



REGIONE CALABRIA
PROVINCIA DI COSENZA



COMUNE DI AMANTEA

MIGLIORAMENTO INFRASTRUTTURALE DEL PORTO
TURISTICO DI AMANTEA

PROGETTO DEFINITIVO - ESECUTIVO

PROGETTISTI: RTP

CAPOGRUPPO MANDATARIA:

MANDANTE:



Viale Lazio, n°13
90144 Palermo (PA)



Corso Umberto I, n°154
80138 Napoli (NA)

Progettista Responsabile integrazione prestazioni specialistiche
Ing. *Guilermo Migliorino*



Elaborato:

STUDIO METEOMARINO

CODIFICA

2019-03

CODICE DOCUMENTO ITC

1	0,1	WW	R,H	0,8
---	-----	----	-----	-----

REV.

0

SCALA

ELABORATO

R8

Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
0	12/03/2020	1° EMISSIONE	D. ALFIERI F.	G. CANTISANI	A. BORSANI

Visto:

Il Responsabile Unico del Procedimento

Ing. Francesco STELLATO

INDICE

<i>Introduzione</i>	3
<i>Analisi dei dati ondametrici</i>	4
<i>Trasposizione dei dati di moto ondoso</i>	11
<i>Clima meteomarinario medio al largo del paraggio di Amantea</i>	26
<i>Correlazioni periodo-altezza d’onda</i>	31
<i>Propagazione del moto ondoso sottocosta</i>	36
<i>Clima meteomarinario medio sottocosta</i>	48
<i>Eventi estremi di moto ondoso al largo e sottocosta (onde di progetto)</i>	52
<i>Clima meteomarinario equivalente (onde di modellazione)</i>	62
<i>Flusso di energia del moto ondoso al largo</i>	64
<i>Flusso di energia del moto ondoso sottocosta</i>	68
<i>Determinazione dell’onda di progetto</i>	70
<i>Profondità di chiusura di spiaggia</i>	72
<i>Analisi dei livelli</i>	75
<i>Risalita del moto ondoso sulla spiaggia</i>	79

Introduzione

Il presente studio è stato redatto a corredo del progetto dal titolo “Miglioramento infrastrutturale del Porto Turistico di Amantea”.

Lo studio riguarda la modellazione del clima meteomarino al largo e sottocosta del paraggio di Amantea, importante comune costiero del tirreno calabrese centrale appartenente alla provincia di Cosenza.

La corretta determinazione delle onde che investono un paraggio rappresenta una base fondamentale nella progettazione degli interventi di ingegneria marittima e nella conoscenza della dinamica evolutiva di un litorale. Ai fini di una successiva progettazione marittima, della modellazione della morfodinamica del litorale di Amantea, risulta essenziale la definizione di un clima meteomarino medio sottocosta, in prossimità della zona dei frangenti, e di un clima meteomarino estremo, per la caratterizzazione delle onde di progetto ai fini del dimensionamento delle opere a gettata.

La prima parte dello studio è relativa alla selezione della boa ondometrica, da cui poter effettuare le analisi delle registrazioni delle serie temporali delle grandezze del moto ondoso (altezza, periodo e direzione di provenienza). In particolare, i dati ondometrici vengono opportunamente filtrati per epurare i dati provenienti da registrazioni errate e, quindi classificati per classi di altezza significativa, e settori direzionali di provenienza del moto ondoso.

Successivamente, i dati meteomarini della boa ondometrica di riferimento sono opportunamente trasferiti al largo del paraggio di Amantea, attraverso il metodo della trasposizione geografica, che consente la determinazione dei valori di altezza e periodo nell'area oggetto di studio, mediante un approccio empirico per la determinazione della deviazione angolare, che subiscono le onde nel trasferimento da un paraggio ad un altro.

Le analisi sono effettuate in base all'esposizione geografica dei paraggi sotto l'azione dei venti foranei attraverso la determinazione dei fetch.

Così come per i dati estrapolati dalle registrazioni degli ondometri, le grandezze meteomarine al largo di Amantea sono opportunamente classificate, ai fini della definizione del clima meteomarino medio. Vengono inoltre determinate le correlazioni esistenti fra i valori di altezza d'onda significativa, periodo medio e periodo di picco.

Le classi di altezza d'onda associate ai settori direzionali di provenienza delle onde sono propagate da largo a sottocosta, con particolare attenzione alle batimetrica -5 m, in modo da quantificare precisamente gli effetti della batimetria sull'evoluzione delle grandezze del moto ondoso. La propagazione delle onde viene effettuata attraverso un modello numerico, basato sull'evoluzione spaziale dello spettro d'energia del moto ondoso, che tiene conto degli effetti dello shoaling e della rifrazione.

Sulla base del clima meteomarino al largo, vengono determinate le mareggiate che hanno investito il paraggio di Amantea e viene successivamente effettuata l'analisi degli eventi estremi di moto ondoso per differenti settori direzionali, ai fini della determinazione dell'onda di progetto a prefissato tempo di ritorno. Per i tempi di ritorno più significativi viene successivamente effettuata la propagazione delle onde di progetto fino a sottocosta, ai fini del dimensionamento delle opere previste per il litorale in esame.

Ai fini dell'analisi morfologica e morfodinamica del tratto litoraneo di Amantea, vengono calcolate le onde di modellazione sottocosta, i flussi energetici del moto ondoso al largo e sottocosta, la profondità di chiusura di spiaggia, e il massimo livello di risalita d'acqua sulla spiaggia, sulla base dall'analisi dei livelli marini mareali meteorologici e astronomici e del run-up indotto dal moto ondoso.

Analisi dei dati ondametrici

La caratterizzazione del moto ondoso medio ed estremo al largo di Amantea è stata effettuata a partire dall'analisi delle serie storiche registrate dagli ondometri del Tirreno Centro-Meridionale della Rete Ondametrica Nazionale (RON) del Sistema Idrografico e Mareografico Nazionale, aventi una sufficiente serie storica di dati ed un'esposizione del paraggio simile a quella di Amantea, oggetto del presente studio. In particolare, è stato preso in esame l'ondametro ormeggiato al largo di Cetraro.

Lo scopo dell'analisi delle serie storiche dell'ondametro è rivolta ad effettuare una modellazione del clima ondoso con una serie di dati più ampia possibile. La boa di Cetraro è del tipo Datawell Directional Waverider MKII e registra i dati di moto ondoso a partire dal mese di Gennaio del 1999 (Figura 1). Essa è posizionata nel punto di coordinate geografiche pari a: Latitudine $39^{\circ} 29' 28''$ e Longitudine $15^{\circ} 52' 16''$. Le registrazioni utilizzate, tra quelle

a disposizione della boa di Cetraro, sono relative al periodo compreso tra il 1 Aprile 1999 – ed il 31 Marzo 2007, tali dati sono sufficienti per la definizione di un clima meteomarino e per un successivo studio di dinamica costiera di un paraggio. L'unica limitazione nel considerare gli eventi ondosi provenienti da Cetraro è legata alla durata della serie storica, che risulta pari a 8 anni. Pertanto, nell'analisi degli eventi estremi a prefissato periodo di ritorno, occorre essere cauti nella valutazione delle altezze d'onda significative (H_s), con elevati tempi di ritorno (T_r). Per la definizione del clima ondoso al largo di Cetraro, sono state effettuate le elaborazioni dei dati a partire dalle serie storiche degli ondometri RON che riportano, con cadenza temporale trioraria, altezza d'onda significativa, periodo di picco dello spettro, periodo medio, direzione media di propagazione, temperatura dell'acqua, densità spettrale, direzione media spettrale di propagazione, curtosi, skewness e spread. I dati meteomarini della boe in esame sono stati acquisiti presso il sito www.idromare.it, previa opportuna registrazione.



Figura 1: Boa Datawell Directional Waverider (ondametro di Cetraro)

La durata dello stato di mare per la definizione delle grandezze di cui sopra è pari a circa 20 minuti. I dati delle serie storiche vengono acquisiti normalmente per un periodo di 30 minuti ogni tre ore e con intervalli inferiori nel caso di mareggiate particolarmente significative, essendo, $H_{s\text{soglia}}$ (valore soglia per l'attivazione in continuo dell'ondametro) > 4.5 m per la boa

di Cetraro. In alternativa, le serie storiche vengono forniti agli utenti attraverso appositi bollettini ondametrici trimestrali nel seguente formato:

1992	1	1	0	00	70	40	36	133
1992	1	1	3	00	60	43	36	135
1992	1	1	6	00	80	50	39	142
1992	1	1	9	00	70	53	36	179

dove:

la 1^a colonna rappresenta l'anno;

la 2^a colonna rappresenta il mese;

la 3^a colonna rappresenta il giorno;

la 4^a colonna rappresenta l'ora;

la 5^a colonna rappresenta una colonna vuota;

la 6^a colonna rappresenta l'altezza d'onda significativa (cm);

la 7^a colonna rappresenta il periodo di picco (10^{-1} s)

l'8^a colonna rappresenta il periodo medio (10^{-1} s)

la 9^a colonna rappresenta la direzione media di provenienza ($^{\circ}$ N).

I dati della serie storica dalla boa posta al largo di Cetraro, per il periodo di tempo compreso tra il 1 Aprile del 1999 e il 31 Marzo del 2007 (periodo considerato per il presente studio), risultano pari a 23376.

La serie storica dei dati ondametrici registrati dall'ondametro di Cetraro è stata sottoposta ad opportuna validazione, attraverso l'eliminazione degli eventi non registrati dalla boa e gli eventi considerati anomali. In particolare, sono stati adottati i seguenti criteri di validazione dei dati:

- Eliminazione dei cosiddetti "outliers", rappresentati da stati di mare caratterizzati da valori di H_s , T_m e T_p eccessivamente elevati e non compatibili con l'esposizione in mare aperto della boa in esame;
- Eliminazione dei dati non registrati della boa, presenti nelle serie storiche registrati come dati pari a 0.

- Controllo tra 2 rilevazioni ondametriche successive della variazione del valore di altezza d'onda significativa, che deve essere inferiore a 1.5 m;
- Controllo tra 2 rilevazioni ondametriche successive della variazione del valore del periodo di picco, che deve essere inferiore a 5 s;
- Se vengono riscontrate le 2 succitate condizioni su H_s e T_p , ma la direzione di provenienza dell'evento ondosso tra 2 rilevazioni risulta maggiore di 30° , il dato ondametrico può essere considerato valido;
- Controllo per ogni evento registrato della ripidità massima compatibile dell'onda in acque profonde ($d/L_p > 0.5$, essendo d la profondità ed L_p la lunghezza di picco dell'onda) con il limite di stabilità geometrico; per ogni registrazione, deve essere verificato che:

$$\frac{H_s \cdot 2 \cdot \pi}{9.81 \cdot T_p^2} < 0.1$$

- Controllo per ogni evento registrato della non eccessiva differenza fra i valori di periodo di picco e di periodo medio; per ogni registrazione, deve essere verificato che:

$$\frac{T_p}{T_m} < 2$$

- Controllo delle eventuali ripetizioni della singola registrazione ondametrica a causa del malfunzionamento momentaneo della boa.

Sulla base di tali preliminari verifiche sui dati ondosso grezzi registrati dalla boa, gli eventi ondosso da considerare per le successive modellazioni meteomarine sono pari a 18354. Pertanto, il rendimento η , espresso in %, della boa RON di Cetraro nel periodo 1999-2007 risulta pari a:

$$\eta = \frac{n. \text{dati filtrati}}{n. \text{dati grezzi}} \cdot 100 = 78.52 \%$$

essendo, di conseguenza, la percentuale di inefficienza della boa in esame pari al 21.48 %.

Pertanto, le osservazioni ondometriche filtrate sono state ordinate per classi di altezza d'onda significativa pari a 0.5 m e per settori direzionali di provenienza del moto ondoso pari a 30° (vedi Figura 1).

TABELLA DIREZIONALE ALTEZZA D'ONDA -ANNUALE													
Dir (°)	345	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	
	a 015	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345	Tot.
Hs (m)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
calme	6	0	0	0	7	51	96	316	862	2625	788	91	4842
.25-0.5	36	0	0	0	12	88	299	489	912	2673	835	185	5529
0.5-1.0	9	0	0	0	12	60	231	368	708	1993	448	92	3921
1.0-1.5	6	0	0	0	1	32	73	152	441	1216	202	43	2166
1.5-2.0	1	0	0	0	1	8	23	31	215	596	85	7	967
2.0-2.5	5	0	0	0	2	7	9	20	151	224	55	16	489
2.5-3.0	0	0	0	0	0	4	7	15	65	101	21	7	220
3.0-3.5	1	0	0	0	0	0	2	9	38	40	11	3	104
3.5-4.0	1	0	0	0	0	0	4	3	15	31	6	2	62
4.0-4.5	0	0	0	0	0	1	1	1	10	12	5	3	33
4.5-5.0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	2	1	7
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	1	1	6
5.5-6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	4
6.0-6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	4
Tot.	65	0	0	0	35	251	746	1404	3418	9522	2462	451	18354

Tabella 1: Numero di apparizioni del moto ondoso al largo di Cetraro

Gli eventi caratterizzati da $H_s < 0.50$ m sono stati considerati come calme.

Dall'analisi della Tabella 1 si osserva come gli eventi di moto ondoso caratterizzati da elevati valori di altezza d'onda significativa risultano essere compresi nei settori direzionali provenienti prevalentemente da Ovest (225°-255°N e 255°-285°N).

I dati di moto ondoso al largo di Cetraro sono stati ulteriormente elaborati per le succitate classi d'altezza significativa e settori direzionali di provenienza del moto ondoso, determinando per ciascuno di essa la frequenza semplice di apparizione delle onde (vedi tabella 2)

VALORI PERCENTUALI DEGLI EVENTI RILEVATI													
Dir (°)	345	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	
	015	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345	Tot.
Hs (m)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
calme	0.03	0	0	0	0.03	0.22	0.41	1.35	3.69	11.23	3.37	0.39	20.71
.25-0.5	0.15	0	0	0	0.05	0.38	1.28	2.09	3.9	11.43	3.57	0.79	23.65
0.5-1.0	0.04	0	0	0	0.05	0.26	0.99	1.57	3.03	8.53	1.92	0.39	16.77
1.0-1.5	0.03	0	0	0	0	0.14	0.31	0.65	1.89	5.2	0.86	0.18	9.27
1.5-2.0	0	0	0	0	0	0.03	0.1	0.13	0.92	2.55	0.36	0.03	4.14
2.0-2.5	0.02	0	0	0	0.01	0.03	0.04	0.09	0.65	0.96	0.24	0.07	2.09
2.5-3.0	0	0	0	0	0	0.02	0.03	0.06	0.28	0.43	0.09	0.03	0.94
3.0-3.5	0	0	0	0	0	0	0.01	0.04	0.16	0.17	0.05	0.01	0.44
3.5-4.0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.01	0.06	0.13	0.03	0.01	0.27
4.0-4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.05	0.02	0.01	0.14
4.5-5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0.03
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.03
5.5-6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.02
6.0-6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0.02
Tot.	0.28	0	0	0	0.15	1.07	3.19	6.01	14.62	40.73	10.53	1.93	78.52 %

Tabella 2: Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Cetraro

In figura 2 sono rappresentati i dati di Boa di Cetrato, per mezzo di un istogramma in cui le calme ($H_s < 0.25$ m) sono separate dagli eventi di moto ondoso ($H_s > 0.25$ m).

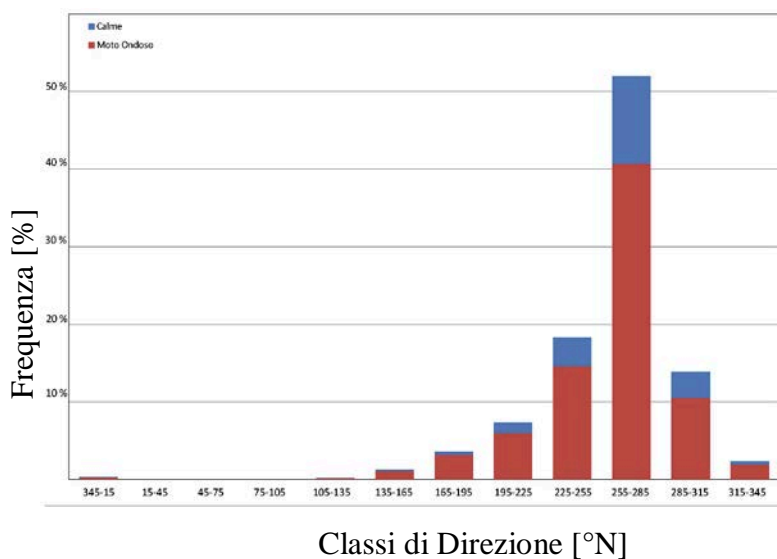


Figura 2: Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Cetraro

In Figura 3 sono state riportate, sotto forma di diagramma polare, le frequenze di apparizione delle classi di altezza d'onda significativa suddivise in questo caso, per maggiore accuratezza, in settori direzionali di 10°.

Gli eventi ondosi aventi $H_s > 4$ m sono stati raggruppati in una stessa classe in modo da avere una visualizzazione grafica più chiara. Si evince che il settore direzionale 255°-265°N rappresenta quello cui competono il maggior numero di eventi di moto ondoso e quelli più estremi, seguiti, in ordine decrescente, dai settori 265°-275°N e 245°-255°N.

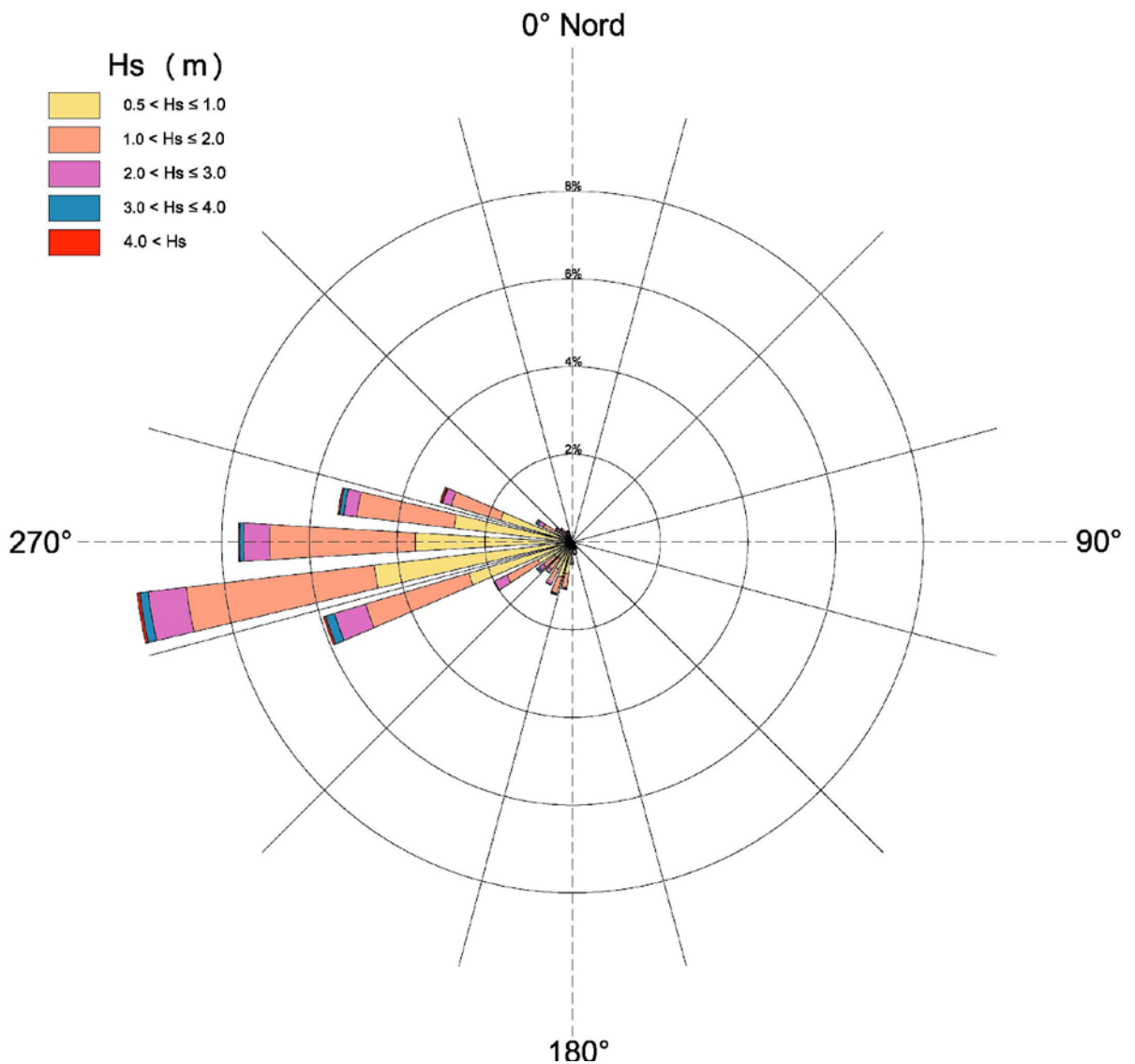


Figura 3: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso al largo di Cetraro

Trasposizione dei dati di moto ondoso

La definizione del clima di moto ondoso al largo di un paraggio risulta fondamentale per impostare gran parte degli studi che vengono eseguiti nel campo dell'ingegneria costiera e, più in generale, delle costruzioni marittime.

