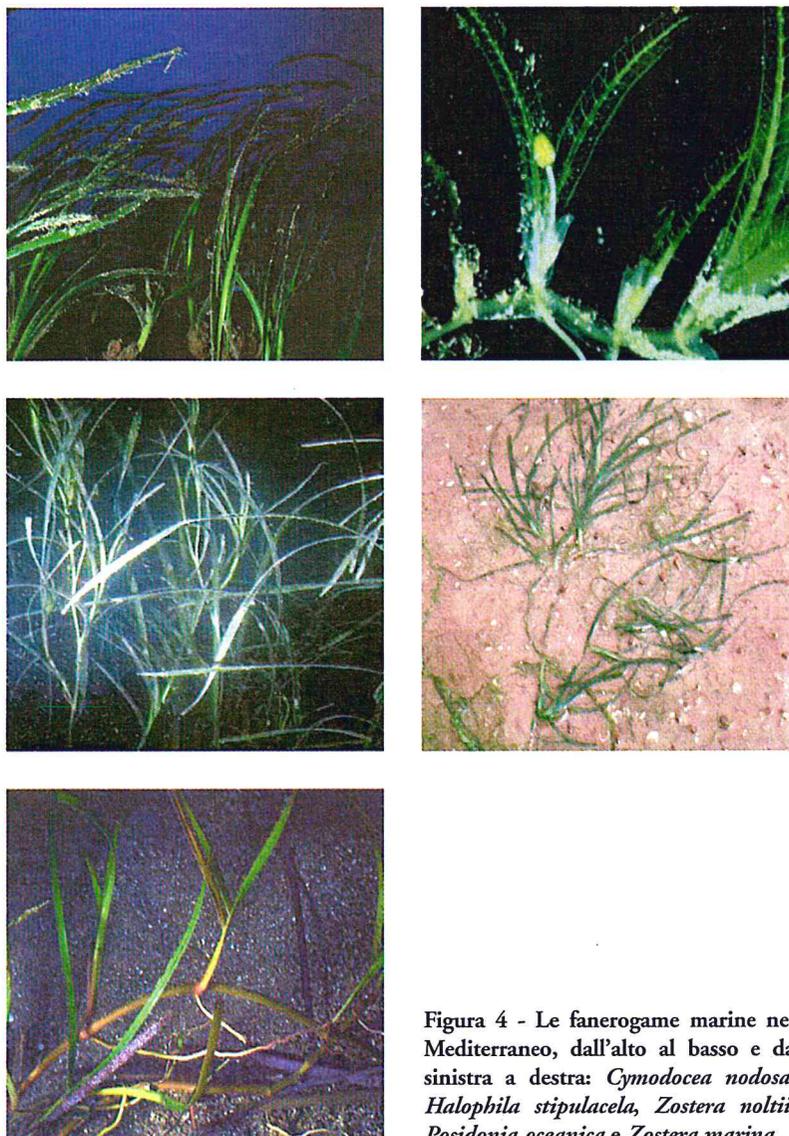


Figura 4 - Le fanerogame marine nel Mediterraneo, dall'alto al basso e da sinistra a destra: *Cymodocea nodosa*, *Halophila stipulacela*, *Zostera noltii*, *Posidonia oceanica* e *Zostera marina*.

Tabella 2 - Caratteristiche dell'habitat della *Zostera marina* e *noltii*. Da [www.marlin.ac.uk](http://www.marlin.ac.uk)

	<i>ZOSTERA MARINA</i>	<i>ZOSTERA NOLTII</i>
DISTRIBUZIONE	Atlantico Pacifico Circolo polare Artico Ristretta distribuzione nel Mediterraneo	Atlantico Mar Caspio Mar Nero Ristretta distribuzione nel Mediterraneo
PREFERENZE FISIOGRAFICHE	Estuari Lagune salate isolate Coste riparate, insenature	Stretti bracci di mare Lagune salate isolate Coste riparate, insenature Estuari
SUBSTRATI PREFERITI <sup>1</sup>	Ghiaia – ciottoli Ghiaia con fango Fango con sabbia Sabbia fangosa	Sabbia fangosa Fango con sabbia Fango
INTENSITÀ DI CORRENTE SOPPORTATA	Debole (<0.2 m/s) Estremamente debole	Moderata (0.2-1.5 m/s) Debole (<0.2 m/s) Estremamente debole
ESPOSIZIONE ONDOSA PREFERITA <sup>2</sup>	Zone protette Zone estremamente protette	Zone protette Zone molto protette Zone estremamente protette
SALINITÀ	Variabile (18 – 40 psu)	Alta (30-40 psu) Variabile (18-40 psu) Ridotta (18-30 psu) Bassa (<18 psu)
PROFONDITÀ	Da 0 a 5 m	Intertidale

<sup>1</sup> Ghiaia-ciottoli: 4-16 mm  
 Ghiaia con fango: 10-80% ghiaia, 20-90% fango.  
 Sabbia fangosa: 50-90% sabbia, 10-50% fango.  
 Fango con sabbia: 50-90% fango, 10-50% sabbia.  
 Fango: < 0.063 mm.

<sup>2</sup> Estremamente protetta: costa completamente chiusa con *fetch* < 3 km.  
 Molto protetta: costa con *fetch* < 3 km se la zona è esposta ai venti prevalenti;  
 costa con *fetch* circa di 20 km se la zona non è esposta ai venti prevalenti oppure è protetta da scogliere.  
 Protetta: costa con *fetch* < 20 km se la zona è esposta ai venti prevalenti o con estesa zona *offshore* poco profonda  
 oppure costa protetta dai venti prevalenti.

(Fonseca et al., 1998). La distruzione di un metro di prateria può comportare l'instaurarsi di un processo erosivo che, in zone caratterizzate da litorali sabbiosi, genera un arretramento della linea di costa di diverse decine di metri. La crescita delle fanerogame marine dipende dalla luce e quindi dalla trasparenza dell'acqua ed è fortemente influenzata dalla temperatura.

Studi condotti su *Zostera noltii* e su *Zostera marina* hanno evidenziato come la prima presenti una maggior adattabilità ad ampie fluttuazioni della quantità di luce (Vermaat et al., 1996; Davison e Hughes, 1998). La riproduzione delle fanerogame marine avviene sia per via sessuata, attraverso l'impollinazione, sia per via vegetativa attraverso la crescita del rizoma; la riproduzione avviene prevalentemente per via vegetativa ove il reclutamento di semi sia ostacolato dal disturbo dei sedimenti di fondo, dalla dispersione dovuta alle correnti o dai predatori.

La distribuzione e la descrizione dell'habitat ideale per lo sviluppo della *Zostera marina* e *noltii* sono riportate in Tabella 2; i principali parametri a cui sono sensibili/intolleranti sono descritti in Tabella 3. Negli ultimi 30 anni, a causa della crescente pressione antropica, si è assistito ad una forte regressione di tali praterie che sono oggi concentrate lungo la costa pugliese, ligure e, in Adriatico, lungo la costa sloveno-croata e nella laguna di Venezia (ove si sono effettuati anche i primi interventi di trapianto, in particolare presso l'isola di Pellestrina). Tra gli effetti principali ai quali ascrivere la scomparsa delle praterie sommerse si possono ricordare: effetti meccanici (dragaggio, strascico, ancoraggi), effetti fisici (diminuzione della quantità di luce, variazione climatiche) ed effetti dovuti alla diminuzione della qualità dell'acqua (inquinamento chimico, biologico, fisico).

Tabella 3 - Fattori che influenzano lo sviluppo della *Zostera marina* e *noltii*. Da [www.marlin.ac.uk](http://www.marlin.ac.uk)

		INTOLLERANZA		RECUPERO		SENSIBILITÀ	
		Z. M.	Z. N.	Z. M.	Z. N.	Z. M.	Z. N.
FATTORI FISICI	Perdita di substrato	H	H	VL	L	VH	H
	Copertura	H	H	VL	L	VH	H
	Variazione sedimenti sospesi	I	I	M	H	M	L
	Essiccazione	I	L	H	VH	L	VL
	Cambiamento regime di emergenza	I	I	H	H	L	L
	Cambiamento di tasso di flusso d'acqua	I	I	M	H	M	L
	Variazione di temperatura	T	T	NR	NR	NS	NS
	Variazione di torbidità	H	I	VL	H	VH	L
	Variazione posizione ondosa	H	H	VL	L	VH	H
	Rumore	T	T	NR	NR	NS	NS
	Presenza visuale	T	T	NR	NR	NS	NS
	Abrasione e disturbi fisici	I	I	M	H	M	L
	Dispiegamento	H	I	L	H	H	L
FATTORI CHIMICI	Contaminazione da componenti sintetici	I	I	M	H	M	L
	Contaminazione da metalli pesanti	L	L	VH	VH	VL	VL
	Contaminazione da idrocarburi	L	I	VH	H	VL	L
	Contaminazione da radionuclidi	-	-	-	NR	-	-
	Variazione del livello di nutrienti	H	I	VL	H	VH	L
	Variazione di salinità	L	L	VH	VH	VL	VL
	Variazione di ossigenazione	L	L	VH	VH	VL	VL
FATTORI BIOLOGICI	Introduzione di microbi patogeni/parassiti	H	L	VL	VH	VH	VL
	Introduzione di specie non native	I	I	L	L	H	H
	Estrazione di queste specie	I	I	M	H	M	L
	Estrazione di altre specie	I	H	M	L	M	H

Legenda: Z. M.=*Zostera marina*; Z. N.=*Zostera noltii*; VH=Molto Alto; H=Alto; I=Intermedio; M=Moderato; T=Tollerante; L=Basso; VL=Molto basso; NR=Non Rilevante; NS=Non Sensibile.

