Provincia di Genova



# Comune di Moneglia


**Progettazione:**

**ING. ERNESTO LA BARBERA**
Via Colombo n° 16/12
GENOVA
Tel/Fax 010591936

**ARCH. GIANNI PERUGGI**
Via XXV Aprile 30
16038 SANTA MARGHERITA LIGURE

**Collaboratori:**

Studio Architetti Associati
**PIZZORNO-PORCARI**
Via Canneto il Lungo 23/1
16123 Genova


## Progetto Urbanistico Operativo

## FRONTE MARE

## L.R. 36/97 art. 50

**RELAZIONE DI COMPATIBILITA' AMBIENTALE PER LA PROCEDURA DI VERIFICA/SCREENING:**

**ALLEGATO 2: "Golfo di Moneglia - Studio meteomarino e analisi del trasporto dei sedimenti") a cura di DEAM s.r.l.**

**GIUGNO 2010**

# GOLFO DI MONEGLIA




## STUDIO METEOMARINO E ANALISI DEL TRASPORTO DEI SEDIMENTI

| REV | DATA | DESCRIZIONE | AUTORI | APPROVATO |
|---|---|---|---|---|
| 0 | Maggio 2010 | Emissione | Dr.Maria FRUZZETTI | Dr. Gianluigi DE FILIPPI |

**INDICE**

**1. SCOPO ..... 4**

**2. AREA DI STUDIO ..... 5**

**2.1 Morfologia della costa ..... 5**
**2.2 Configurazione progettuale ..... 5**

**3. DATI DI BASE ..... 6**

**3.1 Dati disponibili ..... 6**
**3.2 Analisi critica dei dati disponibili ..... 6**

**4. CRITERI METODOLOGICI ..... 8**

**4.1 Definizioni ..... 8**
**4.2 Stima dei valori estremi ..... 9**
**4.3 Vento ..... 9**
**4.4 Moto ondoso ..... 10**
**4.5 Livello marino ..... 10**
**4.6 Corrente ..... 11**

**5. REGIME ANEMOLOGICO ..... 12**

**5.1 Regime tipico ..... 12**
**5.2 Valori estremi ..... 12**

**6. MOTO ONDOSO ..... 13**

**6.1 Clima al largo ..... 13**
**6.2 Valori estremi al largo ..... 13**
**6.3 Clima all'entrata del golfo ..... 14**
**6.4 Valori estremi all'entrata del golfo ..... 14**
**6.5 Valori estremi a costa ..... 14**

**7. CARATTERISTICHE IDRODINAMICHE ..... 16**

**7.1 Caratteristiche delle masse d'acqua ..... 16**
**7.2 Caratteristiche generali della circolazione ..... 16**
**7.3 Il modello idrodinamico del Golfo di Moneglia ..... 17**
7.3.1 Dati di input ..... 17
7.3.2 Risultati ..... 18
**7.4 Valori estremi ..... 18**

**8. LIVELLO DEL MARE ..... 19**

**8.1 Set up da vento ..... 19**
**8.2 Innalzamento dovuto alla marea ..... 20**
**8.3 Valori estremi ..... 21**

**9. DINAMICA DEI LITORALI ..... 22**

**9.1 Caratteristiche generali del trasporto dei sedimenti ..... 22**
**9.2 Caratteristiche dinamiche delle spiagge miste ..... 23**
**9.3 Le formulazioni in presenza di ghiaia ..... 24**
**9.4 Trasporto longitudinale - Modello a macroprocesso ..... 25**

9.4.1 Caratteristiche delle sezioni considerate ..... 25
9.4.2 Caratteristiche del trasporto longitudinale potenziale ..... 27
9.4.3 Andamento del trasporto trasversale ..... 27
9.4.4 Frangimento delle onde ..... 28
9.4.5 Limiti della spiaggia emersa ..... 28
9.4.6 Limiti della spiaggia sommersa ..... 29
**9.5 Trasporto trasversale ..... 29**
9.5.1 Il modello SBEACH ..... 29
9.5.2 Risultati ..... 30
**9.6 Interpretazione dei risultati ..... 31**
**10. CONCLUSIONI E SUGGERIMENTI ..... 32**
**10.1 Conclusioni ..... 32**
**10.2 Suggerimenti ..... 34**
**11. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI ..... 35**
**INDICE DELLE TABELLE ..... 37**
**INDICE DELLE FIGURE ..... 59**
**APPENDICE 1 – MODELLO SWAN ..... 88**
**APPENDICE 2 – MODELLO IDRODINAMICO ..... 93**
**APPENDICE 3 – MODELLO TRALIT ..... 98**
**APPENDICE 4 – MODELLO SBEACH ..... 105**

# 1. SCOPO

Scopo del presente documento è la definizione dei parametri meteo marini tipici ed estremi del Golfo di Moneglia, e l'analisi del trasporto sedimentario longitudinale e trasversale alla costa.

Nell'ambito degli studi per lo screening relativo al PUO fronte mare di Moneglia è infatti necessario pervenire ad una dettagliata comprensione della dinamica litoranea: il presente studio, mediante l'applicazione di opportuni modelli matematici, permette di definire un quadro fenomenologico complessivo, e di descrivere le caratteristiche della dinamica litoranea dell'intero arco costiero, Rappresenta quindi uno strumento preliminare di base a supporto dell'individuazione e progettazione di interventi di riqualificazione e sistemazione dei tratti costieri interni al golfo stesso.

Sono state pertanto analizzate le caratteristiche generali delle onde tipiche ed estreme al largo; successivamente è stata effettuata la propagazione a costa al fine di valutare le variazioni spaziali del clima ondoso e delle altezze d'onda estreme lungo il litorale, con particolare riferimento alle caratteristiche del frangimento..
È stato poi analizzato in dettaglio il campo idrodinamico dell'intero golfo, simulando la corrente generata dai venti che influenzano la dinamica locale.
Sulla base dei risultati ottenuti sono state poi definite le caratteristiche del trasporto di sedimento e quantificati i volumi di materiale messo in moto.
Sono state infine stimate le caratteristiche della spiaggia emersa, attraverso l'analisi del livello marino e della risalita dell'onda sulla spiaggia, e della spiaggia sommersa, calcolando i limiti spaziali della zona dei frangenti.

Per lo studio si è fatto ampio utilizzo di modellistica numerica, i cui dettagli sono riportati nelle **Appendici** poste alla fine del documento.
.

# 2. AREA DI STUDIO

L'area di studio è il Golfo di Moneglia, ubicato lungo il levante ligure.

## 2.1 Morfologia della costa

Il Golfo di Moneglia è esposto ad un settore di traversia da 135 a 285° N, che, date le caratteristiche orografiche del golfo, varia notevolmente per ogni punto situato al suo interno.
L'area costiera è caratterizzata da una costa prevalentemente alta e rocciosa (**Fig. 2.1**) tranne nel tratto antistante all'abitato, dove si trova un arenile difeso da barriere parallele. In particolare, muovendosi da ovest verso est, il tratto da Punta Moneglia fino all'uscita delle gallerie è caratterizzato da costa rocciosa alta con zone in frana piuttosto importanti, mentre tratto verso l'abitato c'è stato un progressivo consolidamento delle pendici e della spiaggia (artificiale e molto grossolana) (**Fig. 2.2**).
Nella zona della Secca è presente una spiaggia ghiaioso-ciottolosa, abbastanza in equilibrio anche se in lento arretramento.
La spiaggia vera e propria di Moneglia, tra la foce dei torrenti S. Lorenzo e Bisagno, è protetta da tre scogliere parallele artificiali. Era una spiaggia molto ampia, poi cominciò a subire fenomeni di erosione a partire dai primi del '900.
Tra l'abitato di Moneglia e Lemeglio la costa è costituita dal piede della frana di Lemeglio, che è tutt'ora in movimento; la costa risulta in erosione abbastanza rapida [**rif. 1-2**].

In **Fig. 2.3** viene presentata la schematizzazione, ai fini modellistici, utilizzata nel presente studio: l'area è stata ruotata di 32° rispetto al n ord (come indicato dalla freccia rossa che indica il nord) e, in corrispondenza dell'isobata dei 5 m, sono stati definiti alcuni punti, denominati A, B,C, D, E ed F, nei quali sono presentati in dettaglio i risultati delle simulazioni modellistiche.

## 2.2 Configurazione progettuale

Il progetto (**Fig. 2.4**) prevede che in corrispondenza del punto B siano realizzati 3 nuovi pennelli (uno esistente da rinforzare, nuova costruzione) , in corrispondenza del punto C vengano spostate più al largo le 3 scogliere esistenti e si attui un ripascimento dell'area retrostante. Si prevede inoltre la risistemazione dell'area attrezzata per l'alaggio e varo dei natanti protetta dalle suddette scogliere.
In corrispondenza del punto D, immediatamente a levante del torrente Bisagno, verrà potenziata la banchina del molo di accosto per il transito dei diportisti e dei battelli turistici. Inoltre si prevede la realizzazione di 3 pennelli e il ripascimento della spiaggia compresa tra questi. Infine, presso il punto E, è prevista la costruzione di un tratto (circa 30 m) di scogliera parallela alla costa, radicato alla testata del pennello esistente, in modo da realizzare uno specchio d'acqua protetto.

# 3. DATI DI BASE

Nel seguito vengono elencati i dati di base reperiti per il presente studio e viene presentata un'analisi critica degli stessi.

## 3.1 Dati disponibili

Nell'ambito del presente studio si è fatto uso dei seguenti dati di base:

- misure di moto ondoso effettuate dalla boa ondametrica ubicata al largo di La Spezia alle coordinate 43° 55.7' N e 9° 49.6' E. L'ondamet ro direzionale fa parte della Rete Ondametrica Nazionale (RON) del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale;

- dati di vento ricostruiti dal noto modello numerico ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasting) di Reading, Inghilterra **[rif. 3]** relativi ad un punto a largo del Golfo di Moneglia (**Fig. 3.1**);

- dati batimetrici, a livello di unità fisiografica, desunti dalla carta nautica digitale NAVICHART;

- dati mareografici desunti da "Admiralty Tide Tables" Vol. 1, edito dall'Hydrographer of the Navy, Gran Bretagna;

- dati sedimentologici basati su alcune analisi sedimentologiche effettuate nell'area, in particolare nei pressi delle sezioni C e D. Le suddette analisi indicano la presenza di un sedimento con $D_{50}$ pari a 0.2 mm (sabbia fine) a largo e con $D_{50}$ pari a 0.24 mm più vicino a costa.

## 3.2 Analisi critica dei dati disponibili

La cronica mancanza, nel Mar Ligure, di dati misurati nel lungo termine ha comportato spesso la necessità di utilizzare le osservazioni visive da navi in transito ("ships observations"), non essendo possibile "ricostruire" con sufficiente approssimazione il clima ondoso mediante metodi empirici o metodi statistici, considerando la tipologia del golfo ligure, dove una buona parte delle perturbazioni ha caratteristiche di ciclogenesi con conseguenti campi di vento che hanno scale spaziali spesso molto diverse da quelle geografiche.
Va tuttavia considerato, che, al largo di La Spezia, è ancorata una boa ondametrica direzionale della Rete Ondametrica Nazionale (RON) che, dal 1989, registra, ogni 3 ore, altezza, periodo e direzione delle onde: nel presente studio sono stati considerati 33882 dati triorari che coprono abbastanza uniformemente il periodo temporale 1989-2001 (13 anni). Si ricorda, infatti, che successivamente la boa ha avuto molti malfunzionamenti e solo recentemente ha ripreso a funzionare con una certa regolarità.
L'area di ubicazione della boa di La Spezia è completamente aperta al settore 210°-240° (fetch praticamente illimitato), settori da cui provengono sia le mareggiate prevalenti che quelle più intense.

La boa è ancorata circa 40 km a sud-est dell'area in esame: tuttavia l'esposizione ai mari prevalenti e dominanti è del tutto analoga se si considera un punto al largo di Moneglia (**Fig. 3.1**); del tutto analoga è anche l'esposizione ai mari da NO, N, NE, settori caratterizzati da fetches molto corti.
E' dunque possibile, mediante "correzioni" del tutto marginali, che tengono conto del fetch e delle caratteristiche anemologiche a grande scala, e limitate a pochi settori direzionali, **definire un clima al largo di Moneglia** che sia basato su misure di 13 anni e che contenga l'informazione direzionale, informazione generalmente non disponibile nella stragrande maggioranza dei casi in cui il dato di direzione si riferisce alla direzione di provenienza del vento, a volte diversa da quella di provenienza delle mareggiate.

Il regime tipico del vento, dedotto dai dati ricostruiti dal modello ECMWF, si riferisce al periodo 1 Luglio 1992 - 31 Dicembre 2004 ed ha un passo temporale di 6 ore: sono cioè disponibili 4 dati/giorno alle ore sinottiche 0, 6,12,18 GMT.

Per quanto riguarda la validità dei dati di vento ECMWF, si ritiene doveroso sottolineare che essi, oltre a subire un processo di validazione da parte dell'Istituto Meteorologico stesso, sono stati molte volte analizzati da DEAM in studi e progetti [**rif. 4**] ed i risultati hanno sempre mostrato una più che sufficiente affidabilità.

Per quanto riguarda i dati di livello del mare, inesistenti nell'area, sono stati ricostruiti mediante formule teoriche sulla base delle caratteristiche ell'intensità del vento e dell'escursione di marea.

Per quanto concerne i dati batimetrici, essi sono stati discretizzati da una carta nautica: sarebbe quindi opportuno, in fase di progettazione definitiva, provvedere ad effettuare misure batimetriche di verifica, soprattutto nell'area costiera più interessata dal trasporto sedimentario, e cioè dall'isobata dei - 5 m fino alla linea di riva.

Per quanto concerne infine i dati sedimentologici, nello studio si è fatto riferimento alle informazioni esistenti: anche in questo caso si raccomanda, per la fase di progettazione definitiva, una adeguata definizione delle caratteristiche sedimentologiche nelle varie aree costiere, basata sul prelievo e l'analisi di campioni sui fondali costieri interessati dal trasporto sedimentario.

# 4. CRITERI METODOLOGICI

La metodologia applicata nel presente studio consiste in un'analisi finalizzata alla definizione di un clima meteo-marino e di valori estremi che assicuri la rappresentatività climatica dei dati. Infatti, i dati meteo-marini debbono essere rappresentativi dei fenomeni meteorologici che possono avvenire in periodi di tempo molto lunghi [**rif. 5**] e quindi essere rappresentativi del clima medio a lungo termine e delle sue variabilità annuali e stagionali al fine di minimizzare l'incertezza statistica associata alla stima dei valori estremi, incertezza ovviamente non eliminabile nell'estrapolare fenomeni stocastici.

Viene di seguito indicata schematicamente la procedura di studio:

- reperimento e validazione dei dati;
- schematizzazione della batimetria a scala di dettaglio e creazione dei grigliati per l'applicazione dei modelli numerici;
- propagazione delle onde estreme e del clima ondoso mediante modello analitico, dal largo all'isobata dei 19 m corrispondente al contorno dell'area presa in esame;
- propagazione, mediante modello numerico spettrale, delle onde estreme all'interno del golfo e definizione dei valori estremi delle onde in diversi punti lungo la costa;
- ricostruzione del campo di corrente mediante modello idrodinamico barotropico bidimensionale al quale sono forniti in input i principali termini forzanti tipici dell'area in esame;
- definizione delle condizioni tipiche ed estreme del livello del mare e del campo di corrente in diversi punti lungo la costa;
- definizione delle caratteristiche del trasporto solido longitudinale e trasversale in diversi punti lungo la costa.

## 4.1 Definizioni

Nel presente documento si fa riferimento a:

- direzione del vento: è la direzione di provenienza;
- direzione dell'onda: è la direzione di provenienza. Trattandosi di dati derivati dallo spettro del moto ondoso, la direzione è la direzione media di provenienza del particolare stato di mare considerato;
- altezza d'onda: trattandosi di dati spettrali, l'altezza è quella denominata $H_{m0}$, che non è esattamente coincidente con l'altezza significativa $H_s$. Nel seguito verrà comunque utilizzato il termine altezza significativa anche per indicare $H_{m0}$;
- periodo dell'onda: è il periodo medio $T_{m01}$, calcolato dallo spettro;
- stato del mare: si è fatto riferimento a stati di mare di 3 ore, come tradizionalmente effettuato nell'ingegneria marina;
- direzione della corrente: è la direzione di propagazione.

Per quanto non espressamente indicato, si fa riferimento a quanto contenuto nel documento "List of sea state parameters" [**rif. 6**].
Poiché nella lingua italiana alcuni termini oceanografici non hanno traduzione, ove necessario verrà usato, come consuetudine, il termine inglese.

## 4.2 Stima dei valori estremi

La teoria dei valori estremi fornisce stime della probabilità che si verifichino, in un certo periodo temporale, valori estremi di un determinato parametro.
Dato un insieme N di valori estremi di una grandezza, sia F(x) la distribuzione estremale che meglio si adatta ad essi (il ragionamento è comunque indipendente dal tipo di distribuzione considerato).
Il periodo di ritorno T(x) dell'evento x è definito come il numero di anni entro i quali x viene superato mediamente una volta. Allora T(x) è collegato a F (x) da:

$$T(x) = \frac{1}{[1 - F(x)]\lambda} \qquad [4.1]$$

dove $\lambda$ è il numero medio di eventi annui.
La probabilità che il superamento di x avvenga entro un anno è 1/T (x), la probabilità di non superamento è [1 – 1/T (x)], e quindi la probabilità che x non sia superato entro t anni è data da:

$$P^{-}(x) = \left[1 - \frac{1}{T(x)}\right]^{t}. \qquad [4.2]$$

(Si indica con $P^-$ la probabilità di non-superamento, con $P^+$ quella di superamento. E' evidente che $P^- + P^+ = 1$).
Con l'esclusione dei più bassi valori di T, la (4.2) è sostituibile con ottima precisione (Gumbel, 1958) con:

$$P^{-}(x) = e^{-\frac{t}{T(x)}} \qquad [4.3]$$

E' evidente che per applicare la (4.3) è necessario conoscere T (x), e quindi F (x).
Per t=T si ottiene $P^+$=63.2%: tale valore è dunque la probabilità media o "rischio medio" associato ad x nel tempo T.
Per t<T tale rischio è ovviamente ridotto: ad es. per t=30 anni e T=100 anni la probabilità di superamento è del 25.9% e così via.
Nel presente studio sono stati stimati i valori estremi per i periodi di ritorno di 1, 10 e 25 anni e per F(x) è stata utilizzata la funzione estremale di Weibull.

## 4.3 Vento

I dati anemologici disponibili sono stati ricostruiti da modelli numerici, riferiti alla quota di 10 m rispetto al l.m.m..

Ai fini dello studio è necessario valutare i valori estremi del vento al largo: essi sono, infatti, necessari per la simulazione della propagazione delle onde verso l'area costiera in esame, sono responsabili delle variazioni di livello marino e rappresentano il termine forzante principale per la stima delle correnti estreme.
I valori estremi sono stati calcolati applicando la distribuzione probabilistica di Weibull:

$$P(w>W) = 1 - \exp[-(w/\alpha)^{\beta}] \quad [4.4]$$

dove w è la variabile (velocità del vento), $\alpha$ e $\beta$ sono i parametri della distribuzione calcolati mediante la tecnica di best-fit ai minimi quadrati.

## 4.4 Moto ondoso

Ricordiamo che per clima del moto ondoso s'intende una funzione p(H,θ,T) che rappresenti la distribuzione in frequenza di eventi definiti dall'altezza H, dal periodo T dell'onda e dalla sua direzione di provenienza θ.
Nel seguito, sulla base dei dati disponibili, il clima viene fornito considerando l'altezza significativa, il periodo medio e la direzione di provenienza media delle onde. Per la zona costiera, oltre al periodo significativo, vengono forniti anche i valori del periodo medio, più variabili nella propagazione dal largo verso costa.

Anche in questo caso i valori estremi sono stati stimati mediante la funzione estremale di Weibull [4.4].

Il periodo medio $T_m$ , associato ai valori estremi, è stato calcolato secondo la relazione:

$$H_s = 0.076\ T_m^2 \quad [4.5]$$

dedotta dai dati misurati a La Spezia (si veda cap. 6).

Nel caso si voglia utilizzare il periodo di picco, questo può essere dedotto dalla relazione [**rif . 7**]:

$$H_s = 0.055\ T_p^2 \quad [4.6]$$

## 4.5 Livello marino

La genesi delle variazioni del livello marino è piuttosto complessa, poiché molteplici sono i fenomeni che possono generare o modificare il movimento delle masse d'acqua. Supponendo che ogni fenomeno causi un singolo effetto possiamo pensare al livello come una semplice sovrapposizione di più vettori del tipo:

$$V = \Sigma \eta_i \quad [4.7]$$

La serie temporale η (t) del livello può essere considerata, ad ogni istante, il risultato della sovrapposizione lineare di due parti fra loro indipendenti, vale a dire la parte deterministica e la parte stocastica:

$$\eta(t) = \eta_T(t) + \eta_s(t) \quad [4.8]$$

La parte deterministica è costituita dall'oscillazione di marea, mentre la parte stocastica $\eta_s$ è a sua volta esprimibile come somma di due contributi principali, vento e gradienti barici.

## 4.6 Corrente

Anche la corrente può essere rappresentata come una sovrapposizione di più vettori del tipo:

$$V = \Sigma V_i \qquad [4.9]$$

Ad un dato istante il valore V(t) della corrente supponendo trascurabili i termini d'interazione, può quindi essere considerato il risultato della sovrapposizione lineare di due parti fra loro indipendenti, vale a dire la parte deterministica e la parte stocastica:

$$V(t) = V_T(t) + V_s(t) \qquad [4.10]$$

La parte stocastica $V_s$ è a sua volta esprimibile come somma di due termini:

$$V_s(t) = V_{Wind}(t) + V_{slope}(t) \qquad [4.11]$$

vale a dire le componenti dovute al vento e quelle da "slope", dovute alla presenza della costa e ai gradienti barici.
Nel presente studio i valori tipici ed estremi sono stati calcolati mediante l'applicazione del modello idrodinamico, come sarà evidenziato nel cap. 7, applicato al vento, essendo del tutto trascurabile il termine $V_T$ dovuto alla marea.

I risultati del modello idrodinamico si riferiscono al valore di velocità $V_m$ integrato sulla profondità, cioè il valore che definisce il trasporto delle masse d'acqua. Per quanto concerne il profilo verticale della corrente, essendo in acque costiere si può ipotizzare che esso sia un "power profile" **[rif. 8]** caratterizzato cioè da una relazione del tipo:

$$V(z) = \left(\frac{n+1}{n}\right) V_m \left(\frac{z}{d}\right)^{1/n} \qquad [4.12]$$

Dove V(z) è la velocità alla quota z e d è la profondità dell'acqua, da cui si deduce la seguente, che lega la velocità a una quota con la velocità ad un'altra quota lungo la colonna d'acqua:

$$\frac{V_{z1}}{V_{z2}} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^{1/n} \qquad [4.13]$$

dove V(z) è la velocità integrata sulla colonna d'acqua, $V_{z1}$ è la velocità di corrente al livello $z_1$ e $V_{z2}$ è la velocità di corrente al livello $z_2$, ed n un valore desumibile dai dati sperimentali. Tale coefficiente, per acque basse o intermedie (<100 m) assume in generale valori compresi tra 4 a 7.

# 5. REGIME ANEMOLOGICO

Nel presente capitolo viene definito il regime tipico dei venti al largo di Moneglia e stimati i valori estremi.
Ricordiamo che per regime dei venti si intende una funzione $p(W,\theta)$ che rappresenti la distribuzione in frequenza di eventi definiti dalla velocità del vento W e dalla sua direzione di provenienza $\theta$.

## 5.1 Regime tipico

Nella **Tab. 5.1** viene riportata la distribuzione percentuale delle velocità del vento per direzione di provenienza; nella **Fig. 5.1** la stessa distribuzione viene riportata in forma grafica (rosa dei venti).

Come si osserva dalla tabella, i regime medio annuale del vento è caratterizzato da una prevalenza dei settori N-NE e S-SO. I venti da N-NE complessivamente rappresentano circa il 24% degli eventi, quelli da S-SO sono presenti in circa il 27% dei casi.
Per quanto concerne le intensità, gli eventi con velocità inferiore a 6 m/s sono circa il 71%, quelli inferiori a 10 m/s sono circa il 92%; valori uguali o superiori a 20 m/s sono presenti nello 0.25% degli eventi, mentre i valori massimi sono di 24 m/s.

## 5.2 Valori estremi

I valori stimati sono mostrati in **Tab. 5.2.** Un esempio del fitting della distribuzione omnidirezionale con la funzione estremale di Weibull è mostrato in **Fig. 5.2**.

# 6. MOTO ONDOSO

Nel presente capitolo viene definito il clima del moto ondoso al largo di Moneglia e successivamente stimati i valori estremi al largo e a costa.
La definizione del clima al largo, la sua rappresentatività statistica e la sua variabilità rivestono un'importanza notevole, in quanto il clima costiero, e quindi le interazioni onde-strutture-costa, dipendono in modo preponderante da esso.

## 6.1 Clima al largo

La distribuzione dell'altezza d'onda significativa per direzione di provenienza è mostrata in **Tab. 6.1** e riportata graficamente in **Fig. 6.1** (rosa delle onde).
Ai fini di un maggiore dettaglio nei calcoli del clima, le direzioni vengono presentate con risoluzione di 15°: la direzione 30° corrisponde qu indi al settore direzionale compreso tra 22.6° e 37.5° N, la direzione 45° al settore direzi onale compreso tra 37.6° e 52.5° N, e così via.
Dall'analisi della tabella appare evidente come il 40 % delle onde provenga dalle direzioni 225-240° N e come, complessivamente, il 71 % degli eventi provenga dal III quadrante (S-O). Lo scirocco, a cui sono associabili le direzioni da 120 e 165° N, è presente nell'11 % dei casi.
Per quanto riguarda le altezze, il 73 % circa delle onde risulta caratterizzato da altezze significative inferiori o uguali ad 1 m, il 93 % inferiore o uguale a 2 m. Sono tuttavia state registrate, per le direzioni 225-240° N, mareggiate di particolare intensità, fino a quasi 7 m di altezza, anche se la frequenza di tali eventi è ovviamente molto bassa: solo lo 0.38 % di onde ha, infatti, altezze significative superiori a 4 metri.

Per quanto concerne il periodo medio (**Tab. 6.2**) l'84 % dei periodi riportati è inferiore o uguale a 6 s, mentre alle mareggiate più intense sono associati periodi di 9 – 10 s.
Nella **Fig. 6.2** sono riportati gli scatter diagram $H_s$-$T_m$, dedotti dalle misure di La Spezia, per tutte le onde misurate e per quelle aventi altezza significativa maggiore di 2 m. che può essere proficuamente utilizzato per dedurre i periodi da associare alle altezze estreme.
La parte più energetica dello scatter-diagram è compresa tra le curve $H_s = 0.088T_m^2$ e $H_s = 0.064T_m^2$ . Pertanto si è ritenuto di utilizzare un valore tra i due coefficienti e precisamente 0.076, come mostrato nella relazione [4.5].

## 6.2 Valori estremi al largo

Considerate le caratteristiche di esposizione dell'area in studio, sono state studiate le distribuzioni delle altezze d'onda significative corrispondenti ai settori di provenienza di 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255 e 270° N**.**
Per ciascuna di tali distribuzioni sono stati stimati i valori estremi mediante la funzione estremale di Weibull (4.4). I risultati ottenuti sono mostrati in **Tab. 6.3.**
Il periodo medio associato ai valori estremi è stato definito mediante la relazione [4.5].

## 6.3 Clima all'entrata del golfo

Nella propagazione dal largo verso le acque meno profonde le onde subiscono delle trasformazioni dovute all'effetto del fondo (praticamente quando la profondità dell'acqua diventa circa metà della lunghezza d'onda).
Si hanno così i fenomeni di "rifrazione" (rotazione dei fronti d'onda dovuta alla diminuzione della velocità delle onde con la profondità), di "shoaling" (variazione del profilo dell'onda indotto dalla concentrazione o dispersione dell'energia per effetto delle differenze tra velocità di fase dell'onda e velocità di gruppo (velocità con cui si propaga l'energia) causato dal fondale), di "attrito" (dispersione di energia per effetto dell'attrito sul fondo che determina una riduzione dell'altezza dell'onda) e di "diffrazione" (effetto indotto dall'interazione delle onde con le strutture).
L'altezza dell'onda al largo $H_o$ si modifica quindi continuamente nella sua propagazione verso le acque basse secondo la relazione:

$$H_i = H_o * K_r * K_s * K_f * K_d \qquad [6.9]$$

dove $H_i$ è l'altezza d'onda locale, $H_o$ l'altezza d'onda a largo e $K_r$, $K_s$, $K_f$, $K_d$ sono rispettivamente i coefficienti di rifrazione, shoaling, attrito e diffrazione.
Tenuto conto di quanto sopra, è stato calcolato il clima in corrispondenza dell'isobata -19 m (**Fig. 2.3**), valutando analiticamente i coefficienti di rifrazione e shoaling per ogni elemento della matrice del clima al largo. E' stato trascurato, ai fini cautelativi, il coefficiente di attrito: le altezze calcolate debbono quindi essere considerate piuttosto conservative.
I risultati, presentati in **Tab. 6.4** e graficamente in **Fig. 6.3**, mostrano che, di tutte le onde presenti al largo, solo circa il 77% raggiungono l'area di studio e sono comprese nei settori direzionali che vanno da 135 a 270° N. Di queste onde il 3% circa proviene da SE, il 16% circa da S, da SO complessivamente proviene il 41%, e il 17% da E. I settori più energetici sono quelli che vanno da 225 a 255° N.

## 6.4 Valori estremi all'entrata del golfo

I valori estremi all'entrata del Golfo di Moneglia, calcolati alla profondità di 19 m, sono presentati nella **Tab. 6.5**.

## 6.5 Valori estremi a costa

Per definire in dettaglio il clima ondoso all'interno del golfo è stato utilizzato un noto modello spettrale di terza generazione, denominato SWAN (**S**imulating **Wa**ves **N**earshore, **[rif. 9]**), che tiene conto di tutti i fenomeni fisici che si verificano nell'area costiera; oltre alla propagazione delle onde, tiene infatti conto anche dei processi di generazione indotti dal vento. Per maggiori dettagli si rimanda all'**Appendice 2**.

In input al modello sono stati forniti:

- i valori estremi di altezza d'onda e periodo medio ai contorni del modello, cioè alla profondità di 19 m, (**Tab. 6.5**) relativi alle direzioni da 135 a 270°N e con periodo di ritorno di 1, 10 e 25 anni;

- la batimetria dell'area di studio, schematizzata come nella **Fig. 2.3**, relativa ad un'area di 2.3 x 1.1 Km, costituita da maglie quadrate di 5 m di lato.

Le **Figg. 6.4-6.9** mostrano i risultati del modello. In tali figure la scala cromatica indica l'andamento dell'altezza d'onda significativa mentre le frecce la direzione del moto ondoso. La didascalia sopra ogni disegno riporta i valori dell'altezza d'onda, il periodo e la direzione dell'onda a largo.
Dai disegni emerge come l'energia sia molto variabile in funzione della direzione di provenienza delle mareggiate, con i settori 225°N e 240°N più energetici.
I risultati possono essere così sintetizzati:

- onde provenienti dai settori 135°-165°N: per questi settori, già caratterizzati da onde al largo scarsamente energetiche, i fronti d'onda subiscono forti rotazioni man mano che propagano all'interno del golfo, con conseguente notevole riduzione dell'energia incidente su tutta l'area costiera;
- onde provenienti dai settori 180°- 195°N: in questi casi si osserva che, per effetto della rifrazione, l'energia ondosa nel tratto costiero centro-meridionale del golfo risulta notevolmente ridotta, mentre la porzione settentrionale del golfo è interessata da energie maggiori;
- onde provenienti dai settori 210°-255°N: a questi s ettori sono associate le mareggiate più energetiche, che incidono perpendicolarmente alla porzione centrale del golfo raggiungendo la costa con energia quasi inalterata;
- onde provenienti dal settore 270°N: a questo settor e sono associate mareggiate di media intensità e si osserva che, per effetto della rifrazione, l'energia ondosa nel tratto costiero settentrionale del golfo risulta notevolmente ridotta, mentre la porzione centro-meridionale del golfo è interessata da energie maggiori.

Le **Tabb. 6.6-6.8** evidenziano altezza significativa, periodo medio calcolato dal modello, direzione locale dell'onda e la dissipazione dell'energia per i 6 punti considerati lungo la costa del golfo, riportati in **Fig. 2.3**.
Nelle **Tabb. 6.6-6.8** sono stati inseriti anche i valori di dissipazione dell'energia, in modo da rendere evidente se le onde abbiano o meno subito il frangimento. Questo parametro è la somma di vari contributi (attrito sul fondo, frangimento dell'onda, etc.) indotto dalla diminuzione della profondità, e tende pian piano ad aumentare man mano che ci si avvicina a costa, con un aumento netto in corrispondenza del frangimento.
L'altezza d'onda massima compatibile con la profondità d del fondale nei vari punti è stata calcolata secondo la ben nota relazione

$$H_{LIM} = 0.78\ d \qquad [6.10]$$

Dato che i punti scelti sono tutti situati a circa 5 m di profondità l'altezza d'onda massima compatibile con il fondale, secondo la relazione (6.10), è 4 m. Nelle **Tabb. 6.6-6.8** le onde che hanno subito il frangimento sono indicate con un asterisco (*).

Da notare che il punto F è caratterizzato da onde leggermente superiori agli altri punti, e per i periodi di ritorno di 1, 10 e 25 anni hanno subito il frangimento le onde che provengono da 225°-240°N (come si nota anche dai va lori di dissipazione più alti) ed i valori indicati in tabella corrispondono alla massima altezza d'onda compatibile con la profondità nel punto.

# 7. CARATTERISTICHE IDRODINAMICHE

Nel presente capitolo vengono evidenziati gli aspetti principali della circolazione nell'area in esame, preceduti da una sintetica descrizione delle caratteristiche delle masse d'acqua e della fenomenologia idrodinamica generale.
Vengono poi simulati i campi di corrente e ricostruita la corrente costiera.

## 7.1 Caratteristiche delle masse d'acqua

Le proprietà idrologiche e le principali strutture delle masse d'acqua che influenzano il Mar Ligure nel corso delle stagioni sono state descritte principalmente da Astraldi e all. [**rif. 10**] sulla base dei dati raccolti da una serie di campagne oceanografiche svolte nell'Arcipelago Toscano.
Il Mar Ligure e il Tirreno, avendo proprietà fisiche ben differenziate, sono in grado di scambiare le caratteristiche delle masse d'acqua: in tale scambio giocano un ruolo preponderante i Canali di Corsica e dell'Elba a causa della loro posizione all'interfaccia dei due bacini.
Un altro effetto importante è quello introdotto dalla batimetria**:** la piattaforma continentale, molto ridotta lungo quasi tutta l'estensione dell'arco ligure, si allarga nei pressi di La Spezia fino a formare una pianura costiera che, all'altezza di Capraia, è ampia più di 60 Km. L'analisi dei dati storici esistenti indica che:

- i due bacini differiscono sostanzialmente per le loro proprietà termiche: ne segue che la densità ha un andamento analogo a quello della temperatura;
- l'acqua del Mar Ligure si mantiene generalmente a temperature medie sensibilmente inferiori a quelle del Tirreno: il gradiente termico tra i due bacini raggiunge il massimo nella stagione invernale. In tale stagione, considerato che la salinità si mantiene su valori abbastanza simili nei due bacini, è anche massimo il gradiente di densità.