In generale, per la definizione del clima di moto ondoso di un paraggio, la fonte di dati più completa ed attendibile è costituita dalle serie storiche di misure registrate dagli ondometri. Tuttavia, in ragione del numero limitato di ondometri presenti al largo delle coste italiane, il più delle volte il sito di interesse, pur ricadendo nella stessa area geografica, è spesso situato in una posizione decentrata rispetto al tratto di mare “sotteso” dall'ondometro. Da qui nasce l'esigenza di ricorrere ad un metodo che consenta di “trasporre” geograficamente le misure ondometriche dal punto di misura a quello di interesse. Nel caso in esame, partendo dalle serie storiche dei dati di moto ondoso registrati dall'ondometro di Cetraro, occorre determinare quale sia il clima meteomarino al largo del paraggio di Amantea, che non risulta disporre di misure dirette di moto ondoso.

Il noto metodo della trasposizione geografica delle misure di moto ondoso, proposto da Contini e De Girolamo (1998), viene applicato per consentire il trasferimento dei dati di altezza d'onda significativa, periodo medio e periodo di picco. Un metodo empirico, applicato dai ricercatori del Laboratorio di Ingegneria Costiera del Politecnico di Bari, viene utilizzato per la determinazione della direzione di provenienza del moto ondoso nell'area di interesse, a partire dalla direzione del moto ondoso registrata dall'ondometro.

L'ipotesi di base del metodo della trasposizione geografica consiste nel supporre che le stesse condizioni di vento (velocità e direzione) che hanno determinato le condizioni di moto ondoso registrate dall'ondometro abbiano interessato anche l'area di generazione situata al largo del sito di interesse. Il metodo consiste nel determinare la corrispondenza tra le direzioni, le altezze ed i periodi del moto ondoso relativi al punto di misura (boa ondometrica di Cetraro) e a quello di interesse (boa virtuale di Amantea), che risulta un punto ottimale per la modellazione meteomarina media ed estrema per il tratto litoraneo in esame (Figura 4).

Le leggi che permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa H_s e il periodo medio T_m in funzione della lunghezza del fetch efficace e della velocità del vento sono le seguenti (Shore Protection Manual, 1984):

$$\frac{gH_s}{u_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left(\frac{gF_e}{u_A^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{gT_m}{u_A} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left(\frac{gF_e}{u_A^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

dove:

u_A è il fattore di velocità del vento (“wind stress factor”), dipendente in modo non lineare dalla velocità del vento misurata alla quota +10 m s.l.m.;

F_e è il fetch efficace relativo ad una prefissata direzione geografica.

Per le analisi meteomarine di un paraggio e la definizione dell'esposizione geografica di una stazione di misura del moto ondoso o di un sito costiero, occorre determinazione i fetch geografici ed efficaci. Per fetch si intende la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso ad opera dell'azione esercitata dal vento. In bacini come il Mediterraneo, l'individuazione dei fetch può essere eseguita facendo ricorso al concetto di “fetch geografico” che indica la distanza geografica tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione. Nel Mediterraneo, in particolare, essendo assimilabile ad un bacino chiuso, si considera ai fini applicativi una distanza massima del fetch geografico pari a 500 km (Noli, 2004).

Ai fini della determinazione delle grandezze del moto ondoso a partire dai dati di vento e per poter determinare le grandezze del moto ondoso da un paraggio ad un altro, è necessario determinare i valori dei fetch efficaci sulla base dei valori dei fetch geografici individuati. Il fetch efficace viene introdotto per considerare l'effetto della larghezza del fetch e della dispersione direzionale dell'energia dell'onda sullo sviluppo e propagazione dell'onda. Il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione è funzione dei valori dei fetch geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata. In questo modo i fetch efficaci

consentono di tener conto del fatto che il moto ondoso viene generato non solo nella direzione lungo la quale spirava il vento ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore di $\pm 90^\circ$ rispetto alla direzione media di azione del vento. Di conseguenza la lunghezza dei fetch efficaci risulta essere diversa da quella dei fetch geografici. Il calcolo dei fetch efficaci, effettuato ogni 5° , può essere eseguito in base alla seguente relazione:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)}$$

dove:

$F_{e,w}$ è la lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione ϕ_w ;

F_i è la lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i -esima ϕ_i ;

ϕ_w è la direzione media (riferita al Nord geografico) di possibile provenienza del vento;

$\phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \phi_w + \theta$ rappresenta la direzione i -esima (riferita al Nord geografico) relativa a un settore di ampiezza 2θ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w (il metodo di Saville prevede un valore di $\theta = 45^\circ$ mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di $\theta = 90^\circ$);

θ è l'ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso;

n è il termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente, si assume $n = 2$ per studi meteomarini effettuati nei mari italiani).

L'equazione precedente deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretschneider, 1947) e dai suoi successivi aggiornamenti (Saville, 1954; Seymour, 1977; Smith, 1991).

La definizione dei fetch geografici ed efficaci costituisce uno dei punti fondamentali degli studi meteomarini. Infatti, i valori dei fetch possono essere utilizzati nelle seguenti analisi:

- definizione preliminare dei settori di traversia principali e secondari per il sito di interesse;

- determinazione della correlazione tra direzione di provenienza del vento e quella del moto ondoso generato;
- ricostruzione indiretta del moto ondoso sulla base di misure anemometriche;
- trasposizione geografica di misure ondametriche;
- propagazione da largo a riva di stati di mare.

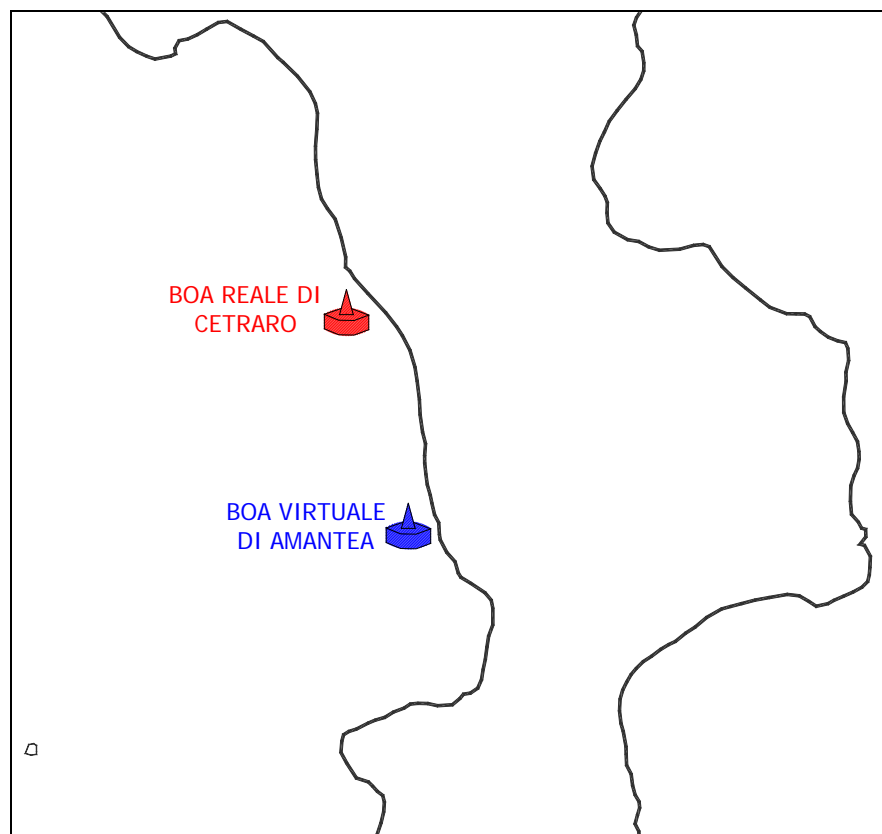


Figura 4: Localizzazione della boa ondometrica reale (Cetraro) e virtuale (Amantea)

In Figura 5 sono indicati i fetch geografici relativi al transetto costiero di Amantea. I valori massimi dei fetch geografici sono compresi fra le direzioni 265°N e 310°N , in cui i fetch, potenzialmente lunghi migliaia di km, sono tagliati a 500 km, sulla base delle esperienze acquisite negli studi meteomarini in Italia (Noli, 2004). A parità di velocità del vento spirante sulla superficie marina, da questo settore angolare possono provenire sul tratto costiero d'interesse gli attacchi ondosi più elevati. In Figura 6 sono invece indicati i fetch efficaci ottenuti per il paraggio di Amantea. In Figura 7 sono indicati i fetch geografici tracciati a partire dal punto in cui posizionata la boa ondometrica di Cetraro. I valori massimi dei fetch

geografici sono compresi fra le direzioni 250°N e 300°N. Rispetto al paraggio di Amantea, l'ondametro di Cetraro risulta leggermente più esposto agli attacchi ondososi provenienti da Ovest e Nord-Ovest. In generale, l'esposizione della boa di Cetraro ai venti foranei non risulta particolarmente differente da quella di Amantea per i fetch più estesi. Maggiori differenze sui fetch fra i 2 siti si possono osservare da Sud-Ovest e Nord-Ovest. In Figura 8 sono invece indicati i fetch efficaci determinati per il paraggio di Cetraro.