### Progetto pilota di trapianto eseguito a Gabicce Mare

Nell'area balneare di Gabicce Mare, è recentemente comparsa una prateria di fanerogame di estensione stimata tra i 10.000 e i 12.000 m<sup>2</sup>, dei quali circa il 90% occupati da *Zostera marina* ed il restante 10% da *Zostera noltii* e ciuffi interspersi di *Cymodocea nodosa*.

Dietro richiesta delle autorità locali, l'Istituto di Scienze del Mare dell'Università di Ancona ha proposto, in collaborazione con l'ARPAM e la Regione Marche, un esperimento pilota di "trapianto" di tale prateria in aree contigue, al fine di proteggerla dall'inevitabile pressione antropica e di ridurre il problema creato alla balneazione. In concomitanza con l'attività di trapianto si è reso necessario effettuare una serie di analisi sulle acque e sui sedimenti marini per verificare che tale intervento non comportasse alterazioni delle caratteristiche dell'ambiente né danni alla balneabilità della costa. Il progetto pilota si è articolato in quattro fasi: mappatura dell'estensione e caratteristiche del prato ed identificazione dei siti di trapianto; determinazione delle caratteristiche strutturali e funzionali (dimensioni, densità e crescita) delle praterie; espianto e trapianto di una porzione di campione del prato con diverse tecniche (a zolle oppure mediante vasetti idrosolubili); valutazione dei risultati, identificazione della migliore e più conveniente modalità di trapianto, nonché definizione dei tempi e dei costi di

tale attività, inclusa una previsione della durata nel tempo di tale tipo di intervento.

Mediante osservazione in campo (sia in immersione sia in emersione), sono state raccolte le informazioni necessarie alla ricostruzione di una mappa biocenotica dell'intera area di Gabicce Mare. Nell'area di interesse sono stati individuati 24 transetti ciascuno dei quali composto di tre stazioni (rispettivamente in prossimità della barriera frangiflutti, in mezzo ed in prossimità dell'arenile) in cui sono state misurate temperatura dell'acqua, trasparenza e profondità. La zona caratterizzata dalla prateria, in Figura 5, è costituita prevalentemente da sabbie fini (40%), molto fini (31%) e fango (23%), presenta una profondità variabile tra 1.4 e 3.4 m, idrodinamismo ridotto del 10-15% rispetto all'area non vegetata e conseguente maggiore tendenza all'accumulo di sabbia. Occorre notare che, nonostante l'area sia estremamente protetta, i varchi ne garantiscono una buona ossigenazione.

Si sono effettuate le attività di espianto e trapianto nel periodo 5-11 Agosto 2002. La *Zostera Noltii* è stata trapiantata a ridosso della terza barriera frangiflutti partendo dal promontorio San Bartolo; la *Zostera marina* è stata impiantata in un'area posta tra la quarta barriera frangiflutti e la battigia.

L'analisi delle aree trapiantate, nell'Ottobre dello stesso anno, ha evidenziato un'elevata percentuale di successo, considerato anche l'effetto stagionale. Sebbene le piante più vicine all'arenile mostrino inevitabili segni di maggior sofferenza a causa del disturbo indotto dai bagnanti, lo stato di salute delle praterie spontanee presenti a Gabicce Mare è decisamente buono e quindi possono essere utilizzate anche per la riforestazione delle aree costiere del litorale marchigiano attualmente soggette a problemi di erosione. Inoltre, un recente sopralluogo da noi effettuato nel Maggio del 2004 ha dato modo di riscontrare una progressiva diffusione delle praterie verso ovest in direzione del locale Mississippi ed in prossimità delle scogliere emerse (Fig. 5).

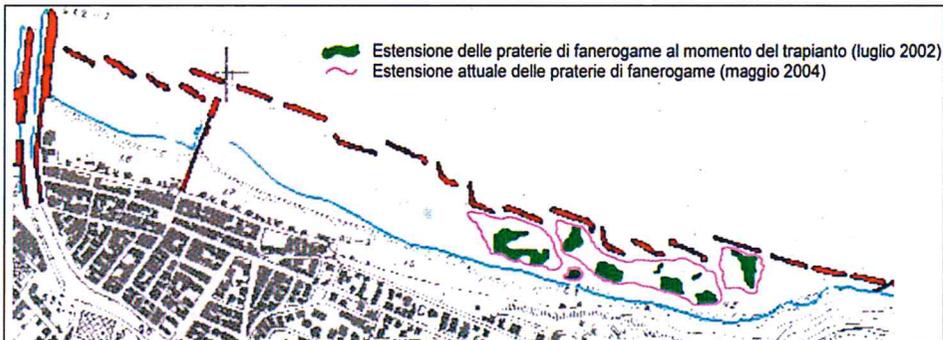


Figura 5 - Estensione delle praterie di fanerogame al momento del trapianto (chiazze verdi); estensione attuale delle praterie di fanerogame, Maggio 2004 (magenta).

## I Alternativa Progettuale: unica barriera sommersa basata sul disegno della Regione Marche

### Il progetto

La prima alternativa progettuale presa in esame si basa sul disegno di massima della barriera sommersa proposta dalla Regione ed è presentata in Figura 6. La barriera ha la stessa distanza da riva e la stessa inclinazione di quella proposta dalla Regione, ma una lunghezza maggiore, pari a 1669,5 m, per l'aggiunta di una soglia in corrispondenza del molo del porto canale di Gabicce-Cattolica, in modo tale da evitare la concentrazione di pericolose "rip currents" ed un'accentuata escavazione del fondale.

Si sono progettate tre diverse tipologie di sezioni sia per la barriera sia per le soglie (Fig. 7), per tenere in considerazione la progressiva riduzione del fondale da -3.5 m a -2.5 m procedendo da Ovest in direzione del promontorio del colle San Bartolo. La berma di sommità ha una larghezza di 10 m ed è posta da una profondità di 0.5 metri per tutte e tre le sezioni di barriera, mentre per le sezioni delle soglie la larghezza è stata ampliata a 17 m con una sommergenza di 1.5 metri. Le pendenze sono state mantenute di 1:4 lato mare e 1:3 lato terra, come proposto dalla Regione.

Lo strato di protezione è stato progettato di altezza 0.8 metri e la larghezza è stata aumentata in corrispondenza delle soglie per evitare fenomeni di escavazione al piede dovuti alla caduta del frangente (Sumer et al., 2005). Nel dimensionare l'opera, occorre osservare che il fondale h su cui essa viene realizzata è troppo basso per essere interessato da onde con periodo di ritorno di 20 o 25 anni (periodi di ritorno normalmente scelti per il dimensionamento di opere marittime di difesa). Infatti, secondo i noti criteri di frangimento delle onde dovu-