La contemporanea presenza di due masse d'acqua con proprietà molto diverse tra di loro, fa sì che l'area al largo delle coste liguri sia caratterizzata da una certa complessità di situazioni e da intensi processi di mescolamento oltre a notevoli cambiamenti nel campo di massa nel corso delle stagioni. Infatti, il fronte termico che separa le due masse d'acqua assume due posizioni stagionalmente ben definite: durante l'estate esso si estende trasversalmente all'area all'altezza del canale di Corsica gli scambi tra i due bacini sono praticamente inesistenti, mentre durante l'inverno, sotto la spinta dell'acqua tirrenica che penetra nel bacino ligure, esso si sviluppa in senso prevalentemente longitudinale lungo il margine esterno dell'Arcipelago Toscano (**Fig. 7.1**).

## 7.2 Caratteristiche generali della circolazione

Alcune misure, effettuate dal 1985 al 1988 mediante due catene correntometri che, hanno permesso di rilevare velocità e direzione della corrente a 4 livelli su fondali di 460 m e 1250 m [**rif. 11**].
A causa della sua esposizione ai venti settentrionali, il Mar Ligure possiede una temperatura sensibilmente più bassa rispetto a quella del Tirreno, con un gradiente che tende ad accentuarsi in inverno. Dal momento che il passaggio della corrente tra i due

bacini è determinato dal gradiente di densità che così si viene a creare, gli scambi tra gli stessi avvengono quasi sempre in direzione del Mar Ligure e sono concentrati per la massima parte durante le stagioni invernale e primaverile.
In sintesi, sono essenzialmente tre gli aspetti principali che la letteratura specialistica di settore mette in luce:

- il campo di corrente presenta valori sufficientemente elevati a tutte le profondità indagate, soprattutto nelle stagioni fredde. La variabilità spaziale è tuttavia notevole;
- la batimetria gioca un ruolo fondamentale;
- le condizioni meteorologiche influenzano decisamente il regime dinamico, sia per l'effetto diretto dello "stress" del vento sulla superficie, sia per l'azione indiretta che il vento esercita sui flussi di calore e quindi sulla densità superficiale dei bacini. Inoltre i gradienti barici, che agiscono soprattutto durante il passaggio delle perturbazioni, inducono oscillazioni di livello con conseguenti modifiche del campo di corrente.

## 7.3 Il modello idrodinamico del Golfo di Moneglia

Per studiare il campo idrodinamico bidimensionale, di tipo barotropico, del Golfo di Moneglia, è stato applicato un modello idrodinamico, descritto in **Appendice 2**, che permette di analizzare l'evoluzione spazio-temporale della circolazione delle masse d'acqua sotto l'influenza dei termini forzanti meteo-marini.

L'area di studio a cui è stato applicato il modello è schematizzata nella **Fig. 2.3**, e riguarda un'area di 2.3 x 1.1 Km, divisa in maglie quadrate di 5 m di lato: lo schema è cioè identico a quello utilizzato per il moto ondoso.

Poiché il termine forzante dominante di gran lunga più rilevante è il vento, mentre la marea induce correnti inferiori ai 2 cm/s, si è ritenuto opportuno forzare il modello solo con il vento.

### 7.3.1 Dati di input

Le direzioni di provenienza del vento che sono state considerate sono 30°, 120°, 210° e 300°N, scelte in base all'orientazione del golfo, in modo da simulare le condizioni in cui il vento tenda ad accumulare acqua, rispettivamente, nella parte a ponente, centrale, e a levante dell'area di studio e la condizione che tendesse ad abbassare il livello del mare nel golfo. In input al modello sono stati forniti:

- i valori tipici del vento, assunti uguali a 10 m/s, per un totale di 4 simulazioni finalizzate alla valutazione della corrente tipicamente presente nel golfo. Il valore di 10 m/s ha una percentuale di eccedenza dell'82% (**Tab. 5.1**) circa e può essere considerato ben rappresentativo delle condizioni medio-alte tipicamente presenti nel golfo;
- i valori estremi della velocità del vento per le varie direzioni che interessano il golfo (**Tab. 5.2** ), per un totale di 12 simulazioni finalizzate alla definizione dei valori estremi della corrente lungo il litorale.

### 7.3.2 Risultati

Alcuni esempi dei risultati grafici ottenuti sono presentati nelle **Figg. 7.2-7.5**. In tali figure sono mostrati vettori, la cui lunghezza è proporzionale alla velocità di corrente e la cui orientazione definisce la direzione di propagazione del flusso, e le isolinee del modulo di velocità. I valori di velocità si riferiscono a valori integrati sulla verticale, come è d'uso nei modelli numerici.
Il fondo colorato in blu si riferisce alla batimetria dell'area, secondo la scala cromatica riportata sulle figure.
Essendo i grafici di immediato impatto visivo, l'analisi delle figure risulta agevole. In particolare, si osserva che per il vento proveniente da O-NO la corrente tende a scorrere lambendo la costa da Ovest verso Est. Nella parte più profonda del golfo i valori del modulo della velocità sono più alti mentre vicino a costa, per effetto dell'attrito sul fondo, sono più bassi.
Il vento proveniente da N-NE induce un abbassamento del livello all'interno del golfo. Di conseguenza vengono richiamate verso costa le acque dalla parte più profonda del golfo che, come si vede dalle frecce, si distribuiscono nell'area in esame.
Per il vento proveniente da E-SE, la corrente fluisce verso Ovest con valori più alti al largo e più bassi vicino alla costa.
Infine il vento proveniente da SO spinge l'acqua all'interno del golfo, aumentando il livello sottocosta e inducendo una corrente uscente diretta verso il largo.

## 7.4 Valori estremi

Da ogni simulazione degli eventi estremi e dei venti tipici effettuata sono stati estratti i valori di corrente longitudinale e trasversale nei 6 punti prescelti (**Fig. 2.3**). In particolare sono stati estratti i valori corrispondenti alla 6° ora di simulazione, che, considerate le ridotte dimensioni dell'area di studio, rappresentano le condizioni a regime della corrente in tutti i casi simulati.
Nelle **Tabb. 7.1-7.4** vengono presentati i valori della corrente longitudinale e trasversale per ogni periodo di ritorno e direzione di provenienza del vento. È stata indicata con Vx la corrente longitudinale, con segno positivo quando è diretta verso ponente e negativo verso il levante, e con Vy la corrente trasversale, con segno positivo quando è diretta verso costa e negativo verso il largo.
Da queste tabelle sono stati estratti i valori massimi che si possono verificare in ogni punto che vengono presentati nella **Tab. 7.5**.

# 8. LIVELLO DEL MARE

La variazione del livello marino in prossimità della costa è dovuta a varie cause, nel seguito elencate e commentate.

## 8.1 Set up da vento

La variazione del livello del mare a costa, causata dallo stress del vento sulla superficie marina si può estendere ad una fascia costiera piuttosto ampia, le cui dimensioni trasversali sono dell'ordine del "raggio di deformazione di Rossby", R.
Non esistono dati di tale effetto lungo la costa ligure: tenuto conto della particolare orografia del golfo e del continuo passaggio di perturbazioni atmosferiche, si ritiene tuttavia che tale effetto possa risultare anche notevole.
Vengono pertanto calcolati i contributi di vari termini forzanti nell'innalzamento complessivo del livello del mare.
L'equazione che descrive l'equilibrio tra lo stress del vento ortogonale a costa e la pendenza della superficie del mare è scritta come:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\tau_w}{\rho_w d_R} \qquad [8.1]$$

dove $d_R$ è la profondità del fondale, $\rho_w$ la densità dell'acqua, $\tau_w$ lo stress del vento che può essere calcolato in funzione della velocità del vento W come:

$$\tau_W \equiv \rho_{air} C_d w^2$$

ed il coefficiente di drag $C_d$ può essere calcolato come (Garrat, 1977):

$$C_D = 6.9 \cdot 10^{-4} + 7.5 \cdot 10^{-5} W \qquad [8.2]$$

dove W rappresenta la velocità media del vento su un intervallo di 10' e alla quota di 10 m rispetto al livello medio del mare.
La distanza su cui si esplica la variazione del livello del mare espresso dall'equazione [8.1] può essere assunta uguale al "raggio di Rossby", definito come:

$$R = \frac{\sqrt{d_R}}{f} \qquad [8.3]$$

dove $f = 2\omega \sin\varphi$ è il parametro di Coriolis, $\omega$ la velocità di rotazione della terra, $\varphi$ la latitudine.
L'innalzamento del livello medio per effetto del vento longitudinale a costa, con la costa a destra rispetto alla direzione da cui il vento spira, è descritta dall'equazione:

$$\eta = \frac{t\tau_w}{\rho_{air} fR} e^{-x/R} \qquad [8.4]$$

dove x è la distanza da costa e t è il tempo per cui spira il vento.
Tale formula viene ottenuta in approssimazione di costa infinita e assenza di attrito, da cui deriva che l'innalzamento cresce indefinitamente con il tempo. In realtà, anche con vento costante, si raggiungerebbe una condizione di equilibrio definita dai fenomeni di attrito. Nei calcoli si è assunta una durata del vento di 3 ore, cioè la durata tipica stimata per i picchi di tempesta ed una profondità $d_R$ pari a 100 m, che è all'incirca quella media antistante la costa in esame.
Data la geometria della costa, il golfo è stato suddiviso in tre settori principali, come mostrato in **Fig. 8.1**. Per il settore n. 1 si sono assunte le direzioni 120°N come quella mediamente perpendicolare all'area in esame e quella di 30°N come tipica del vento longitudinale. Per quanto riguarda il settore n.2, le direzioni scelte sono rispettivamente 210°N e 120°N ed infine, per il settore n.3, 240°N e 150°N.

## 8.2 Innalzamento dovuto alla marea

La parte deterministica dell'oscillazione del livello, dovuta alla marea, risulta dal contributo di un gran numero di componenti elementari di periodicità nota (componenti armoniche) e può essere espressa con l'equazione:

$$L_D(t) = \sum_{1}^{N} A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \qquad [8.5]$$

dove:

$A_k$ è l'ampiezza della k-esima componente armonica della corrente di marea;

$\omega_k$ è la sua velocità angolare;

$\varphi_k$ è la sua fase

N è il numero di componenti armoniche.

Poiché le $\omega_k$ sono note, l'individuazione dell'oscillazione di marea si riduce alla determinazione delle costanti armoniche $A_k$ e $\varphi_k$ delle principali componenti di marea.

Nell'area di studio l'oscillazione di marea può essere rappresentata, con approssimazione più che sufficiente, attraverso le sole componenti M2 e S2 (semi-diurne), 01 e K1 (diurne). Ampiezza e fase di tali componenti armoniche per l'area in esame sono riportate nella **Tab. 8.1**.
Nella **Tab. 8.2** sono evidenziati i parametri tipici della marea e precisamente:

- M.H.W.S., cioè la media del livello, in fase di sizigie, durante l'alta marea;
- M.H.W.N., cioè la media del livello, in fase di quadratura, durante l'alta marea;

- M.L.W.S., cioè la media del livello, in fase di sizigie, durante l'alta marea;
- M.L.W.N., cioè la media del livello, in fase di quadratura, durante la bassa marea;
- M.T.L., cioè il livello medio di marea.

### 8.3 Valori estremi

I risultati ottenuti dall'applicazione delle formule precedenti sono sintetizzati nella **Tab. 8.3**. I valori trovati richiedono un breve commento:

- per i calcoli sono state utilizzate formule semplificate, alcune di tipo semi-empirico, che tuttavia hanno una loro validità generale. In particolare il set-up è stato calcolato con formule che hanno spesso avuto riscontri oggettivi;
- nella stima non sono stati inclusi gli effetti dovuti alle depressioni atmosferiche, in quanto non sono risultate disponibili informazioni sui gradienti barici tipici dell'area.

Si suggerisce pertanto, per maggiore cautela, di considerare come valore estremo da utilizzare nei calcoli la somma dell'elevazione di marea a del set up indotto dal vento trasversale.

# 9. DINAMICA DEI LITORALI

Al fine di valutare la dinamica dei processi naturali che avvengono nella zona costiera di interesse, si è ritenuto opportuno applicare un modello matematico **(Appendice 3)** che permette di stimare il trasporto longitudinale, analizzare la direzione prevalente del trasporto trasversale, indagare le modalità di frangimento, nonché di stimare i valori di set-up e run-up delle onde che si verificano nell'area in esame.
Successivamente è stata valutata la stabilità della spiaggia nel suo stato attuale, mediante la simulazione dell'evoluzione del profilo trasversale indotta dalle mareggiate estreme: tali simulazioni sono state effettuate con il modello morfologico monodimensionale SBEACH **(Appendice 4)**.
Si sottolinea che con "processi naturali" vengono qui intesi i processi fisici (variazioni del livello del mare, energia delle onde, frangimento, correnti longshore, set-up e run-up delle onde, etc.) che definiscono i limiti della spiaggia (emersa+sommersa) attiva nei confronti del trasporto sedimentario, prima dell'intervento antropico, in assenza cioè delle strutture presenti lungo il litorale, strutture che influenzano in maniera consistente la dinamica litoranea.
Nel seguito, dopo un breve cenno teorico, vengono calcolati i vari parametri che permettono di definire il quadro morfodinamico naturale della costa.

## 9.1 Caratteristiche generali del trasporto dei sedimenti

Le onde, propagandosi verso costa determinano, in prossimità del fondo, una corrente orizzontale oscillante nella direzione di propagazione delle onde.
Tale corrente costituisce la causa principale del sollevamento del sedimento, che ha luogo non appena lo "stress" sul fondo supera la resistenza d'attrito tra i granuli di sabbia di cui è costituito il fondale, resistenza che dipende, oltre che dalla natura e dalla dimensione dei granuli, anche dalla ripidità del fondale.
La dissimmetria della forma d'onda, tipica delle acque basse, si rispecchia nelle caratteristiche della velocità orbitale sul fondo, risultando più intensa e di più breve durata in corrispondenza delle creste, quando la velocità è diretta nel verso della propagazione del moto ondoso, e meno intensa, ma di maggior durata, in corrispondenza del cavo d'onda dove la velocità orbitale è diretta in verso opposto.
Le particelle di sedimento in sospensione risultano sottoposte all'azione di tale corrente oscillante e alla forza di gravità. A causa della dissimmetria della velocità orbitale, esse subiscono spostamenti differenti nella direzione di propagazione delle onde e nella direzione opposta e, a seconda del rapporto tra la velocità di caduta delle particelle e la velocità orbitale massima, si ha un trasporto netto verso costa o verso il largo.
Se le onde incidono obliquamente sulla costa il flusso di quantità di moto verso riva determina correnti parallele alla costa, correnti che risultano confinate prevalentemente nella zona di frangimento. A causa di tali correnti il sedimento posto in sospensione dal moto ondoso viene trasportato parallelamente alla costa (**trasporto longitudinale**).
Per onde incidenti normalmente alla costa, si ha invece un moto dei sedimenti in direzione trasversale alla costa (**trasporto trasversale**), diretto verso riva o verso il largo.
Dato il carattere unidirezionale delle correnti longitudinali, il trasporto netto parallelo alla riva risulta di gran lunga superiore al trasporto trasversale; quest'ultimo, inoltre, non è associato ad un vero e proprio trasporto netto bensì ad una selezione granulometrica e ad un modellamento trasversale del fondo.

Gli studi sperimentali e teorici sui meccanismi che determinano il trasporto trasversale alla costa non sono ancora pervenuti ad una esauriente spiegazione del fenomeno.
Dalle osservazioni effettuate è stato, infatti, evidenziato il fenomeno di selezione dei sedimenti nella direzione ortogonale alla costa dovuto al trasporto trasversale.
Fissate le caratteristiche del moto ondoso, per ciascuna posizione nella zona di frangimento delle onde esiste una dimensione del sedimento tale per cui esso risulta in equilibrio. Il sedimento di dimensione minore della "dimensione di equilibrio" si muove verso il largo, quello di dimensione maggiore si muove verso costa.
Anche se sono stati sviluppati diversi modelli per lo studio del trasporto trasversale alla costa, la loro applicabilità allo studio del trasporto trasversale in ambienti naturali sembra ancora piuttosto discutibile quando si analizza l'effetto complessivo del clima del moto ondoso le varie procedure sono spesso in disaccordo, con risultati che comportano differenze anche di vari ordini di grandezza. Si è preferito allora valutare, attraverso vari "indici", ad esempio quello di Hattori, la tendenza all'erosione o all'accrescimento del profilo di spiaggia in funzione dei parametri meteo-marini, morfologici e sedimentologici e analizzare le variazioni del profilo trasversale della spiaggia nel corso delle varie mareggiate.

## 9.2 Caratteristiche dinamiche delle spiagge miste

Nel Golfo di Moneglia sono presenti, oltre alla spiaggia di sabbia fine protetta dalle scogliere emerse, alcune spiagge, di modesta ampiezza, caratterizzate da granulometria più grossolana.
Mentre le spiagge sabbiose si presentano generalmente molto ampie nella parte emersa e con pendenze molto dolci, le spiagge cosiddette "miste" (sabbia mista a ghiaia) sono invece caratterizzate da ampiezza ridotta e pendenze anche notevoli. Queste differenze morfologiche sono principalmente dovute alla composizione granulometrica del materiale di spiaggia, e hanno importanti conseguenze sui processi dinamici costieri. La maggior parte dell'energia ondosa incidente viene dissipata durante il frangimento, e, nel caso di spiagge ripide, la zona di frangimento ("surf-zone") è molto ristretta o addirittura assente, per cui le onde frangono molto vicino o direttamente sopra la spiaggia emersa, e risalgono fino al limite superiore della cosiddetta "swash-zone". Per questo motivo, nelle spiagge miste la swash-zone è caratterizzata da notevole turbolenza, è la zona in cui avviene la maggior parte del trasporto solido e dove, di conseguenza, si verificano le massime variazioni del profilo di spiaggia.
La turbolenza delle onde frangenti tende a mettere in sospensione la porzione di materiale più fine che viene, quindi, trasportata verso il largo, mentre la parte più grossolana tende a depositarsi in corrispondenza del limite inferiore della spiaggia emersa. Se da una parte i granuli e la ghiaia possono essere trasportati verso il largo, in caso di forti energie incidenti, dall'altra è molto difficile che questi possano essere riportati sulla spiaggia emersa. In altre parole, il materiale sottratto alla spiaggia emersa e trasportato verso il largo, generalmente non viene più recuperato [**rif. 12**].
Nelle spiagge sabbiose, invece, la dinamica è molto diversa: buona parte dell'energia ondosa viene dissipata nella surf-zone durante il frangimento, prima che le onde raggiungano la spiaggia stessa, di conseguenza la swash-zone è caratterizzata da basse energie e non ha un ruolo dominante nella dinamica del trasporto solido. Lungo il profilo di spiaggia si osserva in generale la presenza di sistemi di barre, che migrano verso costa o verso il largo a seconda delle condizioni dinamiche.

### 9.3 Le formulazioni in presenza di ghiaia

Il metodo più comune per calcolare il trasporto longitudinale di sedimenti (LST) è la formula del CERC; Coastal Engineering Manual 2002, [**rif. 13**]):

$$I = \frac{K}{16\sqrt{\gamma_b}} \rho g^{\frac{3}{2}} H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\alpha_b) \qquad [9.1]$$

dove I è il peso totale dei sedimenti immersi, K un coefficiente empirico, $H_b$ l'altezza dell'onda al frangimento, $\gamma_b$ l'indice di frangimento (tipicamente uguale a 0.78) e $\alpha_b$ l'angolo dell'onda al frangimento. Questo modello si basa sull'assunzione che il trasporto totale di sedimenti longitudinale sia proporzionale al flusso di energia.

Va specificato che il valore del coefficiente empirico K è diverso se si fornisce il valore di $H_b$ come altezza significativa ($H_s$) o come valore medio ($H_{rms}$). La formula usata per convertire queste due quantità è:

$$K_{(sig)} = \tfrac{1}{2} K_{(rms)} \qquad [9.2]$$

Tuttavia tale formulazione, presenta alcune limitazioni in particolare in presenza di sabbia molto grossa ($D_{50}$ > 1.0 mm).

Nel corso del tempo sono state proposte alcune modifiche al coefficiente K, nel tentativo di migliorare la formula del CERC e, in particolare, nel tentativo di correlare K alla dimensione ($D_{50}$) dei sedimenti (Dean 1978; Walton and Chui 1979; Bruno et al.1980; Dean et al. 1982; Dean 1989; Dean and Dalrymple 2002,).
Viene, infatti, accettata la relazione di proporzionalità inversa che lega K alla granulometria. Il grafico in **Fig. 9.1** mostra tutti dati ricavati dagli studi effettuati da Komar (1988), Nicholls e Webber (1987), Chadwick (1989), e Nicholls e Wright (1991) in Inghilterra, e Leidersdorf et al. (1988) in Alaska [**rif.14**]. Nel grafico sono inoltre riportate le curve che rappresentano le seguenti relazioni:

- **Swart (1976)** [**rif. 19**] ha proposto la seguente relazione, valida tra 0.1 mm<$D_{50}$<1.0 mm:

$$K_{(rms)} = 1.15 \log_{10}\left(0.00146 / D_{50}\right) \qquad [9.3]$$

dove il $D_{50}$ è espresso in metri.

- **Del Valle et al.(1993)** [**rif. 20**] hanno sviluppato una relazione empirica per K basata sui dati attenuti da una ricerca lungo il delta del fiume Adra (Spagna), caratterizzato da sedimenti con un $D_{50}$ compreso tra 0.44 e 1.5mm . Questa relazione, in cui il D50 è espresso in millimetri,

$$K_{(rms)} = 1.4 e^{(-2.5 D_{50})} \qquad [9.4]$$

viene utilizzata preferibilmente nel caso di taglia dei granelli maggiore di 1,5 mm.

- **relazione empirica** [**rif. 21**] i trend dei dati riportati in **Fig. 9.1** può essere espresso dalla formula:

$$K_{(sig)} = \frac{0.1\,\mathrm{mm}}{D} \qquad [9.5]$$

Data l'elevata dispersione dei dati che si osserva nel grafico, specie nell'area dei sedimenti più grossolani, quest'ultima formula dovrebbe essere usata solo per stime indicative preliminari.
Le formule di Swart (1976) e Del Valle et al. (1993) vengono mostrate nella **Fig. 9.1** solo entro gli intervalli di validità propri. Per valori di $D_{50}$ tipici delle sabbie ($0.063 < D_{50} < 2$ mm) tutte e tre le equazioni danno risultati simili, mentre per sedimenti più grossolani le formule di Swart (1976) e Del Valle et al. (1993) prevedono un valore di K minore rispetto a quello riscontrato negli studi.
Nel presente studio, per la stima del trasporto solido nell'ipotesi di ripascimento con materiale ghiaioso ($D_{50} \geq 2$ mm) è stata utilizzata la relazione empirica sopra riportata.

## 9.4 Trasporto longitudinale - Modello a macroprocesso

Per i calcoli del trasporto longitudinale e dei vari parametri associati si è utilizzato un modello a "macroprocesso", ritenuto ragionevolmente idoneo per definire i volumi messi in moto dalle onde. Nella classe di modelli a macroprocesso sono da includere i modelli a soluzione analitica che permettono di valutare a grandi linee la tendenza evolutiva di un litorale nel lungo termine, sotto ipotesi semplificate e per condizioni costanti di moto ondoso nel tempo. Sono modelli che forniscono informazioni indicative, ma comunque già quantitative e, se ben usati, possono comunque fornire informazioni importanti sulla tendenza evolutiva dei vari tratti di costa.
Il modello calcola il trasporto longitudinale potenziale nelle diverse sezioni in cui viene suddivisa la costa. Il programma richiede in input le caratteristiche del profilo batimetrico schematizzate mediante due pendenze, una al largo ed una a costa, e la profondità a cui si verifica la variazione di pendenza. Vanno ovviamente forniti anche i diametri medi dei sedimenti esistenti lungo il profilo considerato. Il calcolo viene effettuato sulla base del clima $P(H,\theta, T)$ del moto ondoso e tiene conto dei contributi al trasporto dovuti a tutti gli elementi del clima che, per direzione di incidenza, risultano significativi per il tratto di litorale, pesati con la rispettiva probabilità di occorrenza.
Poiché in generale il clima è rappresentativo delle condizioni medie annuali del moto ondoso nell'area, il modello fornisce il trasporto potenziale medio annuo che si verifica lungo il tratto di costa, tenendo conto delle dimensioni del sedimento lungo il profilo batimetrico interessato dai fenomeni di trasporto e dalle modalità di frangimento delle onde. Il modello calcola inoltre tutti i parametri necessari alla definizione della spiaggia emersa e sommersa.

### 9.4.1 Caratteristiche delle sezioni considerate

In input al modello, oltre al clima del moto ondoso, vanno forniti, per ogni sezione caratteristica della spiaggia:

- direzione media della normale a costa;

- angolo limite inferiore di esposizione della spiaggia;
- angolo limite superiore di esposizione della spiaggia;
- pendenze medie del fondale a costa e al largo;
- diametro $D_{50}$ del sedimento lungo la sezione (fino a 4 valori).

Le sezioni che sono state selezionate, mostrate in **Fig. 9.2**, sono posizionate in corrispondenza dei 6 punti scelti lungo la costa (**Fig. 2.3**) e caratterizzate da normali a costa molto differenti, come evidenziato in **Tab. 9.1**. Nella tabella sono indicati anche i settori di esposizione di ogni settore, la pendenza del fondale a costa e al largo, la profondità a cui avviene la variazione della profondità e le granulometrie che sono state considerate. Sono state scelte queste sezioni in modo da caratterizzare nel miglior modo possibile le aree interessate dagli interventi di progetto (in corrispondenza dei profili B, C, D ed E, ognuna caratterizzata da una diversa orientazione a costa e settore di esposizione); per una maggiore comprensione della dinamica dei sedimenti sono stati considerati altri due profili (A e F) posizionati vicino al contorno dell'area di studio e caratterizzati da orientazioni ancora differenti.

Per quanto riguarda la granulometria fornita in input al modello, si è tenuto conto di alcune analisi sedimentologiche effettuate nell'area, in particolare nei pressi delle sezioni C e D. Le suddette analisi indicano la presenza di un sedimento con $D_{50}$ pari a 0.2 mm (sabbia fine) a largo e con $D_{50}$ pari a 0.24 mm più vicino a costa. Dato che i dati non erano sufficientemente rappresentativi dell'intera costa, si è ritenuto opportuno effettuare una analisi di sensibilità variando il valore di $D_{50}$ all'interno della classe granulometrica delle sabbie (scala di Udden- Wentworth). Dalla **Fig. 9.3** (in cui i valori di trasporto sono espressi in percentuale) emerge come i valori di trasporto longitudinale varino poco passando da 2.0 mm a valori di 1.0 mm, mentre cambiano in maniera più consistente nell'intervallo 0.25-0.2 mm.
Per quanto riguarda i profili A, D, E ed F, per i quali la bibliografia disponibile indica la presenza di coste alte (A, E ed F) o spiagge ciottolose (B e D), sono stati usati i valori di $D_{50}$ a costa pari a 2.0 mm, per essere sufficientemente cautelativi. I valori ottenuti per questi profili si riferiscono al trasporto potenziale, che si avrebbe se fossero presenti lungo il profilo sedimenti della classe dei granuli. Man mano che ci si allontana da costa sono stati utilizzati valori decrescenti di diametro, fino al valore di 0.2 mm, valore che è stato ipotizzato come rappresentativo dei fondali a largo. In ogni caso, date le pendenze dei profili, molto accentuate, il trasporto non interessa che i primi metri di acqua e quindi non è influenzato dalla granulometria dei sedimenti a largo.

È stata svolta un'analisi di sensibilità per quanto riguarda l'orientazione del profilo per verificare, dato il clima a costa, per quali direzioni si avrebbe un'inversione del trasporto. I risultati mostrano (**Fig. 9.4**) che, tenuti fissi tutti i parametri con l'eccezione dell'orientazione del profilo, ci si avvicina al massimo trasporto netto positivo (il trasporto è stato normalizzato al 100% e si considera positivo se rivolto verso levante) per profili con un'orientazione di circa 190°N, e un trasporto massimo negativo (rivolto verso ponente) intorno a 270°N. L'inversione del trasporto si ha intorno ai 230°N, compatibilmente con le direzioni più energetiche. I colori indicano i risultati per vari settori di esposizione considerati. Infatti, si è provveduto anche a verificare l'influenza di questo parametro, aumentando e diminuendo l'angolo totale del settore di esposizione (135-285°N, 115-295°N, e 150-265°N). E' evidente che l'orientazione del profilo è il fattore predominante nel determinare il verso del trasporto e secondariamente dei volumi di sedimento. Il

settore di esposizione influenza il trasporto in quando include o esclude settore di traversia più o meno energetici.

### 9.4.2 Caratteristiche del trasporto longitudinale potenziale

I risultati ottenuti dall'applicazione del modello sono mostrati nelle **Tab. 9.2** e in **Figg. 9.5-9.6**. Dall'analisi dei risultati si nota come il trasporto sia prevalentemente diretto verso est per le sezioni A, B, C e D, verso ovest per i restanti profili. In realtà, data la vicinanza dell'orientazione del profilo C e D a 230°N, valore in cui presumibilmente cambia il verso del trasporto, sarebbe necessaria una batimetria dettagliata dell'area per poter prevedere con esattezza l'intensità e il verso del trasporto. Inoltre va sottolineato che si sta parlando di trasporto potenziale, cioè del trasporto dovuto all'energia ondosa disponibile: se i volumi messi in gioco sono effettivamente disponibili sui fondali allora il trasporto diventa effettivo, in caso contrario risulta inferiore o nullo.
Secondo i risultati riportati in tabella il materiale eventualmente disponibile al trasporto tenderebbe ad accumularsi nella porzione centrale del golfo. In particolare:

- nel tratto tra il profilo A e B si avrebbe un limitato accumulo di sedimento;
- nel tratto tra il profilo B e C si avrebbe l'erosione dei fondali: data la presenza di un promontorio in corrispondenza della zona "La secca", è ragionevole attendersi un accumulo ad ovest del promontorio e l'erosione ad est di questo. La presenza delle barriere parallele in questa zona ha l'effetto di ridurre la rimozione di sedimento per azione delle onde incidenti;
- nel tratto tra il profilo C e D e il profilo D ed E l'incertezza riguardo il verso del trasporto impedisce di definire il grado di stabilità della spiaggia; inoltre sarebbero da verificare anche i valori del trasporto solido del torrente Bisagno che potrebbe, durante le piene, rappresentare un elemento determinante per la dinamica locale;
- nel tratto tra il profilo E ed F si avrebbe una tendenza all'erosione del fondale.

Il flusso medio di energia a costa aumenta andando dal profilo A al F, infatti quest'ultimo è esposto ai settori più energetici del clima ondoso, settori da cui il profilo A è schermato.
Si sottolinea che i profili A, E, F sono caratterizzati da costa alta e conseguente assenza di arenile.
L'andamento del trasporto in funzione della profondità evidenzia che esso si esplica soprattutto su fondali bassi, fino a circa 4 m di profondità, quindi molto vicino a costa.

### 9.4.3 Andamento del trasporto trasversale

L'indice di Hattori è un parametro che, in base al clima ondoso, indica la percentuale di eventi che tendono a spostare i sedimenti presenti verso il largo, la costa o in equilibrio tra i due sensi. Secondo l'indice di Hattori, le percentuali di eventi che caratterizzano l'andamento del trasporto trasversale nelle varie sezioni considerate sono le seguenti:

| | A | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| % DI EVENTI CON TRASPORTO VERSO COSTA | 42 | 77 | 0 | 77 | 7 | 8 |
| % DI EVENTI CON TRASPORTO IN EQUILIBRIO | 54 | 23 | 16 | 23 | 55 | 56 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| % DI EVENTI CON TRASPORTO VERSO IL LARGO | 4 | 0 | 84 | 0 | 38 | 36 |

Dalla tabella emerge che solo per il profilo C si ha una prevalenza degli eventi che inducono il trasporto verso il largo, mentre per gli altri profili si ha tendenza al trasporto verso costa (B e D) o alla stabilità (A, E ed F).
Si sottolinea che la notevole variabilità alle sezioni considerate può dipendere, oltre a cause naturali, anche dalla scarsa risoluzione della batimetria disponibile nella fascia costiera.

### 9.4.4 Frangimento delle onde

Per quanto concerne le modalità di frangimento, essa può essere calcolata attraverso il cosiddetto "indice di breaking" $\varepsilon_b$

$$\varepsilon_b = \tan(\beta)/(H_b / L_o)^{1/2} \qquad [9.6]$$

dove tanβ è la pendenza del fondale, $H_b$ l'altezza d'onda al momento del frangimento, $L_o$ la lunghezza d'onda al largo.
Il valore dell'indice tende a crescere passando da condizioni di frangimento per "spilling" a quelle per "plunging" e "surfing", risultando inferiore a 0.4 nel caso di spilling, compreso tra 0.4 e 2 nel caso di plunging e maggiore di 2 nel surging.
Ricordiamo che con tali termini si fa riferimento, rispettivamente, alla rottura per "versamento" (spilling, frangimento graduale associato alle lunghezze d'onda tipiche del Mediterraneo su pendenze dei fondali medio-basse), per "cascata" (plunging, caratteristica delle onde più lunghe su fondali ripidi) e per "traslazione" (surging, tipica delle onde molto lunghe, scarsamente presente in Mediterraneo).

Ai fini della stabilità di un fondale, il frangimento per plunging rappresenta la tipologia più pericolosa, in quanto l'acqua ricade verticalmente con violenza ed ha una maggiore efficienza nel sollevamento del sedimento dal fondo. Al contrario il frangimento per spilling ha una minore efficienza nel sollevare il sedimento.

I risultati ottenuti in corrispondenza dei profili selezionati sono presentati nella **Tab. 9.3**: dall'analisi della tabella si può concludere che le modalità con cui si verifica il frangimento sono piuttosto omogenee lungo l'intero arco costiero considerato, le cui attuali pendenze in corrispondenza delle sezioni centrali inducono frangimento per "spilling", mentre per le sezioni in corrispondenza di costa alta caratterizzate da pendenze più ripide si verifica con alte percentuali anche il frangimento per "plunging".

Le profondità di frangimento delle onde nell'area di esame, calcolate per ciascuna sezione, vengono presentate nella **Tab. 9.3** da cui si evidenzia che, sia pur con delle variazioni tra i profili considerati, il 95 % delle onde frange a profondità ≤ 2.2 m.