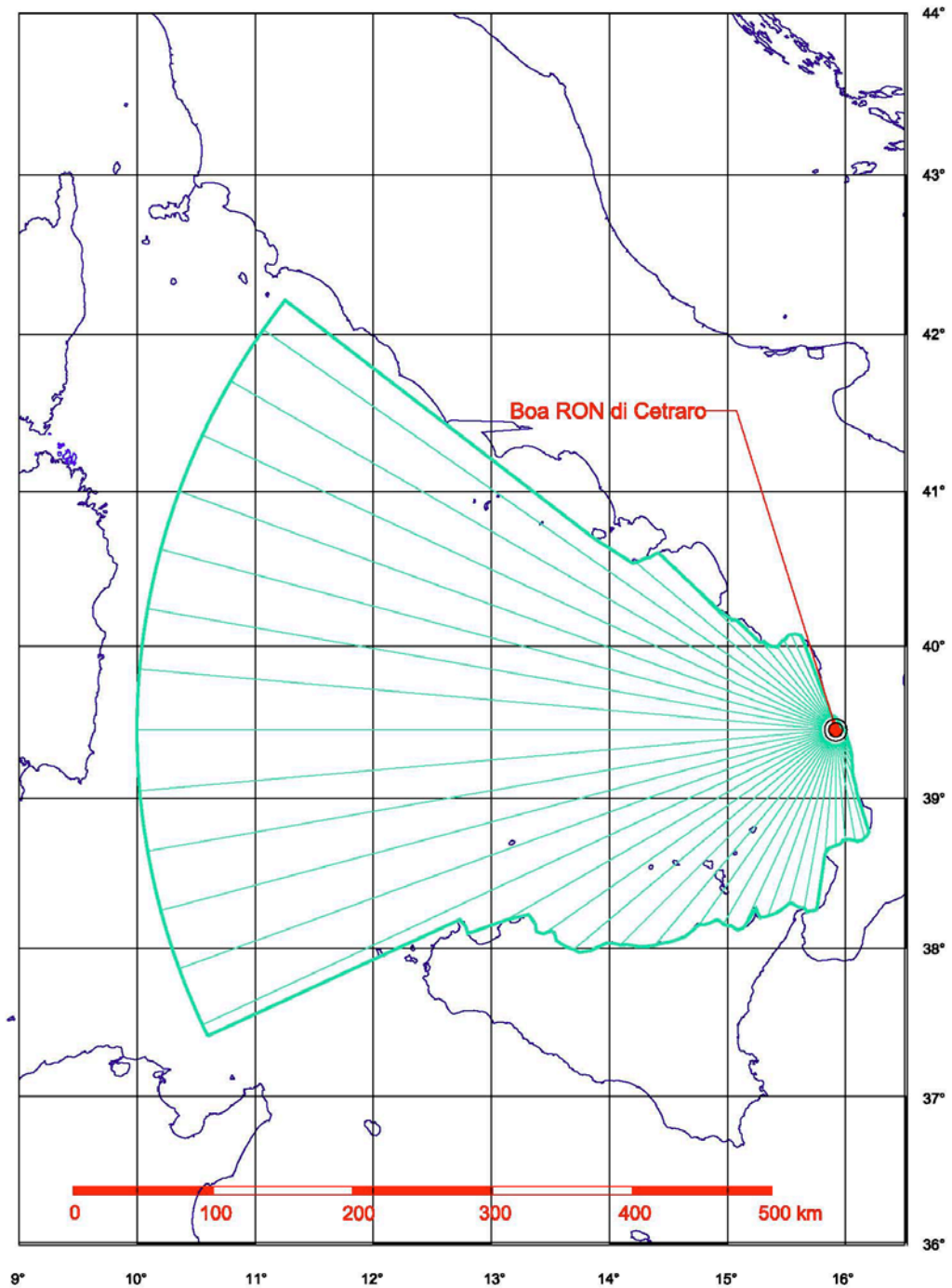


Figura 5: Tracciamento dei fetch geografici per il paraggio di Cetraro

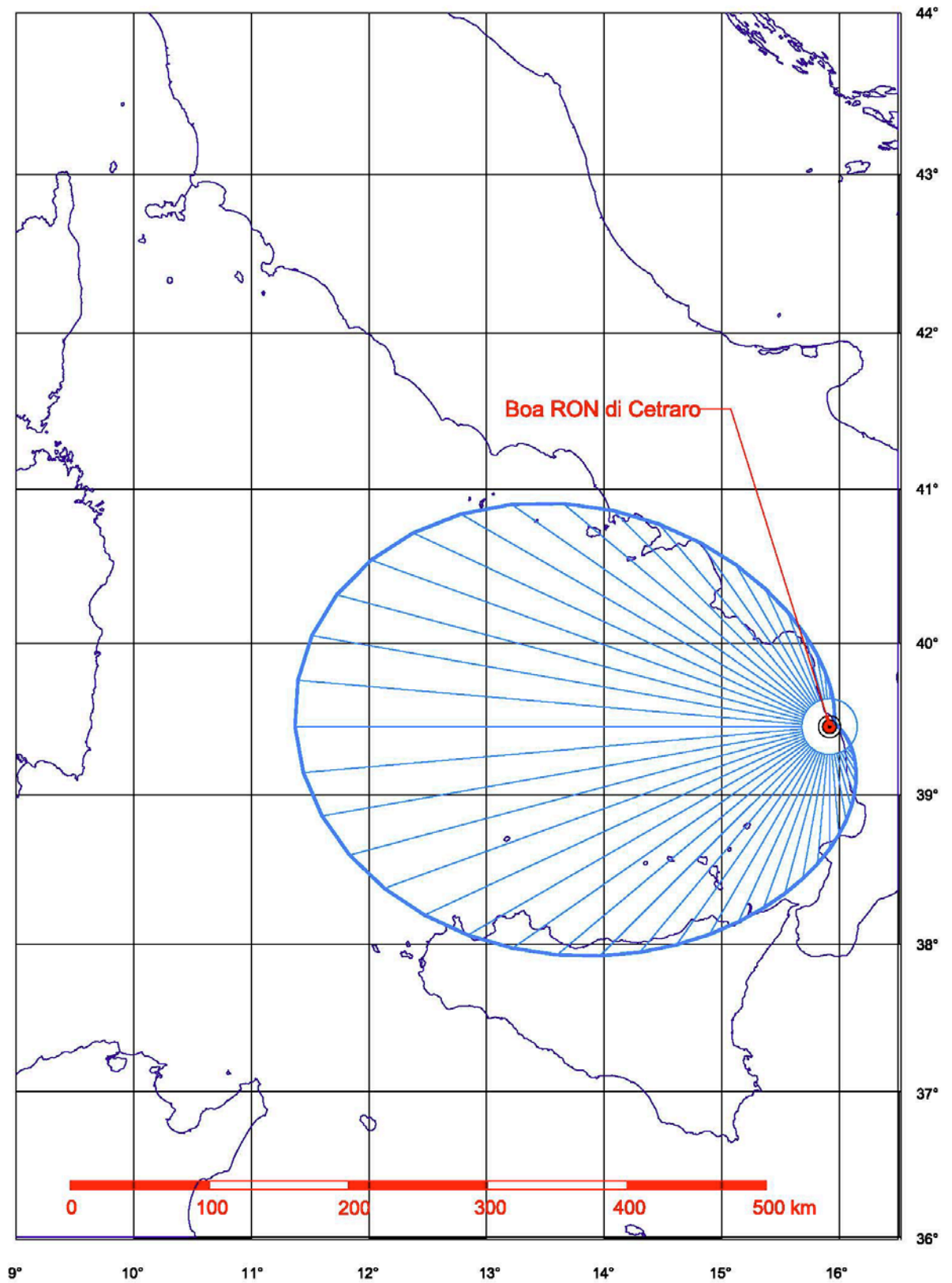


Figura 6: Tracciamento dei fetch efficaci per il paraggio di Cetraro

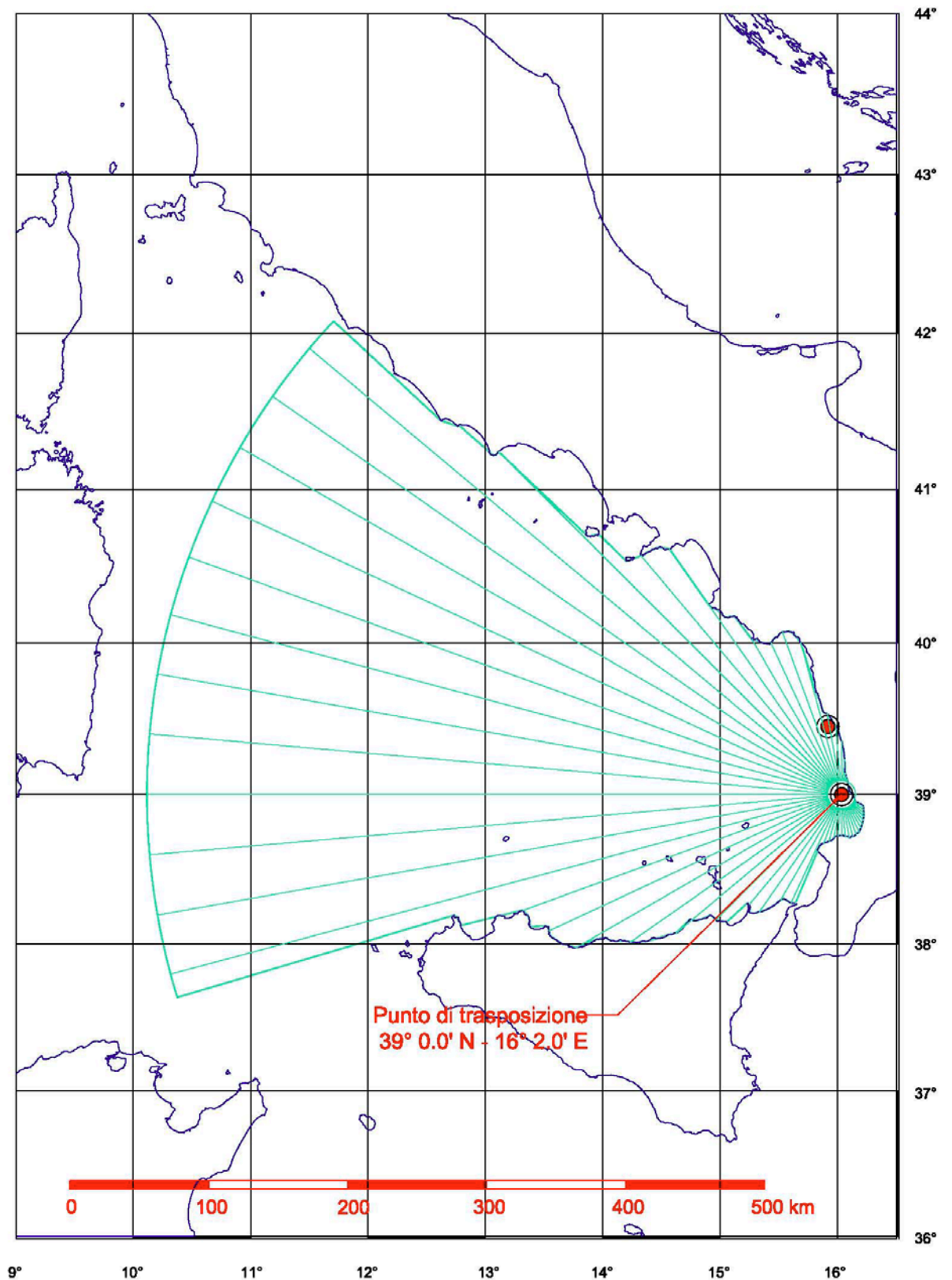


Figura 7: Tracciamento dei fetch geografici per il paraggio di Amantea

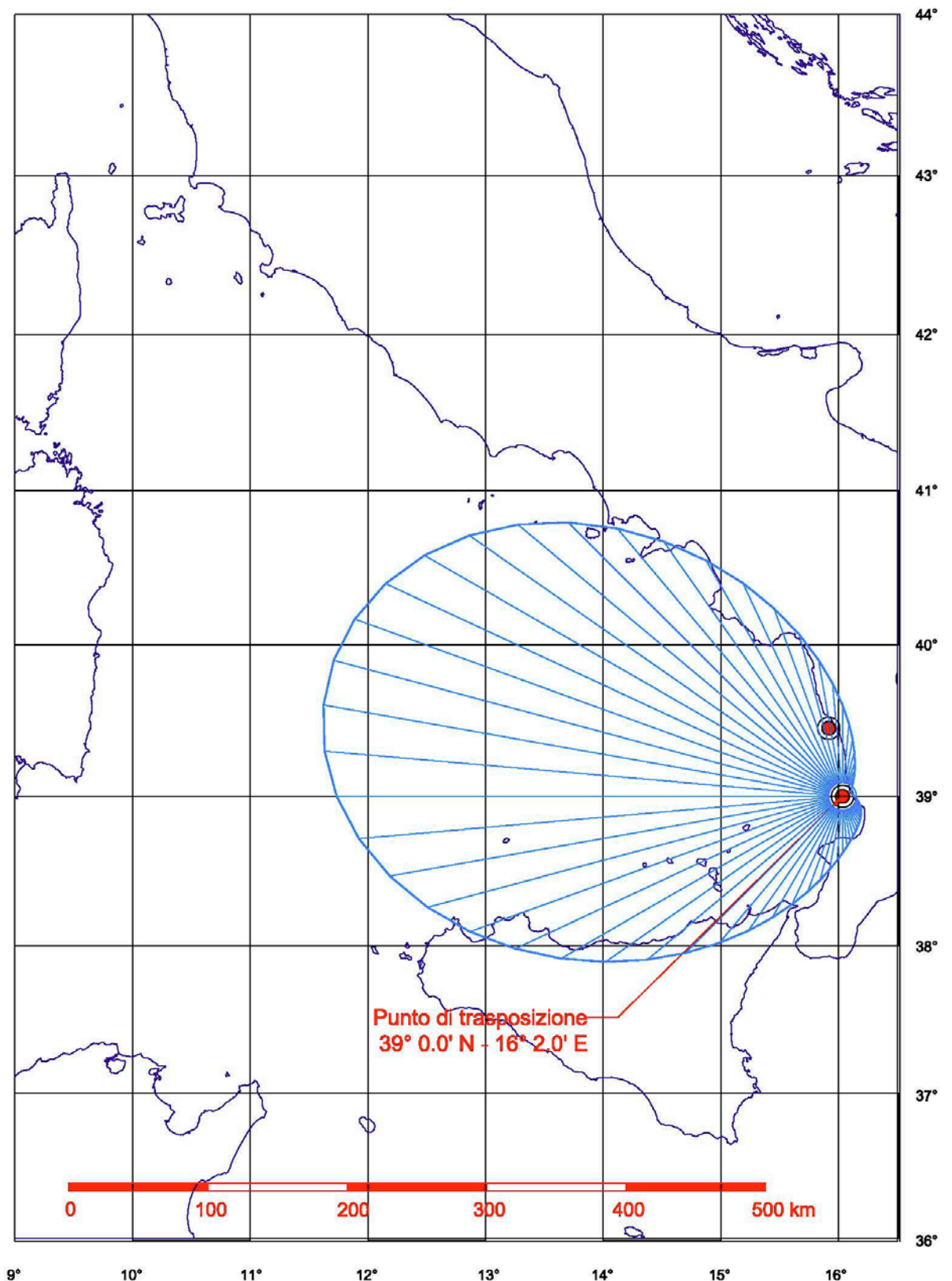


Figura 8: Tracciamento dei fetch efficaci per il paraggio di Amantea

In Tabella 3 e in Tabella 4 sono mostrati, rispettivamente, i valori dei fetch geografici, Fg, ed efficaci, Fe, espressi in km, per Amantea e Cetraro.

Direzione (°N)	Fg (km)	Fe (km)
5	9	22.6
10	8.1	18.5
15	7.5	15.1
20	7.1	12.8
25	6.8	10.2
30	6.6	8.1
35	6.4	7
40	6.3	6.6
45	6.3	6.3
50	6.3	6.3
55	6.3	6.4
60	6.4	6.5
65	6.6	6.7
70	6.8	7
75	7.1	7.4
80	7.4	7.8
85	7.9	8.4
90	8.5	9.1
95	9.2	9.9
100	10	10.9
105	11.1	12
110	12.4	13.5
115	13.8	15.9
120	15.7	19.1
125	17.4	22.8
130	19.4	26.2
135	21.7	30.7
140	24.5	36.9
145	27.9	42.9
150	34	49.2
155	41.6	57.3
160	84.8	65.1
165	87.9	72.6
170	85.9	81.4
175	88.1	90.1
180	91	99.3

Direzione (°N)	Fg (km)	Fe (km)
185	137.7	106.4
190	135.6	119.1
195	141.4	128.3
200	149.2	140.4
205	166	159.3
210	168.1	180.8
215	116.6	194.1
220	133.4	215.8
225	227.7	245
230	152.9	259.3
235	264.5	280.3
240	306.7	313.2
245	500	327.3
250	245	345.2
255	500	376.4
260	500	384.6
265	500	396.2
270	500	405.2
275	500	402.8
280	500	394
285	500	381.4
290	500	365.8
295	500	341.2
300	500	309.5
305	253	286
310	181.7	259.4
315	174.6	220.8
320	92.5	196
325	67.8	168.9
330	68.6	134.6
335	68.6	113.1
340	65.1	90.3
345	57.3	65.3
350	22.8	50
355	17.6	34.4
360	9.7	27.4

Tabella 3: Valori dei fetch geografici, Fg, ed efficaci, Fe, per il paraggio di Cetraro

Direzione (°N)	Fg (km)	Fe (km)
5	27.4	44.6
10	19.5	35.2
15	13.8	29
20	11.3	23.4
25	9.8	18.6
30	8.9	14.8
35	8.3	12
40	7.6	10.2
45	7.2	8.7
50	6.8	7.7
55	6.6	7
60	6.4	6.6
65	6.2	6.4
70	6.3	6.3
75	6.4	6.2
80	6.5	6.3
85	6.6	6.5
90	6.6	6.9
95	6.7	7.5
100	6.8	8.4
105	6.9	9.6
110	7.3	10.8
115	7.9	12.4
120	8.9	14.3
125	10.8	15.9
130	13.6	18
135	25.8	20.1
140	28.2	21.9
145	30	24.1
150	33.2	26.3
155	37	28.9
160	38.4	32.6
165	39.3	37
170	39.3	40.3
175	38.4	46
180	38.7	52

Direzione (°N)	Fg (km)	Fe (km)
185	40.5	57.4
190	42.7	64.6
195	45.6	71.7
200	93.9	78
205	94.9	90.2
210	106.9	107.4
215	112.4	120.3
220	134.2	146.8
225	142.5	165
230	177.5	187
235	110.9	219.2
240	94.4	238.2
245	252.1	264.7
250	300.1	296.5
255	500	312.6
260	500	339.1
265	500	366.7
270	500	375.2
275	500	381.1
280	500	397.8
285	500	393.8
290	500	378
295	500	381.4
300	500	362.4
305	500	323.5
310	500	311.5
315	255.6	289.2
320	218.1	241.1
325	150.3	225.7
330	119.8	202
335	116.3	157.8
340	116.5	141.6
345	104.2	120.7
350	51.6	87.3
355	45.4	73
360	38.9	57.6

Tabella 4: Valori dei fetch geografici, Fg, ed efficaci, Fe, per il paraggio di Amantea

Indicando con gli apici O e P rispettivamente le grandezze relative al punto di misura ed al punto di trasposizione, e fissata una direzione geografica (direzione media da cui spira il vento) alla quale risultano associati i fetch efficaci F_e^P e F_e^O , le precedenti relazioni dello Shore Protection Manual permettono di ricavare la ricercata corrispondenza tra le altezze significative, H_s , ed i periodi medi, T_m , delle onde relative al punto O e al punto P (Contini e De Girolamo, 1998):

$$\frac{H_s^P}{H_s^O} = \left(\frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{T_m^P}{T_m^O} = \left(\frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Per ottenere le precedenti relazioni si è supposto che il fattore di velocità del vento, u_A , sia lo stesso nei due punti al largo messi a confronto (Cetraro-Amantea).

I coefficienti di trasposizione per l'altezza d'onda significativa, $C_1 = \left(\frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{2}}$, per il periodo

medio, $C_2 = \left(\frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{3}}$ e per il periodo di picco, $C_3 = C_2 * T_p/T_m$, sono stati messi a confronto con

la direzione di provenienza del moto ondoso nella Figura 5, nel caso di trasferimento geografico dei dati da Cetraro a Amantea. Nel calcolo del coefficiente C_3 , il rapporto T_p/T_m è stato determinato sulla base delle curve di regressione H_s-T_m e H_s-T_p per la boa reale di Cetraro (vedi paragrafo relativo alle correlazioni periodo-altezza d'onda).

Dall'analisi della Figura 5 si evince un aumento dell'altezza d'onda significativa ($C_1 > 1$) e del periodo medio ($C_2 > 1$) per le direzioni di provenienza del moto ondoso comprese fra 275° e $55^\circ N$ e una diminuzione di H_s e T_m per le direzioni comprese fra 60° e $270^\circ N$. Per il periodo di picco si osserva un generale aumento generale ($C_3 > 1$) per tutte le direzioni, con valori di $C_3 \rightarrow 1$

nel range 150°-160°N. L'aumento generalizzato delle caratteristiche ondose lungo le succitate direzioni è dovuto alla particolare esposizione del paraggio di Amantea, i cui fetch risultano più sviluppati nelle direzioni succitate rispetto a quelle del punto di partenza (Cetraro).

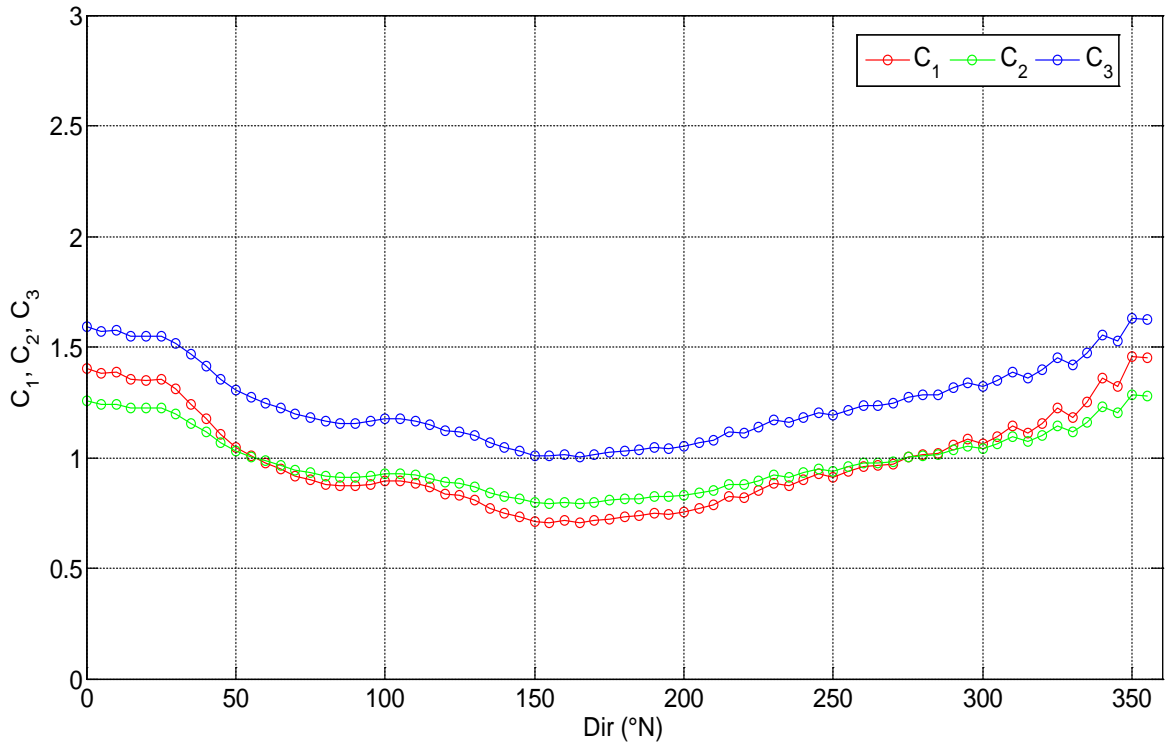


Figura 5: Coefficienti di trasposizione in funzione della direzione di provenienza del moto ondoso (Cetraro-Amantea)

Ai fini della determinazione della direzione del moto ondoso al largo del paraggio di Amantea, occorre rilevare che il metodo dello Shore Protection Manual (SMB) da cui si determinano indirettamente i dati di moto ondoso dai dati di vento, prevede che la direzione di provenienza delle onde sia coincidente con quella del vento. La direzione dell'onda risulta in questo caso la media delle direzioni di tutte le registrazioni che compongono l'evento, pesata rispetto alle intensità, trascurando quindi gli effetti della geometria dell'area di generazione sulla direzione dell'onda.

Si rende quindi necessario introdurre delle relazioni finalizzate alla correzione della direzione del vento per tenere in considerazione che il trasferimento di energia dal vento al mare dipende anche dalla distribuzione direzionale dei fetch. Si può quindi pensare di assegnare allo stato di

mare una direzione calcolata come media pesata delle direzioni rispetto alla lunghezza del fetch geografico. Si ipotizza che il trasferimento di energia avvenga in un settore di ampiezza variabile tra $\pm 45^\circ$ intorno la direzione media del vento e che la funzione di trasferimento dell'energia sia rappresentabile da una potenza ennesima del coseno. In particolare, si può osservare che il trasferimento di energia si riduce lungo le direzioni più lontane da quella di provenienza, mentre aumenta lungo le direzioni a cui competono i fetch più estesi. Di conseguenza, le onde generate da venti spiranti da direzioni prossime ai limiti del settore di traversia tendono a propagarsi lungo direzioni più interne.

Lo scarto tra la direzione media del vento e la direzione del moto ondoso che esso genera, β , viene valutato attraverso una relazione empirica basata sugli studi meteomarini effettuati dai ricercatori del Laboratorio di Ingegneria Costiera del Politecnico di Bari:

$$\beta = \arctan \left(\frac{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \sin(\phi_i - \phi_w) \cos^n(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \cos(\phi_i - \phi_w) \cos^n(\phi_i - \phi_w)} \right)$$

dove F_i è il fetch geografico valutato lungo le direzioni adiacenti alla direzione media del vento comprese in un settore di ampiezza variabile;

ϕ_w è la direzione media (riferita al Nord geografico) di possibile provenienza del vento;

$\phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \phi_w + \theta$ rappresenta la direzione i -esima (riferita al Nord geografico) relativa a un settore di ampiezza 2θ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w ;

θ è l'ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso, valutato in questo caso pari a 45° ;

n è l'esponente del coseno, posto in questo caso pari a 2, come nella formula di Saville per il calcolo dei fetch efficaci.

Le grandezze succitate sono mostrate in Figura 6, con riferimento allo schema adottato per le convenzioni degli angoli relativi alle direzioni di provenienza del vento e del moto ondoso rispetto al Nord Cartografico. In particolare, θ_w rappresenta la direzione di propagazione del moto ondoso.

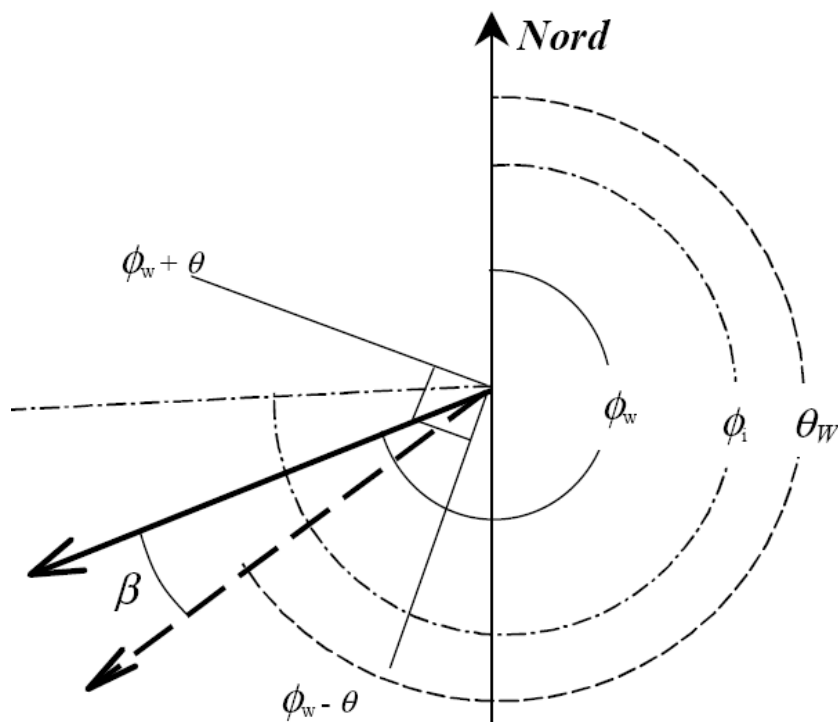


Figura 6: Schema di riferimento, convenzioni e simboli relativi alle direzioni del vento e del moto ondoso

Pertanto, considerando costante la direzione di provenienza del vento nell'area del Tirreno in cui è posta la boa reale di Cetraro e quella virtuale di Amantea, è possibile determinare, attraverso l'applicazione della legge di correlazione tra la direzione dell'onda e quella del vento, le direzioni del moto ondoso del punto di interesse (Amantea) rispetto al Nord Cartografico, note le direzioni di provenienza del moto ondoso registrate dagli ondometri reali. In Figura 7 viene rappresentata la deviazione della direzione del moto ondoso fra la boa reale di Cetraro e quella virtuale di Amantea.

Sempre in figura 7 si può apprezzare la differenza tra le lunghezze dei fetch di efficaci, supponendo costante la direzione del vento, fissata una direzione del moto ondoso registrata dall'ondometro reale (Cetraro), si interseca la curva di correlazione onda-vento relativa all'ondometro in esame trovando la corrispondente curva di correlazione onda-vento relativa a Amantea e la relativa nuova direzione del moto ondoso.

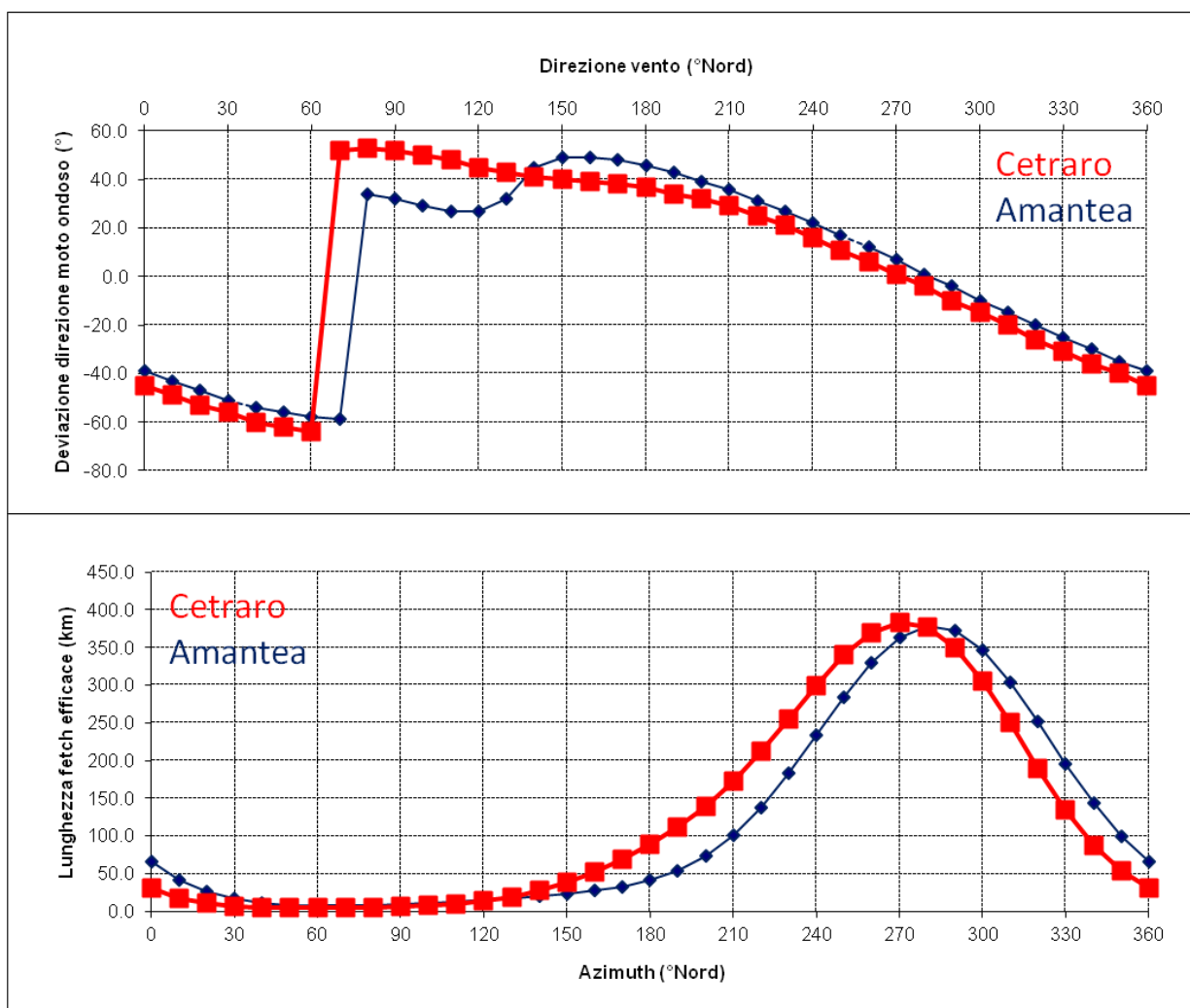


Figura 7: Deviazione di direzioni del moto ondoso e lunghezza fetch efficaci (Cetraro-Amantea)

L'entità della variazione che subisce la direzione di provenienza del moto ondoso durante la trasposizione geografica dell'evento ondoso dagli ondometri reali a quello virtuale al largo di Amantea è mostrata in Figura 8. Le massime deviazioni della direzione delle onde che si hanno passando da Cetraro a Amantea risultano basse e comprese circa fra $+5^\circ$ e -13° , a testimonianza della simile esposizione geografica dei due paraggi in un ampio settore. In particolare, gli stati di mare trasposti relativi al settore 105° - 125° N e 140° - 340° N hanno subito rotazioni orarie, mentre per gli altri settori si sono avute rotazioni antiorarie. La rotazione subita dalle onde nella

trasposizione da Cetraro a Amantea fa sì esse tendano in generale a disporsi nelle direzioni in cui i fetch sono più sviluppati.