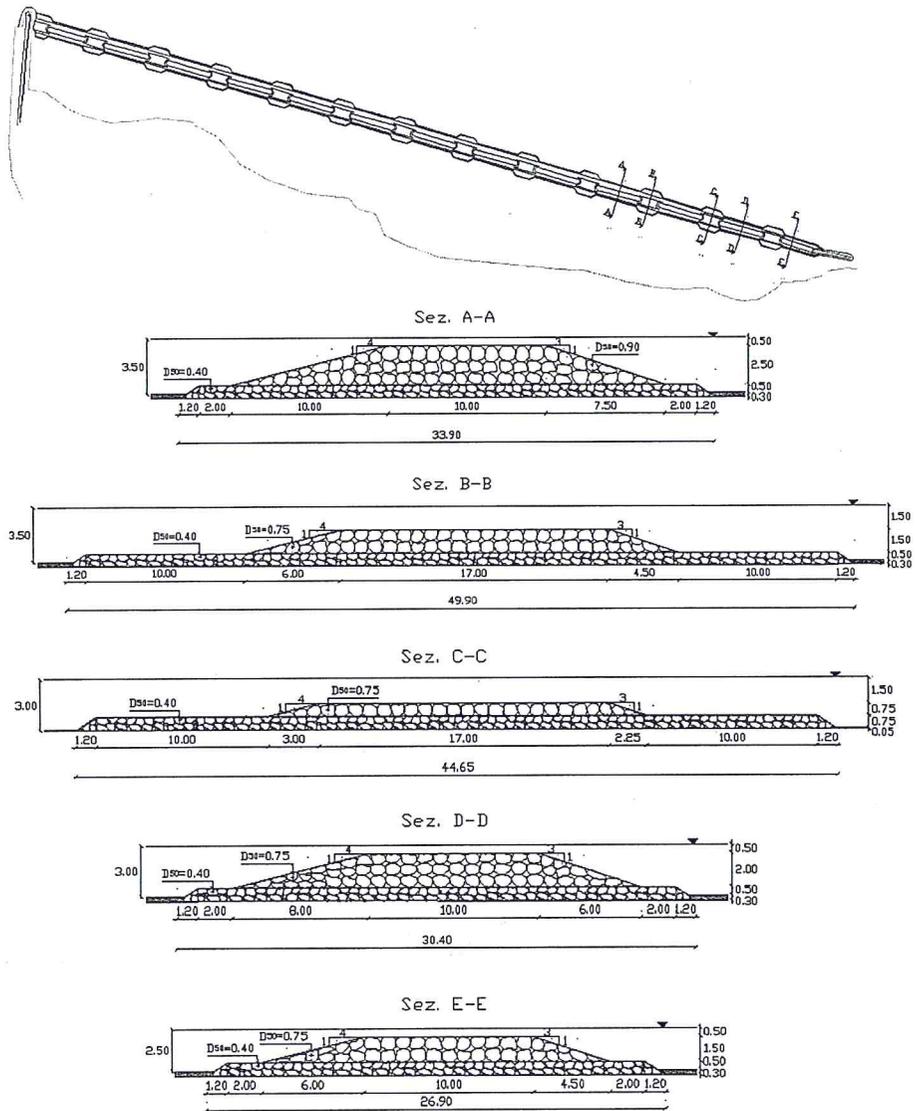


Figura 6 - Pianta e sezioni trasversali della barriera sommersa, I Alternativa.

ti all'effetto del fondale (Battjes e Jannsen, 1978), la linea dei frangenti per tali onde si trova molto più al largo dell'isobata in questione; si assumerà quindi l'onda di progetto di altezza  $H$  pari all'80% del fondale su cui l'opera viene costruita.

La barriera poggia su di uno strato di pietrame, caratterizzato da una pezzatura minore rispetto agli elementi sovrastanti, che separa la struttura dal piano di posa.

Per determinare le dimensioni medie del pietrame costituente il basamento si utilizza la formula di Van Der Meer (1992):

$$\frac{b_f}{b} = 0.22 \left( \frac{H}{\Delta \cdot D_{n50}} \right)^{0.7} \tag{1}$$

con:  $D_{n50}$ =diametro nominale dei massi,  $H$ =altezza d'onda di progetto=3.6 m,  $b_f$ =profondità del piede dell'opera e  $b$ = profondità del fondale sotto il livello di alta marea,  $\Delta = \frac{\delta_c - \delta_w}{\delta_w}$  =densità relativa  $\approx 1.5$  ( $\delta_c$ =densità del materiale impiegato=2600 Kg/m<sup>3</sup> e  $\delta_w$ =densità dell'acqua di mare=1025 Kg/m<sup>3</sup>).

I massi naturali costituenti la barriera si possono dimensionare dalle formule di Givler e Sorens (1986), nelle forma revisionata da Van Der Meer (1992) con l'introduzione del numero di stabilità modificato, (Ahrens, 1987), che tiene conto della ripidità dell'onda:

$$\frac{h_c}{b} = (2.1 + 0.1 \cdot S) \cdot e^{(-0.14 \cdot N_s^*)} \quad (2)$$

con:  $h_c$  = altezza della barriera sommersa,  $S$ =parametro di danneggiamento=1,  $N_s^*$  =parametro di stabilità spettrale,  $N_s^* = \frac{H}{\Delta \cdot D_{n50}} \cdot s_p \cdot \frac{1}{3}$ ,  $s_p$ =ripidità dell'onda calcolata con il periodo di picco=4%.

Per maggior precauzione il  $D_{n50}$  viene moltiplicato per un fattore di sicurezza pari ad 1.1. Per le diverse profondità di imbasamento della barriera e per le relative soglie si ottengono i parametri dimensionali riportati nella Tabella 4. Il basamento è composto da due strati di massi di I categoria con  $D_{n50}$ = 400 mm ai quali va aggiunto scapolame di cava (peso compreso tra 1 e 500 Kg) per costituire un filtro composto da tre strati caratterizzati da  $D_{n25}$ =100 mm,  $D_{n10}$ =22.5 mm,  $D_{n5}$ =6 mm. Pur essendo il  $D_{n50}$  dello strato più fine pari a 6 mm e quindi maggiore del  $D_{n50}$  della sabbia del fondo (0.29 mm), si è verificato che il materiale al fondo non viene trasportato dal moto ondoso causa insufficiente gradiente idraulico.

Tabella 4 - Parametri dimensionali, I Alternativa.

Fondale	Barriera	Soglia	Basamento
-3.5 m	3 strati con $D_{n50} = 0.90$ m	2 strati con $D_{n50} = 0.75$ m	
-3.0 m	3 strati con $D_{n50} = 0.75$ m	1 strato con $D_{n50} = 0.75$ m	2 strati con $D_{n50} = 0.40$ m
-2.5 m	2 strati con $D_{n50} = 0.75$ m		

**Effetti sull'ecosistema**

Si sono sommariamente valutati gli effetti della barriera sommersa sull'ecosistema di Gabicce, in particolare sulle fanerogame marine, mediante lo studio della trasmissione ondosa sulla barriera e quindi la determinazione dell'agitazione ondosa residua a tergo della barriera stessa. Si sono considerate diverse condizioni di marea, altezze d'onda incidenti  $H_{si}$  (assunta pari al 60% della profondità di imbasamento) e profondità del fondale e quindi della cresta del medio mare  $R_c$ , corrispondenti alle diverse profondità di imbasamento. Il coefficiente di trasmissione  $K_t$  è stato calcolato sulla base della formula di Briganti et al. (2003), che modifica la formula di D'Angremond et al. (1996) per strutture a cresta bassa considerando come parametro anche la larghezza di berma  $B$  in rapporto all'onda incidente  $H_{si}$

$$K_t = -0.4 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.64 \left( \frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.31} \cdot (1 - e^{-0.5\xi}), \text{ per } B/H_{si} < 10 \quad (3)$$

$$K_t = -0.35 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.51 \left( \frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.65} \cdot (1 - e^{-0.41\xi}), \text{ per } B/H_{si} > 10 \quad (4)$$

Per ogni condizione di marea e di fondale si è verificato che  $B/H_{si} < 10$ , quindi la formula usata è sempre la (3). Le altezze d'onda trasmesse sono confrontate in Tabella 5 con le altezze d'onda caratterizzanti l'habitat ideale per lo sviluppo delle praterie di fanerogame.

Si può concludere che la barriera sommersa non genera modifiche significative dell'habitat ideale per la sopravvivenza delle fanerogame, in quanto l'area risulta estremamente protetta in condizioni di marea nulla e protetta anche in condizioni di alta marea. Risultati di maggior dettaglio ma di analogo contenuto si sono ottenuti con le simulazioni numeriche presentate nell'ultima sezione.

Tabella 5 - Altezze d'onda trasmesse e corrispondenti classificazioni dell'area protetta, I Alternativa.

	Altezza d'onda trasmessa						Zona
	Fondale -3.50 m		Fondale di -3.00 m		Fondale -2.50 m		
Marea	barriera	soglia	barriera	soglia	barriera	soglia	
-	0.58	0.93	0.51	0.87	0.45	-	Estremamente protetta
+ 0.50	0.86	1.18	0.78	1.12	0.71	-	Protetta
+ 1.00	1.13	1.45	1.06	1.39	0.98	-	Protetta

Tabella 6 - Costo dell'intervento per la I<sup>a</sup> alternativa progettuale.