### 9.4.5 Limiti della spiaggia emersa

Il limite della spiaggia emersa è definita dai valori di “set-up” e di “run-up”, cioè dall’innalzamento del livello del mare dovuto al moto ondoso e dalla risalita dell’onda sulla spiaggia. I risultati relativi ai valori tipicamente presenti, calcolati cioè sulla base del clima ondoso e mostrati nella **Tab. 9.4**, indicano valori massimi abbastanza consistenti che aumentano andando dalla sezione A (92 cm di “set-up” e 83 cm di “run-up”) alla F (142 cm di “set-up” e 132 cm di “run-up”) compatibilmente con i settori di traversia a cui sono esposti: tale fatto comporta che, in particolari condizioni di onde e di marea, la spiaggia, ove esistente, potrebbe risultare per gran parte sommersa.

### 9.4.6 Limiti della spiaggia sommersa

Il limite della spiaggia sommersa definisce il limite di profondità entro il quale si esplica il moto sedimentario indotto dalle onde.
I valori della profondità di chiusura associata al clima ondoso fornito in input al modello sono mostrati nella **Tab. 9.5**: tali risultati indicano che la profondità di chiusura della spiaggia può estendersi fino a circa 9,5 m di profondità in corrispondenza degli eventi ondosi più energetici, sebbene il trasporto longitudinale si verifichi prevalentemente entro i 4 m, come dimostrano anche i risultati della distribuzione del trasporto longitudinale in funzione della profondità (**Figg. 9.5-9.6**).

## 9.5 Trasporto trasversale

Nel presente capitolo viene valutata la stabilità della spiaggia nel suo stato attuale, mediante la simulazione dell’evoluzione del profilo trasversale della spiaggia indotta dalle mareggiate estreme: tali simulazioni sono state effettuate con il modello morfologico monodimensionale SBEACH.

### 9.5.1 Il modello SBEACH

Per valutare l’evoluzione del profilo trasversale della spiaggia in esame, stima indispensabile per una comprensione quantitativa, almeno come ordine di grandezza, delle variazioni che è possibile attendersi, si è ritenuto opportuno utilizzare un modello matematico di evoluzione considerato uno standard di riferimento per tale tipo di analisi.
Il modello, denominato **SBEACH** (**S**torm Induced **BEA**ch **CH**ange Model) é stato sviluppato presso l’US Army Corps of Engineers (Larson *et al.*, 1990) al fine di simulare in maniera accurata la risposta del sistema-spiaggia a sollecitazioni meteorologiche e marine.
I fattori di cui tale modello tiene conto nello sviluppo delle simulazioni sono: onde (altezza, periodo, direzione), vento (velocità e direzione), tipologia e dimensione del sedimento, livello del mare, temperatura dell'acqua (in quanto influenza la velocità di sedimentazione), eventuali barriere artificiali e, naturalmente, profilo iniziale dell'area di studio.
Il modello restituisce in uscita una serie di dati d’interesse tra cui il profilo al termine del periodo di simulazione e ad istanti intermedi, il volume di sedimento spostato in ogni punto del profilo, l'altezza d'onda e l'elevazione del livello del mare.
Essendo questo modello ritenuto in grado di fornire previsioni accurate sui cambiamenti di profilo delle spiagge, compresi la formazione ed il movimento delle principali

caratteristiche morfologiche quali barre e berme, é potenzialmente indicato per molte applicazione nell'ambiente costiero.
Una dettagliata illustrazione del modello (algoritmi, calibrazioni, verifiche con dati misurati), così come descritta dagli autori, è riportata nell'**Appendice 4**.

Sono stati forniti in input al modello:

- i profili nei 6 punti (**Fig. 2.3**) ricavati dalla batimetria disponibile;
- le mareggiate estreme riportate in **Tab. 6.3**;
- valori del diametro di sedimento $D_{50}$ già utilizzati in precedenza.

Per completezza d'informazione sono stati simulati anche i profili A, E, F, caratterizzati da costa alta, per i quali il profilo è stato schematizzato, secondo una delle opzioni previste dal modello, come "hard bottom", cioè roccioso e inamovibile, nella parte emersa, mentre nella parte sommersa si è ipotizzata la presenza di materiale sedimentario.

### 9.5.2 Risultati

Sono state simulate le mareggiate estreme (**Tab. 6.3**) sulle 6 sezioni selezionate (**Fig. 9.2**). I risultati sono riportati e nelle **Figg. 9.7-9.9**, mentre nelle **Tabb. 9.6-9.7** vengono mostrati i valori estremi di set-up e run-up (per il profilo C vengono riportati i risultati sia per la condizione attuale, sia nella situazione in assenza di barriere) e i valori di arretramento della linea di riva per il profilo C (corrispondente all'unica area dove, in pratica, esiste l'arenile), in assenza delle barriere esistenti.
Dai risultati emerge che l'arretramento è praticamente trascurabile in tutti i profili, e che le barriere parallele del profilo C impediscono un potenziale arretramento che arriverebbe, in occasione delle mareggiate estreme, fino a 6 m.
I risultati possono essere così sintetizzati:

- Profilo A: le simulazioni evidenziano la tendenza all'accumulo di sedimenti vicino alla linea di riva e a un profilo finale più ripido, tipico delle granulometrie grossolane;
- Profilo B: tutte le simulazioni evidenziano una sostanziale stabilità del profilo in questione, non mostrando sostanziali avanzamenti o arretramenti;
- Profilo C: nelle simulazioni in assenza della barriera si evidenzia la formazione di diverse barre e l'arretramento della linea di riva fino a circa 6 m nel corso delle mareggiate estreme. Nelle simulazioni con la barriera invece si osserva invece un arenile stabile ed 'erosione ("scouring") al piede della barriera, lato mare;
- Profilo D: tutte le simulazioni evidenziano una sostanziale stabilità del profilo in questione, non mostrando sostanziali avanzamenti o arretramenti;
- Profilo E: le simulazioni evidenziano la tendenza all'accumulo di sedimenti vicino alla linea di riva e a un profilo finale più ripido tipico delle granulometrie più grossolane;
- Profilo F: le simulazioni evidenziano la tendenza all'accumulo di sedimenti vicino alla linea di riva e a un profilo finale più ripido tipico delle granulometrie più grossolane.

Per quanto riguarda i profili A, E ed F, caratterizzati da costa alta, è necessario sottolineare che la granulometria fornita in input potrebbe non essere disponibile sui fondali oppure essere di granulometria diversa da quella qui ipotizzata.

## 9.6 Interpretazione dei risultati

Prima di interpretare i risultati, si deve tener conto che è stato applicato un modello a macroprocesso, in cui il fondale è schematizzato con due sole pendenze. Inoltre la batimetria è desunta dalle carte nautiche e quindi scarsamente dettagliata nella fascia più prossima a costa, mentre il valore dei diametri dei sedimenti è basato su pochi dati disponibili. Di conseguenza i risultati quantitativi non debbono essere considerati in termini assoluti, ma in termini relativi, cioè come confronto di situazioni tra le varie aree.
Si ricorda ancora che i vari parametri qui analizzati e quantificati sono quelli che esisterebbero naturalmente, in assenza cioè delle barriere presenti lungo il litorale.

Ciò premesso, si ritiene opportuno sottolineare che i volumi stimati si riferiscono al cosiddetto trasporto potenziale, cioè a quello disponibile a causa del moto ondoso incidente, dell'esposizione del paraggio, delle pendenze dei fondali, della granulometria media disponibile.
Il trasporto effettivo dipende ovviamente dalla disponibilità di sedimento sui fondali e dal fatto che i flussi di sedimento potenzialmente entranti nell'area effettivamente esistano. A tale proposito si ricorda che il Golfo di Moneglia, delimitato da promontori caratterizzati da costa alta (**Fig. 2.1**), non è alimentato da flussi sedimentari provenienti dalle coste adiacenti. Secondo i risultati ottenuti dal modello, l'area di studio è caratterizzata da un trasporto longitudinale che converge verso la parte centrale del golfo: nel caso in cui il golfo fosse alimentato da sufficiente sedimento, si assisterebbe quindi ad un accumulo di materiale in quest'area.

Per quanto riguarda invece il trasporto trasversale alla costa, si ha una preponderanza del trasporto verso costa per le sezioni B e D, una condizione di stabilità per le sezioni A, E ed F (costa alta), mentre il trasporto è diretto decisamente verso il largo per la sezione C , il che conferma la tendenza all'erosione di questo tratto e la necessità di mantenere le barriere parallele, senza le quali si assisterebbe ad una progressiva, e probabilmente rapida, diminuzione della spiaggia. Le opere di difesa parallele presenti, bloccando il trasporto trasversale sembrano dunque avere un effetto positivo.
Sembra tuttavia opportuno ottimizzare il lay-out delle barriere, in modo da disporre di una maggior ampiezza della spiaggia e poter migliorare la qualità delle acque confinate.

Per quanto concerne le variazioni di livello, esse sono decisamente elevate: di ciò dovrà esserne tenuto debito conto in fase di progettazione definitiva.

Si sottolinea infine che, a questo livello preliminare dello studio, è stata trascurata l'influenza del torrente Bisagno, che potrebbe rivestire una certa importanza nella dinamica litoranea dei sedimenti. In fase di progettazione definitiva sarà necessario reperire dati relativi alle portate del torrente e definire con esattezza l' orientazione della batimetria nei primi metri di costa per simulare i processi che si verificano in corrispondenza della foce, con l'impiego di apposita modellistica numerica 3D.

# 10. CONCLUSIONI E SUGGERIMENTI

Nell'ambito degli studi per lo screening relativo al PUO fronte mare di Moneglia è stato eseguito lo studio del clima del moto ondoso, dell'idrodinamica e delle variazioni di livello marino dell'intero Golfo di Moneglia e della dinamica litoranea, mediante applicazione di opportuni modelli matematici.
Ciò ha permesso di definire le condizioni meteo-oceanografiche tipiche e di stimare condizioni estreme ragionevoli e rappresentative della fenomenologia locale del litorale, in particolare nelle aree ove è prevista la realizzazione dei progetti ipotizzati.

## 10.1 Conclusioni

I risultati indicano che il settore costiero a ponente del golfo (sezioni A e B) risulta parzialmente protetto dai settori più energetici (200÷270°N) dal promontorio di Punta Moneglia e i profili sono caratterizzati da prevalente trasporto longitudinale diretto verso N-E (verso la parte centrale del golfo); tuttavia, considerata la natura rocciosa della costa a ponente il trasporto è in gran parte potenziale, per mancanza di alimentazione.
Il settore centrale (sezione C), costituito dalla parte del golfo protetta dalle scogliere parallele risulta progressivamente più esposto alle ondazioni prevalenti dai settori 200÷240°N ed è caratterizzato da trasporto prevalente trasversale. Il bilancio del trasporto, è potenzialmente diretto verso il largo; tuttavia i sedimenti sono trattenuti dalle difese parallele alla costa esistenti, che risultano praticamente impermeabili.
Il settore immediatamente a levante della foce del torrente Bisagno fino a Punta Rospo (sezioni D, E, F) è caratterizzato dalla massima energia dell'onda incidente per le traversie estreme da 200÷270°N, che agiscono praticamente perpendicolari alla costa e risulta anche esposto alle ondazioni prevalenti da 135÷200°N, che comportano il trasporto longitudinale diretto verso Nord e cioè verso il centro del golfo. Il trasporto effettivo risulta comunque limitato dalla natura rocciosa con assenza di litorali sabbiosi a sud del settore.

Sulla base dei risultati complessivamente ottenuti, esaminando, settore per settore, le opere a progetto del PUO si può affermare:

- SETTORE A PONENTE
  La previsione di tre pennelli trasversali in scogliera di limitata lunghezza (uno esistente da rinforzare e due di nuova costruzione) non comporta significativa alterazione della dinamica costiera; il trasporto longitudinale effettivo proveniente da ponente è praticamente nullo mentre i pennelli possono contribuire ad intercettare il trasporto durante gli eventi con mare da SE, che andrebbe a perdersi sui fondali profondi sotto Punta di Moneglia senza possibilità di ritorno.
  L'efficacia di detti pennelli è comunque limitata.
  L'intervento previsto nell'area della "Secca" essendo tutto all'interno della linea costiera non altera l'equilibrio idrodinamico nel settore.

- SETTORE CENTRALE
  Dalle risultanze dello studio emerge che il litorale centrale di Moneglia a causa del moto incidente, dell'esposizione del paraggio e delle pendenze dei fondali, è caratterizzato da elevato idrodinamismo.

Nella zona delle barriere (sez. C) il trasporto è prevalentemente trasversale e l'ondazione è caratterizzata da un elevato flusso trasversale di energia. La modellazione ha evidenziato che, nell'ipotesi senza barriera, prevarrebbe il trasporto verso il largo e quindi con progressiva diminuzione della spiaggia. Pertanto, ne discende che l'eventuale introduzione di pennelli trasversali in luogo delle attuali scogliere parallele, non solo non risulterebbe efficace nei confronti dell'erosione, ma considerata l'elevata energia dell'onda nel settore, la spiaggia residua verrebbe risalita completamente dall'onda, con il pericolo di raggiungimento dei varchi sotto l'ex rilevato ferroviario e, in corrispondenza di eventi estremi, l'onda potrebbe risalire oltre gli stessi varchi.
Un'eventuale riduzione dell'altezza delle barriere, con la formazione di una diga sommersa, se potrebbe avere una qualche efficacia nel limitare le perdite di materiale verso il largo, avrebbe scarsa efficacia nei confronti della risalita dell'onda sulla spiaggia, provocando una sopraelevazione del livello del medio mare nella zona compresa tra la barriera sommersa e la costa.
Pertanto si ritiene che la soluzione ipotizzata nel PUO di mantenere le difese parallele emerse sia la più opportuna nei confronti della difesa dall'onda incidente, mentre lo spostamento verso il largo consentirà la distribuzione del materiale accumulato all'interno su un'area maggiore con conseguente miglioramento della qualità dell'acqua. Inoltre lo spostamento delle scogliere renderà maggiormente fruibile l'area a terra dedicata alla nautica che attualmente viene investita, in occasione degli eventi estremi, dall'onda che tracima le scogliere.

- SETTORE A LEVANTE
  L'intervento di potenziamento dell'accosto per i battelli turistici immediatamente a levante della foce del Torrente Bisagno, non modificando la lunghezza del pennello radicato allo scoglio del "Gruppo Marcio", non modifica la dinamica costiera.
  L'intervento strutturale di riqualificazione del tratto di litorale tra lo sperone di Villafranca a ponente e l'ex Casello ferroviario a levante, mediante ristrutturazione dei 3 pennelli esistenti e ripascimento nelle celle intermedie, può avere efficacia e buon risultato contribuendo a compartimentare il materiale di ripascimento versato nelle 4 celle risultanti. Il materiale di formazione della spiaggia emersa e sommersa dovrà essere di granulometria grossolana per creare un profilo di equilibrio della spiaggia emersa e sommersa compatibile con la ripidità del fondale attuale.
  Considerato l'effettivo trasporto longitudinale, l'intervento potrà stabilizzare il profilo con un consistente apporto di materiale artificiale.
  L'intervento in località Le Marine, dove attualmente esiste una struttura per l'alaggio e il varo di piccole imbarcazioni, consiste nel costruire un tratto di scogliera parallela alla costa di circa 30 m radicato alla testata di un pennello trasversale in scogliera esistente, in modo da creare uno specchio acqueo protetto dai mari provenienti dal settore di traversia principale (180÷280°N).
  Sulla base dei risultati del modello idrodinamico, poiché l'opera non comporta allungamento del pennello trasversale esistente, risulta che le modifiche apportate alla situazione attuale non provocano alterazioni nel trasporto sedimentario longitudinale, peraltro solo potenziale, né alterazioni del campo idrodinamico.

## 10.2 Suggerimenti

Dallo studio appare abbastanza evidente la necessità di mantenere le scogliere parallele attualmente presenti, anche se si suggerisce, in fase di progettazione definitiva, di modificarne la configurazione in modo da poter disporre di un arenile più ampio e di una migliore qualità delle acque di balneazione.

I risultati del presente studio rappresentano la base per le successive e indispensabili analisi di dettaglio finalizzate alla valutazione dell'efficacia degli interventi previsti, ma, nel corso del progetto definitivo, dovranno essere effettuati rilievi batimetrici di dettaglio, finalizzati ad un'accurata conoscenza dell'orientazione e delle pendenze della spiaggia sommersa, e prelievo di campioni di sedimento lungo opportuni transetti, che potranno anche essere selezionati sulla base dei risultati qui presentati.

Nello studio finalizzato alla progettazione definitiva sarà inoltre da analizzare l'influenza del torrente Bisagno, che potrebbe rivestire una certa importanza nella dinamica litoranea locale; sarà dunque necessario reperire dati relativi alle portate del torrente e al suo apporto solido, in modo da valutare la sua eventuale capacità di rappresentare una sorgente di sedimento per l'area.

Si raccomanda infine l'utilizzo di apposita modellistica numerica 3D, la sola in grado di quantificare con cura i volumi di sedimento sollevati e trasportati nelle varie condizioni climatiche e di simulare la dinamica sedimentaria di dettaglio nelle aree di realizzazione dei progetti previsti.

## 11. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. REGIONE LIGURIA -Dipartimento PIanificazione Territoriale e Paesistica - PTC DELLA COSTA – Progetto del Piano ex art. 4 L.R. 39/84 adottato con D.G.R. n. 209 del 26.02.1999, fascicolo 2.2.1. “Difesa costiera e ripascimento delle spiagge. Storia e ricognizione delle condizioni attuali, problemi aperti, indirizzi di intervento”

2. ENEA – Ferretti, O., Delbono, I., Furia, S., Barsanti, M., Bozzano, A. (2003)- Elementi di gestione costiera. Parte Terza. Difese costiere “rigide”. Distribuzione e valutazione delle tipologie”

3. European Centre for medium-range weather forecast, Reading, Inghilterra - http://www.ecmwf/.int

4. Cleopatra (ChemicaL Effluent & Oil Pollution Alert and TRAcking) UE Project - www.eurimage.com/cleopatra/

5. RESIO D.T., (1978) . “Some aspects of extreme wave prediction related to climatic variations” – Proc. 1st Offsh. Tech.Conf., Houston, Texas, vol.3, 1967-1980

6. PIANC, (1986). List of sea state parameters

7. BOCCOTTI, P (1997) “Idraulica marittima”, UTET

8. DUCHINI E., (2004). “Modelli idrodinamici in acque profonde e in acque costiere: applicazione all’area offshore Egitto”, Università di Pisa, Corso di laurea in Scienze Ambientali, Tesi di laurea

9. SWAN BOOIJ, N., L.H. HOLTHUIJSEN AND R.C. RIS, (1996). The "SWAN" wave model for shallow water, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, pp. 668-676

10. ASTRALDI A., BACCIOLA D., BORGHINI M., DELL’AMICO F., GALLI C., GASPARINI G. P., LAZZONI E., NERI P. L., RASO G., (1993). "Caratteristiche stagionali delle masse d'acqua nell'Arcipelago Toscano" - ENEA.

11. ASTRALDI M., BORGHINI M., GALLI C., GASPARINI G. P., LAZZONI E. (1993). "Caratteristiche della circolazione nell'Arcipelago Toscano", Regione Toscana.

12. KIRK, R.M., (1980). “Mixed sand and gravel beaches: morphology, processes and sediments”. Progress in Physical Geography, 4 (2), 189-210;

13. COASTAL ENGINEERING MANUAL. (2002). Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.(in 6 volumes). Available on-line at: http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/cecw.htm

14. KOMAR, P. D., AND INMAN, D. L. (1970). “Longshore sand transport on beaches”, Journal of Geophysical Research 75(30), 5514-5527.

15. LEIDERSDORF, C. B., GADD, P. E., AND MCDOUGAL, W. G. (1988). “Arctic slope protection methods”, Proceedings, 21st International Conference on Coastal Engineering, Malaga, 1687-1701, ASCE.

16. NICHOLLS, R. J., AND WEBBER, N. B. (1987). “Aluminum pebble tracer experiments on Hurst Castle Spit”, Proceedings,Coastal Sediments ’87, New Orleans, 1563-1577, ASCE.

17. NICHOLLS, R. J., AND WRIGHT, P. (1991). “Longshore transport of pebbles, experimental estimates of K”, Proceedings,Coastal Sediments ’91, Seattle, 920-933, ASCE.

18. CHADWICK, A. J. (1989). “Field measurements and numerical model verification of coastal shingle transport”, Advancesin water modeling and measurement. M. H. Palmer, ed., British Hydromechanics Research Association, Cranfield,387-402.

19. SWART, D. H. (1976). “Predictive equations regarding coastal transports,” Proc 15th Coastal Eng Conf, 1113-1132, ASCE.

20. DEL VALLE, R., MEDINA, R., AND LOSADA, M. A. (1993). “Dependence of coefficient K on grain size,” Technical Note No. 3062, Journal of Waterways, Port, Coastal, and Ocean Engineering 119(5), 568-574.

21. KING, D.B.Jr.,(2005). “Influence of grain size on sediment transport rates with emphasis on total longshore rate”, US Army Corps of Engineering, ERDC/CHL CHETN-II-48

**INDICE DELLE TABELLE**

TAB. 5.1 - DISTRIBUZIONE DELLA FREQUENZA PERCENTUALE DI VELOCITA' DEL VENTO AL LARGO PER DIREZIONE DI PROVENIENZA

TAB. 5.2 - VALORI ESTREMI DEL VENTO AL LARGO

TAB. 6.1 - DISTRIBUZIONE DELLA FREQUENZA PERCENTUALE DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA AL LARGO PER DIREZIONE DI PROVENIENZA

TAB. 6.2 - DISTRIBUZIONE DELLA FREQUENZA PERCENTUALE DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA AL LARGO IN FUNZIONE DEL PERIODO MEDIO

TAB. 6.3 - VALORI ESTREMI DEL MOTO ONDOSO AL LARGO

TAB. 6.4 - MONEGLIA: CLIMA IN CORRISPONDENZA IN CORRISPONDENZA DELL'ENTRATA DEL GOLFO ALLA PROFONDITA' - 19 M

TAB. 6.5 - VALORI ESTREMI CALCOLATI ALLA PROFONDITA' DI 19 m IN CORRISPONDENZA DELL'ENTRATA DEL GOLFO

TAB. 6.6 - MONEGLIA: VALORI DI ALTEZZA SIGNIFICATIVA Hs, PERIODO MEDIO $T_m$, DIREZIONE A COSTA Dir E DISSIPAZIONE Dis NEI PUNTI CONSIDERATI (Fig. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 1 ANNO

TAB. 6.7 - MONEGLIA: VALORI DI ALTEZZA SIGNIFICATIVA $H_s$, PERIODO MEDIO $T_m$, DIREZIONE A COSTA Dir E DISSIPAZIONE Dis NEI PUNTI CONSIDERATI (Fig. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 10 ANNI

TAB. 6.8 - MONEGLIA: VALORI DI ALTEZZA SIGNIFICATIVA $H_s$, PERIODO MEDIO $T_m$, DIREZIONE A COSTA Dir E DISSIPAZIONE Dis NEI PUNTI CONSIDERATI (Fig. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 25 ANNI

TAB. 7.1 - VALORI DELLA CORRENTE LONGITUDINALE (VX) E TRASVERSALE (VY) INDOTTA DAI VENTI TIPICI NEI PUNTI CONSIDERATI (FIG. 2.3)

TAB. 7.2 - VALORI DELLA CORRENTE LONGITUDINALE (VX) E TRASVERSALE (VY) INDOTTA DAI VENTI ESTREMI NEI PUNTI CONSIDERATI (FIG. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 1 ANNO

TAB. 7.3 - VALORI DELLA CORRENTE LONGITUDINALE (VX) E TRASVERSALE (VY) INDOTTA DAI VENTI ESTREMI NEI PUNTI CONSIDERATI (FIG. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 10 ANNI

TAB. 7.4 - VALORI DELLA CORRENTE LONGITUDINALE (VX) E TRASVERSALE (VY) INDOTTA DAI VENTI ESTREMI NEI PUNTI CONSIDERATI (FIG. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 25 ANNI

TAB. 7.5 - TABELLA RIASSUNTIVA DELLA CORRENTE LONGITUDINALE E TRASVERSALE NEI PUNTI CONSIDERATI

TAB. 8.1 - AMPIEZZA E FASE DELLE COMPONENTI DI MAREA A LA SPEZIA

TAB. 8.2 – VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO A LA SPEZIA DOVUTO ALLA MAREA

TAB. 8.3 – VALORI ESTREMI DEL LIVELLO DEL MARE INDOTTI DA MAREA E VENTO

TAB. 9.1 - MONEGLIA: CARATTERISTICHE DELLE SEZIONI BATIMETRICHE INDIVIDUATE

TAB. 9.2 - MONEGLIA: SINTESI DEI RISULTATI DELLO STUDIO DEL TRASPORTO LONGITUDINALE

TAB. 9.3 - MONEGLIA: TIPI E PROFONDITA' DI FRANGIMENTO

TAB. 9.4 - MONEGLIA: VALORI TIPICI DI "SET-UP" E "RUN-UP" NEI VARI PROFILI

TAB. 9.5 - MONEGLIA: LIMITI DELLA SPIAGGIA SOMMERSA NEI VARI PROFILI

TAB. 9.6 - VALORI ESTREMI DI "SET-UP" E "RUN-UP" NEI VARI PROFILI

TAB. 9.7 - ARRETRAMENTO DELLA LINEA DI RIVA NEL PROFILO C – SENZA LE BARRIERE PRESENTI

| DIR | W(m/s) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (°N) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | >28 | TOT |
| **0** | 1.6 | 2.1 | 2.2 | 1.3 | 0.8 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | * | * | * | | | | **8.8** |
| **30** | 1.7 | 3.5 | 3.8 | 2.8 | 1.8 | 0.8 | 0.4 | 0.1 | * | * | * | | | | | **15.2** |
| **60** | 1.7 | 2.5 | 1.9 | 1.4 | 0.9 | 0.6 | 0.2 | 0.1 | * | * | * | | | | | **9.1** |
| **90** | 1.5 | 1.6 | 1.1 | 0.9 | 0.4 | 0.2 | 0.0 | * | * | * | | | | | | **5.7** |
| **120** | 1.4 | 1.7 | 1.6 | 1.1 | 0.6 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | * | * | | | | | | **7.0** |
| **150** | 1.6 | 2.8 | 1.9 | 1.2 | 0.6 | 0.3 | 0.1 | * | * | * | | | | | | **8.6** |
| **180** | 1.9 | 5.4 | 3.3 | 1.6 | 0.6 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | * | | * | | | | | **13.5** |
| **210** | 2.1 | 4.1 | 3.0 | 1.9 | 1.2 | 0.9 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | * | | * | | | | **14.0** |
| **240** | 1.7 | 2.6 | 1.4 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | * | * | | | | | **7.40** |
| **270** | 1.3 | 1.4 | 0.6 | 0.2 | 0.1 | * | * | * | * | | | | | | | **3.6** |
| **300** | 1.2 | 1.0 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | * | * | | | | | | | | | **2.9** |
| **330** | 1.4 | 1.1 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | * | * | * | * | * | | | | **4.3** |
| **TOT** | **19.3** | **29.6** | **21.8** | **13.6** | **7.8** | **4.3** | **2.0** | **0.9** | **0.4** | **0.2** | **0.1** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **100.0** |

*** significa percentuali <0.01 %**

TAB. 5.1 - DISTRIBUZIONE DELLA FREQUENZA PERCENTUALE DI VELOCITA' DEL VENTO AL LARGO PER DIREZIONE DI PROVENIENZA

| DIR (°N) | PERIODO DI RITORNO (anni) | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 10 | 25 |
| | W (m/s) | W (m/s) | W (m/s) |
| **0** | 17.2 | 22.6 | 24.5 |
| **30** | 16.7 | 20.4 | 21.8 |
| **60** | 16.1 | 20.7 | 22.4 |
| **90** | 14.2 | 19.7 | 21.3 |
| **120** | 15.0 | 19.5 | 21.1 |
| **150** | 14.3 | 18.4 | 20.0 |
| **180** | 15.0 | 18.9 | 20.6 |
| **210** | 17.6 | 22.2 | 23.7 |
| **240** | 20.2 | 24.2 | 25.7 |
| **270** | 10.9 | 16.1 | 18.1 |
| **300** | 10.1 | 15.2 | 17.1 |
| **330** | 15.2 | 22.4 | 25.2 |
| **OMNI** | 20.2 | 24.2 | 25.7 |

TAB. 5.2 - VALORI ESTREMI DEL VENTO AL LARGO

| DIR | Hs (m) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (°N) | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | >7.0 | TOT |
| **0** | 0.96 | 0.91 | 0.16 | | | | | | | | | | | | | **2.04** |
| **15** | 1.36 | 1.15 | 0.27 | | | | | | | | | | | | | **2.78** |
| **30** | 0.91 | 0.50 | 0.08 | | | | | | | | | | | | | **1.49** |
| **45** | 0.41 | 0.15 | 0.02 | | | | | | | | | | | | | **0.58** |
| **60** | 0.31 | 0.13 | 0.02 | | | | | | | | | | | | | **0.46** |
| **75** | 0.23 | 0.09 | 0.02 | | | | | | | | | | | | | **0.34** |
| **90** | 0.24 | 0.08 | 0.01 | | | | | | | | | | | | | **0.33** |
| **105** | 0.25 | 0.12 | 0.03 | | | | | | | | | | | | | **0.39** |
| **120** | 0.37 | 0.39 | 0.16 | 0.02 | | | | | | | | | | | | **0.94** |
| **135** | 0.66 | 0.98 | 0.26 | 0.06 | 0.01 | | | | | | | | | | | **1.96** |
| **150** | 1.22 | 1.43 | 0.48 | 0.09 | 0.01 | | | | | | | | | | | **3.23** |
| **165** | 1.75 | 2.01 | 1.04 | 0.29 | 0.07 | 0.01 | * | | | | | | | | | **5.18** |
| **180** | 2.42 | 2.64 | 0.73 | 0.27 | 0.07 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | | | | | | | | **6.19** |
| **195** | 2.55 | 1.75 | 0.50 | 0.16 | 0.09 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | | | | | | | | **5.08** |
| **210** | 2.65 | 2.12 | 1.15 | 0.45 | 0.19 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | | | | | | | | **6.67** |
| **225** | 4.29 | 5.39 | 3.62 | 2.81 | 1.72 | 0.79 | 0.37 | 0.18 | 0.05 | 0.01 | * | * | * | | | **19.23** |
| **240** | 6.30 | 7.12 | 3.35 | 1.69 | 1.00 | 0.75 | 0.42 | 0.33 | 0.17 | 0.08 | 0.04 | 0.01 | * | * | | **21.26** |
| **255** | 4.29 | 2.51 | 0.75 | 0.25 | 0.10 | 0.04 | 0.01 | * | | | | | | | | **7.97** |
| **270** | 2.84 | 1.21 | 0.26 | 0.07 | 0.05 | 0.02 | | | | | | | | | | **4.45** |
| **285** | 1.90 | 0.89 | 0.19 | 0.04 | 0.01 | | | | | | | | | | | **3.03** |
| **300** | 1.31 | 0.54 | 0.13 | 0.03 | 0.01 | | | | | | | | | | | **2.02** |
| **315** | 0.81 | 0.53 | 0.14 | | | | | | | | | | | | | **1.48** |
| **330** | 0.67 | 0.56 | 0.11 | | | | | | | | | | | | | **1.34** |
| **345** | 0.70 | 0.66 | 0.11 | | | | | | | | | | | | | **1.46** |
| **TOT** | **39.39** | **33.86** | **13.57** | **6.24** | **3.33** | **1.73** | **0.84** | **0.55** | **0.22** | **0.09** | **0.04** | **0.01** | **0.01** | * | | **99.88** |

**CALMA 0.12**

*** significa percentuali <0.01 %**

TAB. 6.1 - DISTRIBUZIONE DELLA FREQUENZA PERCENTUALE DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA AL LARGO PER DIREZIONE DI PROVENIENZA

| Tm | Hs (m) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (s) | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | >7.0 | TOT |
| **2** | * | | | | | | | | | | | | | | | **0.00** |
| **3** | 5.53 | 0.35 | | | | | | | | | | | | | | **5.88** |
| **4** | 20.08 | 10.98 | 0.96 | * | | | | | | | | | | | | **32.02** |
| **5** | 10.47 | 12.52 | 4.86 | 0.92 | 0.09 | | | | | | | | | | | **28.86** |
| **6** | 2.69 | 6.26 | 4.53 | 2.83 | 1.12 | 0.27 | 0.03 | 0.01 | * | | | | | | | **17.73** |
| **7** | 0.53 | 2.71 | 2.07 | 1.73 | 1.44 | 0.72 | 0.26 | 0.17 | 0.04 | 0.01 | * | | | | | **9.67** |
| **8** | 0.05 | 0.95 | 0.82 | 0.62 | 0.59 | 0.57 | 0.36 | 0.19 | 0.06 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | | | | **4.27** |
| **9** | 0.02 | 0.09 | 0.25 | 0.17 | 0.10 | 0.17 | 0.17 | 0.13 | 0.09 | 0.04 | 0.01 | * | * | | | **1.25** |
| **10** | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | * | * | | **0.19** |
| **11** | * | | | | | | * | | | | | | | | | **0.01** |
| **12** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **TOT** | **39.39** | **33.86** | **13.51** | **6.28** | **3.34** | **1.73** | **0.84** | **0.54** | **0.22** | **0.09** | **0.04** | **0.02** | **0.01** | **0.00** | | **99.88** |

**CALMA 0.12**

***significa percentuali <0.01 %**

TAB. 6.2 - DISTRIBUZIONE DELLA FREQUENZA PERCENTUALE DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA AL LARGO IN FUNZIONE DEL PERIODO MEDIO

| DIR (°N) | PERIODO DI RITORNO (anni) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | | 10 | | 25 | |
| | Hs (m) | Tm (s) | Hs (m) | Tm (s) | Hs (m) | Tm (s) |
| **135** | 2.0 | 5.1 | 2.7 | 5.9 | 2.9 | 6.2 |
| **150** | 2.0 | 5.1 | 2.7 | 5.9 | 2.9 | 6.2 |
| **165** | 2.5 | 5.7 | 3.2 | 6.4 | 3.5 | 6.7 |
| **180** | 2.9 | 6.2 | 3.9 | 7.1 | 4.3 | 7.5 |
| **195** | 2.8 | 6.0 | 4.0 | 7.2 | 4.5 | 7.7 |
| **210** | 3.1 | 6.3 | 4.2 | 7.4 | 4.6 | 7.7 |
| **225** | 4.5 | 7.7 | 5.5 | 8.4 | 5.9 | 8.7 |
| **240** | 5.4 | 8.4 | 7.0 | 9.5 | 7.7 | 9.9 |
| **255** | 2.8 | 6.0 | 3.8 | 7.0 | 4.2 | 7.4 |
| **270** | 2.3 | 5.5 | 3.5 | 6.7 | 4.0 | 7.2 |
| **OMNI** | 5.6 | 8.6 | 7.1 | 9.7 | 7.7 | 9.9 |