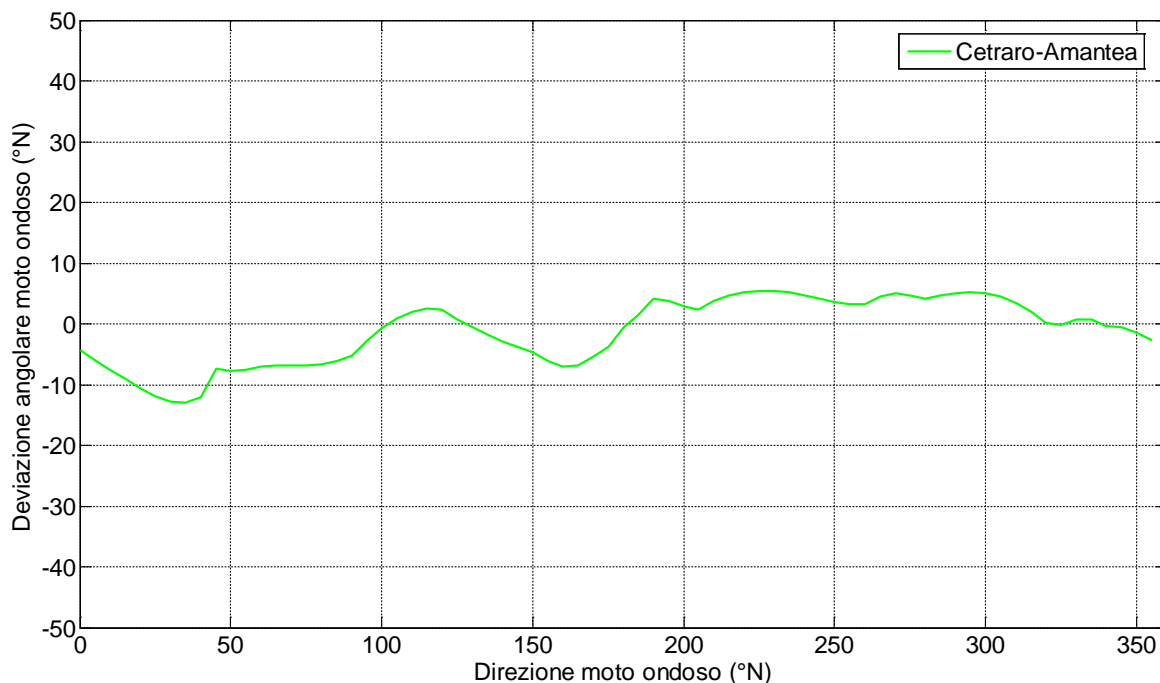


Figura 8: Variazione della deviazione angolare del moto ondoso fra la boa reale di Cetraro e quella virtuale di Amantea

Clima meteomarinario medio al largo del paraggio di Amantea

L'applicazione del metodo della trasposizione geografica dei dati di moto ondoso (altezza, periodo e direzione) dalla boa ondometrica reale di Cetraro alla boa virtuale posta al largo del paraggio di Amantea e del metodo per il calcolo delle direzioni del moto ondoso consente la determinazione del clima meteomarinario al largo, con riferimento agli eventi ricadenti nel settore di traversia. Esso rappresenta un settore angolare comprendente tutte le direzioni da cui si presume possano provenire le agitazioni ondose determinate dai venti foranei. L'arco di circonferenza, centrato sul punto al largo di Amantea, comprendente tutte le direzioni da cui possono provenire i venti foranei nel paraggio in esame è stato ottenuto considerando le possibili direzioni di provenienza delle onde sulla base della particolare esposizione del sito (Figura 13). Per il paraggio in esame, il settore di traversia, sui cui spirano i venti che possono

creare significative agitazioni ondose, è compreso tra 195°N e 345°N , per un'ampiezza angolare pari a 150° , non molto dissimile da quello di Cetraro.

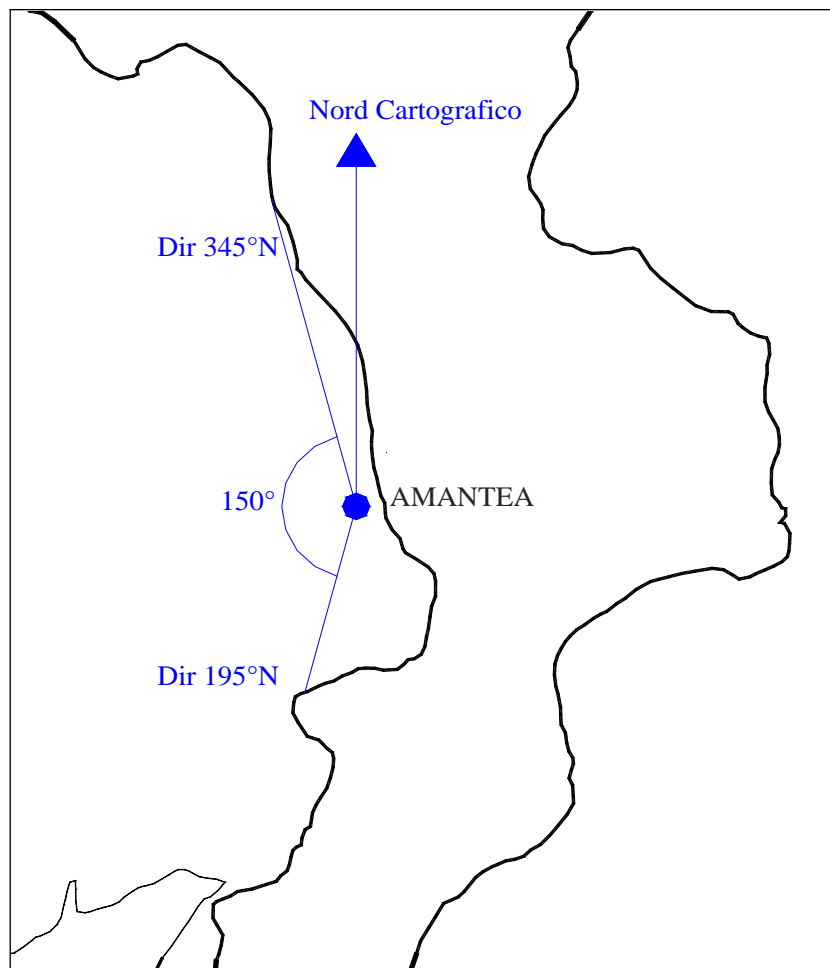


Figura 9: Individuazione del settore di traversia del paraggio di Amantea

In Tabella 3 e in Tabella 4 sono mostrati, rispettivamente, i numeri di apparizione e le percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Amantea, con riferimento alla trasposizione dei dati ondometrici dalla boa di Cetraro. L'ampiezza dei settori direzionali, all'interno del settore di traversia del paraggio risulta pari a 30° per i settori centrali (210° - 240°N , 240° - 270°N , 270° - 300°N e 300° - 330°N) e pari a 15° per i settori estremi alla traversia (195° - 210°N e 330° - 345°N).

Come si può osservare dall'istogramma mostrato in

Figura 10 e dal diagramma polare mostrato in Figura 11 risulta che, con riferimento alla suddivisione dei settori direzionali effettuati al largo del paraggio di Amantea, gli stati di mari più frequenti provengono dal settore di traversia 240°-270°N, mentre il massimo stato di mare risulta provenire dal settore 270°-300°N con un evento di altezza d'onda significativa nel range compreso fra 7.75 m e 8.25 m. Valori di H_s elevati risultano inoltre afferenti ai settori direzionali 300°-330°N e 330°-345°N, i cui eventi massimi raggiungono un range di altezze significative comprese, rispettivamente, fra 7.75 m e 8.25. Dall'applicazione della trasposizione geografica, i valori massimi di altezza d'onda significativa risultano lievemente maggiori di quelli afferenti alle registrazioni della boa di Cetraro, poiché l'esposizione del paraggio di Amantea è relativa a valori del fetch maggiormente sviluppati per i succitati settori angolari.

TABELLA DIREZIONALE ALTEZZA D'ONDA ANNUALE													
NUMERO EVENTI RILEVATI													
Dir (°)	345	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345	Tot.
Hs (m)													
calme	2	0	0	7	39	27	73	411	1011	2695	1023	32	5320
.25-0.5	32	0	0	5	49	62	136	505	566	2638	807	163	4963
0.5-1.0	41	0	0	15	48	68	101	342	508	2494	827	160	4604
1.0-1.5	15	0	0	1	27	23	18	42	205	1183	317	59	1890
1.5-2.0	9	0	0	0	8	8	8	20	120	507	145	24	849
2.0-2.5	1	0	0	1	3	3	4	11	46	178	58	10	315
2.5-3.0	5	0	0	1	5	6	1	1	12	73	36	8	148
3.0-3.5	0	0	0	0	1	1	3	1	6	47	16	15	90
3.5-4.0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	22	12	6	42
4.0-4.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	4	15
4.5-5.0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	9	2	15
5.0-5.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	8
5.5-6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2
6.0-6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2
>6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5	8
Tot.	112	0	0	30	181	199	345	1333	2474	9849	3259	489	18271

Tabella 3: Numero di apparizioni del moto ondoso al largo di Amantea

VALORI PERCENTUALI DEGLI EVENTI RILEVATI													
Dir (°)	345	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345	Tot.
Hs (m)													
calme	0.01	0	0	0.03	0.17	0.12	0.31	1.76	4.32	11.53	4.38	0.14	22.76
.25-0.5	0.14	0	0	0.02	0.21	0.27	0.58	2.16	2.42	11.29	3.45	0.7	21.23
0.5-1.0	0.18	0	0	0.06	0.21	0.29	0.43	1.46	2.17	10.67	3.54	0.68	19.7
1.0-1.5	0.06	0	0	0	0.12	0.1	0.08	0.18	0.88	5.06	1.36	0.25	8.09
1.5-2.0	0.04	0	0	0	0.03	0.03	0.03	0.09	0.51	2.17	0.62	0.1	3.63
2.0-2.5	0	0	0	0	0.01	0.01	0.02	0.05	0.2	0.76	0.25	0.04	1.35
2.5-3.0	0.02	0	0	0	0.02	0.03	0	0	0.05	0.31	0.15	0.03	0.63
3.0-3.5	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.03	0.2	0.07	0.06	0.39
3.5-4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09	0.05	0.03	0.18
4.0-4.5	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0.02	0.06
4.5-5.0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.01	0.06
5.0-5.5	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.01	0	0.03
5.5-6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
6.0-6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
>6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0.03
Tot.	0.48	0	0	0.13	0.77	0.85	1.48	5.7	10.58	42.13	13.94	2.09	78.16

Tabella 4: Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Amantea

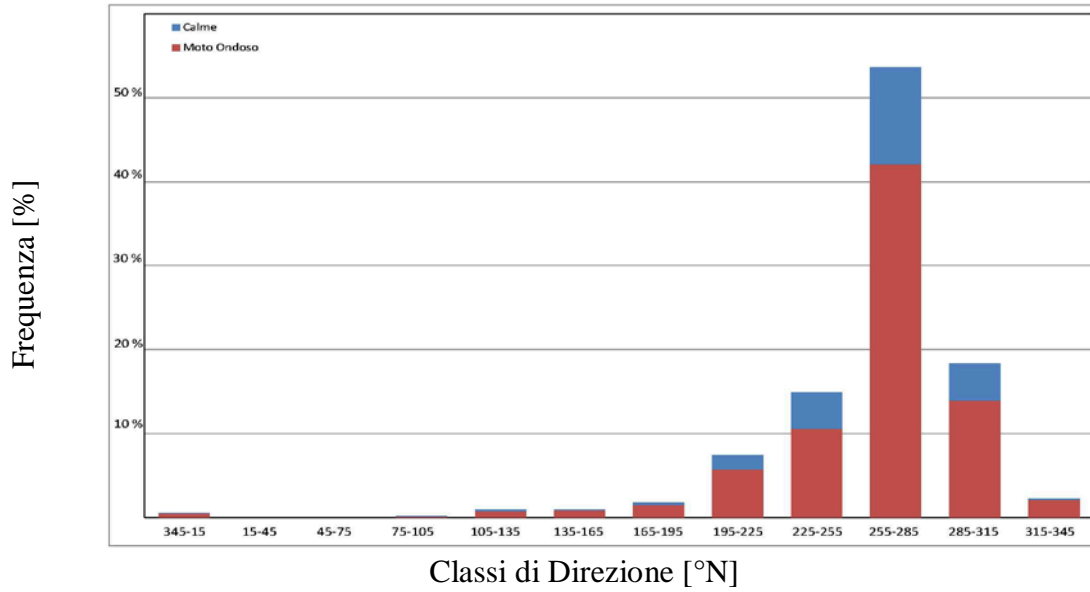


Figura 10: Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Amantea

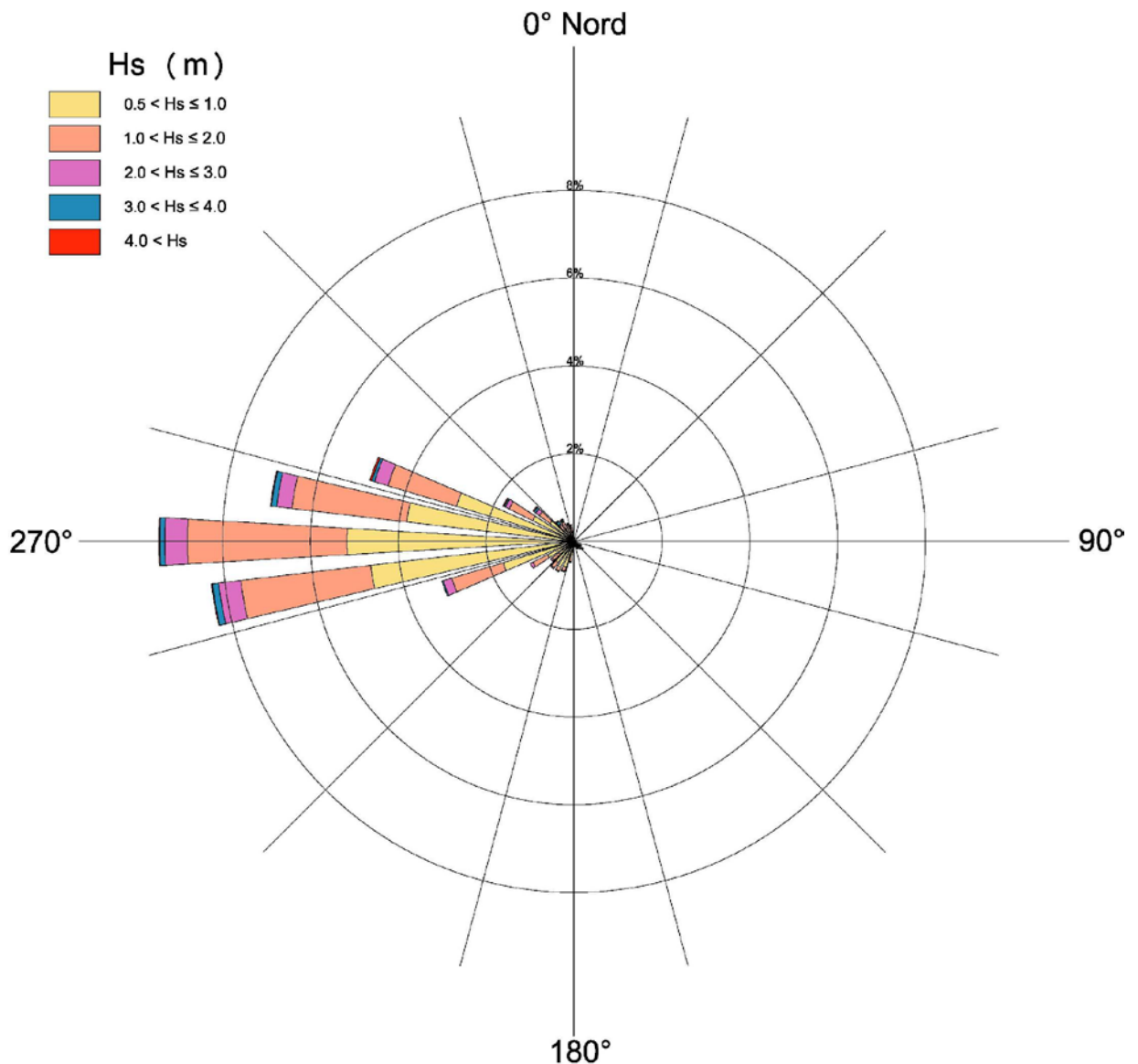


Figura 11: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi i moto ondoso al largo di Amantea

In particolare, dall'analisi del clima meteomarinico al largo del paraggio di Amantea, ricavato dalla trasposizione dei dati di Cetraro, emergono le seguenti caratteristiche:

- la percentuale degli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda inferiore a 0.25 m, definiti come calme, è pari al 22.76 % circa;
- gli eventi più frequenti provengono, per il 42.13 % del totale dei casi, dalla direzione 270°N e per il 66.65 % dei casi dal settore compreso tra 240°-300°N;

- i moti ondosi più intensi, aventi $H_s > 2.50$ m, rappresentano l'1.34 % degli eventi totali, e provengono soprattutto da due limitati settori angolari (255° - 285° N e 285° - 315° N);
- la trasposizione geografica fa sì che gli eventi ondosi al largo del paraggio in esame tendano a concentrarsi nel settore angolare orientato verso la normale al litorale, la cui direzione media risulta pari a 280° N.

Correlazioni periodo-altezza d'onda

Partendo ora dall'analisi dei dati di boa di Cetraro e per i dati di moto ondoso trasposti al largo del paraggio di Amantea, selezionati per la successiva determinazione del clima meteomarinico sottocosta, è stato possibile costruire la correlazione tra l'altezza d'onda significativa a largo e i corrispondenti valori di periodo medio e di picco. Tali correlazioni risultano utili ai fini dell'individuazione degli eventi ondosi che occorre propagare sottocosta. Essi sono suddivisi per classi di altezza d'onda significativa a cui corrispondono, sulla base di opportune correlazioni, i valori del periodo.

La formulazione matematica scelta risulta del tipo:

$$T = \alpha \cdot H_s^\beta$$

dove:

T è il periodo dell'onda, espresso in s;

H_s è l'altezza d'onda significativa, espressa in m;

α e β sono i coefficienti di correlazione.

I dati d'onda sono stati suddivisi per altezze congruenti, fissando un fattore di soglia pari a 0.5 m, indipendentemente dalla direzione di provenienza.

Per ogni altezza d'onda H_{si} sono state tabulate tutte le n direzioni di provenienza, i corrispondenti n periodi e gli m numeri di apparizione b_s . Si è ricavato il periodo riferito alla i-

esima onda come $T_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^m T_{sj} \cdot b_s}{m}$, espresso in s.