	Massi di I Categoria	Scapolame	Barriere emerse esistenti da salpare da mare a terra
	Volumi (m <sup>3</sup> )		
<b>Barriera</b>	40.920	-	
<b>Soglia</b>	8.250	-	
<b>Basamento</b>	41.200	7.270	
<b>Totale</b>	90.370	7.270	31.000
	Costi (€)		
<b>€ / m<sup>3</sup></b>	45,86	31,82	41,62
<b>Totale(M€)</b>	4,14	0,23	1,29
<b>Costo totale intervento + IVA 20% + imprevisti 10% ~ 7,36 M€</b>			

### Valutazione economica

La valutazione economica si discosta da quella proposta dalla Regione Marche in quanto considera l'impossibilità esecutiva di riutilizzare tutto il materiale costituente le scogliere emerse per la costruzione della nuova barriera sommersa. Questo perché parte del materiale stesso è ormai inglobato nel fondale e quindi difficile da recuperare ed anche perché, in tal modo, porzioni di spiaggia rimarrebbero esposte all'agitazione ondososa durante lo smantellamento ed il trasporto dei massi dall'attuale posizione alla zona di costruzione.

Quindi, la seguente valutazione è stata eseguita considerando il salpamento completo delle scogliere esistenti da mare ad un sito di deposito a terra e la costruzione della barriera sommersa costruita totalmente con materiale di cava trasportato via mare.

Sulla base del prezzario proposto dalla Regione Marche approvato con delibera della G.R. n.1484 OT/LPU del 02.08.2002 e pubblicato nel supplemento n.21 al B.U.R. n.97 del 05.09.2002 (Vol.1 e Vol.2), è stato formulato il seguente quadro economico dell'intervento (Tab. 6).

## II Alternativa Progettuale: serie di barriere sommerse lungo il tracciato delle attuali emerse

### Il progetto

Visto l'eccessivo costo ed i problemi esecutivi dell'alternativa I, si è pensato di proporre un'alternativa progettuale che permettesse di non stravolgere completamente l'attuale disposizione delle scogliere emerse, ma semplicemente di scapitozzarle alle quota desiderata e riutilizzarne il materiale per costruire la nuova barriera sommersa, riprofilando le sezioni con massi provenienti da cave di prestito a terra, trasportati via mare. Il nuovo progetto prevede, quindi, la costruzione di un'unica barriera sommersa che segua il più possibile il tracciato delle attuali scogliere emerse, composta da 12 tratti di barriera di lunghezza variabile e 12 soglie di lunghezza pari a 30 metri, secondo lo schema presentato in Figura 7.

Le sezioni sono le stesse viste nell'alternativa progettuale precedente, ma con un accorgimento in più per quanto riguarda la larghezza del basamento di protezione delle soglie. Per evitare il danneggiamento delle praterie sommerse durante l'esecuzione dei lavori, si è provveduto a ridurre l'ampiezza del basamento di protezione lato terra per quelle soglie direttamente interessate dalla proliferazione delle fanerogame. In tal modo si cerca di evitare, sia l'eccessiva risospensione dei sedimenti di fondo in prossimità delle praterie, dannosi per il regolare sviluppo dell'attività fotosintetica, sia la probabilità che le piante possano essere direttamente schiacciate dalla posa in opera dei massi costituenti il basamento di protezione della barriera.

Rispetto all'alternativa I, non variando le profondità di imbasamento, le sommergenze e le altezze della struttura e del basamento, rimangono inalterate le considerazioni relative alla stabilità. Ciò che varia invece è il costo complessivo dell'opera, che risulta cospicuamente ridotto grazie al notevole volume di massi riutilizzabile.

### Valutazione economica

Sulla base delle sezioni della scogliera sommersa e delle soglie e del prezzario proposto dalla Regione Marche, è stato formulato il seguente quadro economico dell'intervento (Tab. 7).

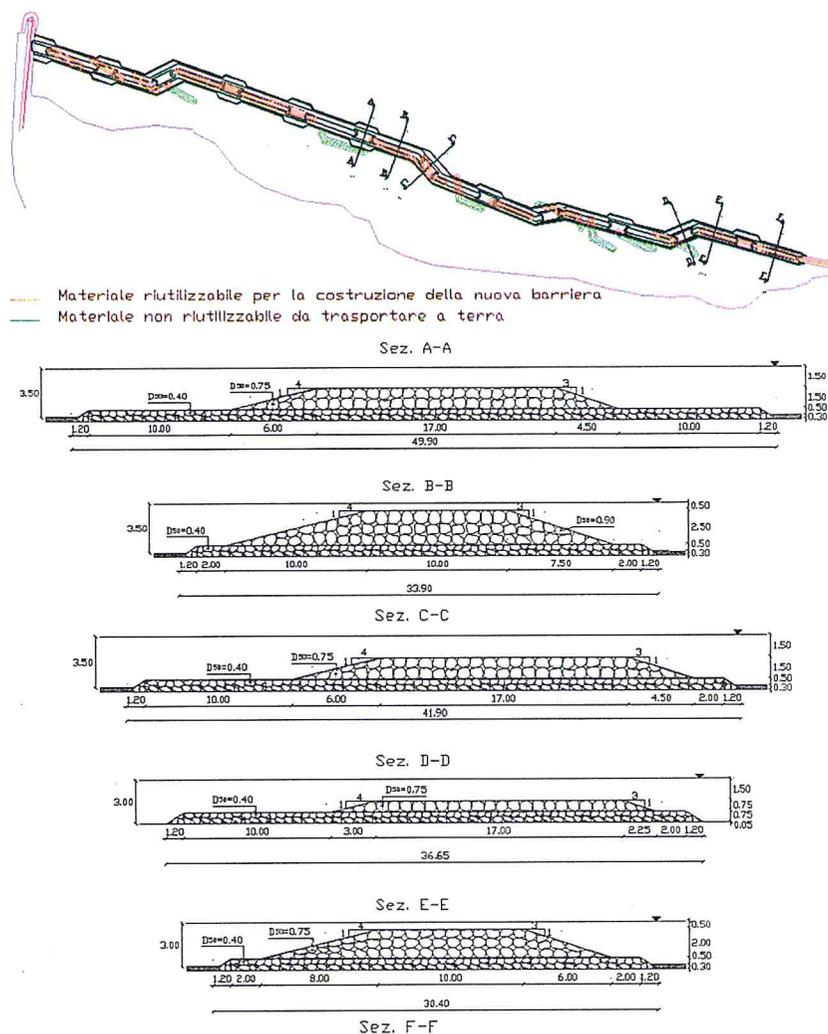


Figura 7 - Pianta e sezioni del progetto ottimizzato, con indicazione del tracciato attuale delle barriere (in alto) al fine di evidenziare quelle da rimuovere e quelle da scapitolare.

Tabella 7 - Costo dell'intervento per la II alternativa progettuale.

	Massi di I Categoria	Scapolame	Massi riutilizzabili	Massi non riutilizzabili
<b>Volumi (m<sup>3</sup>)</b>				
<b>Barriera</b>	38.790		10.000 (da lasciare in posto) + 10.000 (salpamento mare - mare)	11.000
<b>Soglia</b>	6.420			
<b>Basamento</b>	29.350	5.180	13.120 (da lasciare in posto)	
<b>Totale</b>	74.560			
<b>Totale massi da acquistare</b>	54.560	5.180		
<b>Costi (€)</b>				
<b>€/m<sup>3</sup></b>	45,86	31,82	27,06 (salpamento mare - mare)	41,62 (salpamento mare - terra)
<b>Totale (M€)</b>	2,50	0,16	0,27	0,46
<b>Costo totale intervento + IVA 20% + imprevisti 10% ~ 5,42 M€</b>				

## Analisi numerica dell'evoluzione costiera indotta

### Obiettivo

Tale analisi si è proposta di valutare l'idrodinamica indotta dalla situazione attuale e prevedere gli effetti degli interventi di progetto proposti sull'idrodinamica e morfologia della spiaggia. Si sono quindi ricostruite le condizioni di moto ondoso, le circolazioni idrodinamiche e il regime di trasporto solido mediante il modello matematico bidimensionale MIKE 21 sviluppato dal DHI Water & Environment.

### Il codice di calcolo

Il modello MIKE 21 supporta vari moduli che permettono di trasferire il moto ondoso da largo verso riva (NSW), di propagare le onde in presenza di strutture (PMS), di calcolare le correnti marine indotte dal moto ondoso (HD) e di valutare i tassi di trasporto solido (ST). Il modulo PMS si basa sulla approssimazione parabolica dell'equazione di Kirby (1986), che assume una direzione d'onda predominante e trascura la diffrazione e la rifrazione nella direzione di propagazione dell'onda. Il modulo HD risolve le equazioni del moto alle differenze finite utilizzando uno schema implicito ADI (Alternating Direction Implicit) che fornisce una precisione del secondo ordine (Abbot et al., 1973). Il modulo di trasporto solido MIKE 21 ST calcola il tasso di trasporto solido di materiali non coesivi ed il valore istantaneo iniziale di modificazione del fondo per effetto dell'azione combinata di onde e correnti. Implementa un algoritmo di calcolo deterministico basato sul modello di Engelund e Fredsoe (1976) e valuta separatamente il contributo dei sedimenti trascinati sul fondo e di quelli movimentati in sospensione.