TAB. 6.3 - VALORI ESTREMI DEL MOTO ONDOSO AL LARGO

| DIR | Hs (m) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (°N) | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | TOT |
| 0 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 15 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 30 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 45 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 60 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 75 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 90 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 105 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 120 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 135 | 0.31 | 0.38 | 0.08 | 0.01 | | | | | | | | | 0.78 |
| 150 | 0.95 | 1.23 | 0.34 | 0.06 | | | | | | | | | 2.58 |
| 165 | 1.48 | 1.74 | 0.72 | 0.16 | 0.02 | | | | | | | | 4.13 |
| 180 | 2.10 | 2.39 | 0.97 | 0.32 | 0.08 | 0.01 | | | | | | | 5.87 |
| 195 | 2.49 | 2.23 | 0.64 | 0.23 | 0.09 | 0.03 | 0.02 | | | | | | 5.72 |
| 210 | 2.60 | 1.95 | 0.84 | 0.31 | 0.15 | 0.06 | 0.02 | | | | | | 5.92 |
| 225 | 3.47 | 3.83 | 2.50 | 1.78 | 1.22 | 0.60 | 0.21 | 0.04 | 0.01 | | | | 13.66 |
| 240 | 5.35 | 6.51 | 3.70 | 2.43 | 1.73 | 0.89 | 0.40 | 0.17 | 0.08 | 0.04 | 0.01 | | 21.30 |
| 255 | 5.29 | 4.65 | 1.84 | 0.79 | 0.41 | 0.18 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | | | | 13.23 |
| 270 | 2.10 | 1.09 | 0.28 | 0.07 | 0.02 | | | | | | | | 3.56 |
| 285 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 300 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 315 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 330 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 345 | | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| TOT | 26.14 | 26.00 | 11.90 | 6.16 | 3.72 | 1.77 | 0.70 | 0.23 | 0.09 | 0.04 | 0.01 | | 76.74 |

TAB. 6.4 - MONEGLIA: CLIMA IN CORRISPONDENZA IN CORRISPONDENZA DELL'ENTRATA DEL GOLFO ALLA PROFONDITA' - 19 M

| PERIODO DI RITORNO= 1 ANNO | | | |
|---|---|---|---|
| **Direzione a largo (°N)** | **Direzione all'imboccatura (°N)** | **Hs (m)** | **Tm (s)** |
| **135** | 139.1 | 1.7 | 5.1 |
| **150** | 152.0 | 1.9 | 5.1 |
| **165** | 167.7 | 2.3 | 5.7 |
| **180** | 182.4 | 2.7 | 6.2 |
| **195** | 196.0 | 2.6 | 6.0 |
| **210** | 210.2 | 2.9 | 6.3 |
| **225** | 222.8 | 4.1 | 7.7 |
| **240** | 233.8 | 4.8 | 8.4 |
| **255** | 252.0 | 2.6 | 6.0 |
| **270** | 267.2 | 2.1 | 5.5 |

| PERIODO DI RITORNO= 10 ANNI | | | |
|---|---|---|---|
| **Direzione a largo (°N)** | **Direzione all'imboccatura (°N)** | **Hs (m)** | **Tm (s)** |
| **135** | 144.7 | 1.9 | 5.9 |
| **150** | 155.3 | 2.3 | 5.9 |
| **165** | 169.9 | 2.8 | 6.4 |
| **180** | 184.5 | 3.5 | 7.1 |
| **195** | 197.3 | 3.6 | 7.2 |
| **210** | 210.3 | 3.8 | 7.4 |
| **225** | 222.2 | 5.0 | 8.4 |
| **240** | 231.8 | 6.3 | 9.5 |
| **255** | 248.7 | 3.4 | 7.0 |
| **270** | 261.7 | 2.9 | 6.7 |

| PERIODO DI RITORNO= 25 ANNI | | | |
|---|---|---|---|
| **Direzione a largo (°N)** | **Direzione all'imboccatura (°N)** | **Hs (m)** | **Tm (s)** |
| **135** | 146.7 | 2.0 | 6.2 |
| **150** | 156.6 | 2.5 | 6.2 |
| **165** | 170.8 | 3.1 | 6.7 |
| **180** | 185.3 | 3.8 | 7.5 |
| **195** | 197.9 | 4.1 | 7.7 |
| **210** | 210.3 | 4.2 | 7.7 |
| **225** | 221.9 | 5.4 | 8.7 |
| **240** | 231.1 | 7.0 | 9.9 |
| **255** | 223.1 | 3.8 | 7.4 |
| **270** | 259.2 | 3.2 | 7.2 |

TAB. 6.5 - VALORI ESTREMI CALCOLATI ALLA PROFONDITA' DI 19 m IN CORRISPONDENZA DELL'ENTRATA DEL GOLFO

| | PERIODO DI RITORNO 1 ANNO - PUNTI DI CALCOLO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Direzione al largo (°N) | A | | | | B | | | | C | | | | D | | | | E | | | | F | | | |
| | (5,1 m) | | | | (5,0 m) | | | | (5,0 m) | | | | (5,0 m) | | | | (5,1 m) | | | | (5,0 m) | | | |
| | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) |
| 135 | 1.1 | 5.1 | 141 | 0.00006 | 0.9 | 5.0 | 128 | 0.00004 | 0.8 | 5.0 | 115 | 0.00003 | 0.8 | 5.2 | 110 | 0.00003 | 0.6 | 5.1 | 97 | 0.00002 | 0.9 | 5.2 | 105 | 0.00004 |
| 150 | 1.4 | 5.1 | 137 | 0.00010 | 1.2 | 5.0 | 125 | 0.00008 | 1.1 | 5.1 | 112 | 0.00006 | 1.1 | 5.2 | 107 | 0.00006 | 0.8 | 5.0 | 95 | 0.00003 | 1.2 | 5.2 | 102 | 0.00007 |
| 165 | 1.9 | 5.7 | 133 | 0.00039 | 1.7 | 5.6 | 120 | 0.00024 | 1.7 | 5.7 | 105 | 0.00023 | 1.7 | 5.8 | 101 | 0.00023 | 1.3 | 5.7 | 89 | 0.00010 | 1.7 | 5.8 | 95 | 0.00024 |
| 180 | 2.2 | 6.2 | 129 | 0.00247 | 2.1 | 5.9 | 116 | 0.00156 | 2.2 | 6.1 | 99 | 0.00309 | 2.3 | 6.1 | 95 | 0.00343 | 1.9 | 6.2 | 83 | 0.00045 | 2.3 | 6.3 | 88 | 0.00334 |
| 195 | 2.1 | 6.0 | 125 | 0.00110 | 2.0 | 5.8 | 113 | 0.00082 | 2.2 | 5.9 | 94 | 0.00325 | 2.3 | 6.0 | 90 | 0.00385 | 2.0 | 6.0 | 79 | 0.00087 | 2.3 | 6.1 | 83 | 0.00388 |
| 210 | 2.1 | 6.3 | 121 | 0.00161 | 2.0 | 6.0 | 109 | 0.00122 | 2.5 | 6.2 | 89 | 0.00717 | 2.5 | 6.2 | 84 | 0.00851 | 2.4 | 6.3 | 73 | 0.00538 | 2.7 | 6.4 | 75 | 0.01365 |
| 225 | 2.7 | 7.4 | 120 | 0.01286 | 2.4 | 6.9 | 107 | 0.00524 | 2.7 | 7.1 | 84 | 0.01552 | 2.8 | 7.2 | 77 | 0.01721 | 3.0 | 7.3 | 68 | 0.02636 | 3.5 | 7.6 | 67 | 0.06594 |
| 240 | 2.8 | 7.9 | 118 | 0.01552 | 2.4 | 7.3 | 105 | 0.00563 | 2.8 | 7.6 | 81 | 0.01725 | 2.9 | 7.7 | 73 | 0.01930 | 3.2 | 7.8 | 64 | 0.03426 | 3.7* | 8.1 | 62 | 0.09412 |
| 255 | 1.1 | 6.3 | 112 | 0.00006 | 1.0 | 6.0 | 101 | 0.00006 | 1.8 | 6.0 | 76 | 0.00035 | 2.1 | 6.0 | 67 | 0.00179 | 2.2 | 6.0 | 58 | 0.00238 | 2.4 | 6.1 | 55 | 0.00632 |
| 270 | 0.6 | 5.9 | 109 | 0.00002 | 0.5 | 5.5 | 97 | 0.00002 | 1.1 | 5.6 | 72 | 0.00007 | 1.4 | 5.6 | 62 | 0.00012 | 1.6 | 5.6 | 52 | 0.00016 | 1.8 | 5.6 | 48 | 0.00039 |

TAB. 6.6 - MONEGLIA: VALORI DI ALTEZZA SIGNIFICATIVA Hs, PERIODO MEDIO $T_m$, DIREZIONE A COSTA Dir E DISSIPAZIONE Dis NEI PUNTI CONSIDERATI (Fig. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 1 ANNO

| | PERIODO DI RITORNO 10 ANNI - PUNTI DI CALCOLO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Direzione al largo (°N) | A | | | | B | | | | C | | | | D | | | | E | | | | F | | | |
| | (5,1 m) | | | | (5,0 m) | | | | (5,0 m) | | | | (5,0 m) | | | | (5,1 m) | | | | (5,0 m) | | | |
| | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) |
| 135 | 1.3 | 5.9 | 139 | 0.00010 | 1.2 | 5.9 | 125 | 0.00008 | 1.0 | 5.9 | 111 | 0.00006 | 1.0 | 6.1 | 107 | 0.00006 | 0.7 | 6.0 | 93 | 0.00003 | 1.1 | 6.1 | 100 | 0.00007 |
| 150 | 1.8 | 5.9 | 136 | 0.00025 | 1.6 | 5.8 | 122 | 0.00016 | 1.5 | 5.9 | 108 | 0.00013 | 1.5 | 6.0 | 104 | 0.00013 | 1.1 | 5.9 | 91 | 0.00007 | 1.5 | 6.1 | 98 | 0.00014 |
| 165 | 2.3 | 6.4 | 133 | 0.00338 | 2.1 | 6.1 | 118 | 0.00187 | 2.2 | 6.2 | 102 | 0.00219 | 2.2 | 6.3 | 99 | 0.00237 | 1.7 | 6.4 | 86 | 0.00022 | 2.2 | 6.5 | 92 | 0.00237 |
| 180 | 2.8 | 6.9 | 129 | 0.01769 | 2.4 | 6.5 | 115 | 0.00638 | 2.6 | 6.7 | 96 | 0.01106 | 2.6 | 6.7 | 93 | 0.01168 | 2.5 | 6.8 | 81 | 0.00671 | 2.9 | 7.1 | 84 | 0.02322 |
| 195 | 2.8 | 7.0 | 126 | 0.01679 | 2.4 | 6.6 | 112 | 0.00620 | 2.7 | 6.8 | 92 | 0.01286 | 2.7 | 6.8 | 88 | 0.01371 | 2.7 | 6.9 | 77 | 0.01280 | 3.1 | 7.2 | 79 | 0.03393 |
| 210 | 2.8 | 7.1 | 123 | 0.01487 | 2.4 | 6.7 | 109 | 0.00577 | 2.7 | 6.9 | 88 | 0.01431 | 2.7 | 7.0 | 82 | 0.01557 | 2.9 | 7.1 | 72 | 0.01958 | 3.3 | 7.3 | 73 | 0.04798 |
| 225 | 3.1 | 7.8 | 121 | 0.02945 | 2.5 | 7.3 | 107 | 0.00763 | 2.8 | 7.6 | 84 | 0.01782 | 2.9 | 7.7 | 77 | 0.01947 | 3.1 | 7.8 | 68 | 0.03284 | 3.7* | 8.1 | 67 | 0.09431 |
| 240 | 3.3 | 8.6 | 120 | 0.03874 | 2.6 | 8.0 | 105 | 0.00858 | 2.9 | 8.4 | 82 | 0.01995 | 2.9 | 8.5 | 74 | 0.02193 | 3.3 | 8.6 | 65 | 0.04029 | 3.9* | 8.9 | 63 | 0.13110 |
| 255 | 1.6 | 7.2 | 114 | 0.00017 | 1.5 | 6.8 | 102 | 0.00014 | 2.5 | 6.6 | 78 | 0.00672 | 2.6 | 6.7 | 68 | 0.01149 | 2.8 | 6.8 | 59 | 0.01721 | 3.1 | 7.0 | 57 | 0.03736 |
| 270 | 1.0 | 7.2 | 112 | 0.00006 | 0.9 | 6.8 | 100 | 0.00005 | 1.8 | 6.6 | 74 | 0.00038 | 2.2 | 6.5 | 64 | 0.00294 | 2.4 | 6.6 | 55 | 0.00496 | 2.7 | 6.7 | 51 | 0.01289 |

TAB. 6.7 - MONEGLIA: VALORI DI ALTEZZA SIGNIFICATIVA $H_s$, PERIODO MEDIO $T_m$, DIREZIONE A COSTA Dir E DISSIPAZIONE Dis NEI PUNTI CONSIDERATI (Fig. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 10 ANNI

| | PERIODO DI RITORNO 25 ANNI - PUNTI DI CALCOLO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Direzione al largo (°N) | A | | | | B | | | | C | | | | D | | | | E | | | | F | | | |
| | (5,1 m) | | | | (5,0 m) | | | | (5,0 m) | | | | (5,0 m) | | | | (5,1 m) | | | | (5,0 m) | | | |
| | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) | Hs (m) | Tm (s) | Dir (°N) | DIS ($m^2/s$) |
| 135 | 1.4 | 6.2 | 138 | 0.00012 | 1.3 | 6.2 | 124 | 0.00010 | 1.2 | 6.2 | 110 | 0.00008 | 1.1 | 6.4 | 106 | 0.00008 | 0.8 | 6.3 | 92 | 0.00004 | 1.2 | 6.4 | 99 | 0.00009 |
| 150 | 1.9 | 6.2 | 136 | 0.00059 | 1.8 | 6.0 | 122 | 0.00030 | 1.7 | 6.1 | 107 | 0.00021 | 1.7 | 6.3 | 103 | 0.00021 | 1.2 | 6.3 | 90 | 0.00009 | 1.7 | 6.4 | 97 | 0.00024 |
| 165 | 2.5 | 6.6 | 132 | 0.00780 | 2.3 | 6.2 | 118 | 0.00374 | 2.4 | 6.4 | 102 | 0.00485 | 2.4 | 6.5 | 98 | 0.00519 | 1.9 | 6.6 | 85 | 0.00056 | 2.4 | 6.8 | 91 | 0.00614 |
| 180 | 3.0 | 7.2 | 129 | 0.02490 | 2.5 | 6.8 | 114 | 0.00751 | 2.7 | 7.0 | 96 | 0.01294 | 2.7 | 7.0 | 92 | 0.01360 | 2.7 | 7.1 | 80 | 0.01080 | 3.1 | 7.4 | 83 | 0.03285 |
| 195 | 3.0 | 7.3 | 126 | 0.02828 | 2.5 | 6.9 | 112 | 0.00777 | 2.7 | 7.1 | 92 | 0.01514 | 2.8 | 7.2 | 87 | 0.01604 | 2.9 | 7.3 | 76 | 0.01951 | 3.3 | 7.6 | 78 | 0.05179 |
| 210 | 3.0 | 7.3 | 123 | 0.02356 | 2.5 | 6.9 | 109 | 0.00706 | 2.7 | 7.1 | 88 | 0.01579 | 2.8 | 7.2 | 82 | 0.01703 | 3.0 | 7.3 | 72 | 0.02414 | 3.4 | 7.6 | 72 | 0.06272 |
| 225 | 3.2 | 8.0 | 121 | 0.03609 | 2.6 | 7.5 | 107 | 0.00826 | 2.8 | 7.8 | 84 | 0.01860 | 2.9 | 7.9 | 77 | 0.02027 | 3.2 | 8.0 | 68 | 0.03478 | 3.8* | 8.3 | 67 | 0.10538 |
| 240 | 3.4 | 8.8 | 120 | 0.04518 | 2.6 | 8.4 | 105 | 0.00908 | 2.9 | 8.7 | 82 | 0.02080 | 3.0 | 8.8 | 74 | 0.02276 | 3.3 | 8.9 | 65 | 0.04186 | 4.2* | 9.2 | 63 | 0.14284 |
| 255 | 2.5 | 7.2 | 120 | 0.00740 | 2.3 | 6.7 | 107 | 0.00380 | 2.7 | 6.9 | 84 | 0.01412 | 2.7 | 7.0 | 77 | 0.01590 | 2.9 | 7.1 | 68 | 0.02257 | 3.3 | 7.3 | 67 | 0.05332 |
| 270 | 1.2 | 7.6 | 113 | 0.00010 | 1.1 | 7.2 | 101 | 0.00008 | 2.2 | 6.8 | 75 | 0.00185 | 2.5 | 6.8 | 65 | 0.00742 | 2.7 | 7.0 | 56 | 0.01163 | 3.0 | 7.2 | 53 | 0.02628 |

TAB. 6.8 - MONEGLIA: VALORI DI ALTEZZA SIGNIFICATIVA $H_s$, PERIODO MEDIO $T_m$, DIREZIONE A COSTA Dir E DISSIPAZIONE Dis NEI PUNTI CONSIDERATI (Fig. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 25 ANNI

| VELOCITA' DELLE CORRENTI LONGITUDINALI E TRASVERSALI (cm/s) INDOTTE DAI VENTI TIPICI | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Direzione al largo (°N) | A | | B | | C | | D | | E | | F | |
| | (5,1 m) | | (5,0 m) | | (5,0 m) | | (5,0 m) | | (5,1 m) | | (5,0 m) | |
| | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy |
| 30 | -15 | 2 | -6 | 1 | 4 | 0 | 8 | 2 | 11 | 2 | 14 | 0 |
| 120 | -17 | 2 | -10 | -2 | -17 | 2 | -18 | -4 | -17 | -2 | -21 | 0 |
| 210 | 15 | -2 | 8 | -1 | -4 | 0 | -8 | -2 | -12 | -1 | -14 | 0 |
| 270 | 14 | -2 | 9 | 4 | 19 | -2 | 19 | 4 | 19 | 2 | 20 | 0 |

TAB. 7.1 - VALORI DELLA CORRENTE LONGITUDINALE (VX) E TRASVERSALE (VY) INDOTTA DAI VENTI TIPICI NEI PUNTI CONSIDERATI (FIG. 2.3)

| VELOCITA' DELLE CORRENTI LONGITUDINALI E TRASVERSALI (cm/s)- PERIODO DI RITORNO 1 ANNO | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Direzione al largo (°N) | A | | B | | C | | D | | E | | F | |
| | (5,1 m) | | (5,0 m) | | (5,0 m) | | (5,0 m) | | (5,1 m) | | (5,0 m) | |
| | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy |
| 30 | -25 | 4 | -11 | 1 | 10 | -1 | 16 | 3 | 20 | 3 | 24 | 0 |
| 120 | -26 | 3 | -15 | -3 | -25 | 4 | -27 | -5 | -25 | -3 | -31 | -1 |
| 210 | 26 | -3 | 11 | -2 | -9 | 0 | -15 | -3 | -21 | -2 | -26 | 0 |
| 270 | 14 | -2 | 10 | 4 | 19 | -2 | 19 | 4 | 19 | 2 | 20 | 0 |

TAB. 7.2 - VALORI DELLA CORRENTE LONGITUDINALE (VX) E TRASVERSALE (VY) INDOTTA DAI VENTI ESTREMI NEI PUNTI CONSIDERATI (FIG. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 1 ANNO

| VELOCITA' DELLE CORRENTI LONGITUDINALI E TRASVERSALI (cm/s)- PERIODO DI RITORNO 10 ANNI | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Direzione a largo (°N) | A | | B | | C | | D | | E | | F | |
| | (5,1 m) | | (5,0 m) | | (5,0 m) | | (5,0 m) | | (5,1 m) | | (5,0 m) | |
| | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy |
| **30** | -29 | 5 | -14 | 0 | 12 | -1 | 19 | 4 | 28 | 1 | 29 | 0 |
| **120** | -31 | 3 | -18 | -3 | -31 | 5 | -33 | -6 | -30 | -4 | -37 | -1 |
| **210** | 32 | -3 | 14 | -2 | -11 | -2 | -19 | -4 | -33 | -2 | -32 | 0 |
| **270** | 21 | -4 | 15 | 5 | 27 | -1 | 28 | 7 | 34 | 1 | 30 | 1 |

TAB. 7.3 - VALORI DELLA CORRENTE LONGITUDINALE (VX) E TRASVERSALE (VY) INDOTTA DAI VENTI ESTREMI NEI PUNTI CONSIDERATI (FIG. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 10 ANNI

| VELOCITA' DELLE CORRENTI LONGITUDINALI E TRASVERSALI (cm/s)- PERIODO DI RITORNO 25 ANNI | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Direzione a largo (°N) | A | | B | | C | | D | | E | | F | |
| | (5,1 m) | | (5,0 m) | | (5,0 m) | | (5,0 m) | | (5,1 m) | | (5,0 m) | |
| | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy | vx | vy |
| **30** | -32 | 6 | -16 | 0 | 14 | -2 | 21 | 4 | 31 | 1 | 32 | 0 |
| **120** | -35 | 4 | -20 | -3 | -34 | 6 | -37 | -6 | -33 | -5 | -41 | -1 |
| **210** | 35 | -3 | 15 | -2 | -11 | -2 | -20 | -4 | -35 | -2 | -34 | 0 |
| **270** | 23 | -4 | 16 | 7 | 30 | -3 | 30 | 7 | 31 | 4 | 32 | 1 |

TAB. 7.4 - VALORI DELLA CORRENTE LONGITUDINALE (VX) E TRASVERSALE (VY) INDOTTA DAI VENTI ESTREMI NEI PUNTI CONSIDERATI (FIG. 2.3) – PERIODO DI RITORNO DI 25 ANNI

| | A | | B | | C | | D | | E | | F | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **VELOCITA' LONGITUDINALE (cm/s)** | **vs levante** | **vs ponente** | **vs levante** | **vs ponente** | **vs levante** | **vs ponente** | **vs levante** | **vs ponente** | **vs levante** | **vs ponente** | **vs levante** | **vs ponente** |
| | 35 | 35 | 20 | 11 | 34 | 30 | 37 | 30 | 35 | 34 | 41 | 32 |
| **VELOCITA' TRASVERSALE (cm/s)** | **vs costa** | **vs largo** | **vs costa** | **vs largo** | **vs costa** | **vs largo** | **vs costa** | **vs largo** | **vs costa** | **vs largo** | **vs costa** | **vs largo** |
| | 6 | 4 | 7 | 3 | 6 | 3 | 7 | 6 | 4 | 5 | 1 | 1 |

TAB. 7.5 - TABELLA RIASSUNTIVA DELLA CORRENTE LONGITUDINALE E TRASVERSALE NEI PUNTI CONSIDERATI

| COMPONENTE ARMONICA | AMPIEZZA (cm) | FASE (gradi) |
|---|---|---|
| **M2** | 9 | 244 |
| **S2** | 3 | 267 |
| **K1** | 4 | 168 |
| **O1** | 1 | 116 |

TAB. 8.1 - AMPIEZZA E FASE DELLE COMPONENTI DI MAREA A LA SPEZIA

| PARAMETRO | ALTEZZA (cm) |
|---|---|
| **MEAN HIGH WATER SPRING** | 33 |
| **MEAN HIGH WATER NEAP** | 28 |
| **MEAN TIDE LEVEL** | 20 |
| **MEAN LOW WATER NEAP** | 10 |
| **MEAN LOW WATER SPRING** | 0 |

TAB. 8.2 – VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO A LA SPEZIA DOVUTO ALLA MAREA

| **SETTORE 1 – VALORI ESTREMI** | | | |
|---|---|---|---|
| LIVELLO DEL MARE | 1 ANNO (cm) | 10 ANNI (cm) | 25 ANNI (cm) |
| set up con vento trasversale | 16 | 32 | 40 |
| set up con vento longitudinale | 24 | 40 | 48 |
| marea | 13 | 13 | 13 |

| **SETTORE 2 – VALORI ESTREMI** | | | |
|---|---|---|---|
| LIVELLO DEL MARE | 1 ANNO (cm) | 10 ANNI (cm) | 25 ANNI (cm) |
| set up conl vento trasversale | 24 | 45 | 54 |
| set up con vento longitudinale | 18 | 36 | 44 |
| marea | 13 | 13 | 13 |

| **SETTORE 3 – VALORI ESTREMI** | | | |
|---|---|---|---|
| LIVELLO DEL MARE | 1 ANNO (cm) | 10 ANNI (cm) | 25 ANNI (cm) |
| set up conl vento trasversale | 35 | 57 | 67 |
| set up con vento longitudinale | 16 | 30 | 38 |
| marea | 13 | 13 | 13 |

TAB. 8.3 – VALORI ESTREMI DEL LIVELLO DEL MARE INDOTTI DA MAREA E VENTO

| Profilo | Normale a costa | Settori di esposizione | Pendenza del fondale a costa | Pendenza del fondale a largo | Profondità di variazione della pendenza | D50 (mm) (costa-largo) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **A** | 130 | 135-210 | 0.05 | 0.038 | 4 | 2.0-1.0-0.2 |
| **B** | 180 | 148-218 | 0.025 | 0.013 | 5 | 2.0-1.5-1.0-0.2 |
| **C** | 226 | 158-250 | 0.027 | 0.016 | 4.5 | 0.24-0.2 |
| **D** | 227 | 167-265 | 0.024 | 0.016 | 4.5 | 2.0-1.5-1.0-0.2 |
| **E** | 255 | 190-280 | 0.066 | 0.028 | 4.5 | 2.0-1.0-0.2 |
| **F** | 249 | 165-285 | 0.071 | 0.055 | 4.5 | 2.0-1.0-0.2 |

TAB. 9.1 - MONEGLIA: CARATTERISTICHE DELLE SEZIONI BATIMETRICHE INDIVIDUATE

| | **SEZIONI** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **PARAMETRI** | **A** | **B** | **C** | **D** | **E** | **F** |
| **TRASPORTO LONGITUDINALE NETTO (mc/anno)** | +6390 | +3445 | +25510 | +4621 | -34090 | -29620 |
| **TRASPORTO LONGITUDINALE VERSO PONENTE (mc/anno)** | 0 | -1683 | -74080 | -8329 | -34900 | -31260 |
| **TRASPORTO LONGITUDINALE VERSO LEVANTE (mc/anno)** | +6390 | +5128 | +99590 | +12950 | +807 | +1645 |
| **FLUSSO MEDIO DI ENERGIA(Kw/m)** | 0.31 | 0.48 | 2.23 | 2.20 | 2.79 | 3.07 |
| **FREQUENZA DEGLI EVENTI CONSIDERATI (%)** | 24.27 | 26.54 | 65.13 | 69.28 | 64.52 | 75.14 |
| **FREQUENZA DEGLI EVENTI CON TRASPORTO VERSO EST (%)** | 24.27 | 15.92 | 30.49 | 36.46 | 8.77 | 12.96 |
| **FREQUENZA DEGLI EVENTI CON TRASPORTO VERSO OVEST (%)** | 0.00 | 10.21 | 33.36 | 31.54 | 55.22 | 61.66 |

TAB. 9.2 - MONEGLIA: SINTESI DEI RISULTATI DELLO STUDIO DEL TRASPORTO LONGITUDINALE

| | SEZIONI | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **MODALITA' DI FRANGIMENTO** | **A** | **B** | **C** | **D** | **E** | **F** |
| **SPILLING (%)** | 68 | 100 | 100 | 100 | 34 | 27 |
| **PLUNGING (%)** | 32 | - | - | - | 66 | 73 |
| **SURGING (%)** | - | - | - | - | - | - |
| | **SEZIONI** | | | | | |
| **PARAMETRI** | **A** | **B** | **C** | **D** | **E** | **F** |
| **PROFONDITA' DI FRANGIMENTO MEDIA (m)** | 0.62 | 0.80 | 0.95 | 0.94 | 0.88 | 0.83 |
| **PROFONDITA' DI FRANGIMENTO AL 95% (m)** | 1.35 | 1.66 | 2.17 | 2.12 | 2.04 | 1.97 |
| **PROFONDITA' DI FRANGIMENTO MAX (m)** | 2.86 | 3.65 | 4.05 | 4.04 | 3.88 | 3.87 |

TAB. 9.3 - MONEGLIA: TIPI E PROFONDITA’ DI FRANGIMENTO

| | SEZIONI | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **PARAMETRI** | **A** | **B** | **C** | **D** | **E** | **F** |
| **SET-UP MEDIO (m)** | 0.20 | 0.20 | 0.24 | 0.23 | 0.31 | 0.31 |
| **SET-UP AL 95%(m)** | 0.39 | 0.39 | 0.56 | 0.52 | 0.70 | 0.71 |
| **SET-UP MAX (m)** | 0.92 | 0.89 | 1.03 | 1.00 | 1.38 | 1.42 |
| **RUN-UP MEDIO (m)** | 0.19 | 0.10 | 0.13 | 0.11 | 0.30 | 0.32 |
| **RUN-UP AL 95%(m)** | 0.38 | 0.20 | 0.28 | 0.24 | 0.68 | 0.71 |
| **RUN-UP MAX (m)** | 0.83 | 0.46 | 0.50 | 0.45 | 1.23 | 1.32 |

TAB. 9.4 - MONEGLIA: VALORI TIPICI DI “SET-UP” E “RUN-UP” NEI VARI PROFILI

| | SEZIONI | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **PARAMETRI** | **A** | **B** | **C** | **D** | **E** | **F** |
| **PROFONDITA' LIMITE MEDIA (m)** | 1.81 | 1.87 | 2.26 | 2.21 | 2.22 | 2.15 |
| **PROFONDITA' LIMITE AL 95% (m)** | 3.67 | 3.85 | 4.98 | 4.94 | 4.99 | 4.87 |
| **PROFONDITA' LIMITE MAX(m)** | 7.88 | 9.47 | 9.47 | 9.47 | 9.47 | 9.47 |

TAB. 9.5 - MONEGLIA: LIMITI DELLA SPIAGGIA SOMMERSA NEI VARI PROFILI

| PROFILI | 1 ANNO | | 10 ANNI | | 25 ANNI | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | SET UP (m) | RUN UP (m) | SET UP (m) | RUN UP (m) | SET UP (m) | RUN UP (m) |
| **A** | 0.68 | 2.09 | 0.92 | 2.40 | 1.07 | 2.70 |
| **B** | 0.78 | 0.57 | 1.03 | 0.72 | 1.14 | 0.78 |
| **C** | 1.03 | 0.67 | 1.45 | 0.77 | 1.64 | 0.88 |
| **C (CON BARRIERA)** | 0.97 | 0.63 | 1.28 | 0.71 | 1.38 | 0.82 |
| **D** | 0.99 | 0.59 | 1.41 | 0.69 | 1.64 | 0.80 |
| **E** | 1.73 | 1.89 | 2.02 | 1.99 | 2.20 | 2.11 |
| **F** | 1.74 | 2.44 | 2.12 | 3.45 | 2.29 | 3.65 |

**I profili "A, E, F" sono caratterizzati da costa alta**

TAB. 9.6 - VALORI ESTREMI DI "SET-UP" E "RUN-UP" NEI VARI PROFILI

| DIREZIONE AL LARGO (°N) | 1 ANNO | 10 ANNI | 25 ANNI |
|---|---|---|---|
| | ARRETRAMENTO (m) | ARRETRAMENTO (m) | ARRETRAMENTO (m) |
| **135** | 2.1 | 3.5 | 5.1 |
| **150** | 1.9 | 2.9 | 3.4 |
| **165** | 3.3 | 4.4 | 5.5 |
| **180** | 3.1 | 3.2 | 4.0 |
| **195** | 3.0 | 3.4 | 4.1 |
| **210** | 2.6 | 3.3 | 3.7 |
| **225** | 1.1 | 2.7 | 3.1 |
| **240** | 0.7 | 1.5 | 1.7 |
| **255** | 3.0 | 3.7 | 5.9 |
| **270** | 3.0 | 4.2 | 5.1 |

TAB. 9.7 - ARRETRAMENTO DELLA LINEA DI RIVA NEL PROFILO C – SENZA LE BARRIERE PRESENTI

**INDICE DELLE FIGURE**

FIG. 2.1 - GOLFO DI MONEGLIA - VISIONE DAL SATELLITE (GOOGLE EARTH)

FIG. 2.2 - TAVOLA RELATIVA AL GOLFO DI MONEGLIA DEL PTC [Rif. 1]

FIG. 2.3 - GOLFO DI MONEGLIA – SCHEMATIZZAZIONE DELLE CARATTERISTICHE BATIMETRICHE GENERALI E POSIZIONE DEI PUNTI DI CALCOLO

FIG. 2.4 - GOLFO DI MONEGLIA – IPOTESI DI PROGETTO

FIG. 3.1 - PUNTO DI CALCOLO DEL CLIMA AL LARGO DI MONEGLIA, POSIZIONE DELL'ONDAMETRO DI LA SPEZIA E DEL PUNTO ECMWF

FIG. 5.1 - MONEGLIA – ROSA DEI VENTI AL LARGO

FIG. 5.2 - ESEMPIO DI FITTING DEI DATI DI VELOCITA' DEL VENTO CON DISTRIBUZIONE ESTREMALE DI WEIBULL

FIG. 6.1 - ROSA DELLE ONDE AL LARGO

FIG. 6.3 - ROSA DELLE ONDE A COSTA DEL GOLFO DI MONEGLIA

FIG. 6.4 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 1 ANNO – DIREZIONI 135°- 195°N

FIG. 6.5 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 1 ANNO – DIREZIONI 210°- 270°N

FIG. 6.6 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 10 ANNI – DIREZIONI 135°- 195°N

FIG. 6.7 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 10 ANNI – DIREZIONI 210°- 270°N

FIG. 6.8 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 25 ANNI – DIREZIONI 135°- 195°N

FIG. 6.9 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 25 ANNI– DIREZIONI 210°- 270°N

FIG. 7.1 - IMMAGINI DA SATELLITE DELLE CONDIZIONI TERMICHE SUPERFICIALI IN INVERNO (A) E IN ESTATE (B) (LE AREE PIÙ CHIARE RAPPRESENTANO LE TEMPERATURE PIÙ ELEVATE)[Rif. 10]

FIG. 7.2 - CAMPI DI CORRENTE IN CONDIZIONE DI VENTO TIPICI

FIG. 7.3 - CAMPI DI CORRENTE IN CONDIZIONE DI VENTO CON PERIODO DI RITORNO 1 ANNO

FIG. 7.4 - CAMPI DI CORRENTE IN CONDIZIONE DI VENTO CON PERIODO DI RITORNO 10 ANNI

FIG. 7.5 - CAMPI DI CORRENTE IN CONDIZIONE DI VENTO CON PERIODO DI RITORNO 25 ANNI

FIG. 8.1 - SETTORI DEL GOLFO DI MONEGLIA IN CUI SONO STATI CALCOLATI I VALORI DI LIVELLO ESTREMI

FIG. 9.1 - RELAZIONE TRA IL COEFFICIENTE K DEL CERC E IL DIAMETRO $D_{50}$ DEI SEDIMENTI [Rif. 21]