Una volta calcolato il periodo d’onda T_i per ogni altezza d’onda H_{si} , è stata cercata la regressione fra i valori di T_i e i valori di H_{si} . Le elaborazioni effettuate hanno consentito di determinare per i dati di Cetraro e per quelli relativi a Amantea differenti valori dei coefficienti di regressione.

In Figura 12 e Figura 13 in sono riportate, rispettivamente, le regressioni fra l’altezza significativa e il periodo medio, e fra altezza significativa e il periodo di picco per i dati della boa di Cetraro. Allo stesso modo, in Figura 14 e in Figura 15 sono riportate le regressioni H_s - T_m e H_s - T_p al largo del paraggio di Amantea.

Con questi valori è stato ricostruito il clima medio locale per Cetraro e Amantea, considerando le classi di altezza d’onda significativa variabili fra 0.5 m e 8 m per Cetraro e fra 0.5 m e 8.5 m per Amantea, separate da intervalli discreti di 0.5 m (vedi **Tabella 5 e Tabella 8**). La lunghezza d’onda a largo, L_0 , è stata calcolata con la relazione ricavata dalla teoria di Stokes al 1° ordine in acque profonde, attraverso la relazione: $L_0 = 1.56 * T_m^2$.

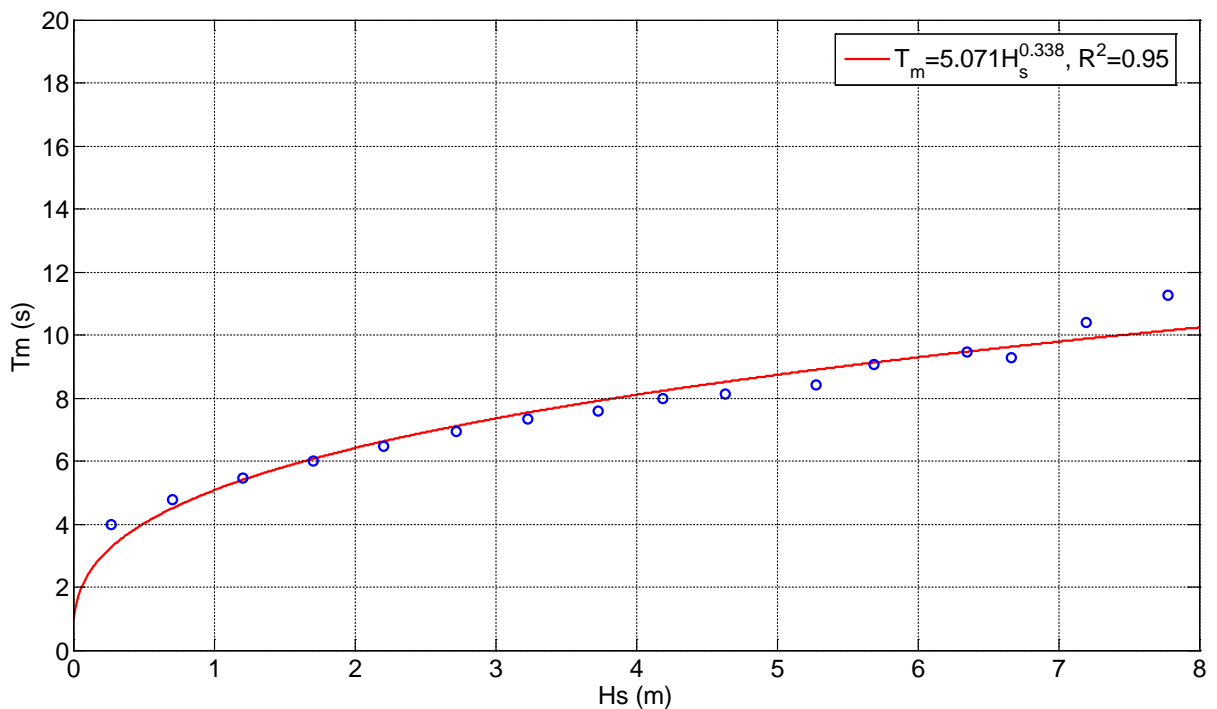


Figura 12: Curva di regressione H_s - T_m per Cetraro

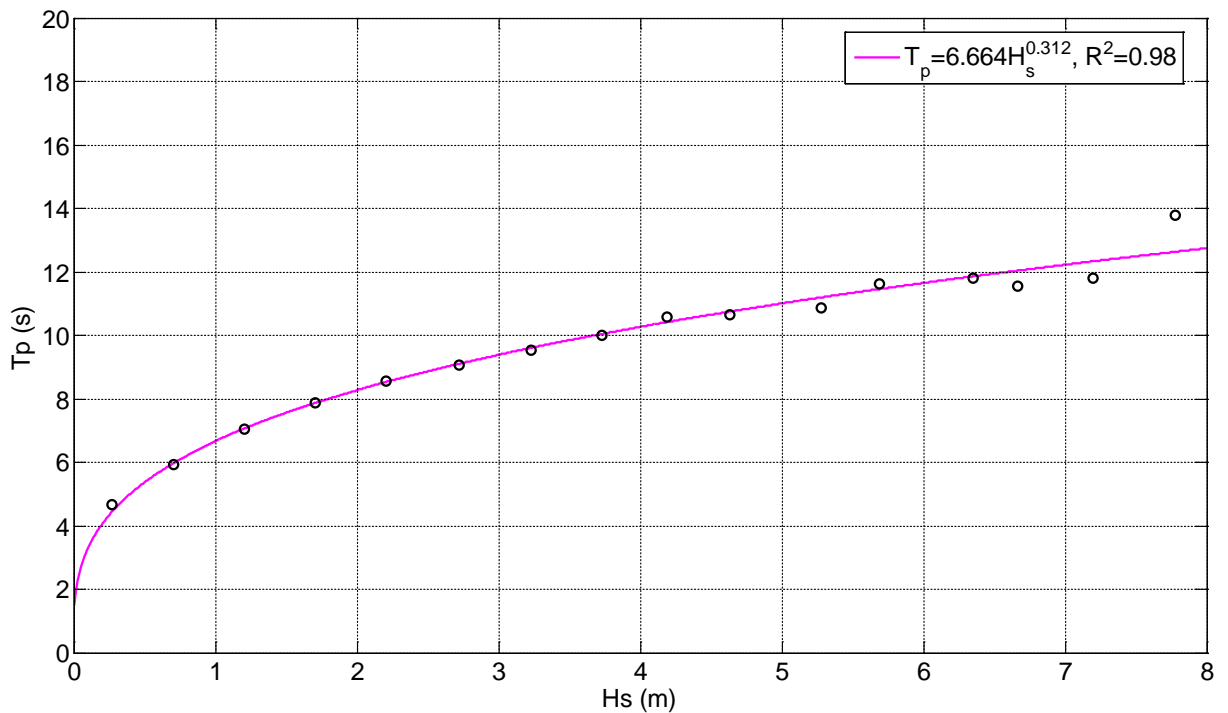


Figura 13: Curva di regressione Hs-Tp per Cetraro

H _s (m)	T _m (s)	T _p (s)	L ₀ (m)
0.5	4.01	5.37	44.95
1	5.07	6.66	69.28
1.5	5.82	7.56	89.22
2	6.41	8.27	106.77
2.5	6.91	8.87	122.72
3	7.35	9.39	137.50
3.5	7.74	9.85	151.39
4	8.10	10.27	164.54
4.5	8.43	10.65	177.09
5	8.74	11.01	189.13
5.5	9.02	11.34	200.72
6	9.29	11.66	211.91
6.5	9.55	11.95	222.77
7	9.79	12.23	233.31
7.5	10.02	12.50	243.58
8	10.24	12.75	253.58

Tabella 5: Andamento di altezza, periodo e lunghezza d'onda al largo di Cetraro

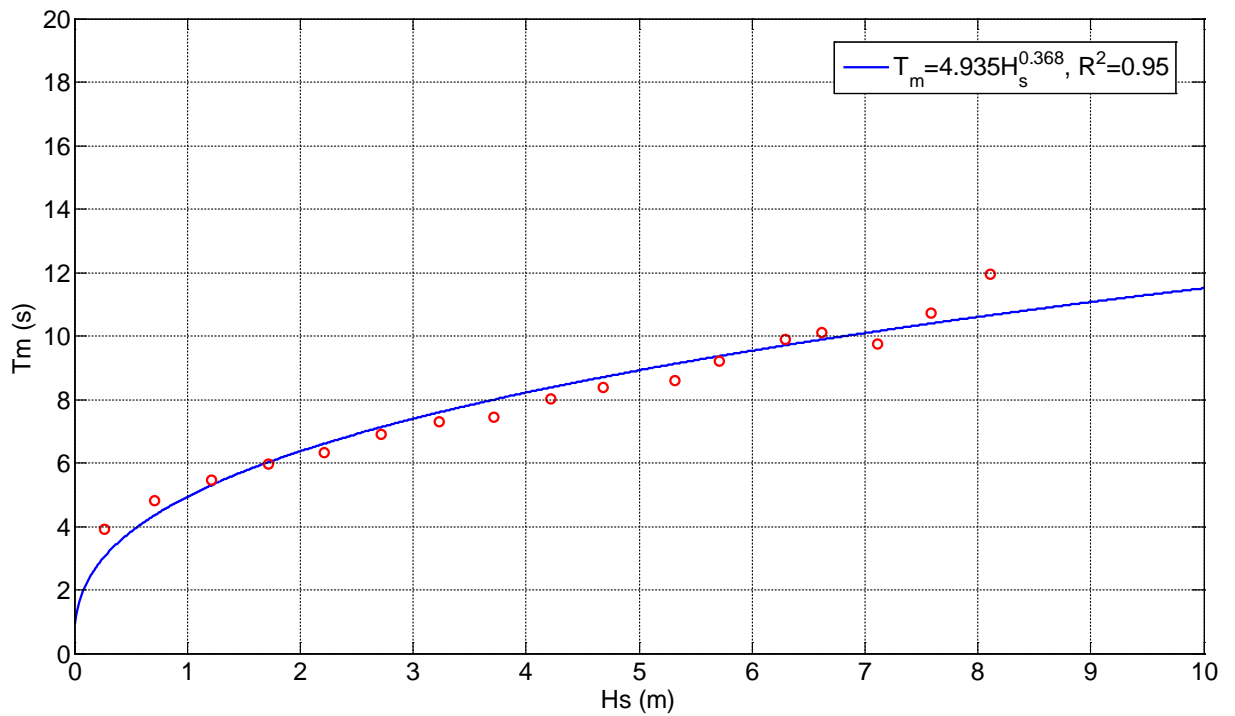


Figura 14: Curva di regressione Hs-Tm per Amantea

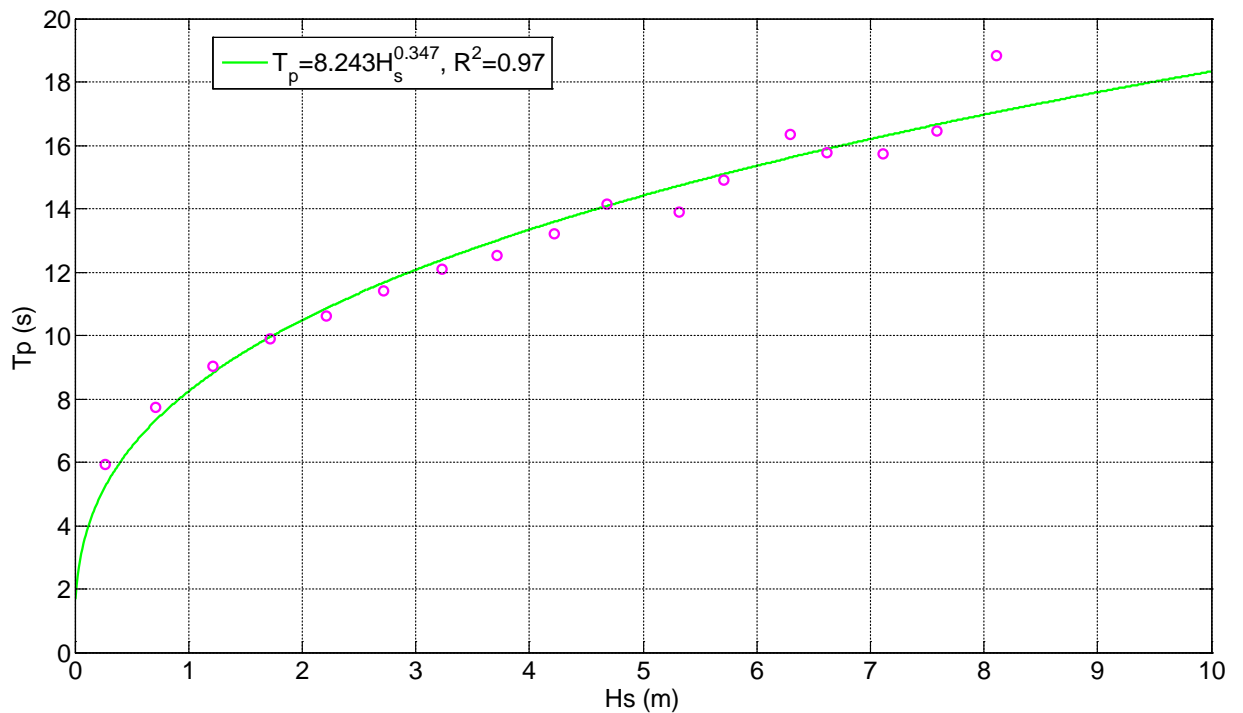


Figura 15: Curva di regressione Hs-Tp per Amantea

H_s (m)	T_m (s)	T_p (s)	L_0 (m)
0.5	3.82	6.48	22.82
1	4.94	8.24	37.99
1.5	5.73	9.49	51.19
2	6.37	10.49	63.25
2.5	6.91	11.33	74.53
3	7.39	12.07	85.23
3.5	7.82	12.73	95.46
4	8.22	13.34	105.31
4.5	8.58	13.89	114.83
5	8.92	14.41	124.09
5.5	9.24	14.90	133.09
6	9.54	15.35	141.89
6.5	9.82	15.79	150.49
7	10.09	16.20	158.92
7.5	10.35	16.59	167.19
8	10.60	16.96	175.32

Tabella 6: Andamento di altezza, periodo e lunghezza d'onda al largo di Amantea

Propagazione del moto ondoso sottocosta

La corretta descrizione delle trasformazioni che le onde subiscono in prossimità della costa risulta essere di estrema importanza per la comprensione dei processi di idrodinamica e morfodinamica costiera e per l'eventuale progettazione o verifica di opere marittime a difesa dei litorali. L'onda, nella sua propagazione da largo verso riva, subisce modifiche di forma, altezza, direzione e celerità. Le caratteristiche delle onde variano a causa di fenomeni quali lo shoaling, la rifrazione, la diffrazione, la riflessione e il frangimento, associati a fenomeni non-lineari dovuti alle interazioni fra le stesse onde e tra le onde e le correnti. Il trasporto di massa liquida legato al frangimento genera inoltre delle correnti che possono avere intensità notevoli e che influiscono in maniera importante sull'evoluzione dei litorali.

La propagazione del clima ondoso da largo verso riva in corrispondenza del paraggio di Amantea è stata effettuata con il modello numerico SWAN, acronimo di Simulating WAVes Nearshore, la cui implementazione è stata sviluppata dal Dipartimento di Meccanica dei Fluidi dell'Università di Delft. Lo SWAN permette di ottenere stime reali dei parametri d'onda in aree costiere, laghi ed estuari una volta note le condizioni del fondo, del vento e delle correnti. In

particolare, il modello simula lo sviluppo degli spettri d'onda che viaggiano da acque profonde verso acque poco profonde, come nel caso del moto ondoso che si propaga verso riva.

Nel modello SWAN sono rappresentati i seguenti processi di propagazione d'onda:

- Propagazione lungo lo spazio geografico;
- Rifrazione dovuta a variazioni del fondale marino e della corrente;
- Shoaling dovuto a variazioni del fondale marino e della corrente;
- Bloccaggio e riflessione da parte di correnti in direzione opposta;
- Trasmissione, bloccaggio o riflessione da parte di ostacoli.

Inoltre, nello SWAN vengono rappresentati i seguenti processi di generazione e dissipazione d'onda:

- Generazione dovuta al vento;
- Dissipazione dovuta alla rottura in cresta (whitecapping);
- Dissipazione dovuta alla rottura d'onda indotta dalla profondità;
- Dissipazione dovuta all'attrito sul fondo;
- Interazioni onda-onda (quadruple e triple);
- Diffrazione a tergo di ostacoli.

Tale modello può essere utilizzato in condizioni sia stazionarie sia non stazionarie, considerando coordinate sia cartesiane (nel caso di piccole scale) sia sferiche (nel caso di piccole e grandi scale).

Nel modello SWAN le onde sono descritte attraverso la densità d'azione spettrale dell'onda bidimensionale anche quando sono presenti fenomeni non lineari (ad esempio nella zona dei frangenti). La ragione fondamentale per l'utilizzo dello spettro anche in condizioni fortemente non lineari è che, anche in tali condizioni, è possibile definire con buona accuratezza la distribuzione spettrale del momento del secondo ordine delle onde (sebbene esso non è sufficiente per descrivere le onde da un punto di vista statistico). Lo spettro utilizzato in SWAN è la densità d'azione spettrale $N(\sigma, \theta)$ anziché la densità di energia spettrale $E(\sigma, \theta)$ poiché, in presenza di correnti, la densità d'azione spettrale viene conservata mentre non lo è la densità d'energia.

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa σ e la direzione d'onda θ (la direzione normale alla cresta dell'onda di ogni componente spettrale). La densità d'azione è funzione della densità d'energia e della frequenza relativa:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

Nella presente modellazione, l'evoluzione dello spettro d'onda è descritta attraverso la seguente equazione del bilancio d'azione spettrale valida per coordinate cartesiane, che rappresenta l'equazione fondamentale di tutta la teoria dello SWAN:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial z} c_z N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

In tale equazione il primo termine di sinistra rappresenta la variazione della densità d'azione spettrale rispetto al tempo; il secondo, il terzo e il quarto termine rappresentano la propagazione dell'azione nello spazio geografico (con le velocità di propagazione c_x , c_y e c_z riferite, rispettivamente, alle direzioni x , y e z); il quinto termine rappresenta la variazione della frequenza relativa dovuta alle variazioni di profondità e delle correnti (con la velocità di propagazione c_σ riferita allo spazio delle frequenze σ); il sesto termine, l'ultimo dei termini di sinistra dell'equazione, rappresenta la rifrazione indotta dalla profondità e dalla corrente (con la velocità di propagazione c_θ riferita allo spazio delle direzioni d'onda θ). Le espressioni per descrivere tali velocità di propagazione sono date dalla teoria dell'onda lineare di Stokes al 1° ordine. Il termine S , che è comunque funzione della frequenza e delle direzioni d'onda ($S = f(\sigma, \theta)$), presente nei termini a destra dell'equazione del bilancio d'azione spettrale, rappresenta il termine sorgente rispetto agli effetti della generazione, della dissipazione e delle interazioni non lineari onda-onda.

Il primo passo nello studio di propagazione del clima ondoso da largo verso riva con il modello SWAN ha riguardato la preparazione di una griglia di calcolo innestata sulla batimetria in corrispondenza del paraggio di Amantea. La modellazione del fondale marino è stata realizzata

sulla base dei rilievi batimetrici delle carte nautiche dell’Istituto Idrografico della Marina del 1993 e dei rilievi batimetrici fatti recentemente sottocosta nella zona della spiaggia attiva (emersa e sommersa) del tratto di costa del comune di Amantea interessato dall’intervento, effettuando in seguito un’interpolazione per triangolazione sulle batimetriche rilevate per avere tutti i valori di tutte le profondità nella griglia di calcolo considerata. Al fine di coprire in maniera significativa tutta l’area interessata allo studio meteomarino, è stata utilizzata una prima serie di simulazioni utilizzando una griglia di calcolo rettangolare avente dimensioni 8500 m in lunghezza e di 5500 m in larghezza, avente un numero pari rispettivamente a 340 maglie e 220 maglie, aventi ciascuna dimensioni 25 m x 25 m, che si estendono a partire da profondità di circa 200 m, nella condizione di acque profonde ($d/L > 0.5$) per tutti gli attacchi ondosi, fino a terra. Con riferimento al Nord Cartografico, in Figura 16 sono mostrati i limiti della griglia di calcolo generale, posizionata in corrispondenza del litorale di Amantea, posizionato a Sud-Est. Sono inoltre evidenziate, con differenti colori, le linee batimetriche determinate attraverso le carte nautiche (fino alla -11 m) e i rilievi effettuati recentemente in situ (dalla -11 m fino alla linea di riva). Sui limiti della griglia di calcolo lato mare (Nord, Sud ed Ovest) sono state effettuate le propagazioni degli stati di mare da largo a sottocosta, con particolare attenzione alla definizione del clima ondoso in corrispondenza di un punto sottocosta rappresentativo del tratto costiero oggetto di studio, posto circa alla batimetrica -20 m, ai fini della modellazione della dinamica evolutiva del litorale, che richiede in input il clima meteomarino medio, e del dimensionamento delle opere rigide, che richiede in input il clima meteomarino estremo.