### Dati batimetrici, sedimentologici, meteomarini

Per ridurre i tempi di calcolo senza perdere gli effetti del moto ondoso sul regime globale del litorale, le simulazioni idrodinamiche sono state effettuate adottando un clima rappresentativo, costituito dalle 6 onde in Tabella 8, trascurando gli effetti del vento e delle maree.

Le onde di input sono state impostate nel modello come onde irregolari e direzionali di uno spettro *Jonswap*. Questa impostazione consente di determinare in maniera realistica il campo di *radiation stress*, il *wave set-up*, e le condizioni al contorno da impostare nel modello di circolazione idraulica.

Tali onde sono state simulate su due batimetrie, con diverse orientazioni a 5° e 45° N, per tenere conto del limite del modello nel rappresentare correttamente onde provenienti da  $\pm 30^\circ$  rispetto alla orientazione media delle batimetrie.

Entrambe le batimetrie sono state ottenute utilizzando una carta nautica del Nord Adriatico e considerando una zona di interesse dalla foce del Po ad Ancona fino ad una profondità di 50 m, per includere la collocazione della boa RON di Ancona da cui si sono desunti i dati meteomarini. Le batimetrie sono costituite da 700 celle in direzione E-W e 2200 in direzione Nord-Sud, con maglia di 100x25 m, per un'area complessiva di pari a 70x55 km. Dalle simulazioni effettuate con il modulo NSW si sono ottenute le altezze d'onda e direzioni di propagazione, nonché i *radiation stresses*, per tutta l'area considerata.

Si sono estratte in particolare le onde davanti alla spiaggia di Gabicce Mare ad una profondità di -10 m (Tabella 9) per essere successivamente utilizzate nelle simulazioni con il modulo PMS su una batimetria ridotta di dettaglio della zona di interesse.

La batimetria di dettaglio per il modulo PMS è unica per tutte e sei le condizioni ondose, poiché le direzioni delle onde sono comprese tra 3.5° e 47° Nord (Tab. 9). Sono state prodotte tre batimetrie differenti solo per le opere: la prima corrispondente alla condizione attuale, con barriere emergenti; la seconda rappresentativa della prima alternativa progettuale simile al disegno della Regione; la terza basata sulla seconda alternativa progettuale, con una serie di barriere sommerse lungo un'ipotetica linea dell'attuale tracciato di barriere.

Le tre batimetrie si compongono di celle di 2x2 m e si estendono per 1701 celle in direzione Est-Ovest e 2301 in direzione Nord-Sud, per un'area totale di 3402x4602 m.

Si sono analogamente costruite tre batimetrie di dettaglio anche per il modulo HD, in questo caso differenti dalle tre batimetrie PMS per la dimensione di griglia, 4x4 m, e per l'estensione verso il largo, fino alla batimetria 6 m anziché fino alla 10 m. In Figura 8 si riportano le batimetrie HD per la condizione attuale e per la seconda alternativa progettuale.

Si sono, infine, predisposte per ogni batimetria ed ogni modulo del codice, delle mappe dei sedimenti del

Tabella 8 - Clima ondoso di input al modulo NSW.

Onda	Direzione (°)	$H_{m0}$ (m)	$T_m$ (s)	$T_p$ (s)	Frequenza (%)
1	60	2.60	6.40	7.70	2.00
2	60	1.10	5.00	6.00	13.83
3	45	4.00	8.00	9.60	1.66
4	30	2.60	6.40	7.70	2.70
5	30	1.10	5.00	6.00	7.69
6	350	1.10	4.00	5.00	6.25

Tabella 9 - Clima ondoso estratto dall'applicazione del modulo NSW alla profondità di 10 m.

Onda	Direzione (°)	$H_{m0}$ (m)	$T_m$ (s)	$T_p$ (s)
1	46.74	2.29	6.39	9.14
2	47.00	1.01	5.00	7.14
3	45.19	3.41	7.89	11.27
4	11.89	1.63	6.40	9.14
5	11.90	0.91	5.00	7.14
6	3.50	1.07	4.00	5.71

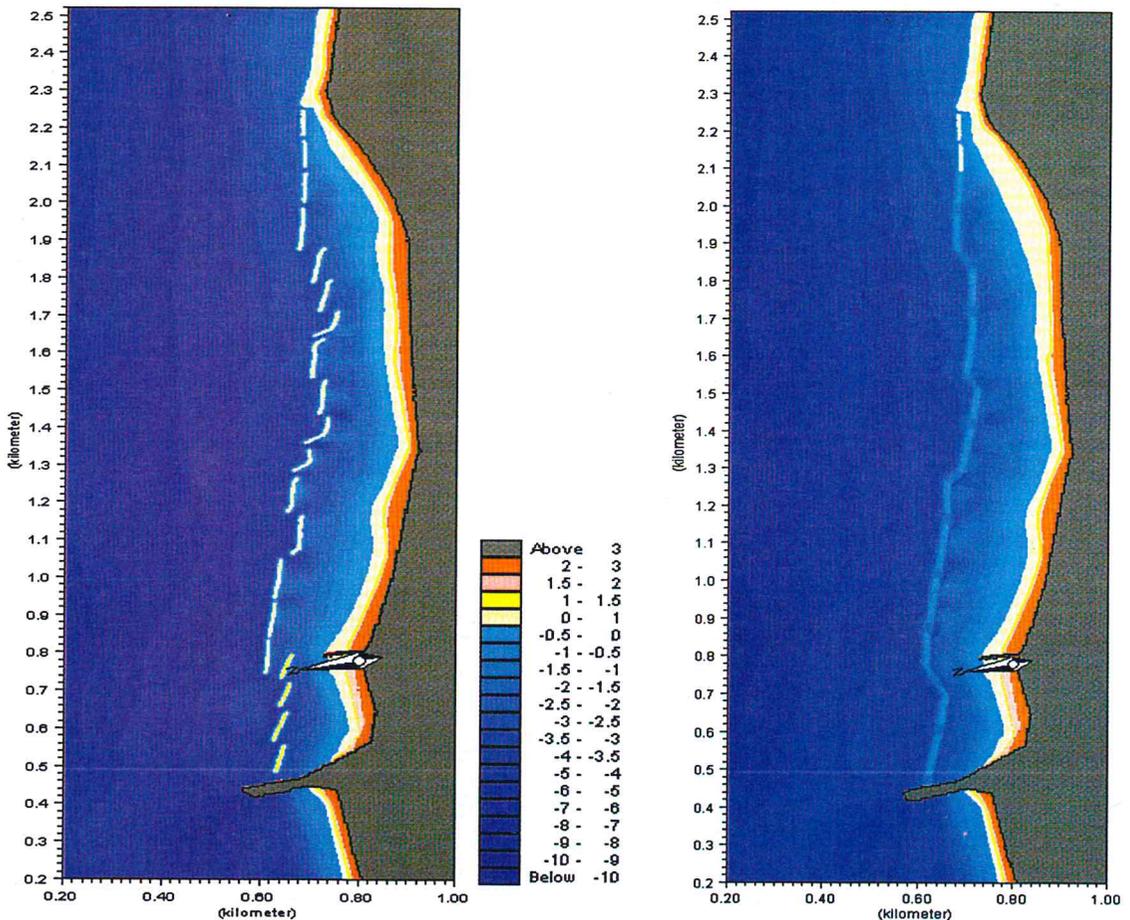


Figura 8 - Batimetrie utilizzate nel modulo HD. A sinistra, condizione esistente, a destra alternativa II con una serie di barriere sommerse.

fondale e delle corrispondenti mappe di scabrezza al fondo, che sono essenziali alla valutazione del trasporto solido ed alla corretta stima della dissipazione dell'energia ondosa. Per semplicità si è ritenuto opportuno considerare solo tre valori del  $D_{n50}$  rappresentativi dell'intera area in esame: 0.29 mm per le sabbie, 10 mm per la ghiaia e 800 mm per i massi. La scabrezza di Nikuradse è stata assunta pari a due volte il  $D_{n50}$  e i corrispondenti coefficienti di Manning sono stati ottenuti come 26 volte l'inverso della scabrezza di Nikuradse alla potenza 1/6.