FIG. 9.2 - SEZIONI DI CALCOLO PER LO STUDIO DEL TRASPORTO LONGITUDINALE E TRASVERSALE

FIG. 9.3 - ANALISI DI SENSIBILITA' - GRANULOMETRIA

FIG. 9.4 - ANALISI DI SENSIBILITA' - ORIENTAZIONE DEL PROFILO

FIG. 9.5 - ANDAMENTO DEL TRASPORTO POTENZIALE IN FUNZIONE DELLA PROFONDITA'- PROFILI A-D

FIG. 9.6 - ANDAMENTO DEL TRASPORTO POTENZIALE IN FUNZIONE DELLA PROFONDITA'- PROFILI E-F

FIG. 9.7 - ESEMPI DELL'EVOLUZIONE DEL PROFILO IN SEGUITO ALLE MAREGGIATE ESTREME - PROFILI A-B

FIG. 9.8 - ESEMPI DELL'EVOLUZIONE DEL PROFILO IN SEGUITO ALLE MAREGGIATE ESTREME - PROFILO C

FIG. 9.9 - ESEMPI DELL'EVOLUZIONE DEL PROFILO IN SEGUITO ALLE MAREGGIATE ESTREME - PROFILI D-F




FIG. 2.1 - GOLFO DI MONEGLIA - VISIONE DAL SATELLITE (GOOGLE EARTH)

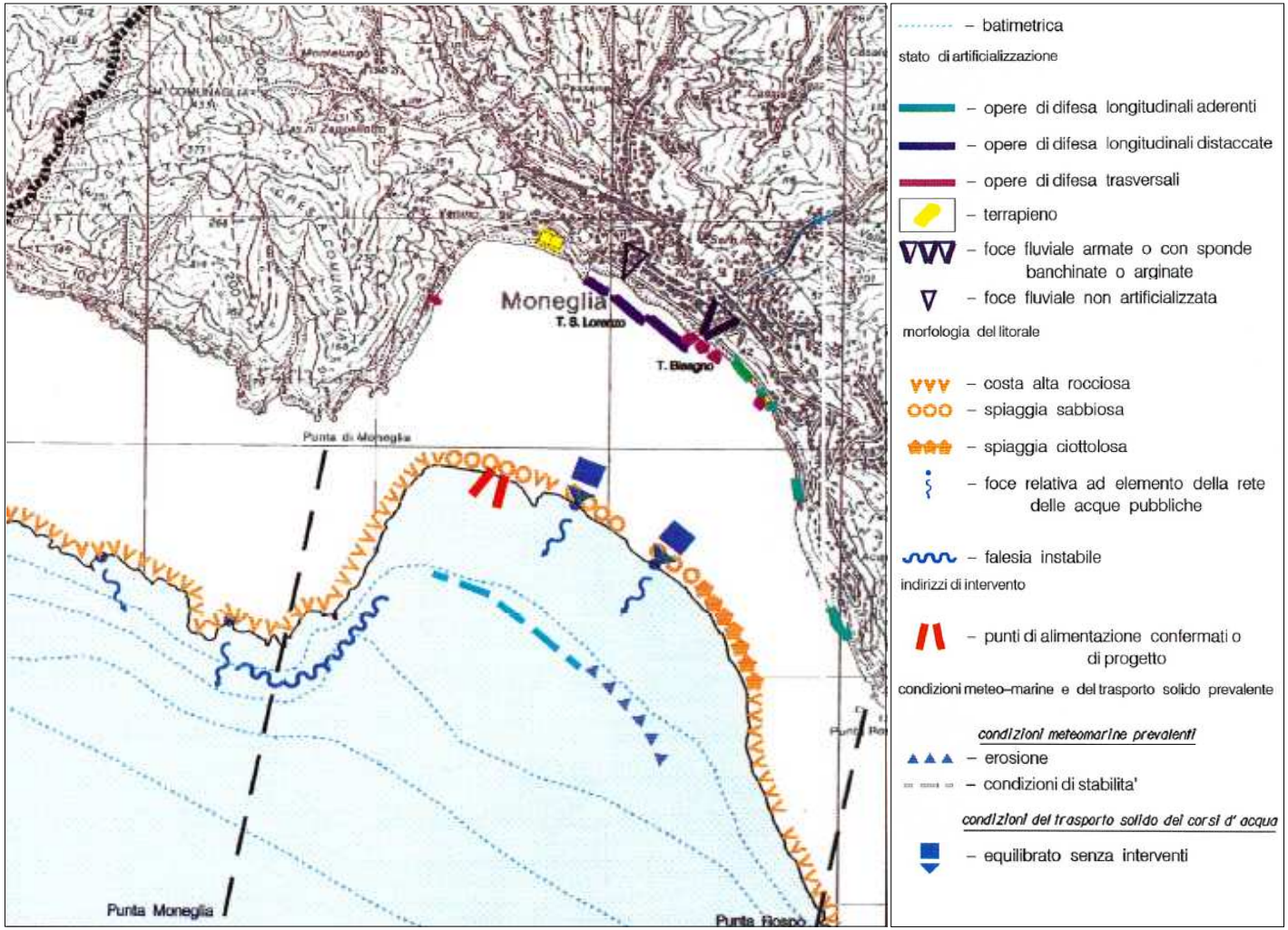



FIG. 2.2 - TAVOLA RELATIVA AL GOLFO DI MONEGLIA DEL PTC [Rif. 1]

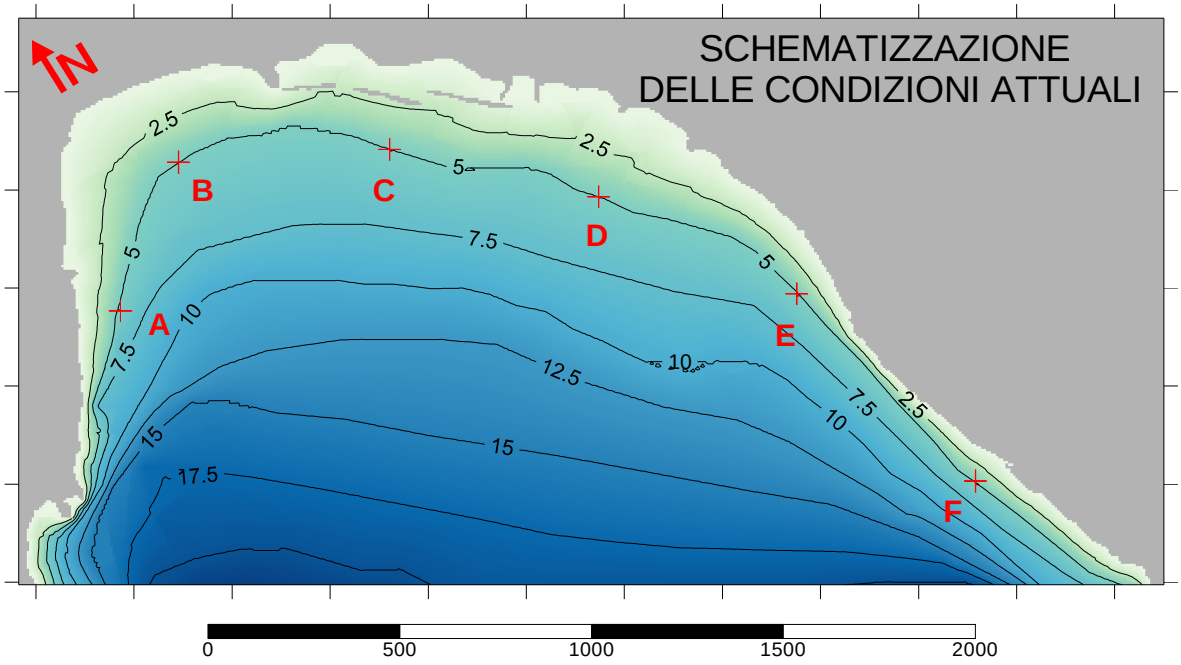



FIG. 2.3 - GOLFO DI MONEGLIA – SCHEMATIZZAZIONE DELLE CARATTERISTICHE BATIMETRICHE GENERALI E POSIZIONE DEI PUNTI DI CALCOLO

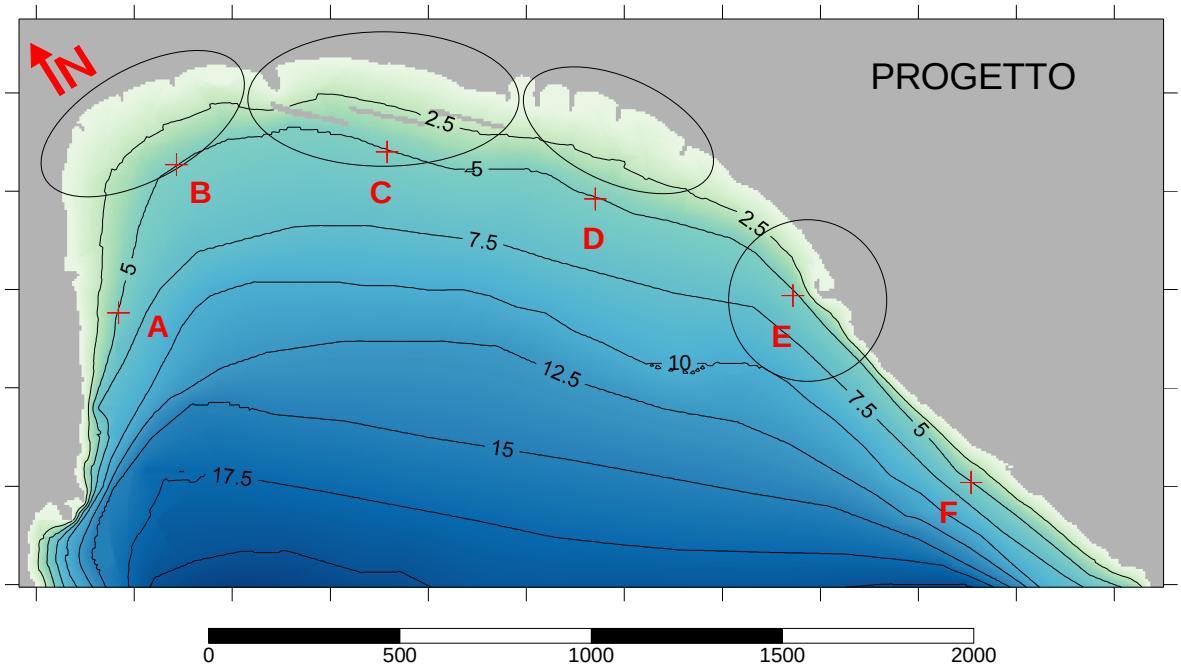



FIG. 2.4 - GOLFO DI MONEGLIA – IPOTESI DI PROGETTO

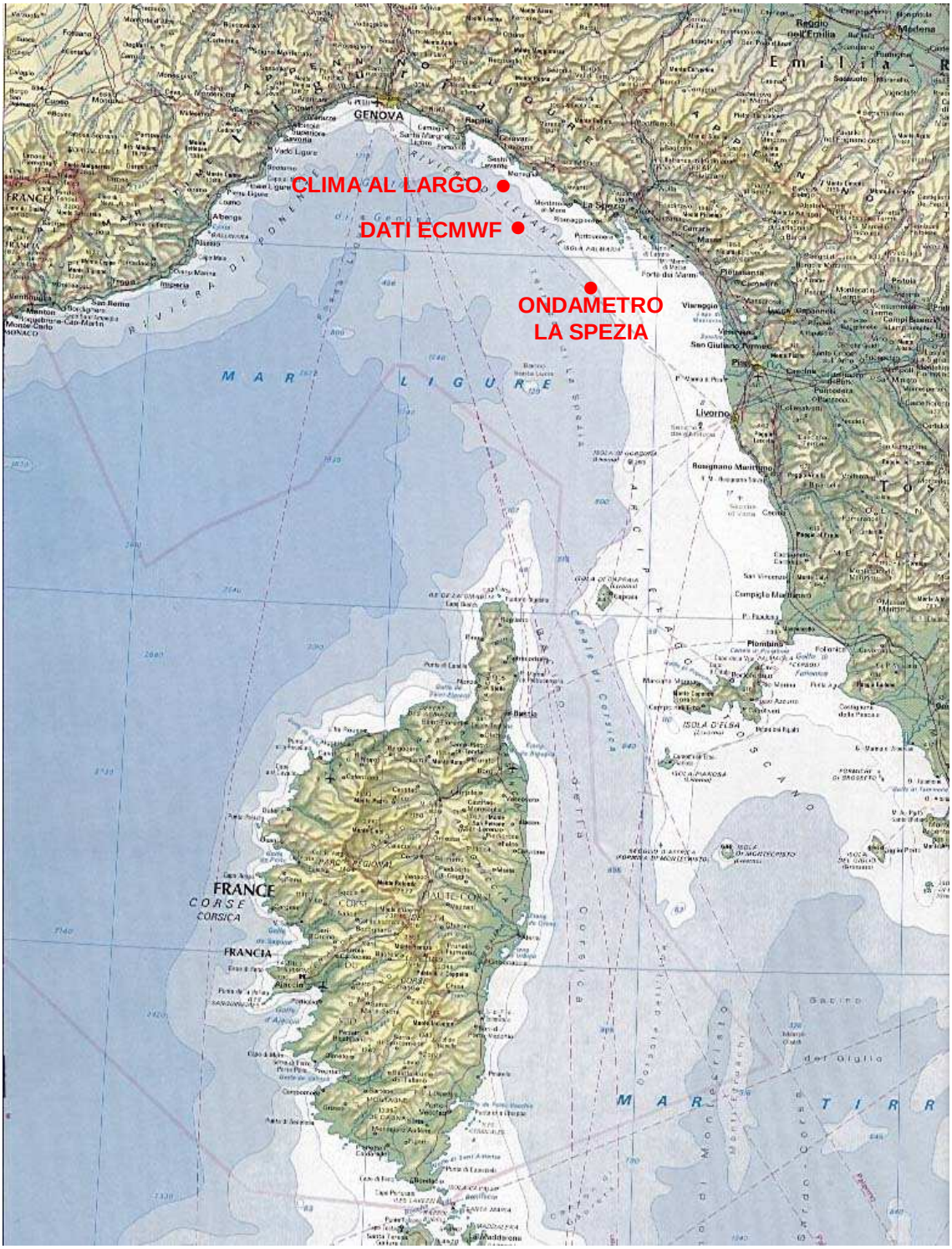



FIG. 3.1 - PUNTO DI CALCOLO DEL CLIMA AL LARGO DI MONEGLIA, POSIZIONE DELL'ONDAMETRO DI LA SPEZIA E DEL PUNTO ECMWF

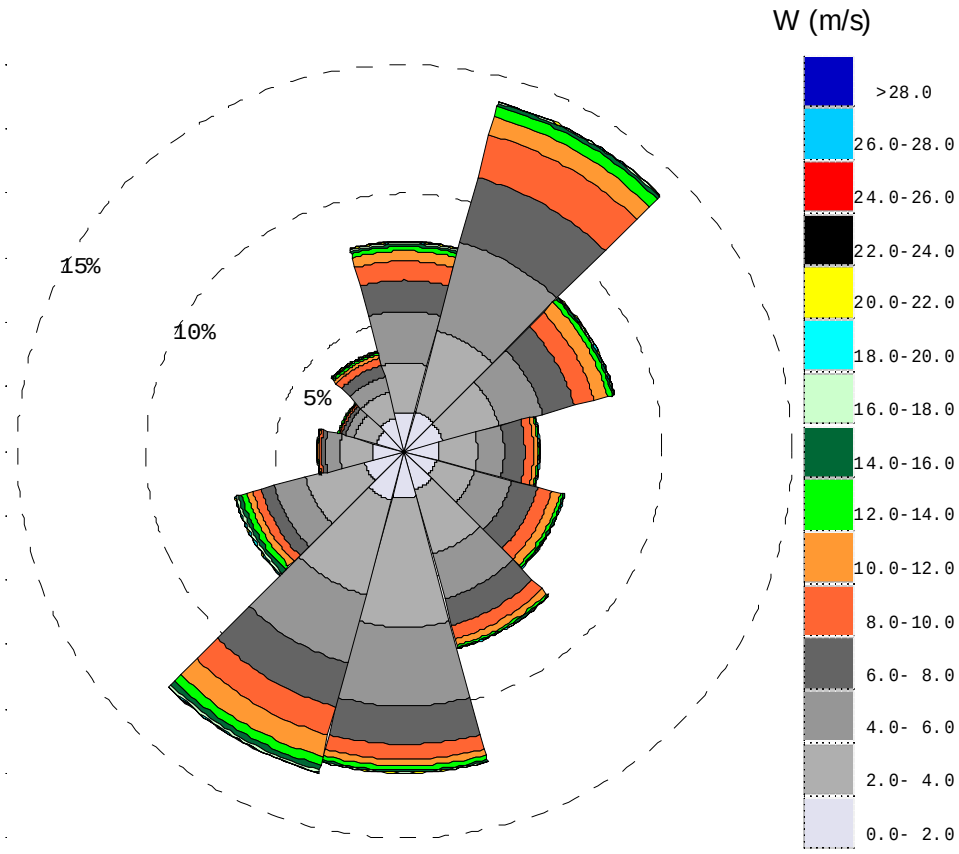



FIG. 5.1 - MONEGLIA – ROSA DEI VENTI AL LARGO

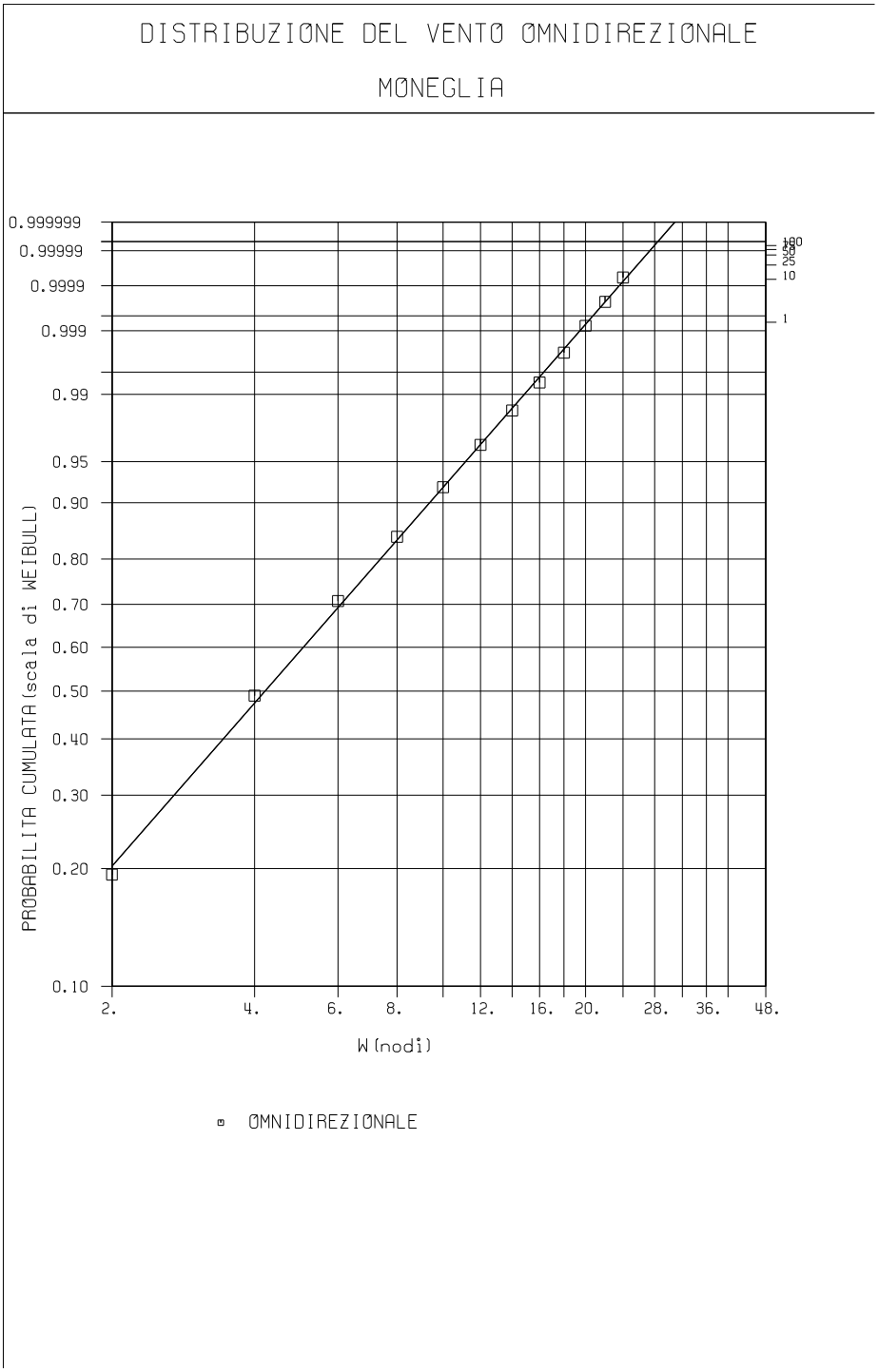



FIG. 5.2 - ESEMPIO DI FITTING DEI DATI DI VELOCITA' DEL VENTO CON DISTRIBUZIONE ESTREMALE DI WEIBULL

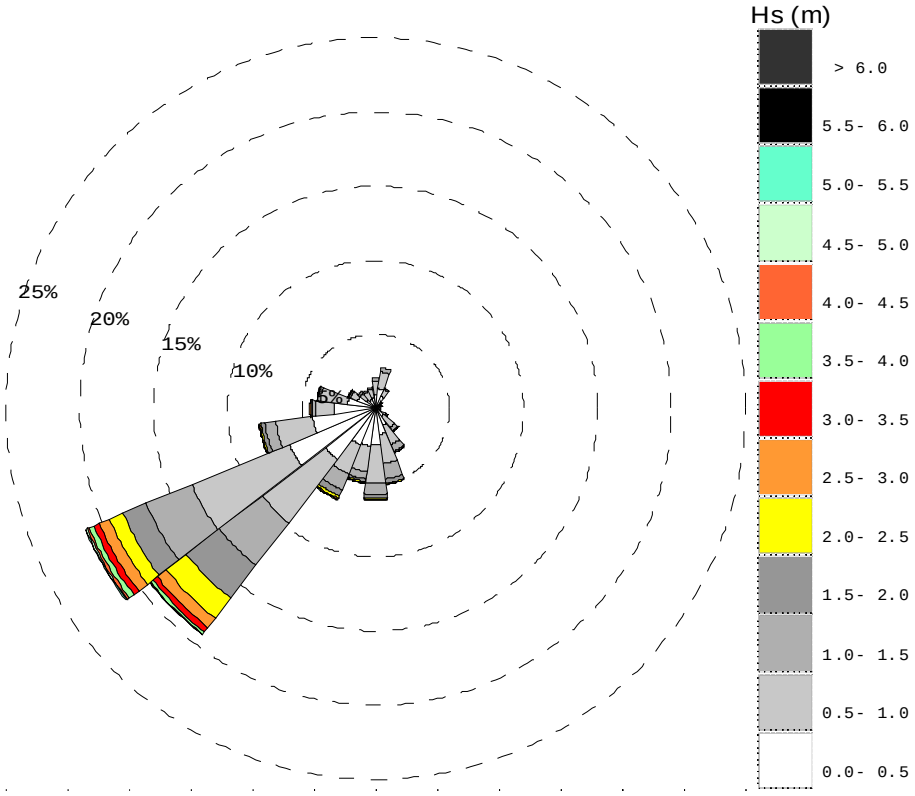



FIG. 6.1 - ROSA DELLE ONDE AL LARGO

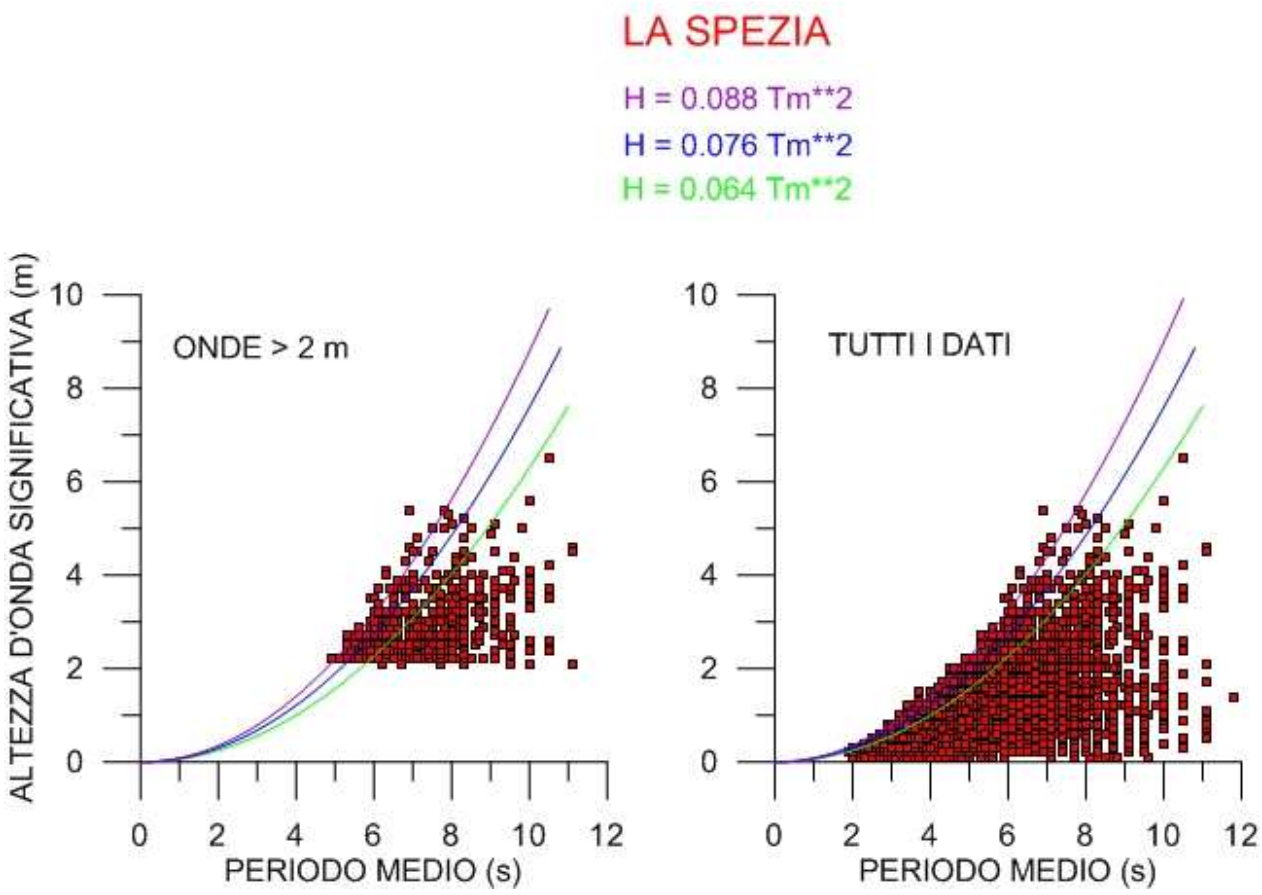



FIG. 6.2 – SCATTER DIAGRAM Hs – Tm DEDOTTO DAI DATI MISURATI A LA SPEZIA

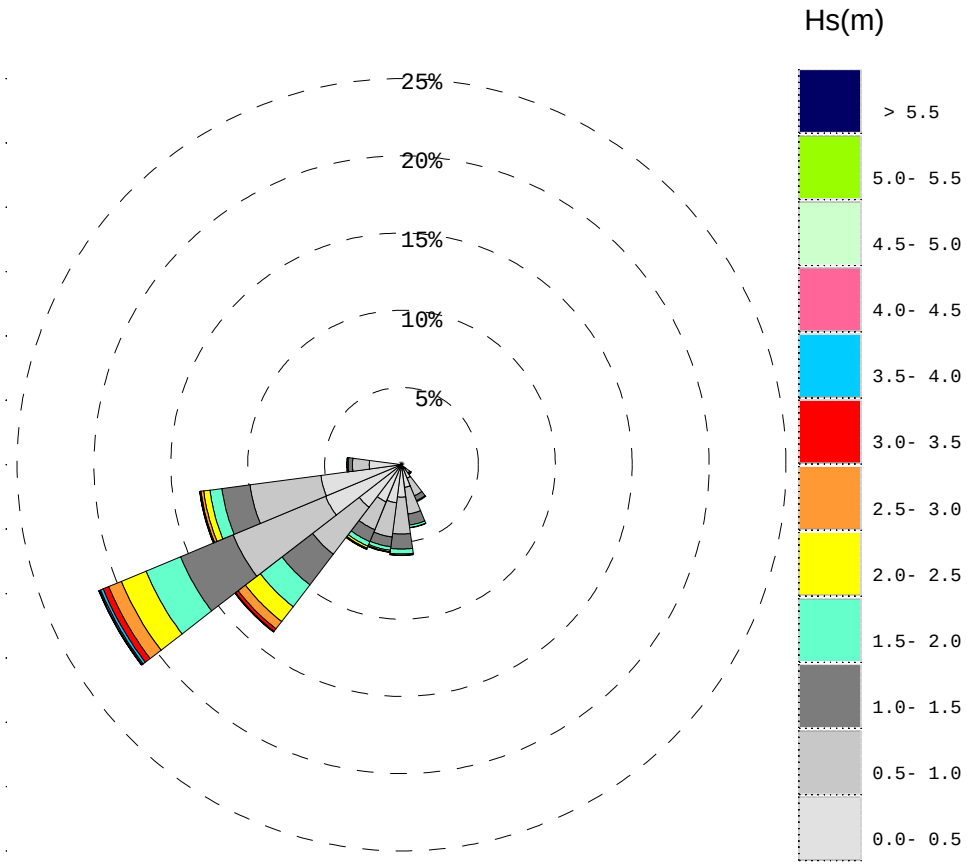



FIG. 6.3 - ROSA DELLE ONDE A COSTA DEL GOLFO DI MONEGLIA

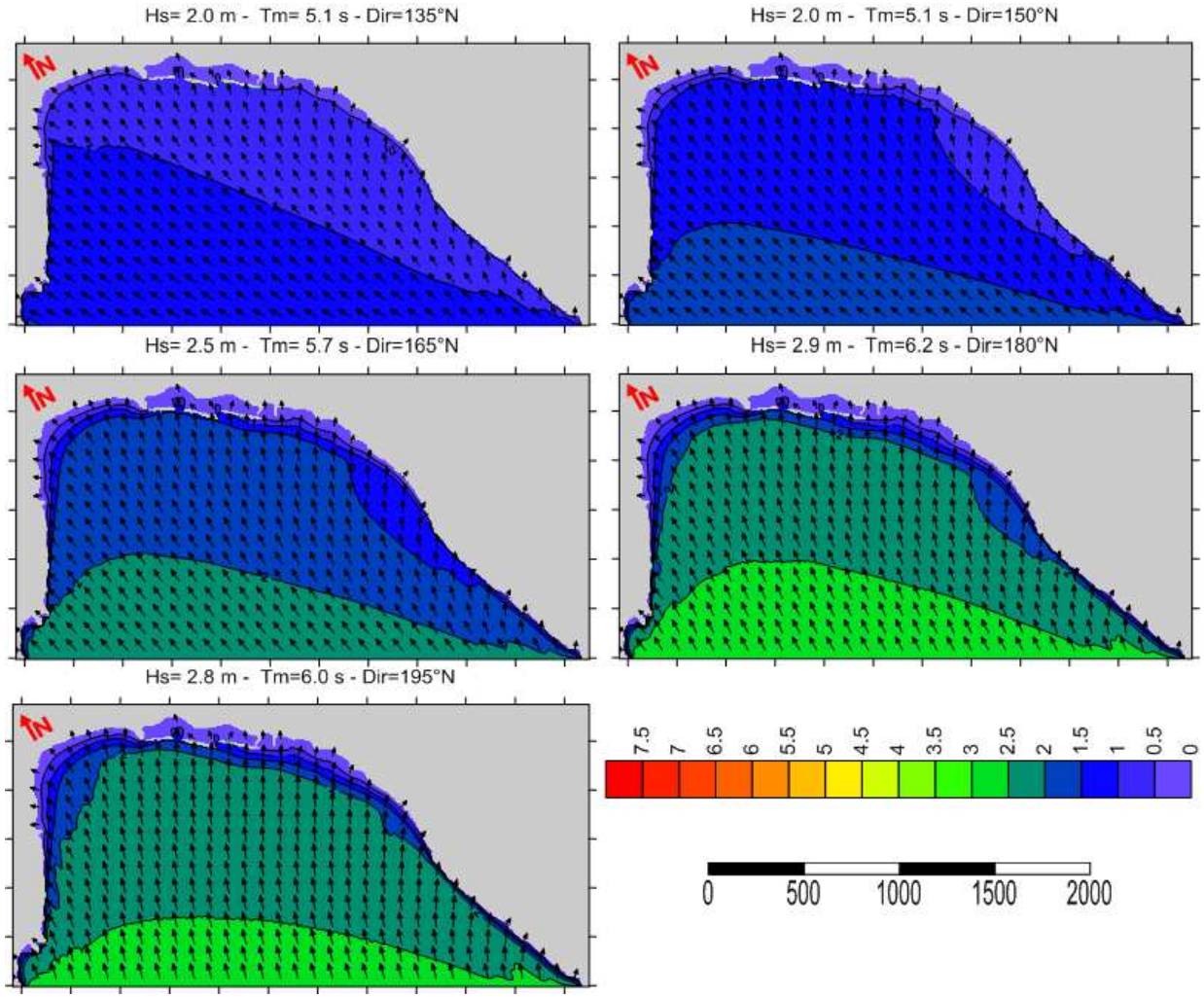



FIG. 6.4 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 1 ANNO – DIREZIONI 135°- 195°N