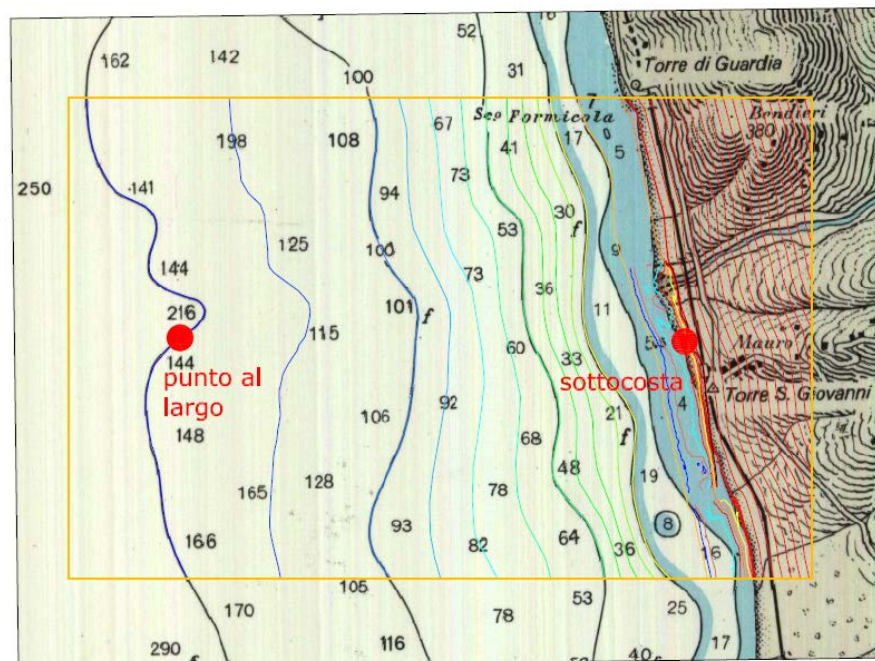


Figura 16: Evidenziazione della griglia di calcolo generale e delle principali batimetriche del tratto litoraneo oggetto dell'intervento nel comune di Amantea

Le onde propagate con lo SWAN vengono definite da un valore di altezza d'onda, H_s , di periodo di picco, T_p , e di direzione di provenienza rispetto al Nord Cartografico relative alla totalità dei dati meteo-marini trasposti a largo del paraggio di Amantea.

Nelle propagazioni effettuate con lo SWAN è stato utilizzato un classico spettro di tipo Jonswap con γ (coefficiente di picco dello spettro) = 3.3, assumendo un range di direzioni spettrali pari a 180° , una frequenza minima dello spettro, $f_1 = 0.01$ Hz, e una frequenza massima, $f_2 = 0.5$ Hz. Il frangimento del moto ondoso per raggiunto limite di profondità è stato definito nell'input del programma in base al rapporto limite $H_s/d = 0.78$, in cui d è la profondità. Sulla base delle del rilievo di campo batimetrico effettuato e delle linee batimetriche rilevate dalla carta nautica, è stata effettuata una modellazione del fondale marino attraverso un'interpolazione per triangolazione su tutti i nodi della griglia di calcolo. In Figura 17 sono mostrati i limiti della griglia di calcolo generale ($x = 8000$ m e $y = 5500$ m), posizionata in corrispondenza di un'ampia fascia del litorale di Amantea. Sono inoltre evidenziate le principali linee batimetriche determinate attraverso l'analisi delle carte nautiche. Nella seguente è mostrata una visualizzazione 3D della batimetria del fondale marino, situata all'interno della griglia di calcolo.

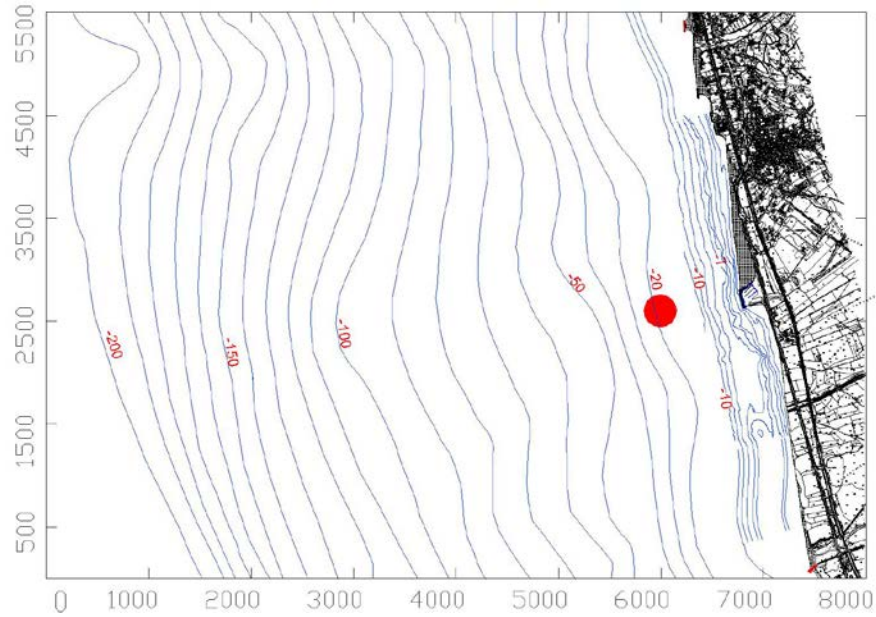


Figura 17: Visualizzazione bidimensionale delle principali batimetriche all'interno della griglia di calcolo

La successiva

Figura 19 mostra invece una visualizzazione 3D della batimetria del fondale marino, con evidenziazione dell'ampiezza delle mesh quadrate adottate (25 m * 25 m).

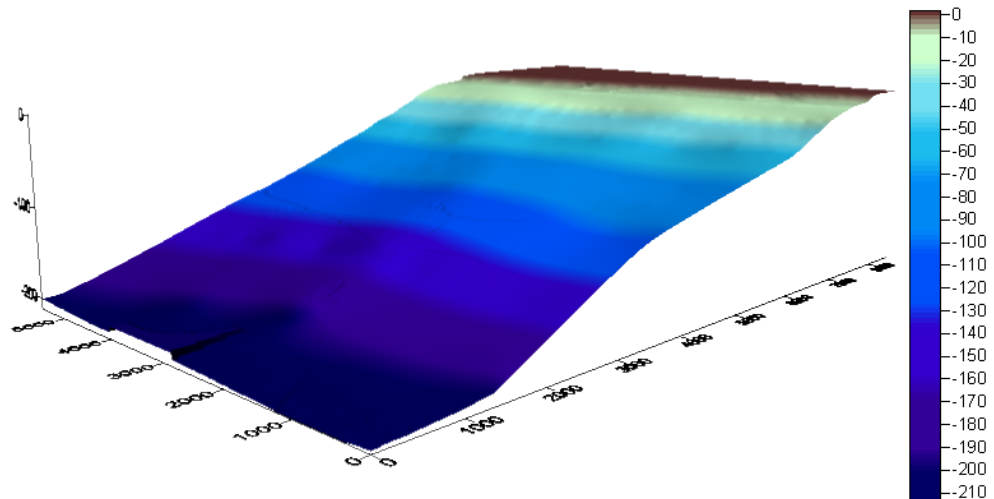


Figura 18: Visualizzazione 3D della batimetria all'interno della griglia generale (vista da Nord-Ovest)

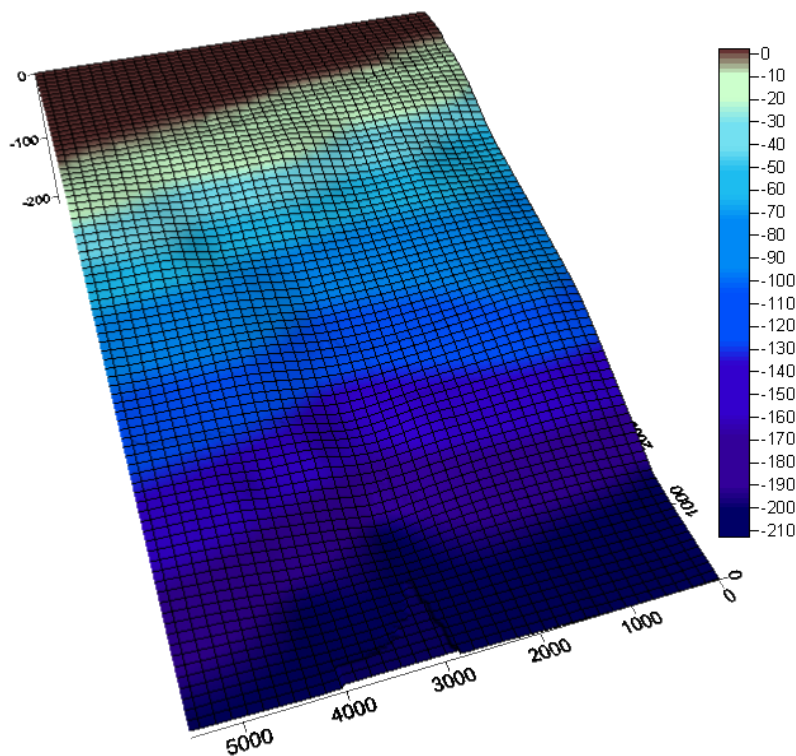


Figura 19: Visualizzazione 3D della batimetria all'interno della griglia generale, con evidenziazione delle mesh adottate (vista da Nord)

Nella successive Figure sono riportati, a scopo esemplificativo, una serie di grafici relativi ai risultati delle simulazioni effettuate con il modello di propagazione del moto ondoso SWAN da largo verso riva nel dominio di calcolo considerato.

Gli output grafici delle simulazioni effettuate sulla griglia generale, avente dimensione 8500 m * 5500 m, fanno riferimento al sistema di coordinate cartesiano xy , dove x rappresenta la coordinata diretta verso la costa, y la coordinata ortogonale ad essa, e z la coordinata verticale, diretta lungo la profondità. In tutti i grafici è stato segnalato l'orientamento rispetto al Nord Cartografico.

In particolare, per i due attacchi ondosi considerati i grafici fanno riferimento a:

- profondità del fondale, con indicazione delle linee batimetriche principali (segnalate ogni 10 m a partire circa dalla -200 m) e della linea di riva, comprendente i raggi d'onda, rappresentati come linee di flusso, relativi alla direzione di propagazione del moto ondoso, al fine di evidenziare gli effetti rifrattivi del moto ondoso nella sua

propagazione verso riva i vettori per effetto dell’incidenza dei fronti d’onda posti a differenti profondità (Figura 24); in particolare, il valore della direzione del moto ondoso, Dir ($^{\circ}N$), che risulta ortogonale alle creste d’onda, viene calcolata nello SWAN secondo la relazione (Kuyt et al., 1988):

$$Dir = \arctan \left[\frac{\int \sin(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \cos(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right]$$

dove $E(\sigma, \theta)$ rappresenta la densità spettrale.

- distribuzione spaziale tridimensionale su tutto il dominio di calcolo dell’altezza d’onda significativa, H_s (m), nel sistema di coordinate xyz , al fine di comprendere il fenomeno di abbattimento dell’altezza d’onda per effetto di shoaling e rifrazione a causa della progressiva diminuzione di profondità (Figura 25) il valore di H_s viene determinato dal modello attraverso la relazione:

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

dove $E(\omega, \theta)$ rappresenta la varianza della densità spettrale e ω la frequenza angolare.

- distribuzione spaziale tridimensionale sottocosta, su un dominio di dimensioni fra i punti $x_1 = 5000$ e $x_2 = 7500$ m, e $y_1 = 2250$ m e $y_2 = 3250$ m (più piccolo di quello generale), dell’altezza d’onda significativa, H_s (m), nel sistema di coordinate xyz , al fine di comprendere il fenomeno di abbattimento dell’altezza d’onda per effetto di shoaling e rifrazione sottocosta, dove tali fenomeni sono particolarmente accentuati (Figura 26);
- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo dell’altezza d’onda significativa, H_s (m) (Figura 27);
- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo del periodo medio dell’onda, T_m (s) (Figura 28), determinato secondo la relazione:

$$T_m = 2\pi \frac{\iint \omega^{-1} E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo della lunghezza d'onda, L (m) (Figura 29); essa viene valutata secondo la seguente relazione:

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

dove il coefficiente p viene solitamente posto pari a 1.

- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo della celerità dell'onda, c (m/s) (Figura 30); essa viene determinata, noto il valore di L e di T_m , secondo l'espressione:

$$c = \frac{L}{T_m}$$

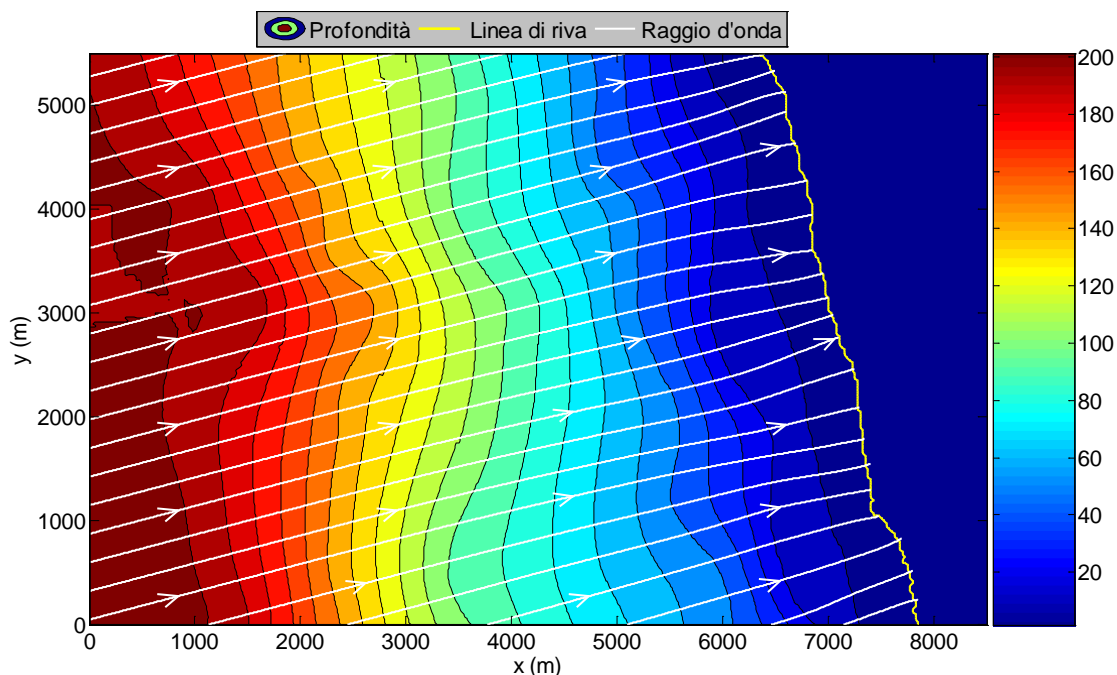


Figura 24: Profondità del fondale e raggi d'onda relativi alla propagazione del moto ondoso su tutto il dominio di calcolo

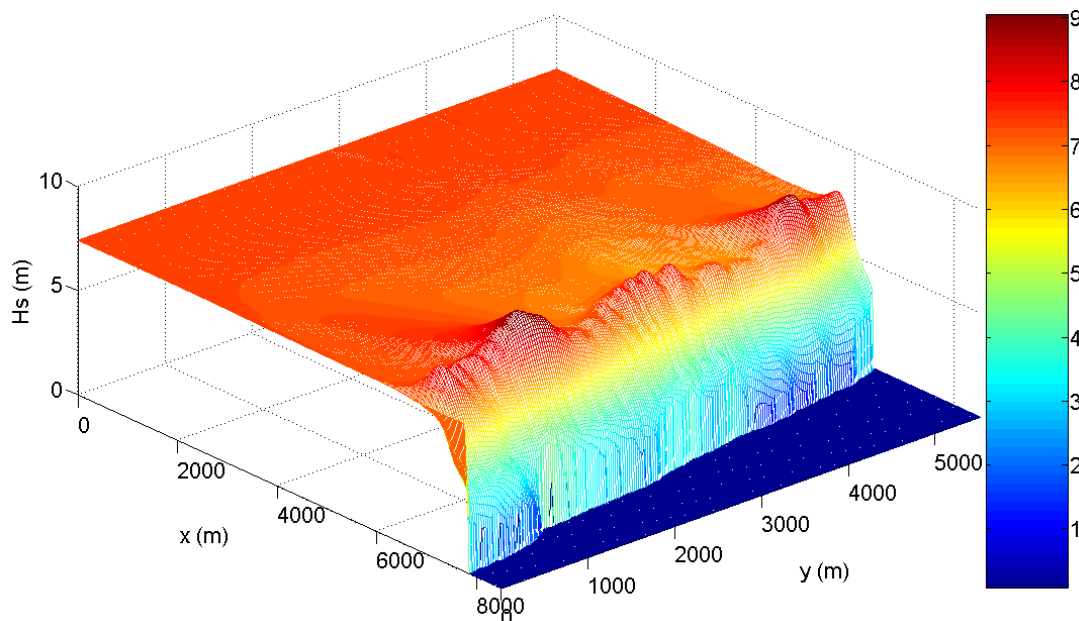
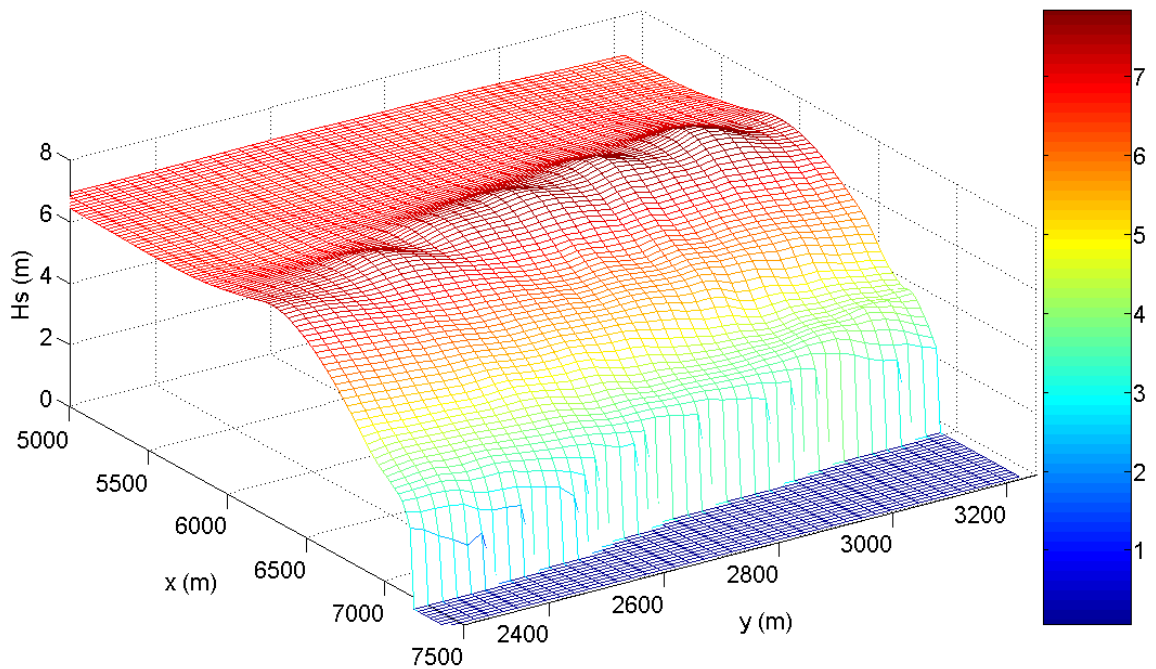


Figura 25: Distribuzione spaziale 3D su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa. VISTA DA SUD-EST