Condizioni al contorno per i moduli NSW e PMS sono di tipo 'symmetrical', al fine di riprodurre condizioni speculari nelle zone laterali adiacenti il dominio di calcolo; per il modulo HD, si impone al contorno verso largo la condizione di flusso nullo, mentre sui contorni laterali si utilizzano livelli e flussi generati dai radiation stresses derivati dai risultati del PMS.

I parametri di frangimento assunti nel modulo PMS, non disponendo di dati per la calibrazione, sono i valori suggeriti:  $\gamma_1=1.0$  (controlla il frangimento per ripidità dell'onda),  $\gamma_2=1.0$  (controlla il frangimento per profondità del fondale) and  $\alpha=0.8$  (indica la dissipazione per frangimento). La viscosità turbolenta viene simulata nel modulo HD mediante la formula di Smagorinski con coefficiente 0.5.

### Risultati delle simulazioni

Per la similarità delle batimetrie e dei risultati ottenuti con le due alternative sommerse, si riportano per brevità solo i confronti relativi alla situazione attuale e all'alternativa progettuale II consigliata.

Per eseguire un confronto tra il comportamento della barriera sommersa e l'attuale scogliera emersa sono stati scelti dodici punti nella zona protetta (Fig. 9), in corrispondenza dei quali sono stati rilevati i valori delle altezze d'onda propagate con il modulo PMS (Tab. 10), le elevazioni superficiali (Tab. 11) e le velocità delle correnti (Tab. 12) ottenute con il modulo HD sia per la situazione attuale sia per l'alternativa II. Dall'analisi delle Tabelle si nota che la barriera sommersa, rispetto alla situazione attuale, genera mediamente una maggior trasmissione ondosa (0.34-0.44 m contro 0.13-0.56 m), un tirante idrico nella zona protetta più elevato (0.07-0.20 m contro 0.02-0.11 m) ed una più intensa velocità della corrente (0.14-0.32 m/s contro 0.09-0.37 m/s), ad eccezione dell'onda 1 da Bora. Le correnti ai varchi (p.ti 3, 7, 8, 10, 12), in particolare, risultano sempre superiori nella configurazione con barriera sommersa, tuttavia non destano preoccupazione ai fini della balneazione tendendo a richiudersi con rapidità verso la barriera e dunque all'interno della zona protetta.

Si riportano per l'onda 4, a titolo esemplificativo, le velocità delle correnti ottenute col modulo HD (Fig. 10). Si può notare, nella situazione attuale, un flusso di corrente piuttosto vorticoso nella zona esterna, mentre all'interno delle barriere si ha una corrente ben definita da Est verso Ovest. Le correnti tendono ad uscire dall'area protetta in direzione largo da tutti i varchi, eccetto quello compreso tra la terza e la quarta scogliera dal molo, dove si nota un'accentuata corrente in ingresso. La velocità della corrente è modesta, mediamente 0.3 m/s, tranne in prossimità della falesia del colle San Bartolo, dove si raggiungono valori maggiori.

Il progetto di barriera sommersa genera correnti più regolari e più intense nella parte esterna alle scogliere con direzione E-W.

Rispetto alla situazione attuale, le correnti presentano un'intensità maggiore, in corrispondenza delle soglie centrali verso largo, lungo riva, in prossimità del molo del porto canale e della falesia del colle San Bartolo.

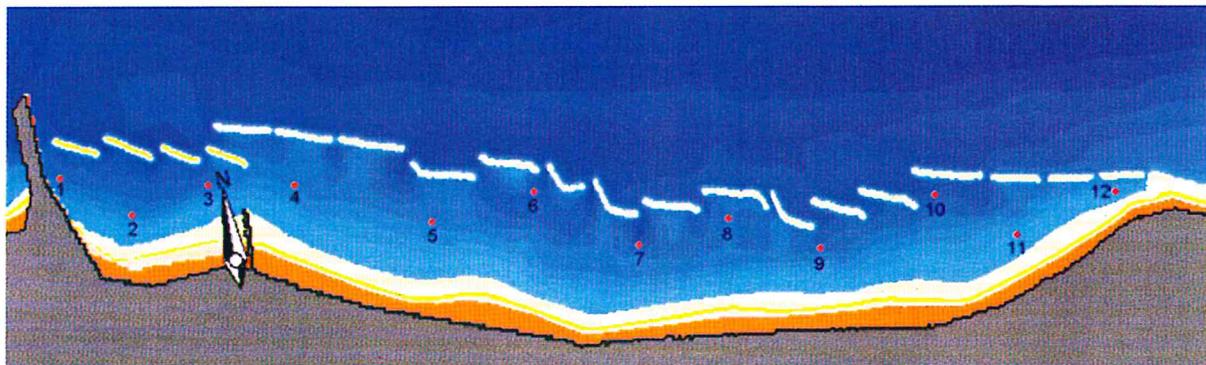


Figura 9 - Individuazione dei dodici punti nella zona protetta della barriera emersa.

Tabella 10 - Valori delle altezze d'onda propagate con il modulo PMS (m).

P.ti	Situazione attuale, Onde						II Alternativa, Onde					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.2	0.2
2	0.5	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
3	1.0	0.1	0.4	0.2	0.1	0.2	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6
4	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
5	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4
6	1.0	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5
7	0.9	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
8	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
9	0.5	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.4	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4
10	0.8	0.1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5
11	0.6	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
12	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.9	0.7	0.9	0.1	0.6	0.1
Medio	0.56	0.13	0.29	0.20	0.14	0.16	0.44	0.41	0.48	0.35	0.37	0.34
Max	1.0	0.3	0.5	0.3	0.2	0.3	0.9	0.7	0.9	0.5	0.6	0.6

Tabella 11 - Valori delle elevazioni superficiali ottenuti con il modulo HD (m).

P.ti	Situazione attuale, Onde						II Alternativa, Onde					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0.075	0.025	0.025	0.075	0.025	0.025	0.075	0.225	0.225	0.125	0.075	0.075
2	0.075	0.025	0.025	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.225	0.125	0.075	0.075
3	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.225	0.125	0.025	0.075
4	0.125	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.225	0.125	0.075	0.075
5	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.225	0.125	0.075	0.075
6	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.225	0.125	0.075	0.075
7	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.175	0.125	0.075	0.075
8	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.175	0.125	0.075	0.075
9	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.175	0.125	0.075	0.075
10	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.175	0.125	0.075	0.075
11	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.175	0.125	0.075	0.075
12	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.125	0.125	0.075	0.025	0.075
Medio	0.079	0.025	0.108	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.196	0.121	0.067	0.075
Max	0.125	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.225	0.225	0.125	0.075	0.075

Tabella 12 - Valori della velocità della corrente ottenuti con il modulo HD (m/s).

P.ti	Situazione attuale, Onde						II Alternativa, Onde					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0.600	0.075	0.400	0.200	0.030	0.030	0.400	0.200	0.200	0.200	0.075	0.200
2	0.200	0.03	0.200	0.200	0.003	0.030	0.400	0.200	0.200	0.030	0.075	0.075
3	0.600	0.200	0.400	0.400	0.200	0.200	0.200	0.200	0.400	0.200	0.200	0.200
4	0.400	0.075	0.075	0.200	0.030	0.075	0.400	0.200	0.400	0.200	0.030	0.075
5	0.400	0.030	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.030	0.075	0.075	0.075	0.200
6	0.600	0.030	0.030	0.200	0.030	0.200	0.400	0.200	0.600	0.200	0.200	0.200
7	0.200	0.075	0.200	0.075	0.030	0.030	0.200	0.075	0.200	0.075	0.030	0.075
8	0.200	0.003	0.030	0.030	0.030	0.007	0.200	0.200	0.600	0.200	0.200	0.200
9	0.400	0.003	0.200	0.030	0.030	0.030	0.200	0.075	0.200	0.200	0.030	0.030
10	0.400	0.200	0.400	0.200	0.200	0.200	0.200	0.400	0.200	0.200	0.200	0.200
11	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.075	0.200	0.030	0.075	0.030
12	0.200	0.200	0.200	0.400	0.200	0.200	0.600	0.600	0.600	0.600	0.600	0.200
Medio	0.367	0.093	0.211	0.195	0.099	0.117	0.300	0.205	0.323	0.184	0.149	0.140
Max	0.600	0.200	0.400	0.400	0.200	0.200	0.600	0.600	0.600	0.600	0.600	0.200