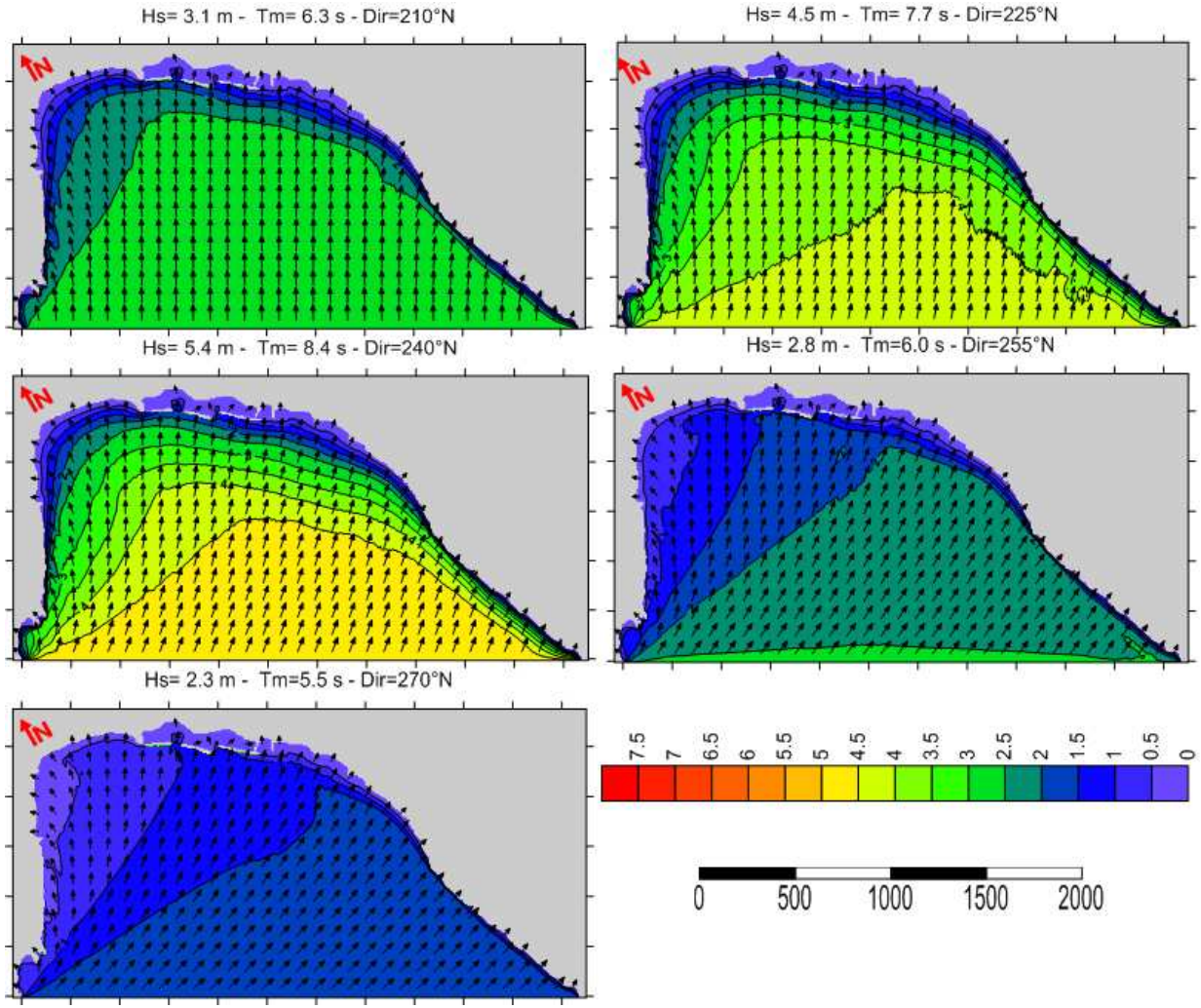



FIG. 6.5 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 1 ANNO – DIREZIONI 210°- 270°N

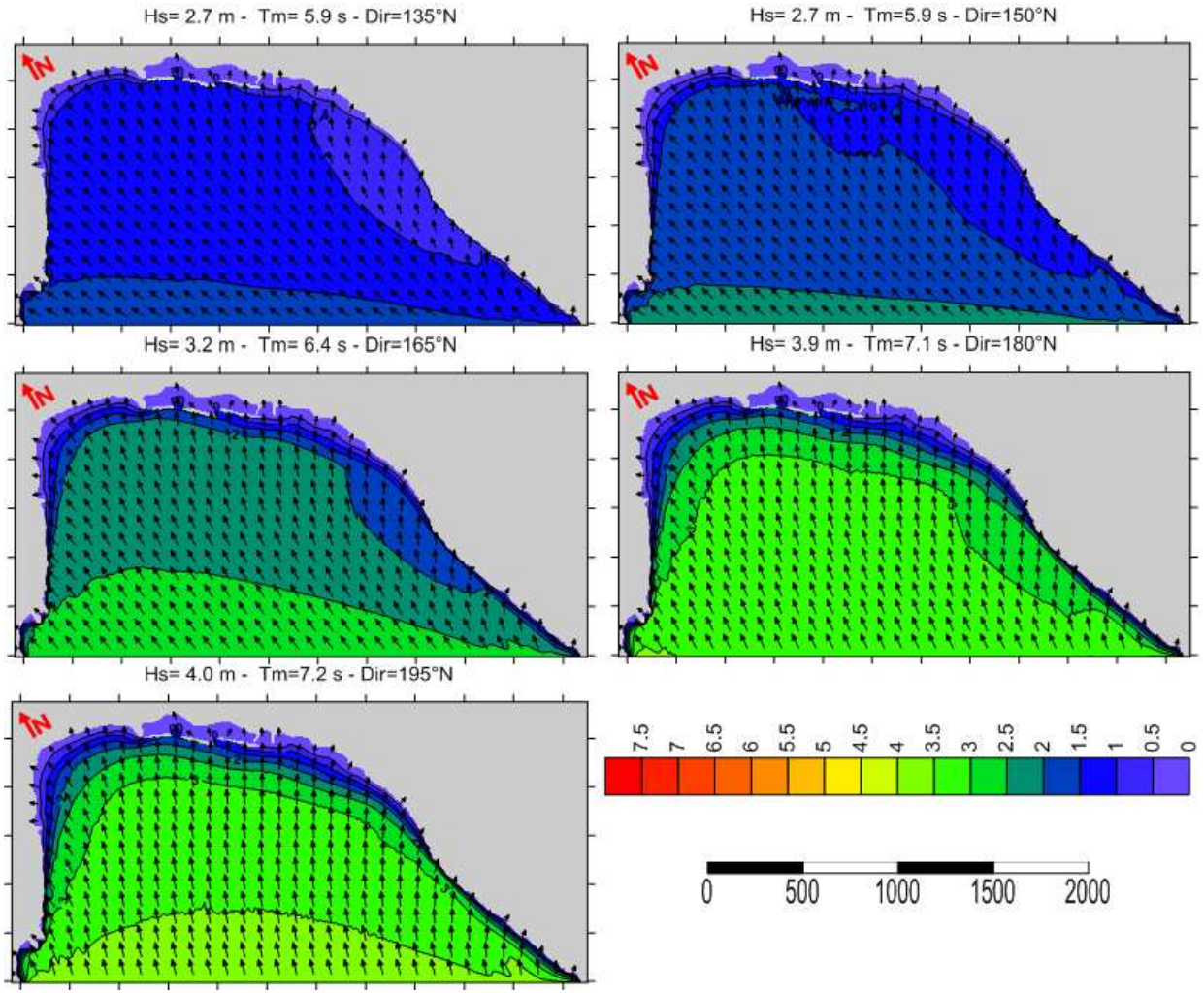



FIG. 6.6 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 10 ANNI – DIREZIONI 135°- 195°N

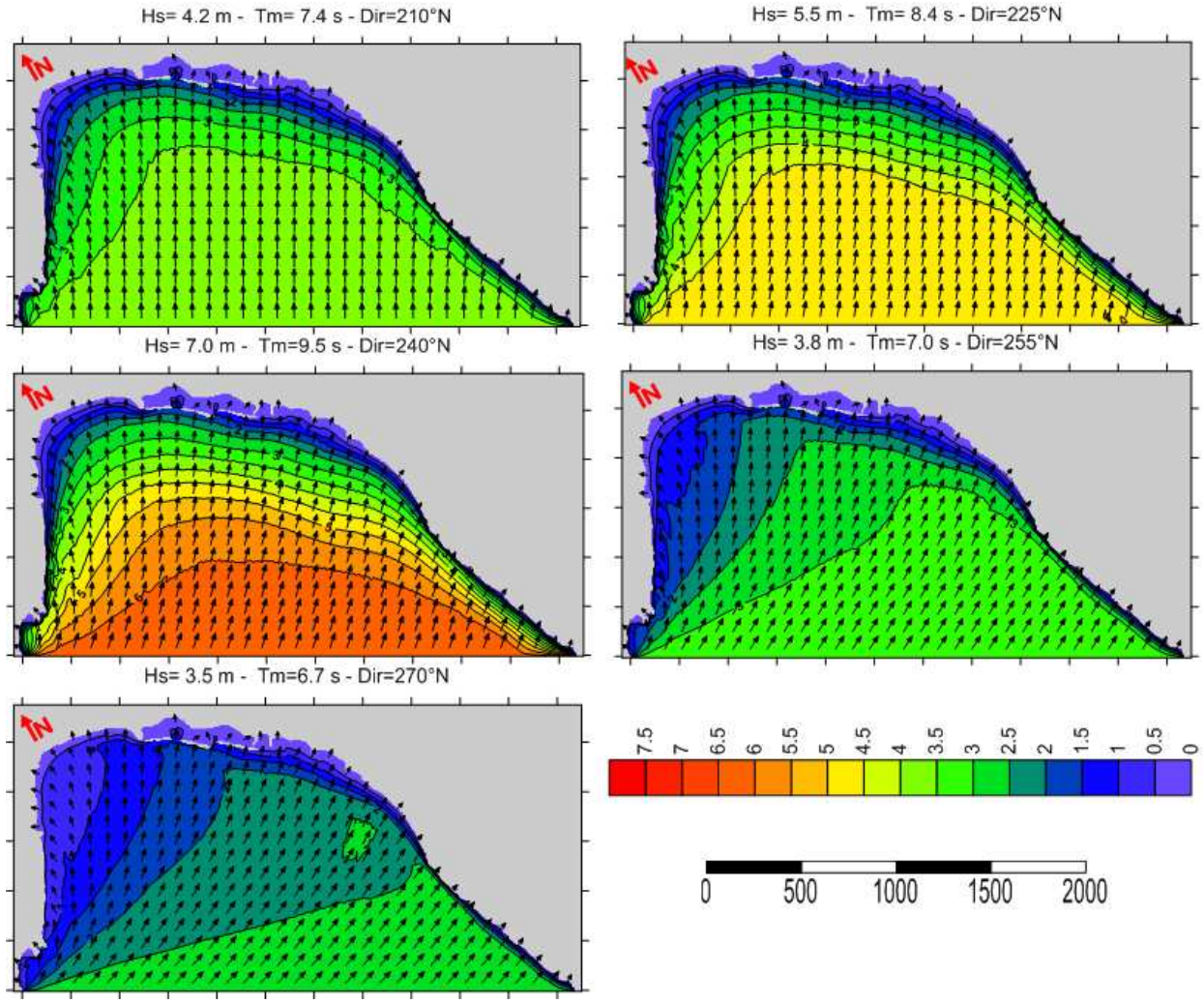



FIG. 6.7 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 10 ANNI – DIREZIONI 210°- 270°N

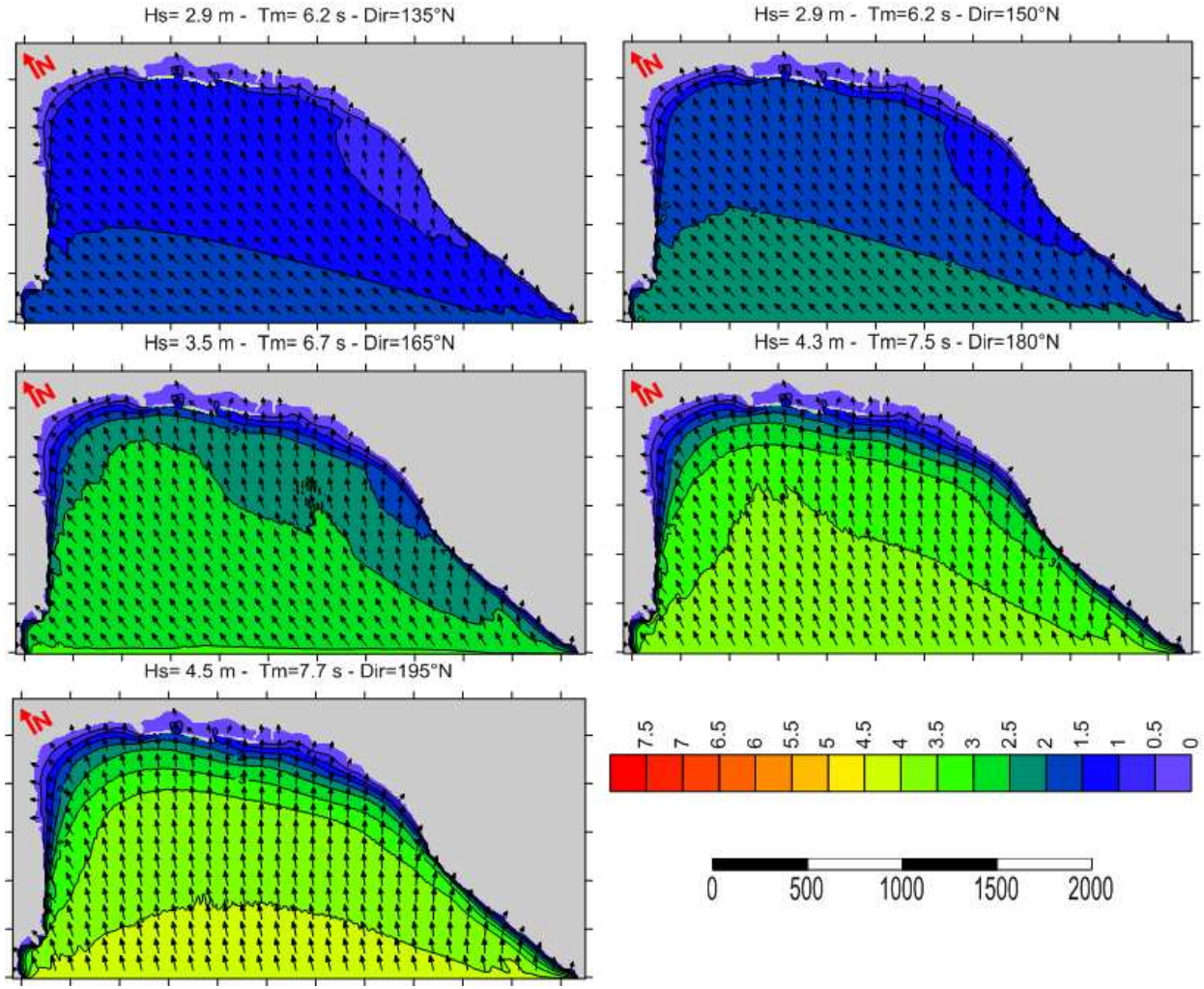



FIG. 6.8 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 25 ANNI – DIREZIONI 135°- 195°N

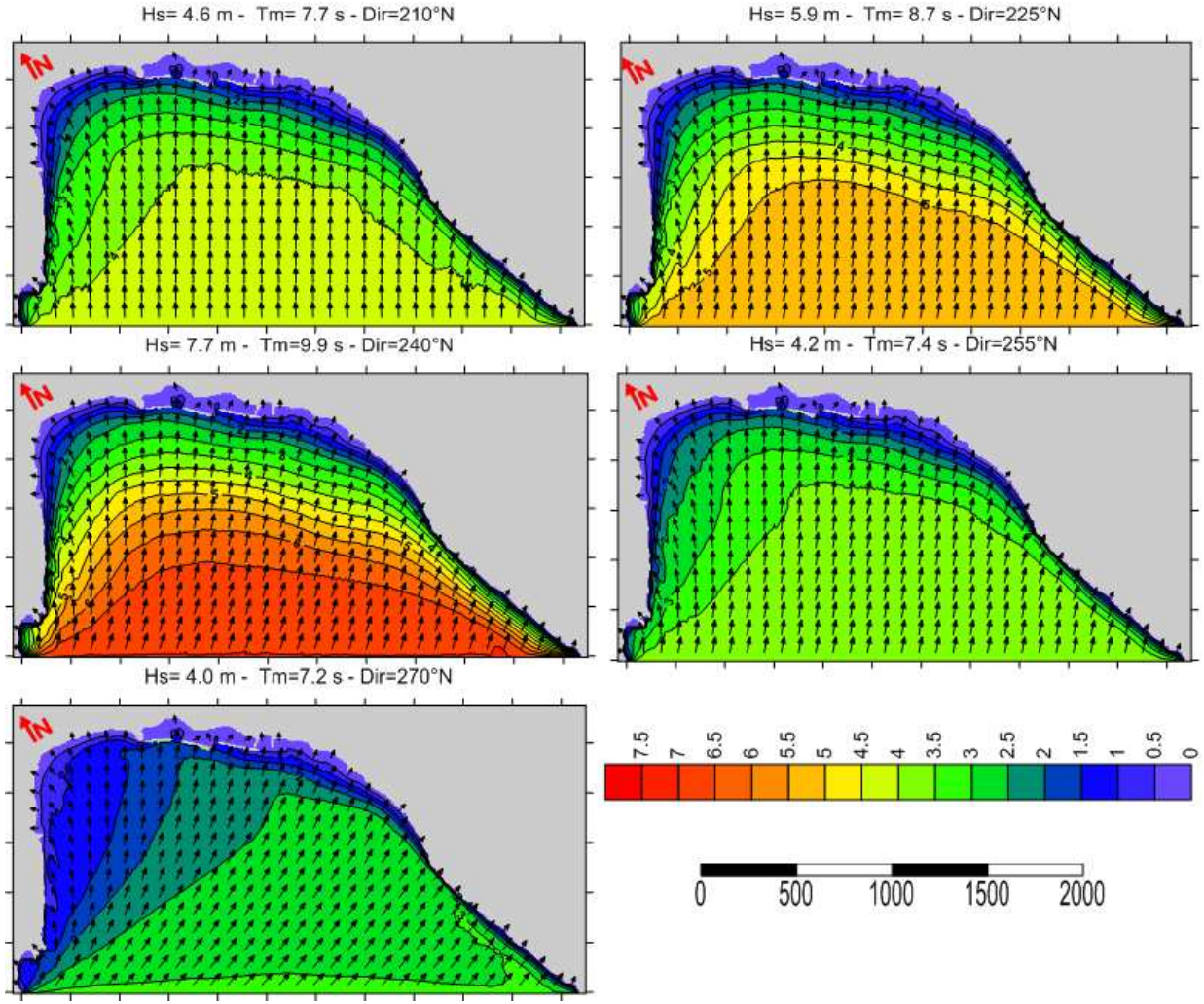



FIG. 6.9 - PROPAGAZIONE A COSTA DELLE ONDE CON PERIODO DI RITORNO 25 ANNI– DIREZIONI 210°- 270°N

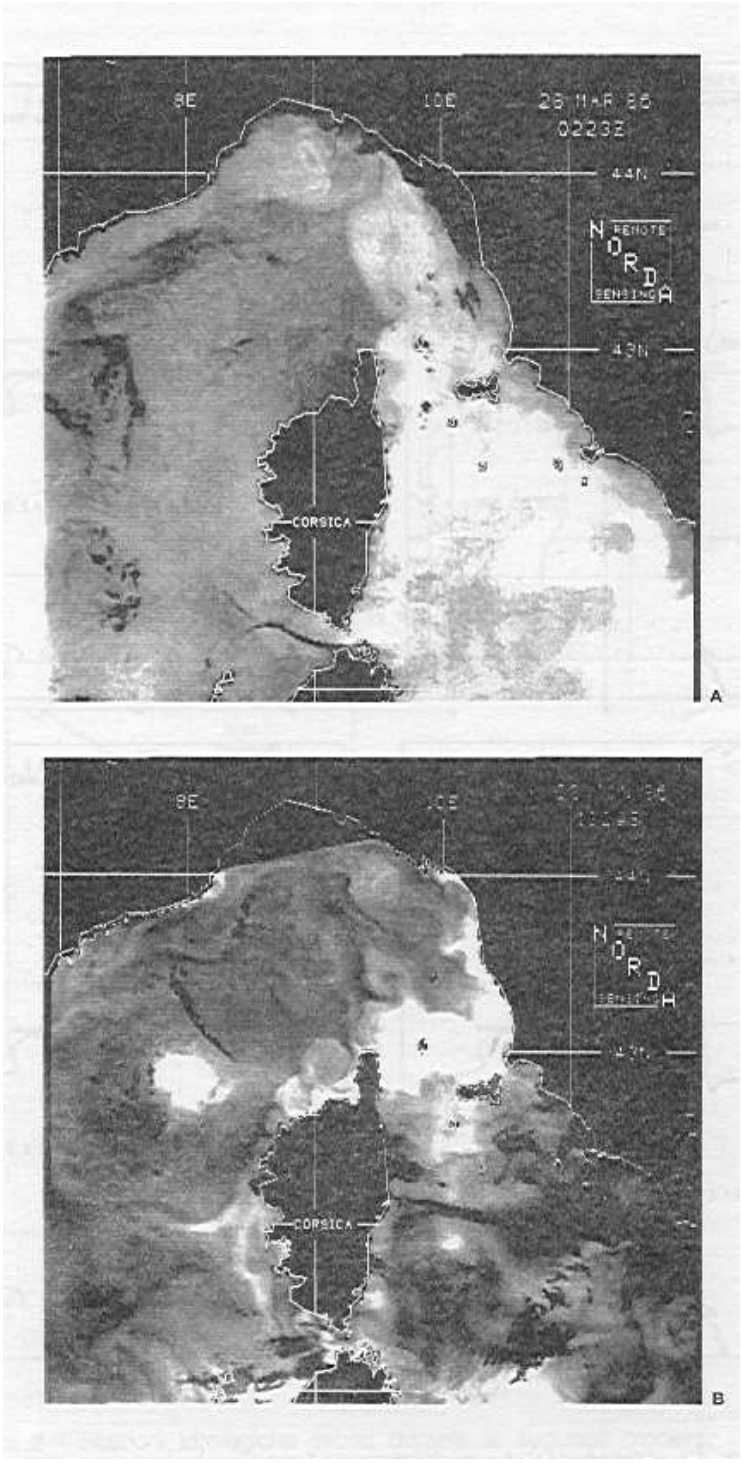



FIG. 7.1 - IMMAGINI DA SATELLITE DELLE CONDIZIONI TERMICHE SUPERFICIALI IN INVERNO (A) E IN ESTATE (B) (LE AREE PIÙ CHIARE RAPPRESENTANO LE TEMPERATURE PIÙ ELEVATE)[Rif. 10]

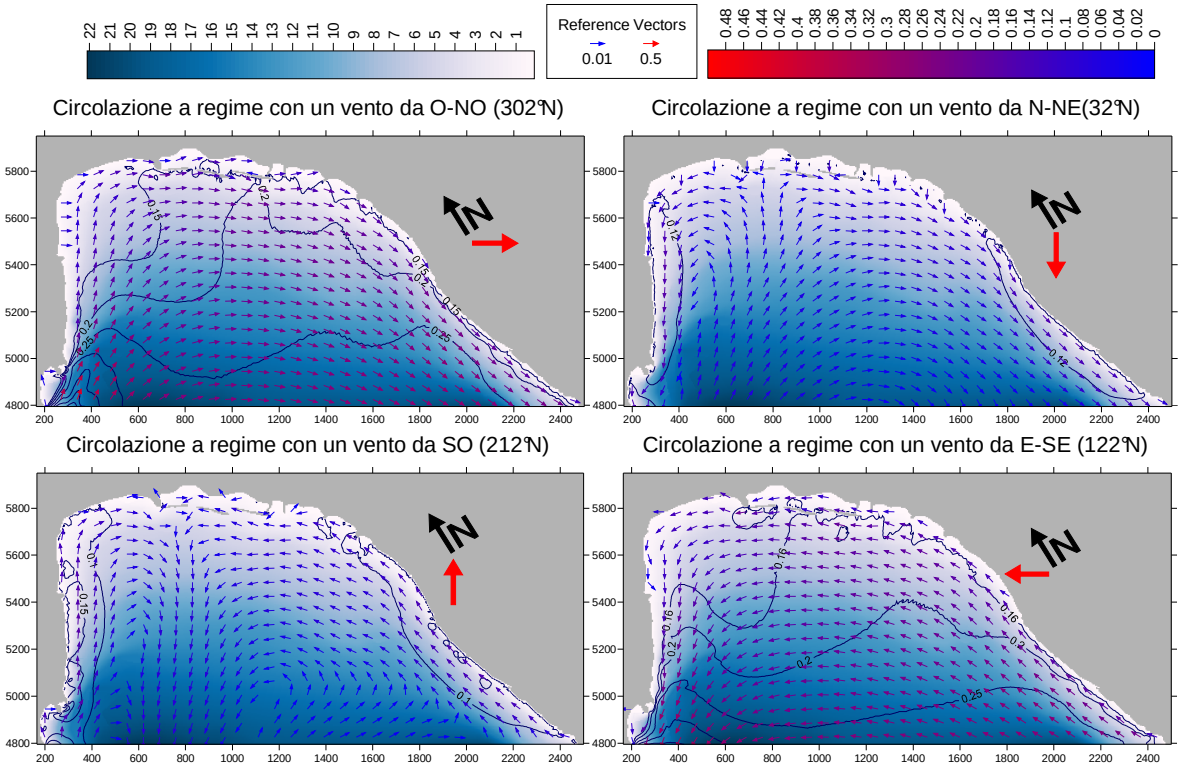



FIG. 7.2 - CAMPI DI CORRENTE IN CONDIZIONE DI VENTO TIPICI

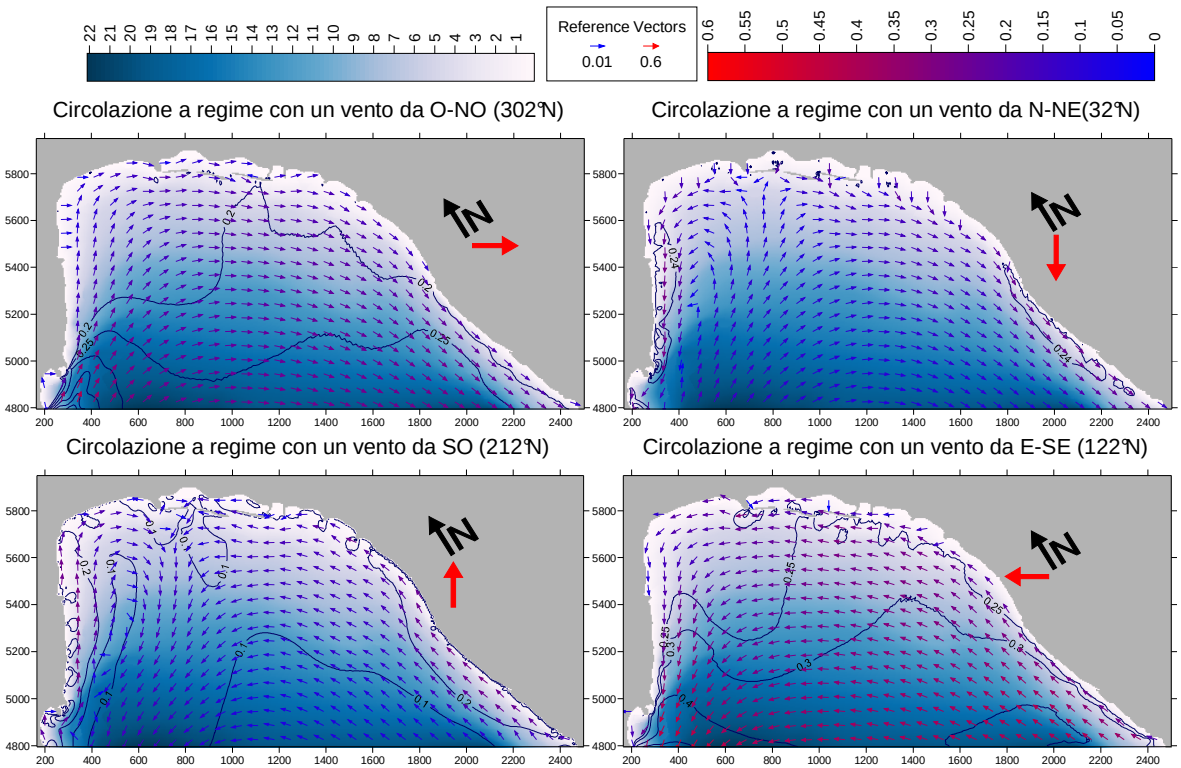



FIG. 7.3 - CAMPI DI CORRENTE IN CONDIZIONE DI VENTO CON PERIODO DI RITORNO 1 ANNO

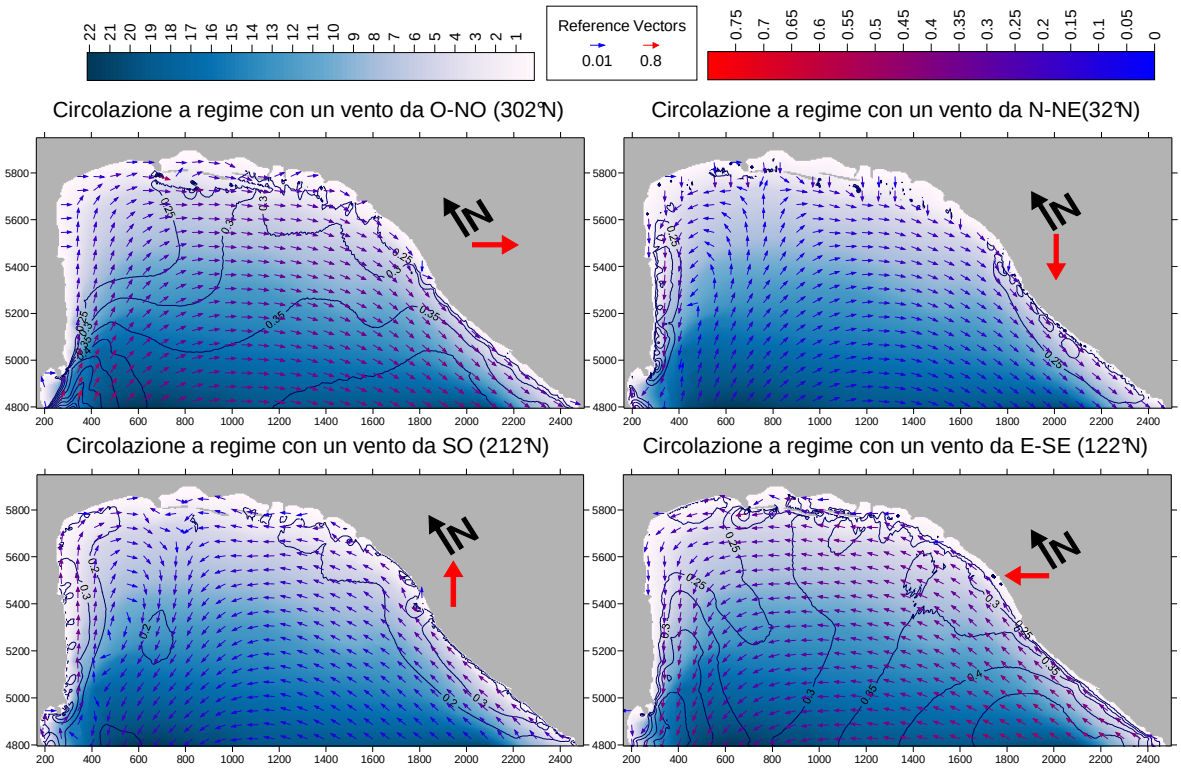



FIG. 7.4 - CAMPI DI CORRENTE IN CONDIZIONE DI VENTO CON PERIODO DI RITORNO 10 ANNI

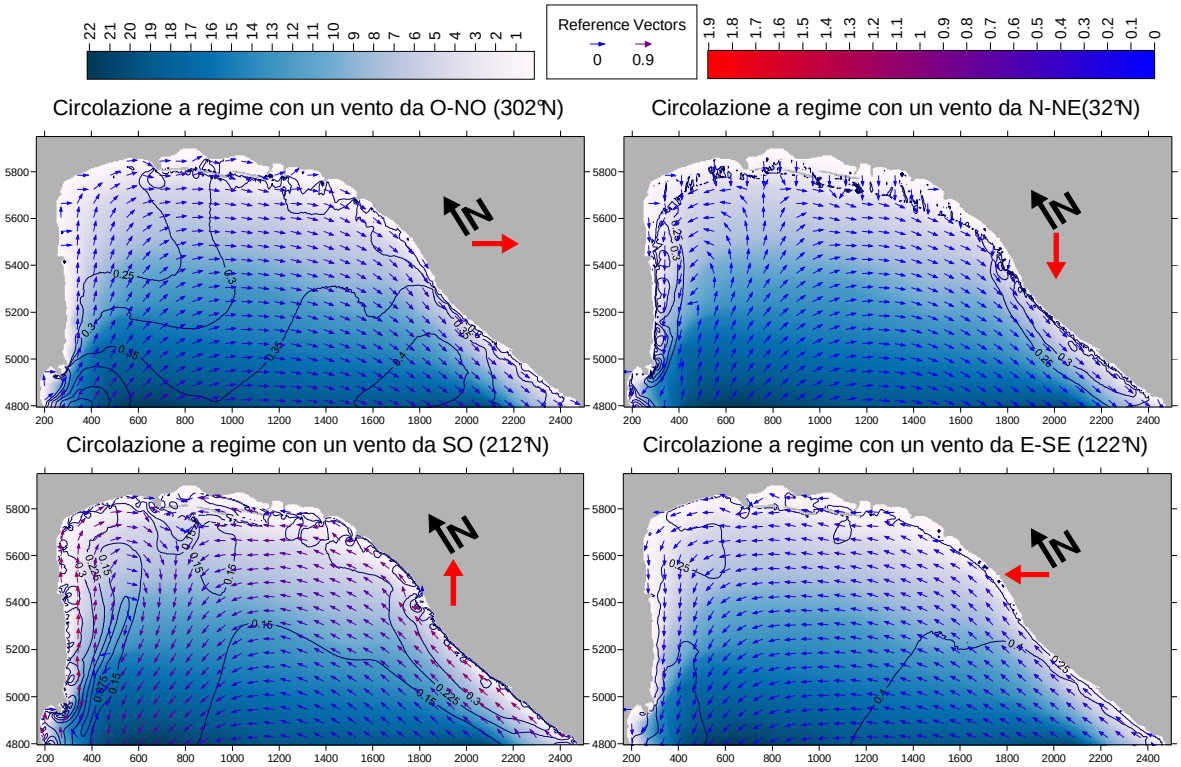



FIG. 7.5 - CAMPI DI CORRENTE IN CONDIZIONE DI VENTO CON PERIODO DI RITORNO 25 ANNI

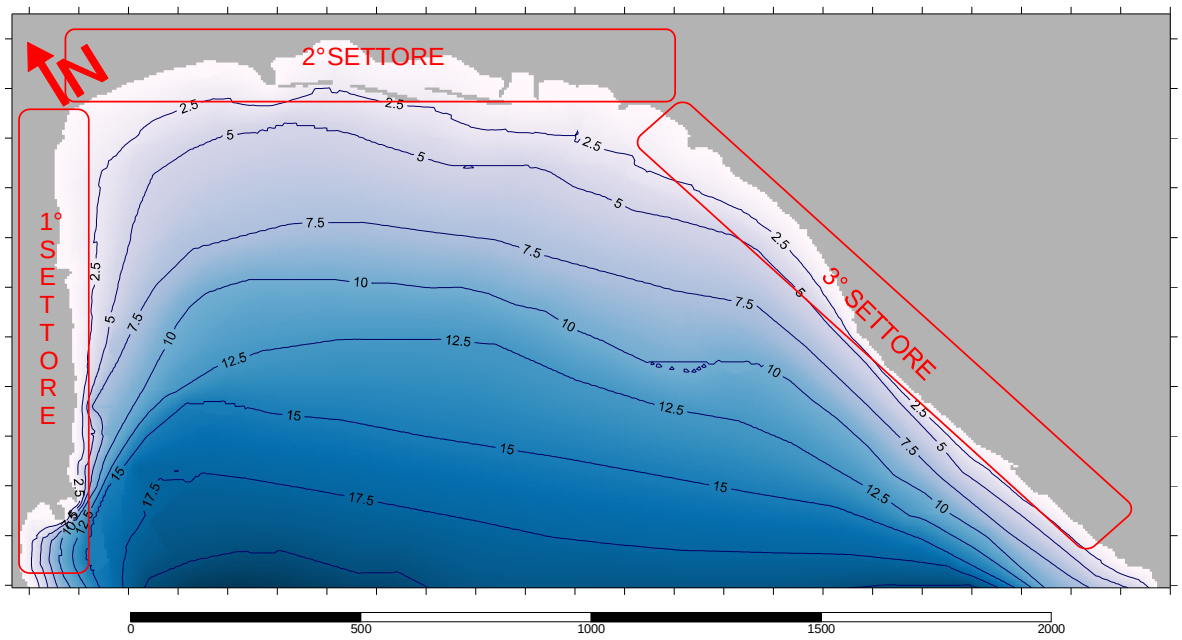



FIG. 8.1 - SETTORI DEL GOLFO DI MONEGLIA IN CUI SONO STATI CALCOLATI I VALORI DI LIVELLO ESTREMI

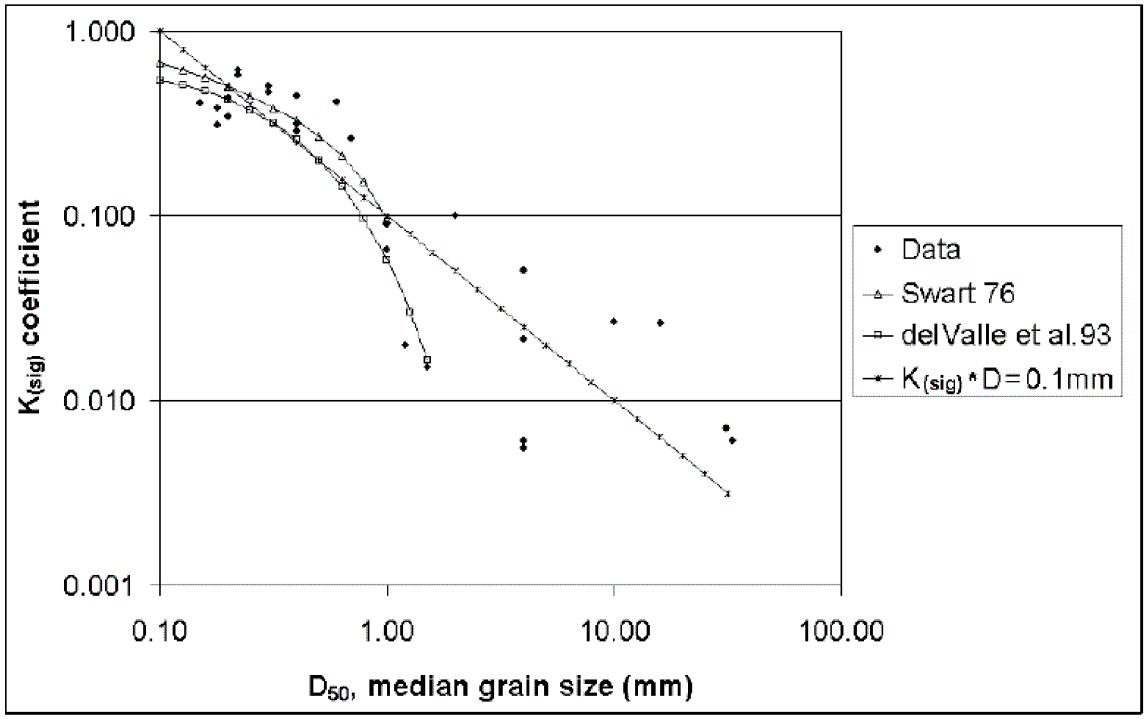



FIG. 9.1 - RELAZIONE TRA IL COEFFICIENTE K DEL CERC E IL DIAMETRO $D_{50}$ DEI SEDIMENTI [Rif. 21]