**Figura 26: Distribuzione spaziale 3D sottocosta dell'altezza d'onda significativa, H_s (m)
VISTA DA SUD-EST**

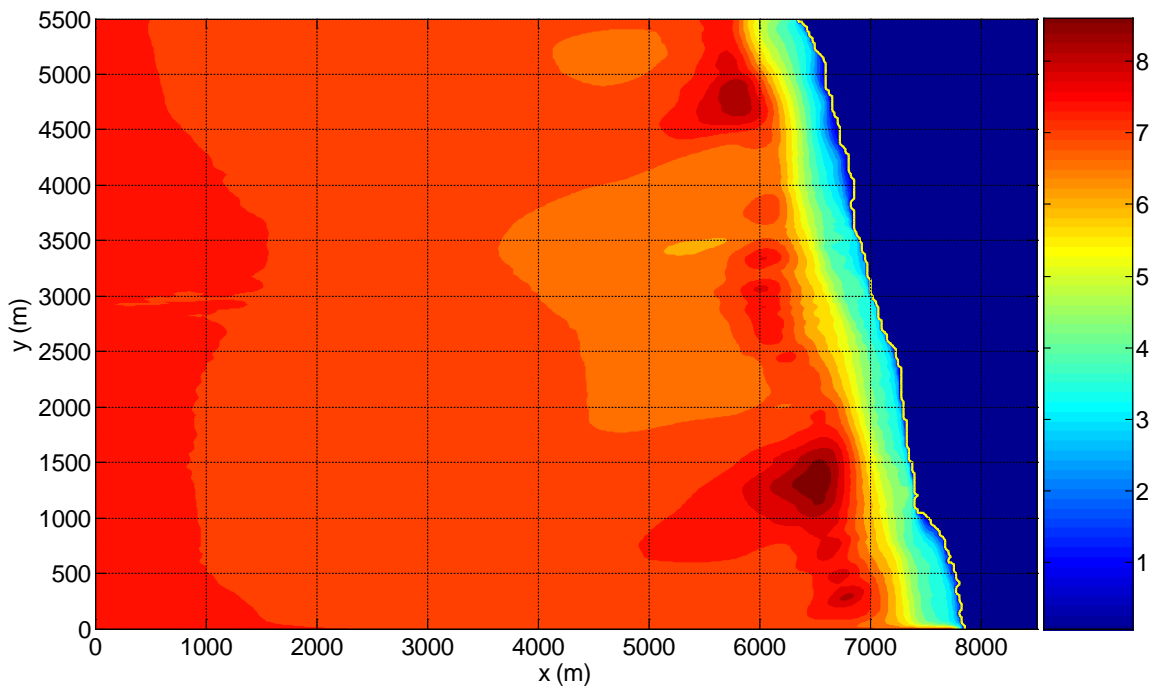


Figura 27: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa, H_s (m)

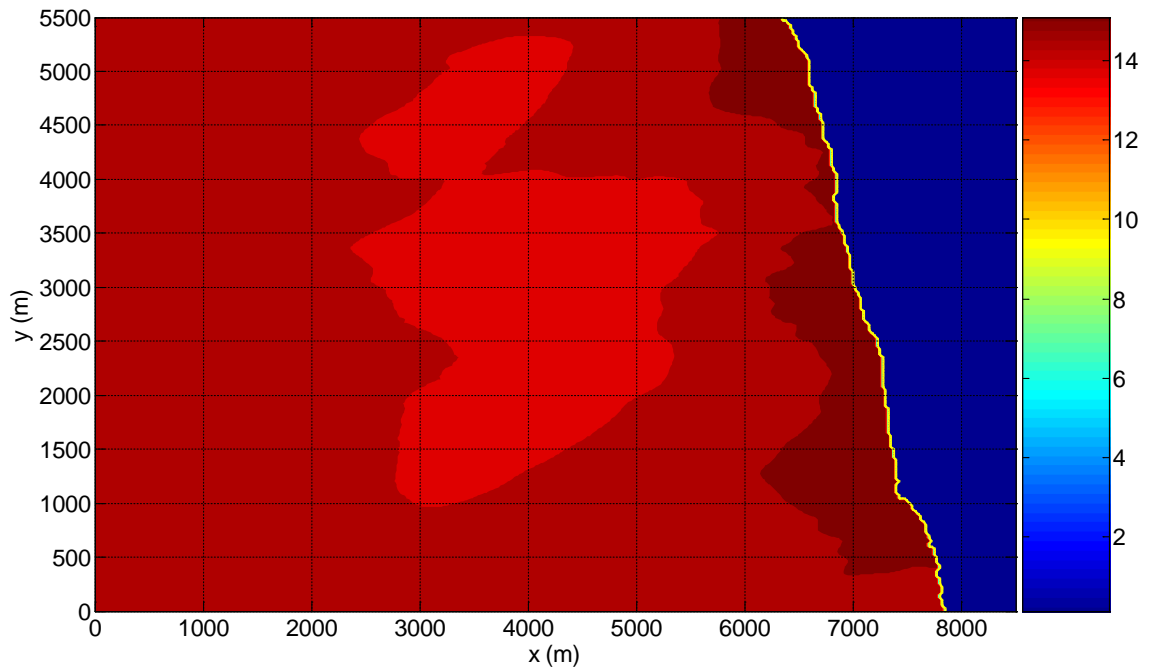


Figura 28: Distribuzione spaziale bidimensionale del periodo medio dell'onda, T_m (s).

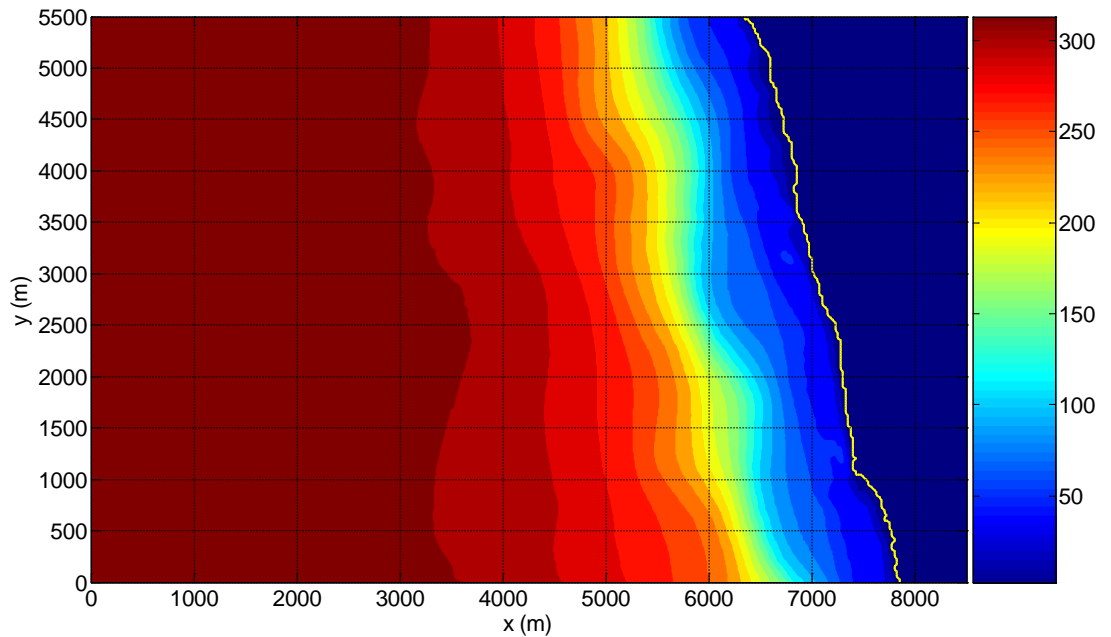


Figura 29: Distribuzione spaziale bidimensionale della lunghezza d'onda, L (m).

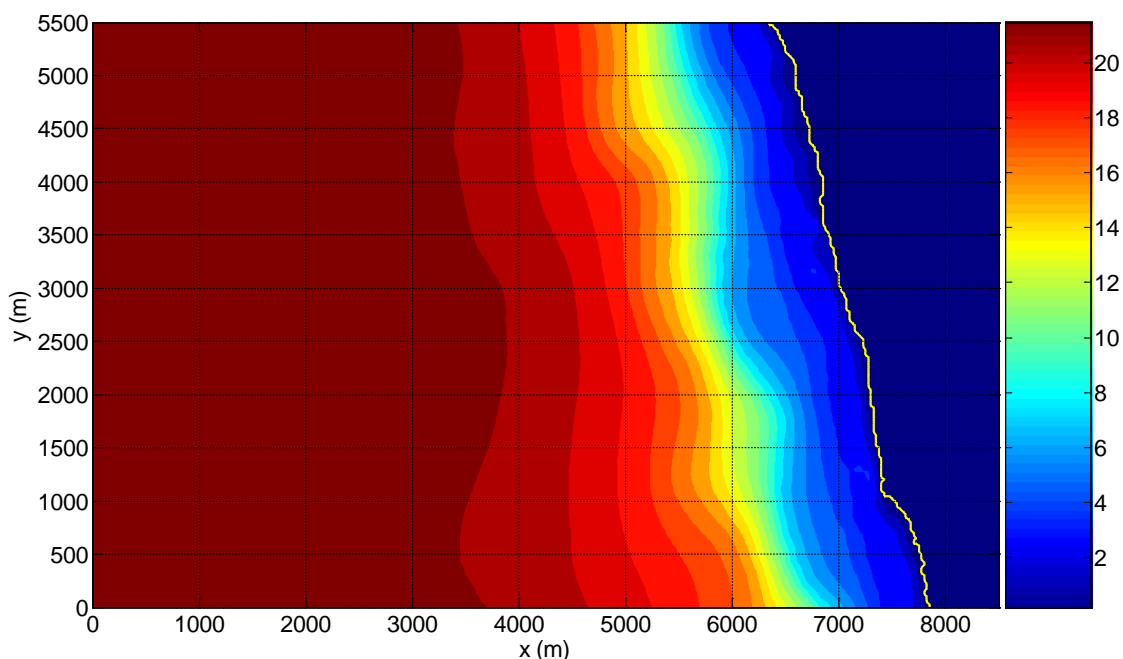


Figura 30: Distribuzione spaziale bidimensionale della celerità dell'onda, c (m/s)

Dall'analisi dei dati ricavati nelle simulazioni, e dai grafici mostrati nelle precedenti Figure, è possibile rilevare che le grandezze d'onda in esame (direzione, altezza significativa, periodo medio, lunghezza e celerità) evidenziano le seguenti caratteristiche:

- Progressiva rotazione delle direzioni di propagazione del moto ondoso, i cui raggi d'onda tendono a disporsi ortogonalmente alla linea di riva per effetto della rifrazione;
- Progressiva diminuzione dell'altezza d'onda significativa, dalla condizione di acque profonde al limite della condizione di acque intermedie ($0.04 < d/L < 0.5$), e successivo lieve innalzamento dell'altezza d'onda significativa, dalla condizione di acque basse ($d/L < 0.04$) fino al limite di frangimento delle onde per raggiunto limite di profondità;
- Variabilità minima del periodo medio dell'onda da largo verso riva sul dominio di calcolo;
- Progressiva diminuzione da largo verso riva della lunghezza d'onda e, di conseguenza, progressivo rallentamento del moto ondoso, descritto dall'abbattimento dei valori della celerità dell'onda.

Occorre infine osservare che il periodo di picco, T_p , risulta una grandezza invariante del moto ondoso nella sua propagazione da largo fino al frangimento per raggiunto limite di profondità.

La dissipazione energetica associata all'onda fa sì che esso risulti variabile nella cosiddetta surf zone (fascia costiera compresa fra la profondità di frangimento e la linea di riva).

Clima meteomarino medio sottocosta

Sulla base delle simulazioni numeriche effettuate con il modello SWAN, in Tabella 9 viene mostrato il clima meteomarino medio ricavato sottocosta, corrispondente al punto sottocosta di riferimento per i successive analisi morfodinamiche, posizionato circa alla batimetrica -20 m e avente coordinate ($x = 6000$ m, $y = 2600$ m). Il clima ondoso è stato pertanto suddiviso per classi di direzioni medie di provenienza del moto ondoso ricadenti nel paraggio di Amantea (165° - 345° N), e caratterizzate da uno specifico valore di classe d'altezza d'onda H_s , a partire da 0.5 m, e dai rispettivi valori di T_m e T_p , determinati attraverso le correlazioni altezza-periodo calcolate in precedenza.

L'incidenza tendenzialmente ortogonale delle direzioni di propagazione del moto ondoso rispetto alle batimetriche fa sì che le onde mutino in altezza e direzione soprattutto per il fenomeno dello shoaling, che risulta meno preponderante nel cambiamento delle onde rispetto alla rifrazione. In questo caso, risulta così minimizzato l'effetto della rifrazione delle onde poiché i fronti d'onda viaggiano a profondità non molto variabili fra di loro.

In generale, si osserva che le direzioni di propagazione delle onde per i diversi settori angolari analizzati tendono sostanzialmente a disporsi normalmente al litorale, o meglio i fronti d'onda tendono a disporsi parallelamente alla linea di riva. Le onde più elevate subiscono abbattimenti in altezza più forti, i cui valori massimi sottocosta, alla profondità di circa 20 m, si attestano su valori intorno ai 6.0 m.

In Tabella 9 e in Tabella 10 sono mostrate, rispettivamente, per il paraggio di Amantea i numeri di apparizione e le percentuali di apparizione del moto ondoso alla profondità di circa -20 m nel punto rappresentativo sottocosta avente coordinate $x = 6000$ m e $y = 2600$ m, nel dominio di calcolo adottato per la propagazione dei stati di mare da largo a sottocosta.

Tali dati vengono rappresentati in forma di istogramma nella Figura 38 e successivamente in forma di diagramma polare (escludendo gli eventi di calma con $H_s < 0.25$ m) in Figura 39. E'

così possibile osservare le percentuali di apparizione del moto ondoso sottocosta per il paraggio di Amantea.

Rispetto alla classificazione effettuata per le classi d'altezza d'onda significativa al largo in base ai settori angolari considerati, gli eventi di moto ondoso, con esclusione delle calme, che caratterizzano il clima ondoso sottocosta sono suddivisi nei settori direzionali 165°-195° 195°-225°N, 225°-255°N, 255°-285°N, 285°-315°N e 315°-345°N.

TABELLA DIREZIONALE ALTEZZA D'ONDA ANNUALE													
NUMERO	EVENTI	RILEVATI											
Dir (°)	345	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345	Tot.
Hs (m)													
calme	0	0	0	0	0	0	138	446	1233	3157	909	32	5915
.25-0.5	0	0	0	0	0	0	153	541	632	2664	732	71	4793
0.5-1.0	0	0	0	0	0	0	106	387	576	2760	687	72	4588
1.0-1.5	0	0	0	0	0	0	16	48	233	1224	204	22	1747
1.5-2.0	0	0	0	0	0	0	6	21	133	504	68	3	735
2.0-2.5	0	0	0	0	0	0	0	7	39	186	49	0	281
2.5-3.0	0	0	0	0	0	0	0	4	15	68	25	0	112
3.0-3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	3	50	7	0	60
3.5-4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	8	0	21
4.0-4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	6
4.5-5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
5.5-6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	3
>6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3
Tot.	0	0	0	0	0	0	419	1454	2864	10644	2690	200	18271

Tabella 9: Numero di apparizioni del moto ondoso nel punto sottocosta (-20 m) per il paraggio di Amantea

VALORI PERCENTUALI DEGLI EVENTI RILEVATI													
Dir (°)	345	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	Tot.
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345	
Hs (m)													
calme	0	0	0	0	0	0	0.59	1.91	5.27	13.51	3.89	0.14	25.3
.25-0.5	0	0	0	0	0	0	0.65	2.31	2.7	11.4	3.13	0.3	20.5
0.5-1.0	0	0	0	0	0	0	0.45	1.66	2.46	11.81	2.94	0.31	19.63
1.0-1.5	0	0	0	0	0	0	0.07	0.21	1	5.24	0.87	0.09	7.47
1.5-2.0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.09	0.57	2.16	0.29	0.01	3.14
2.0-2.5	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.17	0.8	0.21	0	1.2
2.5-3.0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.06	0.29	0.11	0	0.48
3.0-3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.21	0.03	0	0.26
3.5-4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.03	0	0.09
4.0-4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0	0.03
4.5-5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0.02
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01
5.5-6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01
>6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01
Tot.	0	0	0	0	0	0	1.79	6.22	12.25	45.53	11.51	0.86	78.16

Tabella 10: Percentuali di apparizione del moto ondoso nel punto sottocosta (-20 m) per il paraggio di Amantea

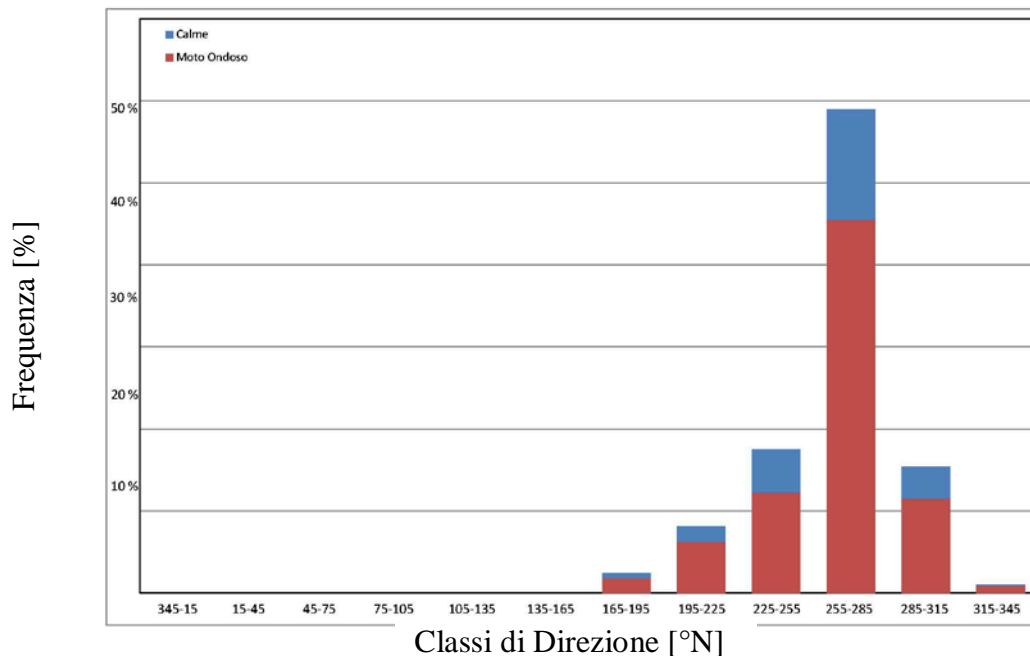


Figura 31: Percentuali di apparizione degli eventi di ondoso Sottocosta per il paraggio di Amantea

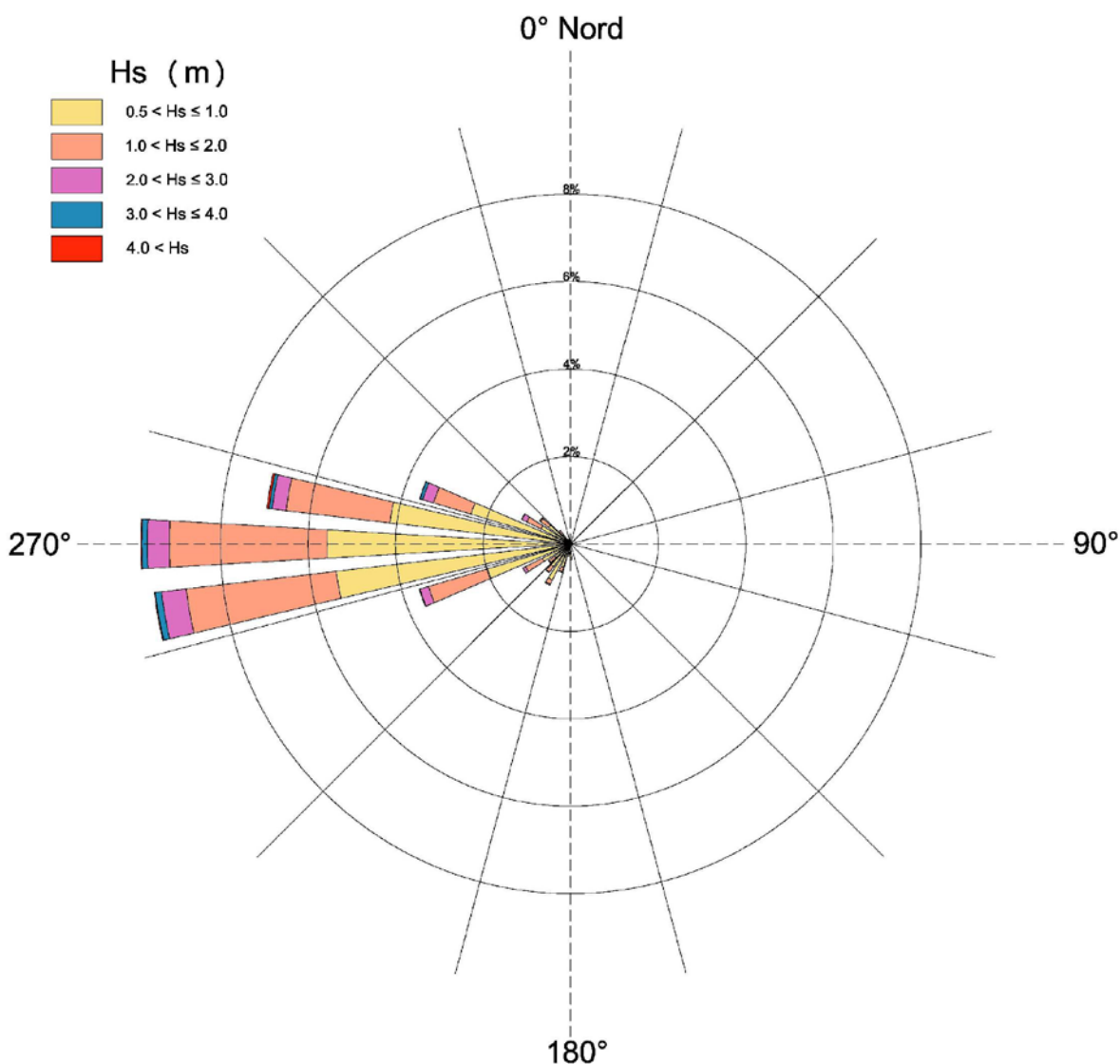


Figura 32: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso sottocosta (-20 m) per il paraggio di Amantea (punto di coordinate: x = 6000 m, y = 2600 m)

Sulla base della risultati ottenuti, si evince che il 69.29 % degli eventi risultano ricadere prevalentemente nei soli settori direzionali compresi tra 240°-300°N, a causa degli effetti dei fenomeni di shoaling e rifrazione connessi al moto ondoso nella sua propagazione verso riva che fanno sì che la direzione del moto ondoso si avvicini alla direzione normale al litorale. In particolare, il 45.53 % degli eventi sottocosta risulta provenire dal settore angolare 255°-285°N,

corrispondente agli stati di mare più elevati con valori massimi degli stati di mare compresi nel range $3.0 \text{ m} < H_s < 3.5 \text{ m}$. Stesso range massimo di stati di mare risulta provenire dai settori $225^\circ\text{-}255^\circ\text{N}$ e $285^\circ\text{-}315^\circ\text{N}$, con percentuale di apparizione totale comunque inferiori al settore $255^\circ\text{-}285^\circ\text{N}$. A causa della rotazione del moto ondoso verso la normale al litorale oggetto di studio, dai settori angolari esterni al paraggio ($165^\circ\text{-}195^\circ\text{N}$ e $315^\circ\text{-}345^\circ\text{N}$) provengono solo eventi di minore entità ($< 1.5 \text{ m}$ $H_s < 2.0 \text{ m}$).