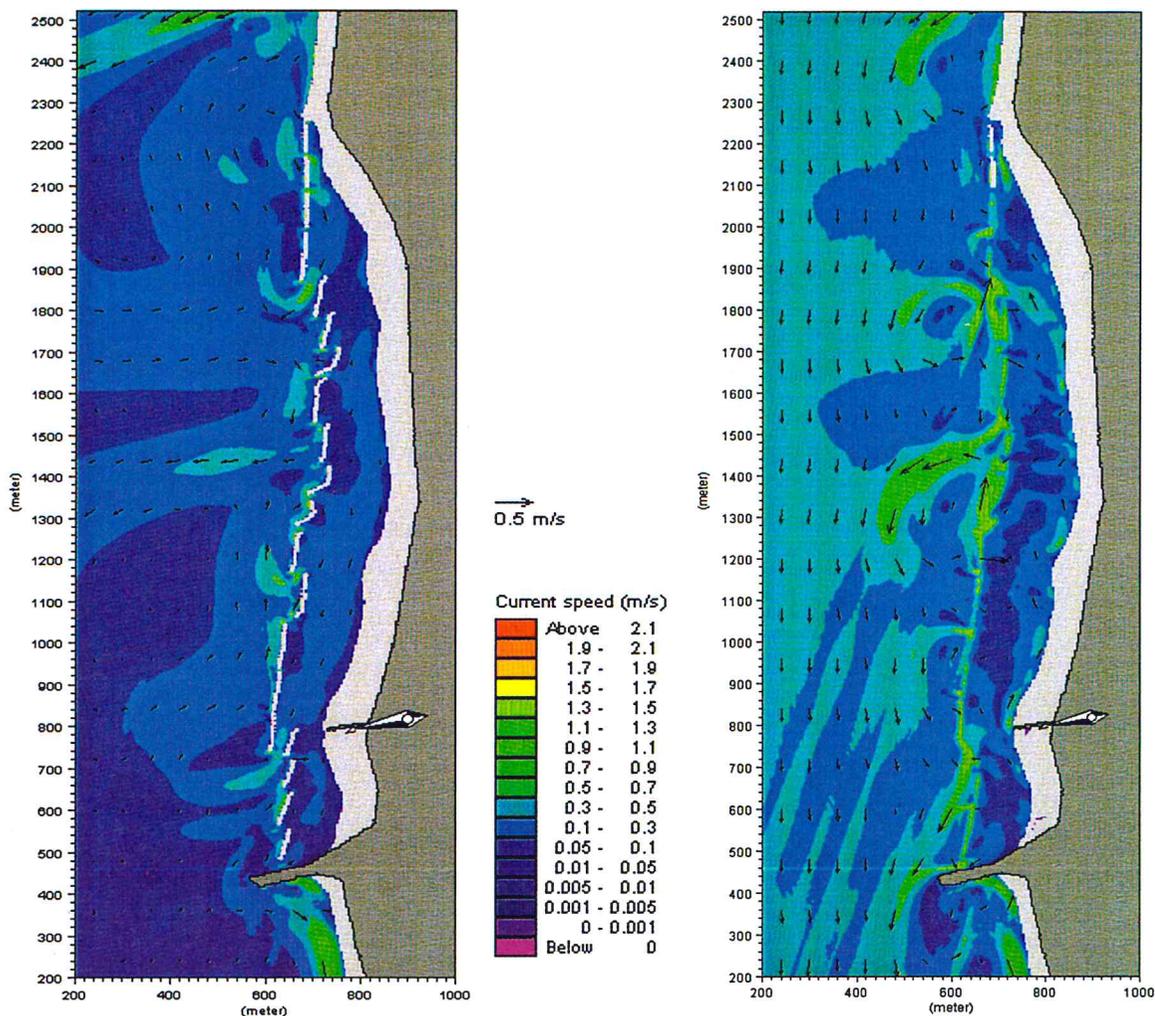


Figura 10 - Intensità e direzione della velocità corrente in scala di colore e vettori, onda 4, per l'attuale disposizione delle scogliere e per l'alternativa II.

Nella Figura 11, sono rappresentati i flussi sedimentari ottenuti dalla integrazione dei flussi sedimentari ottenuti col modulo ST per le singole condizioni ondose, sulla base della frequenza delle stesse nel clima ondoso tipico annuale. Nell'esame dei risultati si deve ricordare che rappresentano solo la tendenza al deposito/erosione media annua, perché sono derivati dalla composizione degli effetti di diverse onde in ordine casuale su una batimetria fissa del fondo.

Per l'attuale disposizione delle barriere, i flussi sedimentari entrano nella zona protetta solo attraverso i varchi e tutto il materiale in ingresso rimane intrappolato all'interno delle barriere. Le zone di accumulo sono maggiormente visibili in prossimità del pontile del locale Mississippi e nella parte centro-orientale.

Nel caso della barriera sommersa si può invece evidenziare che i flussi sedimentari entrano nello specchio protetto anche attraverso la tracimazione sulla scogliera. L'area più critica in cui i flussi sono diretti verso largo, sebbene modesta entità, si trova in corrispondenza dei varchi delle ultime due barriere, in prossimità del colle San Bartolo, per proteggere la quale, si può prevedere la costruzione di due soglie protette tra le barriere in questione.

Confrontando i due grafici di Figura 11, si può riscontrare un andamento dei flussi simile per quanto riguarda la zona ad est del molo del porto canale di Gabicce-Cattolica e la parte ad Est del monte San Bartolo, con una chiara tendenza all'accumulo in prossimità della battigia.

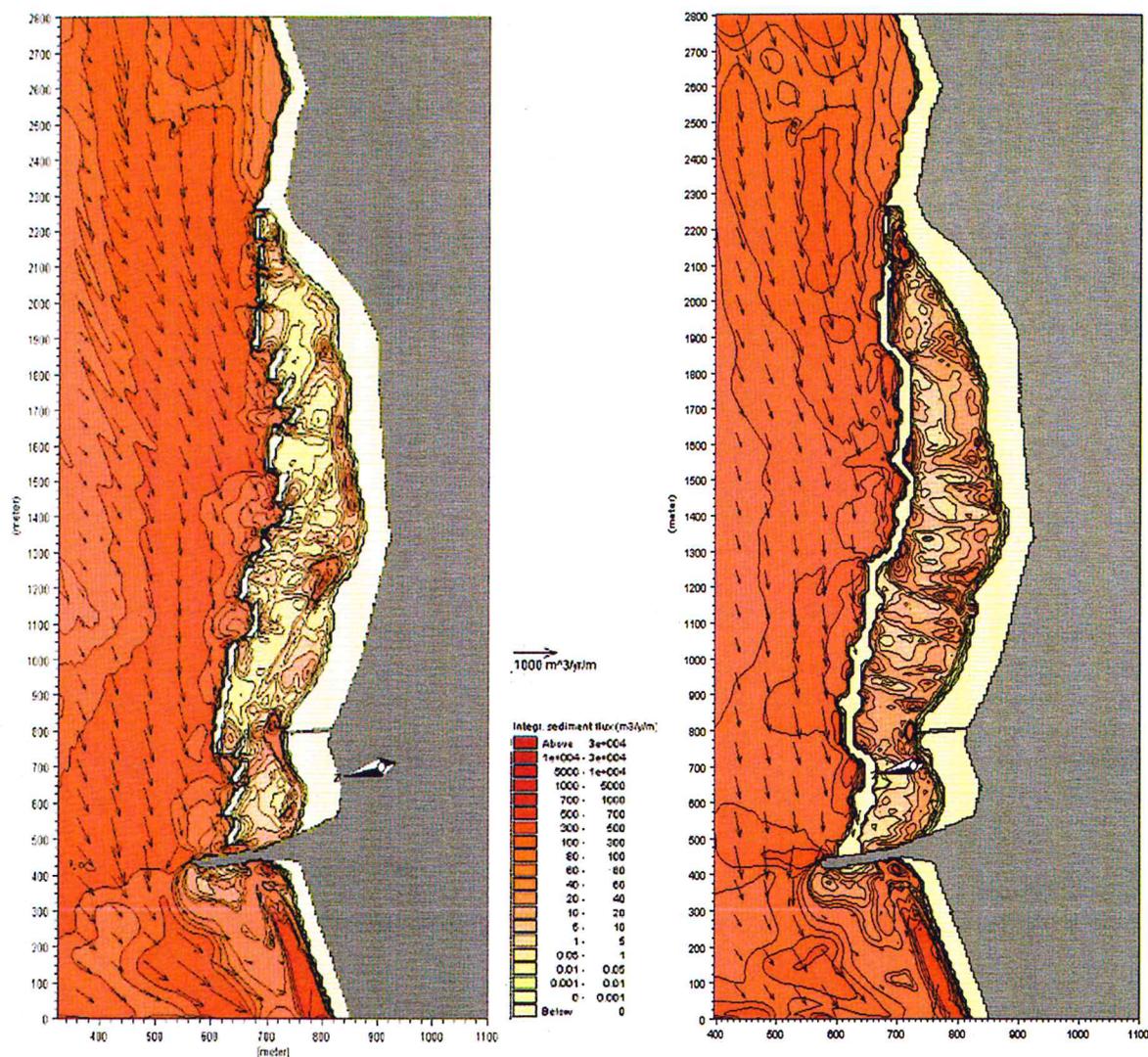


Figura 11 - Flussi sedimentari medi annui nella configurazione attuale e nell'alternativa II.