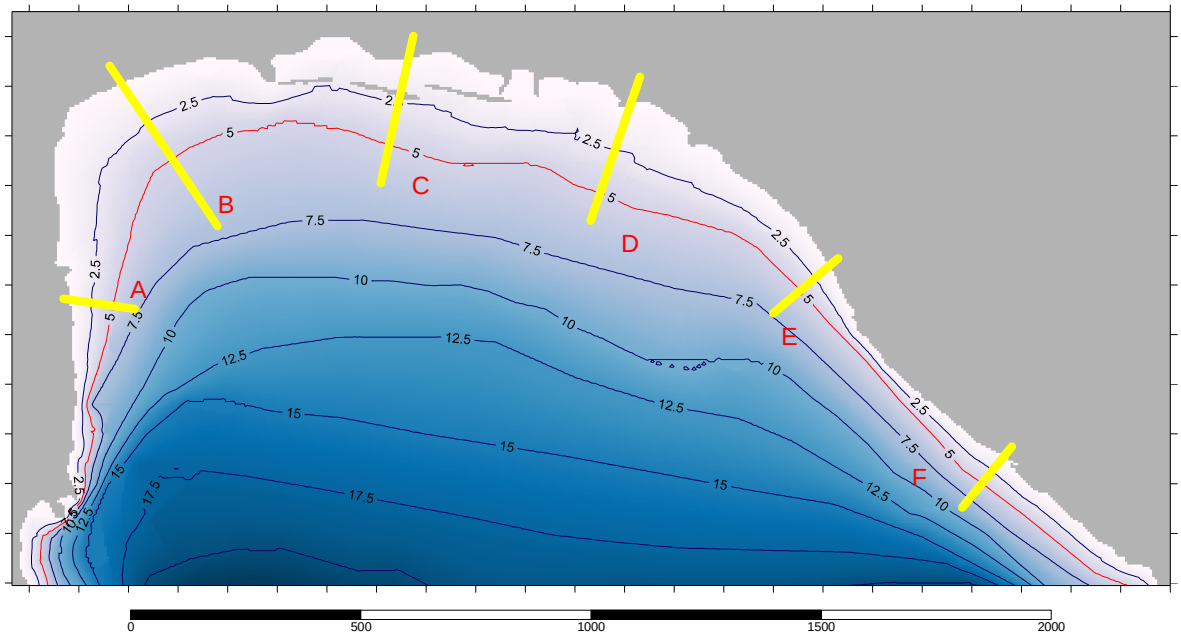



FIG. 9.2 - SEZIONI DI CALCOLO PER LO STUDIO DEL TRASPORTO LONGITUDINALE E TRASVERSALE

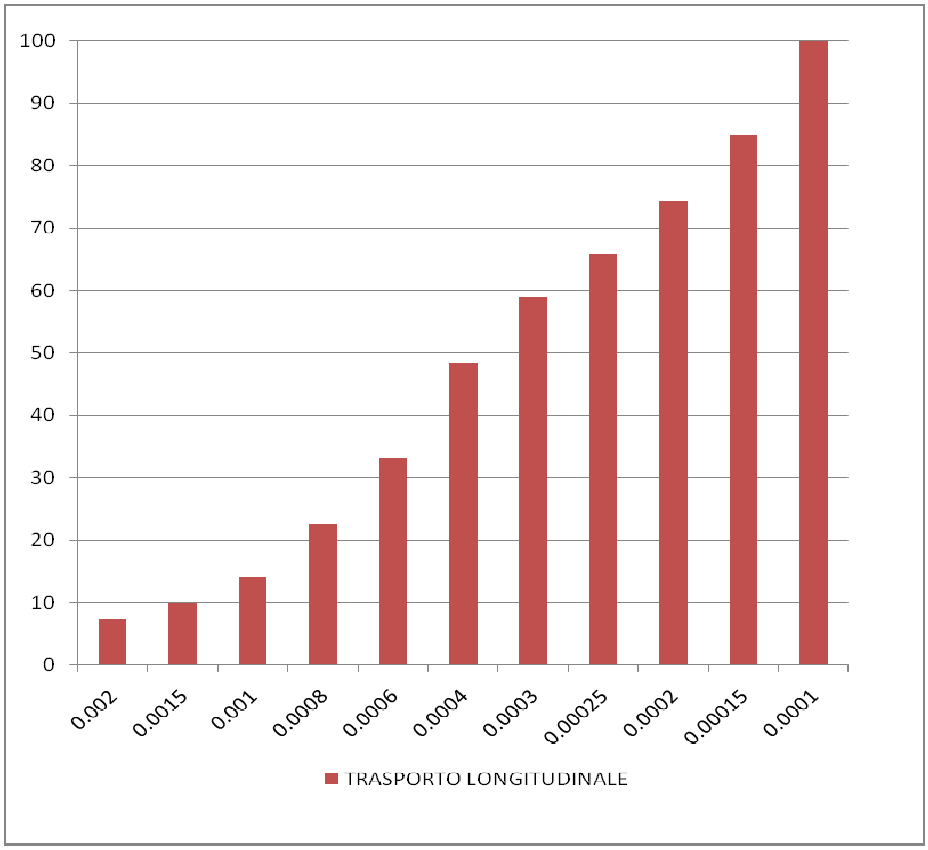



FIG. 9.3 - ANALISI DI SENSIBILITA' - GRANULOMETRIA

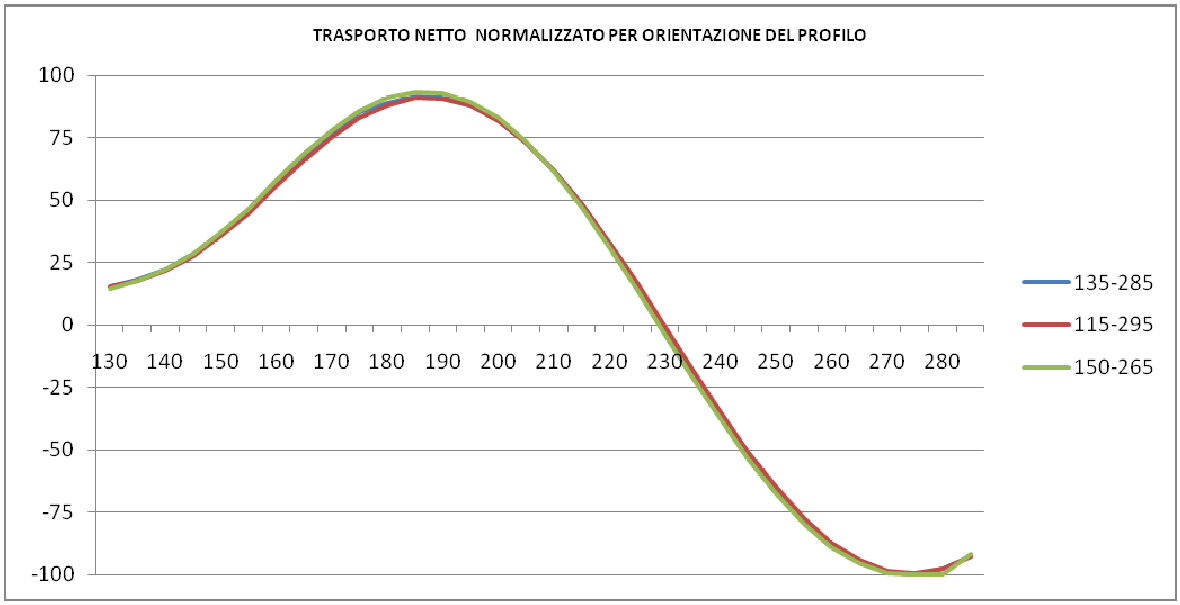



FIG. 9.4 - ANALISI DI SENSIBILITA' - ORIENTAZIONE DEL PROFILO

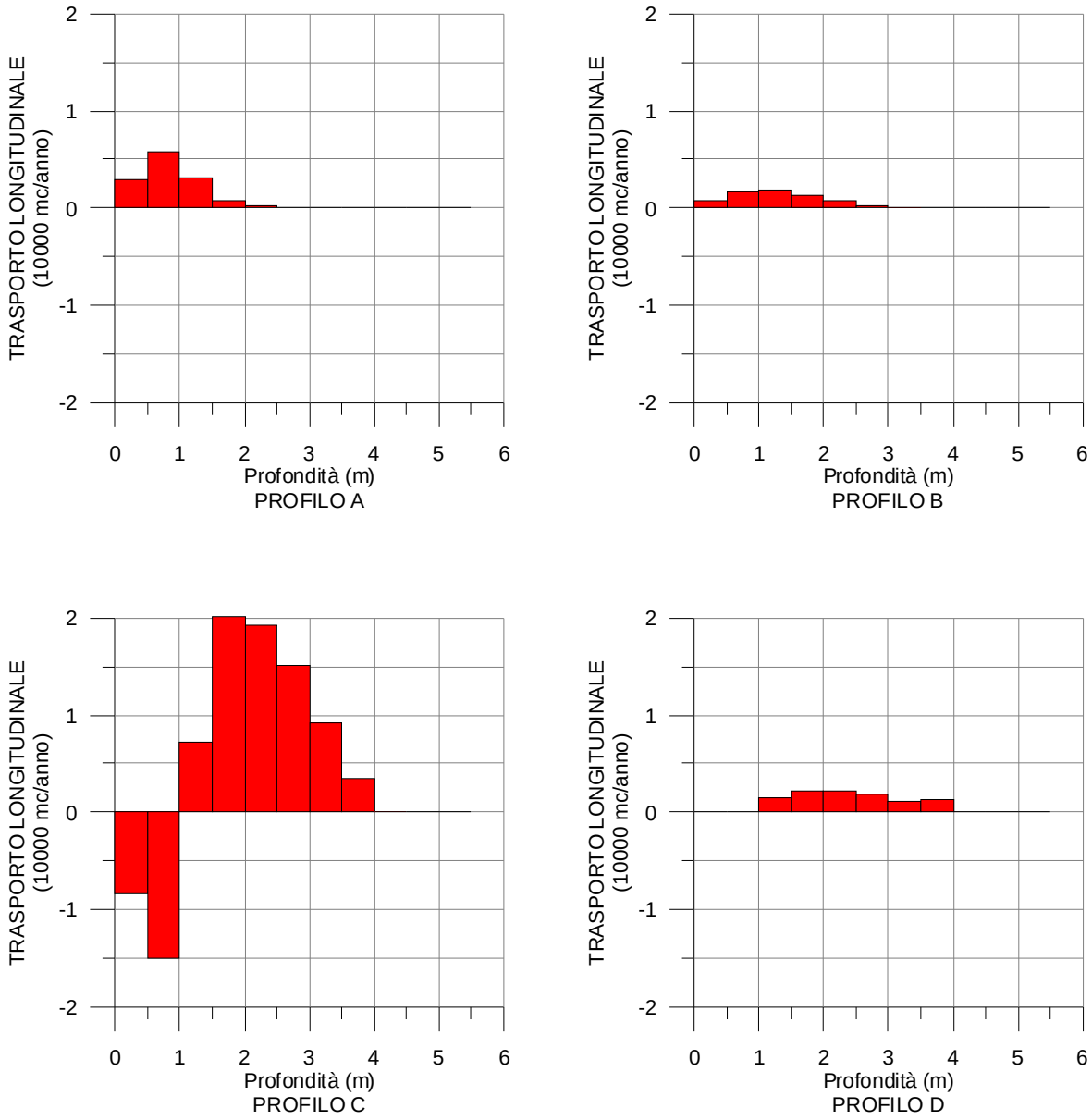



FIG. 9.5 - ANDAMENTO DEL TRASPORTO POTENZIALE IN FUNZIONE DELLA PROFONDITA'- PROFILI A-D

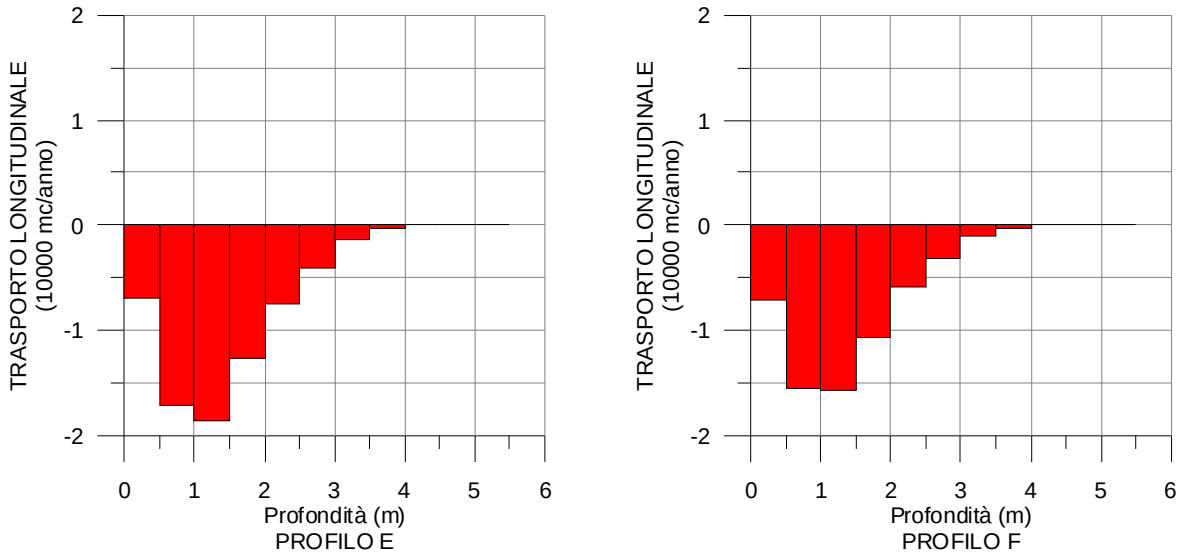



FIG. 9.6 - ANDAMENTO DEL TRASPORTO POTENZIALE IN FUNZIONE DELLA PROFONDITA'- PROFILI E-F

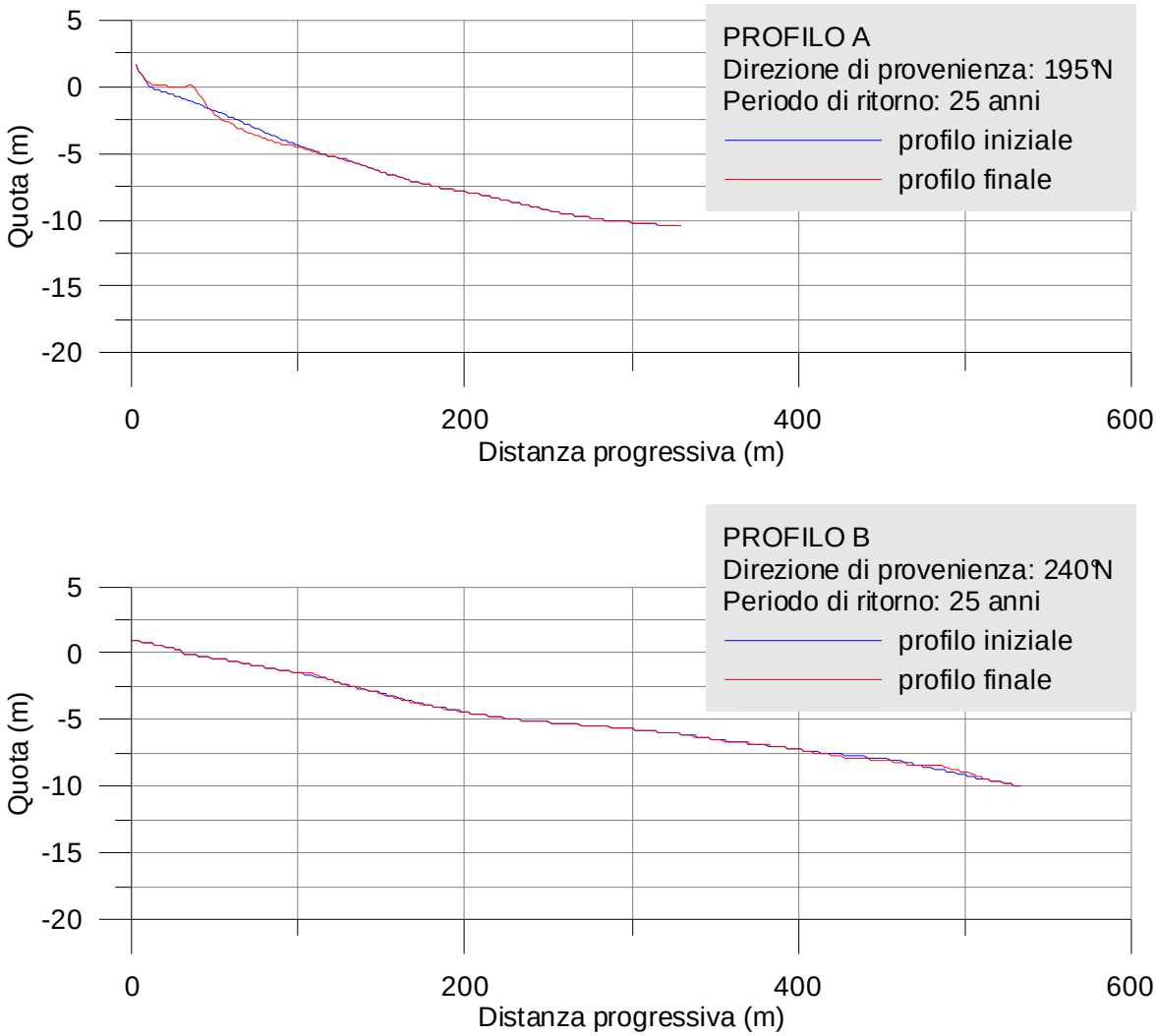



FIG. 9.7 - ESEMPI DELL'EVOLUZIONE DEL PROFILO IN SEGUITO ALLE MAREGGIATE ESTREME - PROFILI A-B

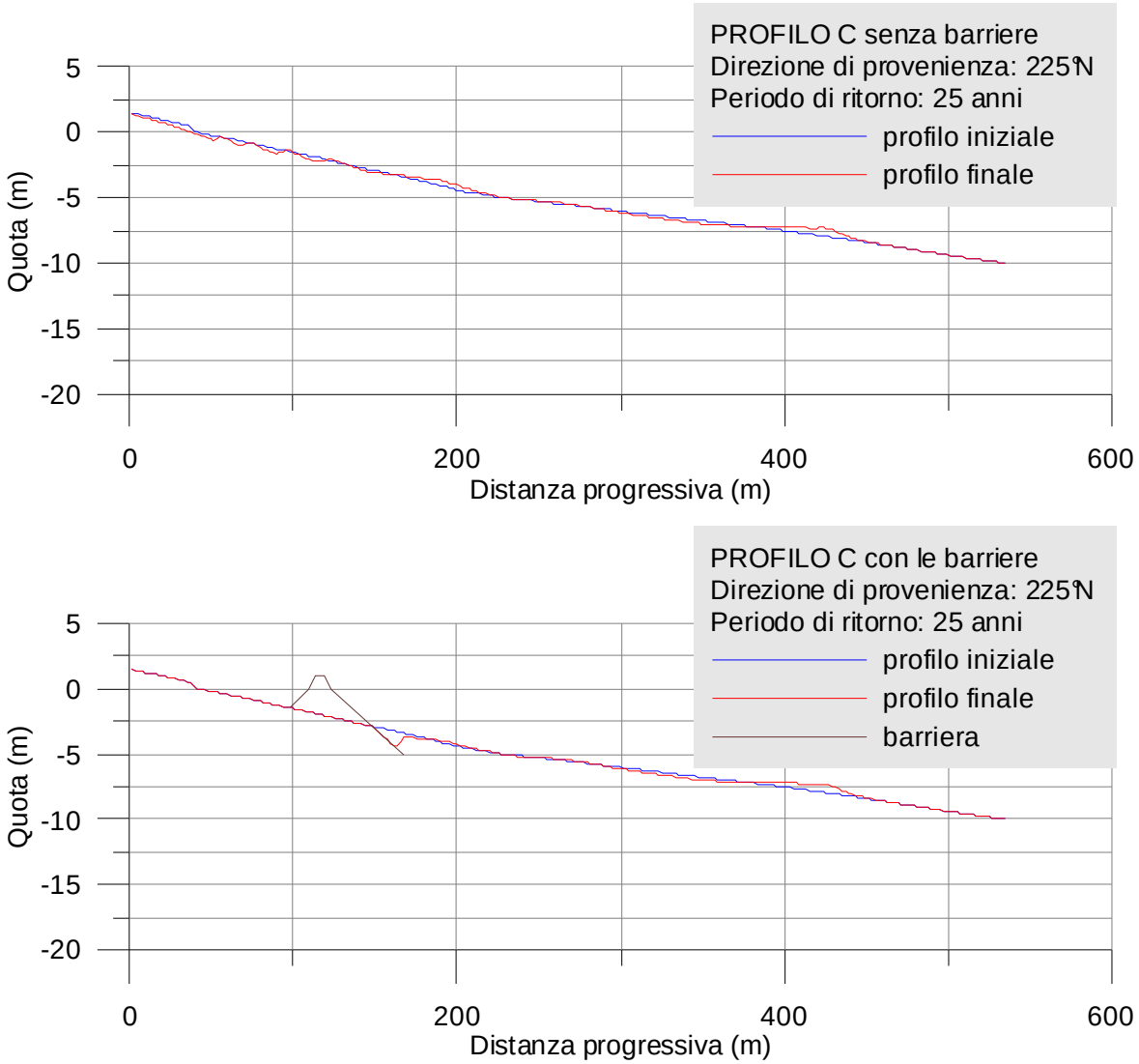



FIG. 9.8 - ESEMPI DELL'EVOLUZIONE DEL PROFILO IN SEGUITO ALLE MAREGGIATE ESTREME - PROFILO C

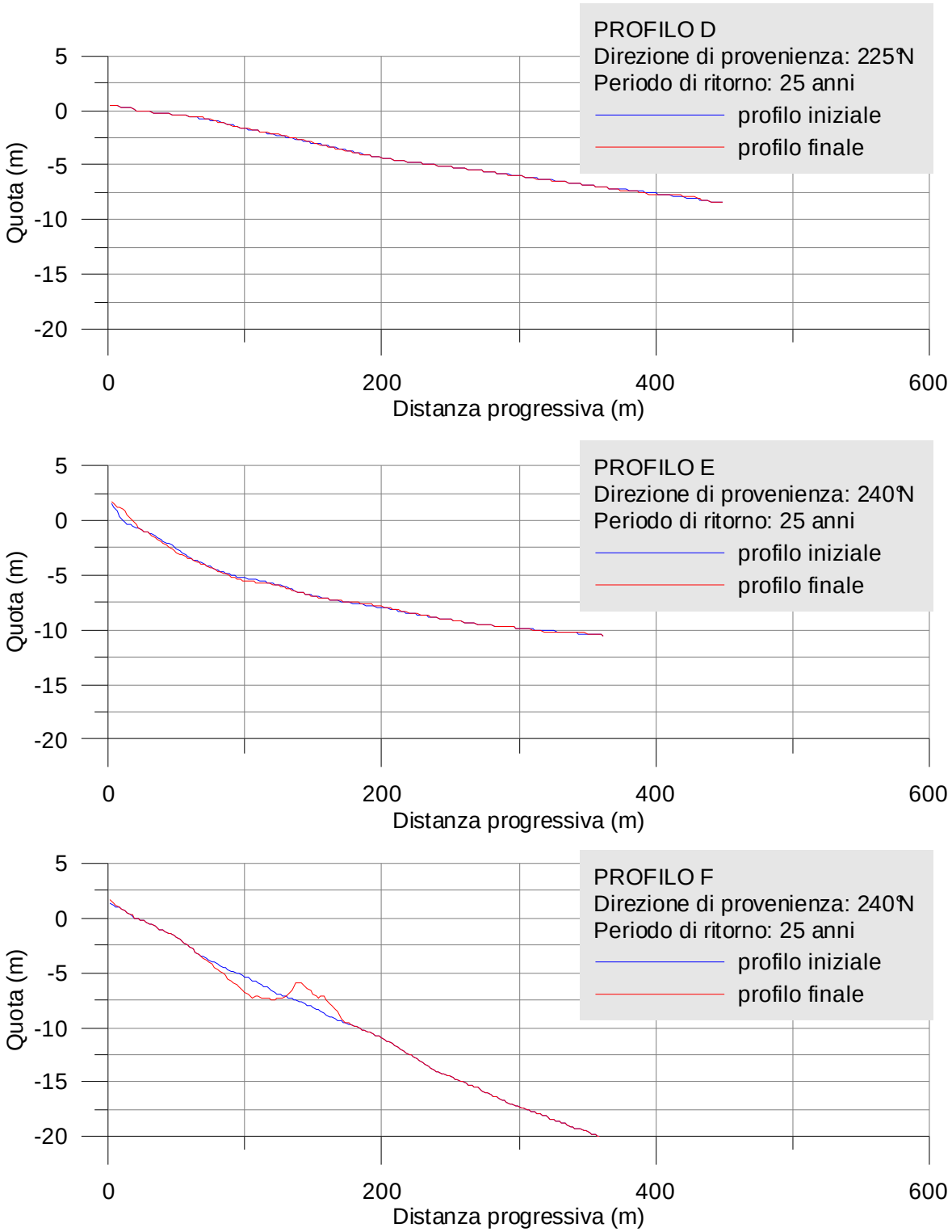



FIG. 9.9 - ESEMPI DELL'EVOLUZIONE DEL PROFILO IN SEGUITO ALLE MAREGGIATE ESTREME - PROFILI D-F

## APPENDICE 1 – MODELLO SWAN

### MODELLO "SWAN "(SIMULATING WAVES NEARSHORE) PER LO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO VERSO COSTA

La propagazione delle onde estreme a costa viene simulata mediante il ben noto modello "SWAN", che rappresenta lo stato dell'arte.
Lo SWAN (Simulating Waves Nearshore) è un modello numerico che produce stime realistiche dei parametri delle onde in aree costiere, a partire da condizioni definite al largo, tenuto conto delle condizioni del vento, delle correnti e delle caratteristiche del fondale.
L'entità dei diversi fenomeni è calcolata a partire dalla batimetria reale dell'area oggetto di studio.

SWAN è un modello spettrale di terza generazione, che tiene conto dei seguenti processi:

- rifrazione dovuta a variazioni spaziali di profondità e corrente;
- "shoaling" dovuto a variazioni spaziali di profondità e corrente;
- attrito e rifrazione indotti da correnti contrarie;
- trasmissione o dissipazione dovuti alla presenza di ostacoli (ad esempio barriere frangiflutti).
-

In SWAN sono formulati I seguenti processi di generazione e dissipazione:

- vento;
- "white-capping";
- frangimento;
- attrito al fondo;
- interazioni non-lineari onda-onda.

SWAN differisce dagli altri modelli analoghi e dai suoi predecessori per i seguenti aspetti principali:

- è un modello spettrale (è, quindi, possibile selezionare il profilo spettrale da definire per le condizioni al contorno così come la funzione di "spreading" direzionale);
- considera la generazione di onde da vento anche in acque basse;
- considera l'interazione onda-corrente anche in acque basse.
-
- Grazie ai tre punti sopra enunciati, SWAN definisce con maggiore completezza la dissipazione dell'energia rispetto ad altri modelli che tengono conto solo dell'attrito al fondo.

## 1. FORMULAZIONE GENERALE

SWAN descrive le onde mediante lo spettro bidimensionale di densità di azione d'onda, anche in condizioni in cui prevalgono fenomeni non lineari (ad esempio nella "surf-zone"). Anche in condizioni fortemente non lineari, infatti, è possibile stimare con ragionevole accuratezza la distribuzione spettrale al secondo ordine.
SWAN utilizza lo spettro di densità di azione $N(k,\theta)$ anziché lo spettro di densità di energia $E(k, \theta)$ perché, in presenza di correnti, la densità di azione si conserva mentre la densità di energia non si conserva.
La densità di azione è uguale al rapporto tra la densità di energia e la frequenza relativa $\sigma$:

$$N(\sigma,\theta) = E(\sigma,\theta)/\sigma.$$

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa $\sigma$ (misurata rispetto ad un sistema di riferimento che si muove con la velocità di propagazione dell'azione d'onda) e la direzione dell'onda $\theta$ (direzione perpendicolare alla cresta di ciascuna componente spettrale).

L'evoluzione dello spettro viene descritta mediante l'equazione di bilancio dell'azione spettrale, di seguito riportata, rispetto ad un sistema di coordinate cartesiane (Hasselmann et a., 1973):

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_x N + \frac{\partial}{\partial y}c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \qquad [1]$$

Il primo termine a sinistra rappresenta il gradiente locale di densità di azione, il secondo ed il terzo termine rappresentano la propagazione di densità di azione nello spazio geografico.
Il quarto termine rappresenta lo spostamento della frequenza relativa dovuto alle variazioni di profondità e corrente, mentre il quinto termine rappresenta la rifrazione indotta dalla corrente e dalle variazioni di profondità.

Le velocità di propagazione ($c_x$, $c_y$, $c_\sigma$, $c_\theta$) all'interno del modello sono definite mediante la teoria lineare.
Il termine **S** ( $=S(\theta,\sigma)$ ) a destra dell'espressione [1] è il termine sorgente espresso come densità di energia, ed è costituito dagli effetti di generazione, dissipazione, e interazioni non-lineari onda-onda.
Per maggiori dettagli si rimanda al manuale del modello (SWAN User Manual).

## 2. PARAMETRI PRINCIPALI

In SWAN le principali grandezze sono così definite:

Altezza d'onda significativa: **Hs** ( in m):

$$Hs = 4\sqrt{\iint E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}$$

dove $E(\omega,\theta)$ è la densità spettrale della varianza, $\omega$ la frequenza determinata dallo shift in frequenza della relazione di dispersione.

Periodo medio d'onda: **$Tm_{01}$** (in s):

$$Tm01 = 2\pi\left(\frac{\iint \omega\, E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}{\iint E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}\right)^{-1} = 2\pi\left(\frac{\iint \omega\, E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}{\iint E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}\right)^{-1}$$

Periodo medio d'onda: **$Tm_{02}$** (in s):

$$Tm_0 2 = 2\pi\left(\frac{\iint \omega^2\, E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}{\iint E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}\right)^{-1/2} = 2\pi\left(\frac{\iint \omega^2\, E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}{\iint E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}\right)^{-1/2}$$

Direzione media dell'onda: **Dir** (in gradi, secondo la convenzione cartesiana o nautica), come convenzionalmente definita (Kuik et al., 1988).

$$Dir = \arctan[\int \sin(\theta)\, E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta / \int \cos(\theta)\, E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta\,]$$

Direzione del picco d'onda: **PDir** (in gradi, secondo la convenzione cartesiana o nautica):

$$PDir = E(\theta) = \int E(\sigma,\theta)\, d\sigma = \int E(\omega,\theta)\, d\omega$$

Velocità orbitale "Root-Mean-Square" in prossimità del fondo: **$U_{rms}$** (in m/s)

$$U_{rms} = <(U^2)>^{1/2}$$

Velocità orbitale massima "Root-Mean-Square" in prossimità del fondo: **$U_{bot}$** (in m/s)

$$U_{bot} = \sqrt{2}\, U_{rms}$$

## 3. SCHEMATIZZAZIONE

L'area di studio viene discretizzata mediante un reticolo di maglie quadrate o rettangolari e ad ogni maglia viene assegnata la corrispondente profondità del fondale.