## Conclusioni

Il contributo si prefigge di proporre un sistema di difesa costiera sostenibile ed eco-compatibile per la spiaggia di Gabicce Mare, stanti le problematiche emerse nella configurazione attuale.

L'alternativa progettuale, sulla base delle indicazioni della Regione Marche, si compone di un'unica barriera sommersa con varchi e si propone di migliorare la circolazione nello specchio protetto preservando le praterie di fanerogame attualmente presenti e senza aggravare i fenomeni erosivi che già interessano la parte centro-orientale della spiaggia ed i fenomeni di instabilità relativi alla falesia del colle San Bartolo. La verifica del progetto è stata effettuata sulla base dei risultati di simulazioni numeriche bidimensionali.

Le variazioni della distribuzione planimetrica e puntuale di onde e correnti, indotte dalla barriera, producono un effettivo incremento dello scambio d'acqua nella zona protetta garantendone una migliore qualità. Inoltre, la circolazione delle correnti dovuta alla presenza della barriera sommersa risulta più regolare di quanto si può riscontrare con la presenza delle scogliere emerse esistenti.

La barriera sommersa non genera modifiche significative all'habitat ideale per lo sviluppo delle praterie di fanerogame. Infatti, nonostante l'agitazione ondosa dietro la scogliera sommersa sia indubbiamente mag-

giore di quella attuale, l'area rimane classificata come zona protetta per condizioni di alta marea di 0.50 ed 1 metro sul l.m.m. e come zona estremamente protetta per condizioni di alta marea nulla, rientrando quindi nei parametri limite visti precedentemente.

In merito alla fruibilità turistica della spiaggia, l'innalzamento del livello di medio mare causato dalla barriera sommersa genera un maggior tirante d'acqua sulle praterie di fanerogame agevolando la balneabilità della zona. Inoltre, la maggior agitazione ondos residua, unita all'incremento del tirante idrico, potrebbe frenare la diffusione delle fanerogame nell'area occidentale dello specchio protetto (zona di maggiore cambiamento idrodinamico), ove sono collocati tutti gli stabilimenti balneari. Infine, il processo di frangimento sulla barriera o a tergo di essa e sulla spiaggia genererà una zona di massima dissipazione e risospensione di fini in battaglia, che insieme all'aumento di livello a parità di fondale e quindi al mutamento delle condizioni attuali di luce ed ossigeno, potrebbe ridurre l'estensione, in direzione perpendicolare a riva, della zona interessata dalle fanerogame con chiaro beneficio per le attività ricreative.

Gli strumenti numerici a disposizione non consentono però di garantire con ragionevole certezza questo scenario di mantenimento della prateria esistente e contenimento del suo sviluppo nelle zone a maggior interesse ricreativo. Ovviamente, bisognerà adottare particolari accorgimenti in fase di esecuzione dell'opera, onde evitare di incrementare eccessivamente la torbidità dell'acqua ed il rimaneggiamento del fondale, dannosi per tali piante.

Per quanto riguarda l'erosione riscontrata nella parte centro-orientale della spiaggia ed i fenomeni di instabilità della falesia del colle San Bartolo, la costruzione della barriera sommersa non genera condizioni di criticità. Tuttavia, per una maggior sicurezza dell'area, si prevede la costruzione di soglie di protezione per i varchi delle due barriere più prossime al monte (lasciate emerse) ed il prolungamento dell'esistente scogliera di protezione al piede del San Bartolo, fino al tratto sottostante l'abitato di Gabicce Monte.

In conclusione, il progetto di barriera sommersa soddisfa gli obiettivi prefissati. Per quanto riguarda i costi di realizzazione, l'alternativa di scapitozzare e riprofilare le barriere esistenti è da prediligere alla variante fatta alla proposta presentata dalla Regione Marche.

### Ringraziamenti

Si desidera ringraziare: il Prof. Ing. Alberto Lamberti, per la supervisione del lavoro; il Dott. Ing. Massimo Guerrero, per l'aiuto nella realizzazione delle batimetrie; il Dott. Ing. Luca Martinelli, per i consigli sul dimensionamento delle opere; il Prof. Ing. Vittorio Curzi, per le indicazioni sull'area del S. Bartolo; il Dott. Ing. Mentino Preti, ARPA Emilia-Romagna, per la foto aerea in Figura 1.

### Bibliografia

- Abbott M.B., Damgaard A. e Rodenhuis G.S., (1973) - *System 21, Jupiter. A design system for two-dimensional nearly-horizontal flows*. IAHR, J. Hydraul. Res. 1: 1-21.
- Ahrens J.P., (1987) - *Characteristics of reef breakwaters*. CERC, Vicksburg, Technical Report CERC: 87-17.
- Battjes J. A. e Janssen J. P.F.M. (1978) - *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Proc. Coastal Eng., New York, ASCE ed., 16: 569-587.
- Briganti R., Van Der Meer J.W., Buccino M. e Calabrese D M., (2003) - *Wave trasmission behind low crested structures*. ACSE, Proc. Coastal Structures, Portland, Oregon.
- D'Angremond K., Van Der Meer J.W. e Dejong R.J., (1996) - *Wave trasmission at low-crested structures*. ASCE, Proc. ICCE, Orlando, Florida, pp. 3305-3318.
- Colantoni P., Mencucci D. e Nesci O., (2004) - *Coastal processes and cliff recession between Gabicce and Pesaro (Northern Adriatic Sea): a case history*. Geomorphology, 62 (3-4): 257-268.
- Davison D.M. e Hughes D.J., (1998) - *Zostera biotopes: an overview of dynamics and sensitivity characteristics for conservation management of marine SACs*. Scottish Association for Marine Science (UK Marine SACs Project), Vol.1.
- De Donatis M., Mazzoli S., Paltrinieri W. e Wezel F. C., (1995) - *Evoluzione tettonica dell'avanfossa appen-*

- ninica marchigiano-romagola dal Miocene superiore al Pleistocene*. St. Geol. Cam., Volume Speciale: 359-371.
- Engelund F. e Fredsoe J. (1976) - *A sediment transport model for straight alluvial channels*. Nordic Hydrology, 7: 293-306.
- Fonseca M.S., Kenworthy W.J. e Thayer G.W., (1998) - *Guidelines for the conservation and restoration of seagrasses in the United States and adjacent waters*. NOAA'S Coastal Ocean Program, 12, pp. 222.
- Givler L.D. e Sorehsen R.M. (1986) - *An investigation of the stability of submerged homogeneous rubble-mound structures under wave attack*. Lehigh University, H.R. IMBT Hydraulics, Report IHL: 110-86.
- Kirby, J.T. , 1986 - Rational approximations in the parabolic equation method for water waves. Coastal Eng., 10: 355-378.
- Nesci O. (2003) - *Evoluzione geomorfologica della falesia costiera del Monte San Bartolo*. Quaderni del Centro di Geobiologia Università degli Studi di Urbino, Vol. n. 1: 15-39.
- Regione Marche, Dipartimento Territorio e Ambiente, Servizio Progettazione Opere Pubbliche di Interesse Regionale, Attività Estrattive e V.I.A., (2003) - *Piano di Gestione Integrata delle Aree Costiere*.
- Sumer M., Fredsøe J., Zanuttigh B., Lamberti A., Gislason K., Diken M. e Di Penta A. (2005) - *Local scour and erosion around low crested coastal defence structures*. Coastal Engineering, DELOS Special Issue, in revisione.
- Primavera E. (2004) - *Studio della dinamica del litorale di Gabicce (PU): modifica dell'attuale scogliera ed effetti sull'ecosistema marino*. Tesi di Laurea, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.
- Van der Meer J. W. (1992) - *Conceptual design of rubble mound breakwaters*. ICCE 1992, Proc. Of the short course on Design and reliability of coastal structures, Venice, 1-3 October 1992: 447-510.
- Vermaat J.E., Agawin N.S.R, Fortes M.D., Uri J.S., Duarte C.M., Marbà N., Enriquez S. e Van Vierssen W., (1996) - *The capacity of seagrasses to survive increased turbidity and siltation: the significance of growth form and light use*. Ambio 25: 499-504.

**Manoscritto ricevuto il 24/12/2004, accettato il 30/05/2005.**