Il modello non ha particolari problemi nella risoluzione spaziale: possono così essere effettuate simulazioni della propagazione dell'onda a costa considerando reticoli di estremo dettaglio o reticoli a vasta scala.
E' inoltre possibile effettuare, ove necessario, l'innesto ("nesting") di uno o più reticoli dettagliati su uno a vasta scala, garantendo in questo modo condizioni ai contorni oggettive dei modelli di dettaglio.

## 4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Andorka Gal, J.H., L.H. Holthuijsen, J.C.M. de Jong and A.T.M.M. Kieftenburg, 1998, Wave transformation near a quasi-1D coast, 26th Int. Conf. Coastal Engng., Copenhagen,150-160

[2] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, 1996, The "SWAN" wave model for shallow water, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, pp. 668-676

[3] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R. Padilla-Hernandez, 1997, A nonstationary, parametric coastal wave model, Conf. Coastal Dynamics '97, Plymouth, 99-107

[4] Booij, N., L.H. Holthuijsen, N. Doorn and A.T.M.M. Kieftenburg, 1997, Diffraction in a spectral wave model, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 243-255

[5] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R. Padilla-Hernandez, 1997, Numerical wave propagation on a curvilinear grid, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 286-294

[6] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, 1998, Shallow water wave modelling, Oceanology International 98, The Global Ocean, Brighton, Conference Proceedings, 3, 483-491

[7] Booij, N., L.H. Holthuijsen and IJ.G. Haagsma, 1998, Comparing the second-generation HISWA wave model with the third-generation SWAN wave model, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 215-222

[8] Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J.Geoph.Research, 104, C4, 7649-7666

[9] Cavaleri, L. and L.H. Holthuijsen, 1998, Wave modelling in the WISE group, Proc. 26th Int. Conf. Coastal Engng., Copenhagen, 498-508

[10] Gorman, R.M. and C.G. Neilson, 1999, Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary, Coastal Engineering, 36, 197-217

[11] Holthuijsen, L.H., N. Booij and R.C. Ris, 1993, A spectral wave model for the coastal zone, Proceedings 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, Louisiana, July 25-28, 1993, New York, pp. 630-641

[12] Holthuijsen, L.H., N. Booij and R. Padilla-Hernandez, 1997, A curvi-linear, third-generation coastal wave model, Conf. Coastal Dynamics '97, Plymouth, 128-136

[13] Holthuijsen, L.H., N. Booij, R. Ris, J.H. Andorka Gal and J.C.M. de Jong, 1997, A verification of the third-generation wave model "SWAN" along the southern North Sea coast, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 49-63

[14] Holthuijsen, L.H., R.C. Ris and N. Booij, 1998, A verification of the third-generation wave model SWAN, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 223-230

[15] Holthuijsen, L.H., N. Booij and IJ.G. Haagsma, 1998, Comparing 1st-, 2nd - and 3rd-generation coastal wave modelling, 26th Int. Conf. Coastal Engng., Copenhagen, 140-149

[16] Padilla-Hernandez, R., P. Osuna, J. Monbaliu and L. Holthuijsen, 1998, Intercomparing third-generation wave model nesting, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 102-112

[17] Ris, R.C., L.H. Holthuijsen and N. Booij, 1994, A spectral model for waves in the near shore zone, Proc. 24th Int. Conf. Coastal Engng, Kobe, Oct. 1994, Japan, pp. 68-78

[18] Ris, R.C. and L.H. Holthuijsen, 1997, Modelling of current induced wave-blocking in a spectral wave model, 8th International Biennal Conference on Physics of Estuaries and Coastal Seas, J. Dronkers and M.B.A.M. Scheffers (eds.), The Hague, 139-144

[19] Ris, R.C., N. Booij and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part II: Verification, J.Geoph.Research, 104, C4,7667-7681

[20] Wood, D.J., M. Muttray and H. Oumeraci, 2000, The SWAN model used to study wave evolution in a flume, Coastal Engineering, accepted for publication.

## APPENDICE 2 – MODELLO IDRODINAMICO

## MODULO IDRODINAMICO BAROTROPICO PER LA SIMULAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE COSTIERA

### 1. Equazioni

Il modello è basato sulle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, mediate sulla verticale e su di un intervallo di tempo pari al periodo dell'onda.
Le equazioni sono le seguenti:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial (uh)}{\partial x} - \frac{\partial vh}{\partial y} \qquad [1]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g\frac{\partial \eta}{\partial x} - g\frac{u|\vec{u}|}{C^2 h} + \frac{1}{\rho h}\tau_x - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \qquad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g\frac{\partial \eta}{\partial y} - g\frac{v|\vec{u}|}{C^2 h} + \frac{1}{\rho h}\tau_y - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \qquad [3]$$

dove:

h: profondità riferita al livello medio del mare;

η: elevazione della superficie libera;

u,v: componenti della velocità orizzontale mediate sulla verticale.

$$v = \frac{1}{h}\int_{-h}^{\eta} v(z)dz \qquad u = \frac{1}{h}\int_{-h}^{\eta} u(z)dz \qquad [4]$$

f: parametro di Coriolis;

$C=C_o h^{1/6}$ coefficiente di Chezy;

$C_o$: coefficiente di scabrezza del fondo;

$\tau_x$ $\tau_y$: componenti dello stress superficiale del vento, legate alla velocità del vento W dalle relazioni

$$\tau_y = \rho_{aria} C_D W_y \left|\vec{W}\right| \qquad \tau_x = \rho_{aria} C_D W_x \left|\vec{W}\right| \qquad [5]$$

$S_{xx}$, $S_{yy}$, $S_{xy}$ componenti del radiation stress del moto ondoso, fornite secondo la teoria lineare da

$$S_{xx} = E\left(\frac{3}{2}n - \frac{1}{2}\right) + E\left(\frac{n}{2}\right)\cos(2\theta)$$

$$S_{yy} = E\left(\frac{3}{2}n - \frac{1}{2}\right) + E\left(\frac{n}{2}\right)\cos(2\theta) \qquad [6]$$

$$S_{xy} = En\cos(2\theta)\sin(2\theta)$$

dove:

$E = \frac{1}{8}\rho g H^2$ densità di energia dell'onda;

H: altezza dell'onda;

$\vartheta$: angolo tra la direzione di propagazione dell'onda e l'asse x;

$n = \frac{C_g}{C} = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{2Kh}{sinh(Kh)}\right]$ rapporto tra la velocità di gruppo e la velocità di fase dell'onda.

## 2. Il motodo di integrazione

Per l'integrazione delle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto è stato adottato uno schema numerico alle differenze finite di tipo esplicito.
Lo schema opera su di un reticolo regolare a maglie quadrate o rettangolari di tipo "traslato" nel quale, cioè, l'elevazione della superficie libera e le componenti della velocità sono definite in punti diversi della maglia, secondo lo schema indicato in **Fig. 1**.
Anche nel tempo la rappresentazione è di tipo "traslato", in quanto l'elevazione della superficie libera è definita al tempo n-1/2, n+1/2, n+3/2, ..., mentre le componenti della velocità sono definite al tempo n, n+1, n+2, ....

L'integrazione del sistema di equazioni viene effettuata in due passi: dapprima viene integrata l'equazione di conservazione della massa e viene calcolata l'elevazione della superficie libera al tempo n+1/2 a partire dai valori di η al tempo n-1/2 e di u e v al tempo n, successivamente vengono integrate le equazioni di conservazione della quantità di moto calcolando i valori di u e v al tempo n a partire dai valori al tempo n-1 e dai nuovi valori η al tempo n+1/2.
Questa procedura è necessaria per garantire la stabilità della soluzione numerica.
Nelle equazioni della conservazione della quantità di moto i termini non lineari di tipo avvettivo vengono schematizzati mediante uno schema "upwind", mentre i termini di attrito sono calcolati mediante uno schema di tipo semi-implicito, allo scopo di migliorare la stabilità della soluzione.
A causa della natura esplicita dello schema numerico adottato, il passo temporale Dt e le dimensioni spaziali Dx e Dy devono comunque soddisfare il criterio di stabilità di Courant-Levy:

$$D_t \leq \frac{\max(D_x, D_y)}{\sqrt{2}\left(|\vec{v}|\right) + \sqrt{gh)}} \qquad [7]$$

Per l'integrazione del sistema di equazioni debbono essere assegnate opportune condizioni iniziali e al contorno.
Nelle acque basse l'effetto accentuato dell'attrito determina il rapido attenuarsi delle perturbazioni del moto, per cui l'influenza delle condizioni iniziali tende a divenire trascurabile e dopo breve tempo si stabilisce una condizione di regime dipendente dall'equilibrio tra le condizioni al contorno ed i termini forzanti.
Ciò semplifica notevolmente il problema della determinazione delle condizioni iniziali per le quali in generale viene assunto uno stato di quiete:

$$\eta,\ u,\ v = 0 \quad \text{per } t=0 \qquad [8]$$

Per quanto riguarda le condizioni al contorno vengono effettuate le seguenti assunzioni:

ai contorni chiusi viene imposto l'annullamento delle componenti normali della velocità ($u_n$) e della derivata normale al contorno della componente longitudinale della velocità ($u_l$):

$$u_n = 0 \qquad \frac{\partial u_l}{\partial n} = 0 \qquad \text{per } t \geq 0 \qquad [9]$$

al contorno aperto parallelo alla costa, corrispondente al contorno con il mare aperto, viene imposto l'annullamento dell'elevazione della superficie libera;

ai contorni trasversali alla costa vengono imposte condizioni periodiche. Queste ultime corrispondono ad imporre l'uguaglianza dei flussi e dell'elevazione della superficie nei due contorni trasversali e presuppongono che il tratto di costa in esame presenti caratteristiche simili in corrispondenza ai due contorni.

## 3. Parametri di input

Per l'applicazione del modello sono necessari i seguenti dati di input:
geometria del bacino;
profondità in ogni maglia del reticolo;
rugosità del fondo in ogni maglia;
i termini del radiation stress in ogni maglia;
condizioni iniziali di u, v e $\eta$ in ogni maglia;
condizioni ai contorni aperti ad ogni passo di integrazione $\delta$ti;
è oscillazione di marea;
il vento superficiale (direzione ed intensità) ad ogni passo di integrazione $\delta$ti e per ogni maglia.

## 4. Caratteristiche dell'output

Come risultato dell'integrazione numerica, il modello fornisce, ad intervalli prefissati, il valore di U, V e $\eta$ in ciascuna maglia del bacino.
E' inoltre possibile ottenere una rappresentazione grafica dell'andamento del campo di corrente e dell'elevazione della superficie libera.

## 5. Referenze Bibliografiche

I. RAMMING H. G., 1972: "Reproduction of physical processes in coastal areas", Proc. of 13th Conference on Coastal Engineering, Vancouver, Vol. 3;

II. HSU S.A., 1986: "A mechanism for the increase of wind stress (drag) coefficient with wind speed over water surfaces: a parametric model", J. of Phys. Oceanography, 16, 144-150;

III. HANSEN W., 1962: " Hydrodynamical methods applied to oceanographyc problems", Proc. of the Symposium on Mathematical Hydrodynamical Methods of Physical Oceanography. Institut fur Meerskunde der Universitat, Hamburg;

IV. REID R.O. e BODINE B.R., 1968: "A Numerical model for storm surges in Galverston Bay", Journal of the Waterways Harbours and Coastal Division, ASCE, Vol. 102, n. WW1;

V. NODA, E.K., SONU C.J., RUPERT, V.C. and COLLINS, J.I. 1974: "Nearshore circulations under sea breeze conditions and wave-current interactions in the surf-zone", Tetra Tech Report TC-149-4;

VI. ALLENDER, J.H., DITMARS, J.D., HARRISON, W. and PADDOCK, R.A. 1978: " Comparison of model and observed nearshore circulation", Proc. of 16$^{th}$ International Conference on Coastal Engineering, Hamburg;

VII. LIU, P. and LENNON, G.P., 1978: " Finite Element Modelling of Nearshore Currents", Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 104, WW2.

VIII. BIRKEMEIER, W.A. and DALRYMPLE; R.A., 1976: " Nearshore Water Circulation Induced by Wind and Waves", Proc. of the Symposium on Modelling Technique, ASCE;

IX. BRUCE A., EBERSOLE, DALRYMPLE R.A. 1980: "Numerical modelling of nearshore circulation", Procedings of VII Coastal Engineering Conference, Sydney, Australia;

X. BACKHAUS J.O. 1983: "A semi-implicit scheme for the shallow water equations for application to shelf sea modelling", Continental Shelf Research, 2.

## APPENDICE 3 – MODELLO TRALIT

### MODELLO NUMERICO PER IL CALCOLO DEL TRASPORTO SOLIDO LITORANEO E DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DELLA SPIAGGIA

La disponibilità di una stima statisticamente valida del clima del moto ondoso al largo consente di valutare con analoga significatività il flusso di energia del moto ondoso incidente ed il conseguente trasporto solido litoraneo.
Il trasporto litoraneo longitudinale può essere infatti direttamente collegato alla componente longitudinale alla costa del flusso di energia associata al moto ondoso in fase di frangimento, come emerge da numerose osservazioni effettuate sia su modello fisico che in ambienti naturali.

Il modello qui descritto calcola il trasporto longitudinale potenziale nelle diverse sezioni in cui viene suddivisa la costa.
Il calcolo viene effettuato sulla base del clima P(H, $\theta$, T) del moto ondoso al largo (frequenza di eventi suddivisi per periodo e direzione di provenienza) e tiene conto dei contributi al trasporto dovuti a tutti gli elementi del clima che, per direzione di incidenza, risultano significativi per il tratto di litorale, pesati con la rispettiva probabilità di occorrenza.
Poiché in generale il clima è rappresentativo delle condizioni medie annuali del moto ondoso nell'area, il modello fornisce il trasporto potenziale medio annuo che si verifica lungo il tratto di costa, tenendo conto delle dimensioni del sedimento lungo il profilo batimetrico interessato dai fenomeni di trasporto e dalle modalità di frangimento delle onde.

Il modello calcola inoltre tutti i parametri necessari alla definizione della spiaggia emersa e sommersa, quali la distribuzione del frangimento delle onde, i limiti della surf.zone, il set-up e il run-up delle onde e fornisce, attraverso alcuni indici, le caratteristiche del trasporto trasversale.

## 1. EQUAZIONI

Il trasporto longitudinale del peso immerso $I_l$ (dyne/sec) del materiale sedimentario è legato alla componente litoranea del flusso di energia associata al moto ondoso in fase di frangimento P (erg/seccm) secondo la seguente relazione empirica:

$$I_l = Kp_l = K\,(E_b cn)_b \text{ sen } \alpha_b \cos \alpha_b \qquad [1]$$

dove:

| | |
|---|---|
| $E_b = .25\ \sigma_a\ g\ H_b^2$ | energia dell'onda in fase di frangimento. |
| $(Cn)_b$ | è la velocità di gruppo delle onde in fase di frangimento. |
| $\alpha_b$; $H_b$ | sono l'angolo di incidenza e l'altezza d'onda al frangimento. |
| K | è un coefficiente empirico. |

La grandezza $I_l$ è legata alla variabile trasporto longitudinale Q (cm/s) dalla relazione:

$$I_l = (\sigma_s - \sigma_a)\ ga'Q \qquad [2]$$

dove $\sigma_s$ e $\sigma_a$ rappresentano la densità del sedimento e dell'acqua, g è l'accelerazione di gravità e $a' \approx 0.6$ tiene conto della porosità del sedimento.
Per la definizione delle condizioni di moto ondoso si fa riferimento al clima del moto ondoso al largo (frequenza di eventi suddivisi per periodo, direzione ed altezza).
Per utilizzare il clima osservato al largo nel calcolo del flusso di energia a costa e quindi del trasporto è necessario eseguire una trasformazione opportuna, valutando le modifiche a cui è soggetto il moto ondoso nella propagazione verso costa per gli effetti combinati di shoaling, rifrazione e dissipazione fino al fenomeno di frangimento delle onde.
Nel modello l'entità di tali effetti è calcolata nell'ipotesi che la batimetria sia schematizzata mediante piani inclinati caratterizzati da pendenze diverse. La sua applicazione implica quindi che la configurazione morfologica della spiaggia sommersa sia sufficientemente regolare e il processo propagativo del moto ondoso per le principali direzioni di incidenza risulti uniforme.
L'effetto dell'attrito è stato introdotto in forma parametrica.
Per la sezione j della costa è quindi possibile calcolare il flusso di energia longitudinale $P_{lji}$ introdotto dall'elemento i-esimo costituente il clima e il valore del contributo al trasporto del sedimento $Q_{ji}$.
La somma dei diversi contributi, pesati con la loro frequenza percentuale $p_i = P(T,\theta_b,H_b)$ fornisce il valore del trasporto longitudinale netto di materiale sedimentario. Pertanto il trasporto longitudinale $Q_j$ in una sezione j della costa può essere espresso come:

$$Q_j = \Sigma_i Q_{ji} = \Sigma_i K\ P_{lji}\ p_i \qquad [3]$$

La quantità $P_{lji}$ viene calcolata secondo la formula:

$$P_{lji} = [(E_i\ Cn_i)_b\ \text{sen}\ \alpha_{ib}\ \cos\ \alpha_{ib}]_j \qquad [4]$$

I valori di altezza d'onda, corrispondenti alla matrice del clima al largo P(T,θ,H), sono propagati verso costa fino al verificarsi del frangimento. Tale procedura è estesa a tutti gli elementi del clima al largo la cui direzione di incidenza è compresa nel settore di esposizione della costa. Si ottiene quindi "un vettore di breaking" contenente tutti i parametri di interesse fisico e statistico necessari per calcolare il trasporto longitudinale.
I valori ottenuti applicando le formule precedenti sono rappresentativi di un trasporto longitudinale potenziale, quale derivante esclusivamente da considerazioni energetiche del moto ondoso. In realtà il trasporto effettivo dipende dalla disponibilità e dalla granulometria del sedimento, dalla morfologia del fondale e dalla modalità di frangimento delle onde.
Oltre ai valori di trasporto potenziale il modello fornisce anche una stima del trasporto effettivo ottenuto introducendo una dipendenza del coefficiente K (supposto costante nella formulazione originale di Komar e dello Shore Protection Manual), dal diametro medio del sedimento nell'area di profilo interessata dai fenomeni di trasporto, secondo la relazione proposta da Swart (1976), e dall'indice di breaking $\varepsilon_b$, secondo quanto proposto da Kamphuis e Readshow (1978).
La relazione proposta da Swart è la seguente:

$$K = A \log(0.00146/D_{50}) \qquad [5]$$

dove A è una costante e $D_{50}$ è il diametro medio del sedimento.

Nel modello il profilo batimetrico viene schematizzato, dal punto di vista sedimentologico, in 4 fasce (caratterizzate dal diametro medio $D_{50}$ e dalla lunghezza l).
Il coefficiente K risulta dipendente dalla media di diametri medi del sedimento $D_{50}$, pesati con la larghezza delle fasce corrispondenti, calcolata nella zona interessata dai fenomeni di trasporto. Tale calcolo è effettuato per ogni elemento della matrice del clima P(H, θ, T) che influisce sul tratto del litorale in esame, in quanto per ogni elemento varia l'estensione della fascia di profilo trasversale interessata da un trasporto attivo del sedimento.

I risultati sperimentali di Kamphuis e Readshow indicano una minore efficienza nel sollevamento del sedimento per le onde che si rompono per "spilling" rispetto alle onde che si rompono per "plunging" o "surging".
Gli autori suggeriscono di introdurre una dipendenza di K dall'indice di breaking $\varepsilon_b$, il cui valore tende a crescere passando da condizioni di rottura per spilling a quelle per plunging e surging, risultando inferiore a 0.4 nel caso di spilling, compreso tra 0.4 e 2 nel caso di plunging e maggiore di 2 nel surging.
La relazione proposta risulta essere la seguente:

$$\begin{aligned} K &= 0.28 && \text{per } \varepsilon_b < 0.4 \\ K &= 0.7\varepsilon b && \text{per } 0.4 \square\ \varepsilon b \square\ 1 \\ K &= 1. && \text{per } \varepsilon b > 1 \end{aligned} \qquad [6]$$

dove l'indice di breaking è dato da:

$$\varepsilon_b = \tan(\alpha)/(H_b/L_o)^{1/2}$$

in cui tan($\alpha$) è la pendenza del fondale, $H_b/L_o$ è la ripidità dell'onda.
Nel modello, per ogni elemento della matrice del clima P(H, $\theta$, T) si calcola il valore dell'indice di breaking e quindi il corrispondente contributo al trasporto.

## 1.1 Criterio di frangimento dell'onda

Nel modello si utilizza il criterio di frangimento riportato in SPM (1977):

$$H_b/d_b = \Gamma \qquad [7]$$

in cui $\Gamma$ dipende dalla ripidità dell'onda e dalla pendenza m del fondale, secondo le relazioni seguenti:

$$\Gamma = b-(aH_b)/(gT^2)$$

$$b = 1.56/(1+e^{-19.5m})$$

$$a = 1.36\ g(1-e^{-19m})$$

Per la valutazione di $\Gamma$ si effettua una stima iniziale di $H_b = H_o\, K_r\, K_f\, K_s$ in cui:

$K_s = 0.76\ m^{1/7}\ (H_o/L_o)^{-1/4}$ — coefficiente di shoaling (Wang e Le Mehautè, 1980)

$K_r = (\cos\alpha_o/\ \cos\alpha_b)^{1/2}$ — coefficiente di rifrazione

mentre il coefficiente di attrito $K_f$ è introdotto in forma parametrica.
Per quanto riguarda la modalità di frangimento delle onde sul profilo in esame, il modello fornisce la distribuzione dei valori dell'indice di breaking $\varepsilon_b$ che permette di individuare la modalità di rottura prevalente, tenendo conto della ripidità dell'onda e della pendenza del profilo.

## 1.2 Calcolo dei parametri caratteristici della spiaggia

Il modello fornisce alcuni parametri utili a caratterizzare la fascia costiera ed in particolare a definire il limite al largo e a costa dell'area interessata dai fenomeni di trasporto e la zona dei frangenti.

### 1.2.1 Il limite al largo

La massima profondità verso il largo a cui si ha un trasporto attivo del sedimento dovuto al moto ondoso è valutata mediante la formula di Hallermeier (1978):

$$d_{lim} = 2.28\ H - 68.5\ H^2/(gT^2) \qquad [8]$$

dove H è l'altezza d'onda locale.
Nel modello la profondità limite $d_{lim}$ è calcolata per ogni elemento della matrice del clima, ottenendo una distribuzione della profondità limite per ogni punto di calcolo del trasporto.

### 1.2.2 La linea dei frangenti

La profondità di frangimento è calcolata applicando la formula [7] per ogni elemento del clima. Il modello fornisce la distribuzione della profondità di rottura per ogni punto di calcolo del trasporto.

### 1.2.3 Il limite a costa

Nell'area costiera assumono importanza i fenomeni di "set-up" e di "run-up": il primo è l'innalzamento medio del livello del mare che si ha in seguito alla diminuzione delle altezze d'onda conseguenti al flusso di massa verso profondità decrescenti; il secondo è la massima elevazione, al di sopra dell'innalzamento medio, raggiunta a riva dall'onda dopo il frangimento, dovuta al flusso di energia verso costa.
Il modello fornisce i valori massimi a riva del set-up e del run-up ed i valori corrispondenti al 50% e al 95% dei casi per i diversi punti di calcolo del trasporto, tenendo conto delle condizioni meteo-marine e morfologiche locali. Per il calcolo del set-up si utilizza la seguente relazione:

$$S = 5/16 \Gamma H_b \, [1 - 5/6\pi \, H_b/(\Gamma L_o) \sin^2 \alpha_o] \qquad [9]$$

dove:

$L_o$ è la lunghezza;
$\alpha_o$ è l'angolo di incidenza dell'onda al largo;
$\Gamma = H_b/d_b$, $H_b$ è l'altezza dell'onda alla rottura e $d_b$ è la profondità al frangimento.

Per il calcolo del run-up R si utilizzano le formule di Svendsen e Jonsson(1976):

$$R = C_{pr} \tan(\beta) (H_o/L_o)^{-1/2} \qquad [10]$$

dove:

$\tan(\beta)$ è la pendenza del fondale, $H_o/L_o$ è la ripidità dell'onda, $C_{pr}$ è un coefficiente di riduzione che tiene conto della permeabilità e della rugosità del fondo ($C_{pr} \leq 1$).

## 1.3 Analisi delle condizioni di equilibrio del profilo di spiaggia

Da osservazioni effettuate da diversi autori è stato evidenziato il fenomeno di selezione dei sedimenti nella direzione ortogonale alla costa dovuto al trasporto trasversale; è stato così sviluppato un modello interpretativo del fenomeno basato sul concetto di dimensioni del sedimento in equilibrio.
Secondo tale modello, fissate le caratteristiche del moto ondoso, per ciascuna posizione nella zona di frangimento delle onde esiste una dimensione del sedimento tale per cui esso risulta in equilibrio. Il sedimento di dimensione minore della "dimensione di equilibrio" si muove verso il largo, quello di dimensione maggiore si muove verso costa.
E' possibile pertanto, note le caratteristiche del moto ondoso e la natura del sedimento, prevedere la direzione prevalente del trasporto trasversale; non è possibile invece valutare su tale base la sua intensità.
Hattori e Kamawata (1980) hanno evidenziato anche l'importanza della ripidità dell'onda e della pendenza del fondale sulla direzione del trasporto trasversale.
La relazione da loro proposta è:

$$I_H = (H_o m g T)/[L_o W(D_{50})] \quad [10]$$

dove $H_o$, $L_o$, T sono rispettivamente l'altezza, la lunghezza e il periodo dell'onda al largo, $W(D_{50})$ è la velocità di sedimentazione delle particelle di diametro $D_{50}$, m è la pendenza del profilo del fondo, g è l'accelerazione di gravità.
Per valori dell'indice di Hattori $I_H < 0.5$ si ha trasporto verso costa, per $I_H > 0.5$ si ha trasporto verso il largo.
Il modello calcola la distribuzione dei valori dell'indice di Hattori mediante la [10], fornendo alcune indicazioni generali sull'equilibrio del profilo nelle condizioni di moto ondoso studiate, indicando se il profilo tende all'erosione, all'accrescimento oppure è in sostanziale equilibrio.

## 2. PARAMETRI DI INPUT

I parametri di input del modello sono:

- clima ondoso al largo;
- pendenza al largo e a costa del fondale nelle sezioni considerate;
- diametro medio del sedimento ($D_{50}$) in quattro fasce lungo la sezione considerata e rispettive distanze da costa;
- l'orientazione della costa;
- il settore di esposizione della costa.

## 3. CARATTERISTICHE DELL'OUTPUT

Il modello fornisce in output:

- valori del trasporto netto e del trasporto longitudinale nei due sensi;
- distribuzione del trasporto per classi di altezza d'onda e direzione;
- distribuzione del trasporto in funzione della profondità;
- distribuzione della profondità di frangimento delle onde;
- distribuzione della profondità limite della spiaggia sommersa in funzione dell'altezza d'onda;
- distribuzione dell'indice di Hattori e dell'indice di frangimento;
- valori medi al 95% e massimi del set-up e run-up delle onde;
- flusso medio di energia a costa e direzione media del flusso.

## 4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Komar P.D., 1976 - “Beach Processess and Sedimentation”; Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs.

Kamphuis J.W., Readshow J.S., 1978 - “A Model Study alongshore Sediment Transport Rate”; XVI Coastal Engineering Conference, Hamburg, Germany.

Swart D.H, 1976 - “Predictive Equation regarding Coastal Transport”, XV Coastal Engineering Conference, Honolulu, Hawaii.

Shore Protection Manual, 1977 - U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Department of the Army Corps of Engineers.

Wang D.J., Le Mehaute B., 1980 - “Breaking Wave Characteristics on a Plane Beach”; XVII Coastal Engineering Conference.

Hallermeier R.J., 1978 - “Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion”, XVI Coastal Engineering Conference, Hamburg, Germany.

Basco D.R., 1982 - “Surf Zone Currents”; Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, Miscellaneous Report N. 82-7.

Svendsen I.A., Jonsson I.G., 1975 - “Hydrodynamics of Coastal regions”; Den Private Ingenirfond; Technical University of Denmark, Lyngby.

Hattori M., Kawamata R., 1980 - “Onshore - Offshore Transport and Beach Profile Change”, XVII Coastal Engineering Conference, Sidney, Australia.

Sunamura T., 1980 “A Laboratory Study of offshore Transport of Sediment and a Model for Eroding Beaches”; XVII Coastal Engineering Conference, Sidney, Australia.

# APPENDICE 4 – MODELLO SBEACH

## IL MODELLO SBEACH – "STORM INDUCED BEACH CHANGE MODEL"

Sviluppato presso l'US Army Corps of Engineers (Larson *et al.,* 1990), il modello **SBEACH** simula in maniera accurata l'evoluzione di un profilo di spiaggia arbitrario sottoposto a variazioni del livello del mare e dell'energia del moto ondoso incidente.
Tale modello è stato sviluppato a seguito di uno studio finalizzato alla comprensione dei rapporti "causa-effetto" tra i fattori che determinano il profilo di spiaggia e, quindi, alla previsione dell'evoluzione del profilo.

La proprietà fondamentale del modello è riprodurre in modo deterministico le principali caratteristiche del profilo a partire da relazioni empiriche per il trasporto sedimentario trasversale alla costa ("cross-shore") indotto dalle onde, trascurando gli aspetti su piccola scala ed evitando descrizioni complesse del flusso del trasporto sedimentario: l'analisi a macroscala (metri, ore) ha permesso la semplificazione della trattazione delle variazioni del profilo di spiaggia, nonostante la complessità dei processi coinvolti.

Il punto di maggiore forza di **SBEACH** consiste nell'inserimento della crescita e del movimento delle barre come parte integrante delle variazioni del profilo di spiaggia, considerando che queste strutture costituiscono una protezione naturale per le spiagge esposte a forti processi erosivi.

Dato un profilo iniziale del fondo, il modello assume che le variazioni del profilo siano dovute alle onde che frangono, e principalmente alle onde corte (con periodi compresi tra 3 e 20 secondi).
L'area investigata dal modello è la spiaggia "emersa e sommersa" compresa tra il limite superiore rappresentato dal limite di run-up, ed il limite inferiore posto al largo alla profondità a cui non avviene trasporto trasversale significativo. Una delle assunzioni fondamentali del modello è l'esistenza di un profilo di equilibrio della spiaggia, se sottoposta a condizioni costanti di moto ondoso per tempi sufficientemente lunghi.
Il trasporto "cross-shore" è determinato dalle caratteristiche dell'onda locale, del livello del mare e dalle proprietà del profilo iniziale.

La distribuzione delle altezze d'onda utilizzata per il calcolo del trasporto è ottenuta applicando la teoria lineare delle onde al di fuori della "surf-zone" , mentre all'interno della fascia dei frangenti (dalla profondità di frangimento fino alla costa) la distribuzione delle

altezze d'onda è ottenuta applicando il modello di decadimento dei frangenti (Dally, 1980), ampiamente validato.
Nel calcolo della distribuzione delle altezze d'onda sono incorporati gli effetti di "set-up" e "run-up" delle onde, mediante la risoluzione dell'equazione:

$$\frac{d\,S_{xx}}{dx} = -\rho\, g(h+\eta)\frac{d\eta}{dx} \qquad [1]$$

dove $S_{xx}$ è il radiation stress diretto verso la costa e $\eta$ è l'elevazione della superficie del mare.

Il modello è strutturato in modo tale che ad ogni passo temporale di calcolo:

- effettua la suddivisione del profilo di spiaggia in regioni specifiche a seconda delle caratteristiche delle onde locali, allo scopo di specificare le caratteristiche del trasporto;
- calcola il trasporto trasversale alla costa in ciascuna delle suddette regioni del profilo;
- calcola, infine, le variazioni indotte nel profilo applicando l'equazione di conservazione della massa al trasporto trasversale.

Le quattro regioni specifiche sono la *zona I* ("prebreaking") compresa tra il limite al largo ed il punto di breaking, la *zona II (*di transizione dei frangenti) compresa tra il punto di frangimento ed il "plunge point" (punto in cui il frangente si ricurva su se stesso movendosi verso la spiaggia), la *zona III* compresa tra il "plunge point" ed il punto in cui le onde si riformano, rappresenta la l'area in cui le onde sono completamente rotte e la loro energia decade gradualmente, ed infine la *zona IV* ("swash zone") che si estende fino al limite di "run-up".

Nella zona I la distribuzione del trasporto viene determinata nei pressi del punto di frangimento, secondo l'equazione

$$q = q_b\, e^{-\lambda(x-x_b)} \qquad [2]$$

dove $q_b$ rappresenta la frazione del trasporto nel punto di frangimento, $x_b$ è la posizione del punto di frangimento rispetto alla linea di costa e $\lambda$ è un coefficiente di decadimento spaziale stimato empiricamente. Quindi nella zona I il trasporto decade in maniera esponenziale con la distanza dalla costa.

La limitata estensione della zona II non permette la definizione quantitativa delle caratteristiche del trasporto netto, che viene derivato calcolato a partire dalle variazioni medie del profilo, mentre nella zona III l'andamento del trasporto mostra una buona correlazione con quello dell'energia dissipata per unità di volume di acqua, derivante dal modello di decadimento di energia dei frangenti di Dally.

$$q = \begin{cases} 0 & D < D_{eq} - \dfrac{\varepsilon}{K}\dfrac{dh}{dx} \\ K\,(D - D_{eq} + \dfrac{\varepsilon}{K}\dfrac{dh}{dx} & D > D_{eq} - \dfrac{\varepsilon}{K}\dfrac{dh}{dx} \end{cases} \qquad [3]$$

dove K è un coefficiente empirico per il trasporto, il cui valore è può essere compreso tra 1.1-1.9 $10^{-6}$ $m^4/N$, D è l'energia dissipata per unità di volume, $\varepsilon$ un coefficiente empirico per il termine del trasporto dipendente dalla pendenza pari a 0.001 $m^2$/sec., $D_{eq}$ è l'energia dissipata in condizioni di equilibrio (quando il trasporto netto mediato nel tempo è nullo attraverso una qualunque sezione del profilo).

In corrispondenza della zona IV il trasporto è una funzione della pendenza del profilo, delle caratteristiche del sedimento e delle proprietà delle onde che risalgono la spiaggia emersa. La mancanza di dati relativi a tali fattori non ha permesso la derivazione di una relazione tra la quantità di materiale trasportato ed i suddetti fattori.
Tuttavia sono state effettate varie osservazioni qualitative, che hanno dimostrato la riduzione approssimativamente lineare del trasporto in direzione della spiaggia.

La direzione prevalente del trasporto trasversale è determinata mediante l'equazione:

$$\frac{H_0}{L_0} = M\left[\frac{H_0}{wT}\right]^3 \qquad [4]$$

che rappresenta la relazione tra la ripidità delle onde in acque profonde ($H_0/L_0$) ed il parametro dimensionale che tiene conto della velocità di caduta del sedimento ($H_0/wT$), sviluppato inizialmente come criterio per la previsione di formazione di profili di berma (trasporto "onshore" prevalente) o di barra (trasporto "offshore" prevalente).

Un'ampia descrizione del modello è riportata nel documento " Mathematical modeling of the fate of beach fill" (M. Larson, N.Kraus, Coastal Engineeering, 16 (1991) 83-114) al quale si rimanda per i dettagli.