Eventi estremi di moto ondoso al largo e sottocosta (onde di progetto)

Al fine di verificare la stabilità delle opere marittime, è necessario conoscere l'onda di progetto, ossia quel valore dell'altezza d'onda che non sia superato in lunghi periodi di tempo. Ricorrendo a metodi propri dell'analisi probabilistica, la stima dell'altezza d'onda massima probabile è stata condotta secondo il seguente approccio:

- definizione dell'evento (eccedenze o massimi e quindi il livello di soglia o l'intervallo temporale);
- scelta della distribuzione probabilistica rappresentativa degli eventi statistici (campione degli eventi);
- valutazione del numero degli eventi nella vita presunta dell'opera;
- valutazione della distribuzione di probabilità dell'altezza d'onda massima.

L'individuazione dell'onda di progetto necessita la conoscenza delle caratteristiche delle mareggiate che si sono verificate nel paraggio considerato. L'approccio probabilistico porta alla determinazione di un valore di altezza significativa, H_s , in funzione del periodo di ritorno, T . Il periodo di registrazione dei dati di moto ondoso (circa 8 anni per la boa di Cetraro) risulta affidabile per la determinazione degli eventi estremi.

Partendo dalle serie storica dei dati di moto ondoso al largo del paraggio di Amantea riguardanti le altezze d'onda significative e la loro direzione di provenienza, ricavati dalla trasposizione geografica dei dati registrati dall'ondometro di Cetraro è stata effettuata un'operazione di “estrazione” dalla popolazione dei dati, volta alla determinazione di un campione di eventi (altezze massime al culmine della mareggiata) omogenei e statisticamente indipendenti.

A tal fine, è stato assunto che l’agitazione della superficie libera possa essere considerata una mareggiata quando l’altezza significativa supera una determinata soglia, posta pari a 2.0 m, sulla base delle analisi delle mareggiate estrapolate dalle serie storiche registrate dalle boe italiane della RON (Corsini et al., 2002; Cavalieri et al., 2004), per un periodo di tempo significativo, considerato almeno di durata pari a 6 ore, e quando le direzioni di provenienza degli stati di mare rimangano confinati entro un settore angolare di massimo 30° (Corsini et al., 2002). La durata della mareggiata è quindi individuata da due attraversamenti della soglia, mentre la misura della sua intensità è data dalla massima altezza d’onda significativa verificatasi in tale durata. La direzione di provenienza della mareggiata viene posta pari alla media delle direzioni registrate durante l’evento.

In particolare, dall’analisi della serie dei valori di altezza d’onda significativa, H_s , al largo del paraggio di Amantea sono state individuati 118 eventi di mareggiata afferenti al settore di traversia in esame (165°-345°N), per come mostrato in Tabella 12, scegliendo in seguito 2 settori direzionali principali (255°-285°N e 285°-315°N) in modo tale che fossero rappresentativi di un numero sufficiente di mareggiate utili per la determinazione degli eventi estremi, e in Figura 33 attraverso una rappresentazione polare di tutti gli eventi di mareggiata. Per il settore direzionale 195°-210°N non sono stati individuati eventi di mareggiata che soddisfino le condizioni succitate. Il maggior numero di mareggiate sono risultate provenire dal settore angolare 240°-270°N, con 118 eventi.

Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Flusso d'energia
8.67	15.48	297	4018.27
8.62	13.66	332	2499.9
6.68	16.08	331	1034.98
6.23	11.36	272	498.64
5.92	10.63	294	925.25
5.64	11.02	279	1260.31
5.16	11.86	349	621.4
4.83	11	291	435.54
4.73	11.37	297	1068.63
4.64	11.43	306	568.27
4.57	11.29	296	620.67
4.4	12	306	688.44
4.32	10.21	262	627.79

Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Flusso d'energia
2.82	9.15	282	107.77
2.8	10.25	286	653.08
2.78	12.64	269	560.96
2.77	9.9	290	515.46
2.77	8.65	290	229.75
2.77	8.45	256	355.57
2.7	9.74	286	239.08
2.66	10.65	309	209.2
2.64	9.36	277	422.41
2.63	7.78	266	271.05
2.6	10.94	307	332.56
2.59	11.38	286	155.73
2.58	8.61	268	269.32

REGIONE CALABRIA
 COMUNE DI AMANTEA (CS)
 "MIGLIORAMENTO INFRASTRUTTURALE DEL PORTO TURISTICO DI AMANTEA"

R08 – STUDIO METEOMARINO

4.31	10.34	316	707.59
4.3	8.59	259	647.97
4.23	12.98	289	963.3
3.99	11.04	325	419.16
3.99	12.67	347	636.27
3.98	9.07	280	760.38
3.93	9.8	314	285.03
3.9	10.41	266	845.94
3.89	10.34	288	602.09
3.88	12.19	308	571.27
3.82	9.85	277	431.15
3.79	10.86	306	252.04
3.75	8.99	258	957.47
3.72	15.88	318	246.12
3.68	9.84	325	838.84
3.67	10.27	276	536.3
3.57	10.43	322	152.75
3.55	10.55	257	786.39
3.53	11.95	317	201.87
3.5	7.59	261	519.94
3.5	8.61	268	603.41
3.49	12.55	324	158.89
3.46	10.81	328	265.96
3.45	8.79	283	465.83
3.41	9.15	261	151.51
3.41	9.22	311	389.46
3.4	9.62	272	514.05
3.37	10.34	310	493.79
3.36	10.23	275	740.69
3.34	7.96	296	291.34
3.34	10.02	307	258.58
3.3	11.76	328	292.38
3.16	8.99	258	633.65
3.13	8.99	268	497.22
3.1	9.99	300	194.45
3.06	9.22	274	305.74
3.05	10.86	288	835.15
3.01	9.78	318	323.99
3.01	12.34	315	191.82
2.97	11.18	338	167.62
2.95	9.19	321	172.82
2.88	8.59	308	227
2.88	10.23	275	116.15
2.85	8.21	278	176.72
2.84	8.78	263	231.04
2.83	9.76	352	238.75

2.58	7.87	259	338.45
2.56	8.61	278	324.86
2.53	9.71	309	87.62
2.48	7.66	254	93.28
2.47	9.18	273	224.02
2.47	8.57	267	342.39
2.45	6.62	257	265.78
2.43	7.55	260	447.16
2.43	8.15	277	148.62
2.41	7.86	294	150.37
2.39	7.85	268	199.6
2.38	10	292	173.12
2.37	9.29	286	259.12
2.35	8.56	302	112.66
2.35	8.34	271	405.51
2.34	8.49	265	146.97
2.33	8.62	289	273.43
2.31	7.04	254	180.97
2.29	7.68	280	122.13
2.28	7.15	273	124.19
2.27	6.26	272	239.37
2.27	8.27	252	231.49
2.27	9.38	266	287
2.25	11.27	284	202.14
2.24	8.03	290	54.35
2.24	6.37	250	206.87
2.23	10.02	307	143.21
2.22	8.99	258	162.38
2.22	9.03	289	172.95
2.2	8.31	281	260.81
2.18	6.85	256	204.7
2.17	7	260	183.84
2.14	11.37	297	136.75
2.14	9.11	291	108.96
2.12	7.63	296	392.71
2.12	6.54	282	130.36
2.12	7.57	268	130.65
2.12	9.55	282	216.42
2.09	6.83	243	121.16
2.07	8.78	293	168.69
2.06	8.47	286	157.41
2.06	7.74	335	38.64
2.05	7.88	277	123.28
2.05	8.07	298	140.47
2.03	6.35	170	18.35
2	7.78	308	222.83

Tabella 7: Altezze d'onda massime al culmine della mareggiata e direzioni medie di provenienza

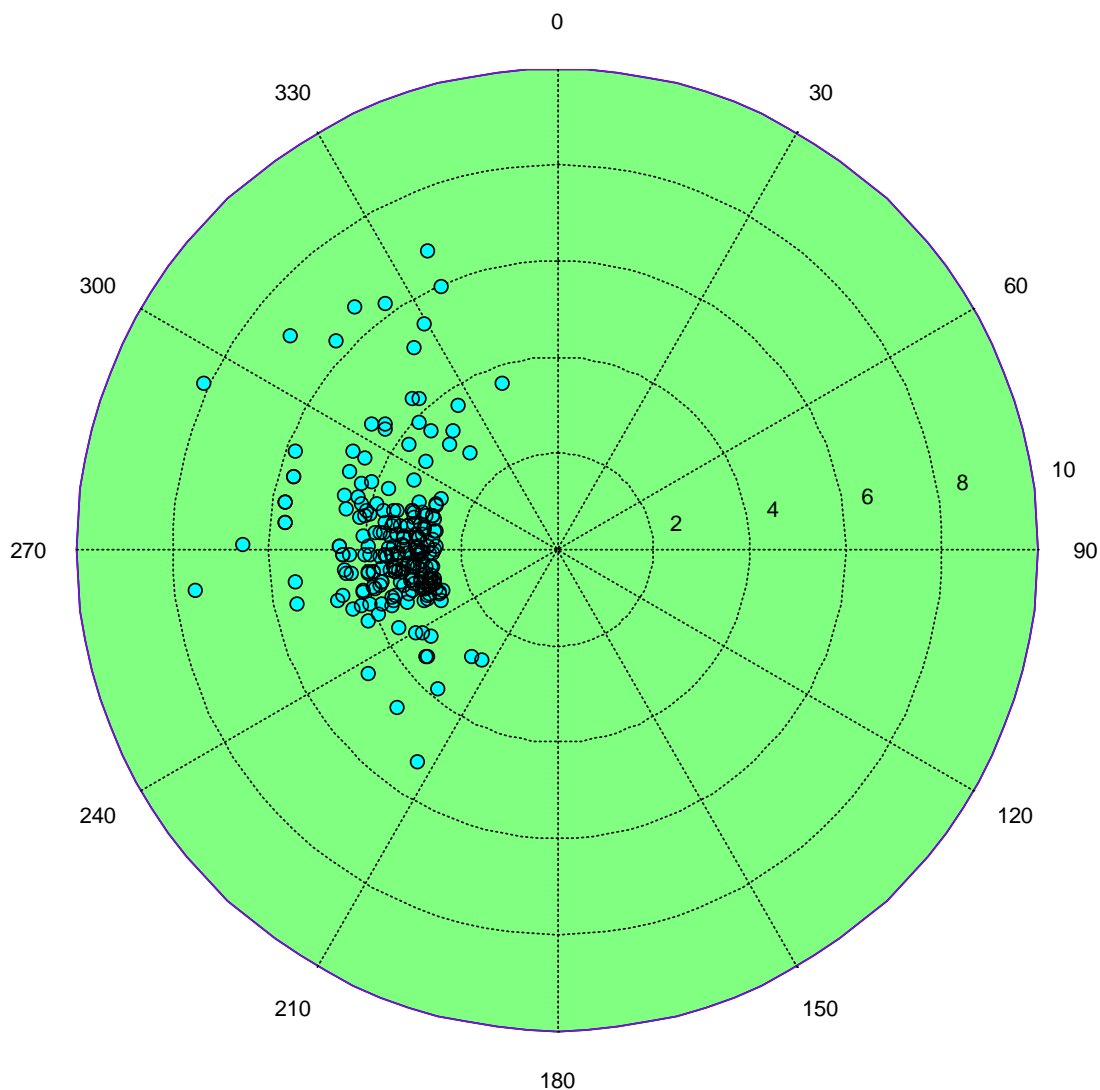


Figura 33: Diagramma polare delle altezze d'onda significative massime al culmine della mareggiata in funzione della direzione media di provenienza

Gli eventi estremi di moto ondoso da determinare attraverso un'analisi probabilistica a lungo termine sono stati scelti afferire ai settori direzionali 240°-270°N

Al fine di determinare le altezze d'onda significative a prefissato T , si fa riferimento al metodo di Goda (1988), basato sulle seguenti ipotesi:

- tutte le altezze d'onda significative del campione provengono da una singola popolazione statistica di eventi di mareggiate;

- le altezze d'onda di una mareggiata sono ragionevolmente rappresentate dall'altezza significativa;
- le altezze d'onda estreme facenti parte del campione non sono limitate da qualche fattore fisico, come ad esempio la profondità in acque intermedie o basse.

In particolare, Goda considera le seguenti funzioni di distribuzione a lungo termine:

- $F(H_s \leq \hat{H}_s) = e^{-e^{-\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)}}$ distribuzione di Fisher-Tippet I (FT-I o Gumbel)

- $F(H_s \leq \hat{H}_s) = 1 - e^{-e^{-\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)^k}}$ distribuzione di Weibull

dove:

$F(H_s \leq \hat{H}_s)$ è la probabilità che H_s non superi il valore di soglia di altezza significativa, \hat{H}_s (in questo caso posto uguale a 2.0 m);

B è il parametro del sito;

A è il parametro di scala;

k è il parametro di forma.

Il valore di k viene posto pari a 0.75, 1.00, 1.40 e 2.00. Al variare di tale coefficiente, si esaminano quindi 4 differenti distribuzioni a lungo termine di Weibull.

Il primo passo relativo all'applicazione della metodologia consiste nel prendere i valori di altezza d'onda significativa di input e posizzarli in ordine decrescente. Ad ogni valore di H_s viene assegnata una probabilità (plotting position) secondo le espressioni:

$$F(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0.44}{NT + 0.12} \quad (\text{secondo la Fisher-Tippet I})$$

$$F(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0.20 - \frac{0.27}{\sqrt{k}}}{NT + 0.20 + \frac{0.23}{\sqrt{k}}} \quad (\text{secondo la Weibull})$$

in cui:

$F(H_s \leq H_{sm})$ rappresenta la probabilità che l' m -esima altezza significativa non venga superata;

H_{sm} è l' m -esimo valore del campione delle altezze significative;

m (livello del valore dell'altezza significativa) = 1, 2, ..., N, in cui N rappresenta il numero totale delle mareggiate;

NT è il numero totale degli eventi durante la lunghezza della serie storica considerata.

I coefficienti ottimali della distribuzione Fisher-Tippet I (o di Gumbel) i coefficienti della plotting position sono stati ottenuti da Grigorten (1963), mentre quelli relativi alla distribuzione di Weibull sono stati ottenuti da Goda (1988).

Per tutte e 5 le distribuzioni (FT-I e Weibull con $k = 0.75, 1.00, 1.40$ e 2.00), sono stati considerati gli eventi a partire da un valore di soglia \hat{H}_s , fissato pari a 2.0 m. I parametri A e B vengono determinati verificando l'adattabilità ai dati delle 5 funzioni, attraverso un'analisi di regressione lineare effettuata con il metodo dei minimi quadrati. I calcoli sono basati sull'analisi di regressione lineare della relazione:

$$H_{sm} = \hat{A}y_m + \hat{B}$$

dove y_m (variabile ridotta) si calcola trasformando logicamente le espressioni delle probabilità di non superamento, $F(H_s \leq H_{sm})$, ottenendo per le due distribuzioni selezionate:

$$y_m = -\ln[-\ln F(H_s \leq H_{sm})] \quad (\text{secondo la Fisher-Tippet I})$$

$$y_m = \{-\ln[1 - F(H_s \leq H_{sm})]\}^{1/k} \quad (\text{secondo la Weibull})$$

I valori di \hat{A} e \hat{B} rappresentano, rispettivamente, i parametri di scala e di sito ricavati dall'analisi di regressione lineare.

Per la selezione della funzione di distribuzione che meglio si adatta al campione dei dati in esame, con riferimento alle mareggiate afferenti ai diversi settori angolari di provenienza del

moto ondoso al largo dei paraggi in esame, si considera quella che fornisce il alto valore del coefficiente di correlazione, R^2 . In Tabella 13 vengono mostrati, per il paraggio al largo di Amantea, i valori dei coefficienti di correlazioni per le distribuzioni di probabilità adottate, evidenziando quelle distribuzioni che forniscono il valore più elevato di R^2 .

Tali distribuzioni probabilistiche verranno considerate ai fini della determinazione delle altezze d’onda significative a prefissato tempo di ritorno.

Distribuzione	R^2
Gumbel	0.942
Weibull k = 0.75	0.973
Weibull k = 1	0.978
Weibull k = 1.4	0.938
Weibull k = 2	0.875

Tabella 8: Coefficienti di correlazione per le distribuzioni di probabilità adottate al largo di Amantea

Successivamente, i valori dell’altezza d’onda significativa per differenti periodi di ritorno sono calcolati, per le funzioni di probabilità considerate, mediante la seguente espressione:

$$H_{sr} = \hat{A}y_r + \hat{B}$$

dove:

$$y_r = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{\lambda T}\right)\right] \quad (\text{secondo la Fisher-Tippet I});$$

$$y_r = [\ln(\lambda T)]^{1/k} \quad (\text{secondo la Weibull});$$

H_{sr} rappresenta l’altezza d’onda significativa, associata ad un periodo di ritorno T ;

λ (numero medio degli eventi per anno) = NT / K ;

K (lunghezza della registrazione dei dati di moto ondoso).

Tenendo conto che la probabilità cumulata di non superamento è legata al tempo di ritorno dell’evento dalla relazione:

$$Tr(X \leq x) = \frac{I}{(1 - P(X \leq x))}$$

Per il settore compreso tra 90°÷165° N, le altezze d’onda significative, associate al tempo di ritorno (Tr) di 10, 50 e 100 anni, assumendo i valori relativi alla distribuzione di Gumbel, i valori di Hs sono rispettivamente 7.92 m, 9.56 m e 10.26, invece utilizzano la distribuzione Weibull 1.0, si ottengono di 8.35 m, di 10.31 m e di 11.16 m. Per la definizione del periodo associato all’altezza d’onda di progetto è uso corrente determinarlo per mezzo di formule del tipo $T = c H1/m$ (vedi le espressioni Bretschneider, Grancini ed altri); nel nostro caso si è utilizzato $T_m = 4.15\sqrt{H_s}$ ottenendo:

Distribuzione	Tempi di Ritorno		
	10 anni	50 anni	100 anni
Gumbel	11.68	12.83	13.29
Weibull	11.99	13.33	13.86

Tabella 9: Periodo medio associato all’altezza significativa, calcolata per le diverse distribuzioni statistiche

Per i periodi di ritorno più significativi, sono mostrati, rispettivamente, in Tabella 14 i valori di Hs a prefissato tempo di ritorno per le 2 distribuzioni probabiliste utilizzate. Gli stessi dati sono poi rappresentati in figura 34.

GUMBEL			WEIBULL (1.0)		
Tr	G(z)	Hs	Tr	G(H)	Hs
0.1	0.470339	2.877644	0.1	0.470339	2.718463
0.25	0.788136	4.050155	0.25	0.788136	3.838212
0.5	0.894068	4.817175	0.5	0.894068	4.685269
1	0.947034	5.550805	1	0.947034	5.532327
2	0.973517	6.269507	2	0.973517	6.379385
3	0.982345	6.686347	3	0.982345	6.874881

4	0.986758	6.981129	4	0.986758	7.226442
5	0.989407	7.209376	5	0.989407	7.499134
10	0.994703	7.916862	10	0.994703	8.346191
25	0.997881	8.850146	25	0.997881	9.46594
50	0.998941	9.555461	50	0.998941	10.313
100	0.99947	10.26051	100	0.99947	11.16006
250	0.999788	11.19233	250	0.999788	12.2798
500	0.999894	11.89716	500	0.999894	13.12686
1000	0.999947	12.60196	1000	0.999947	13.97392

Tabella 15: Eventi estremi direzionali a prefissato tempo di ritorno al largo del paraggio di Amantea

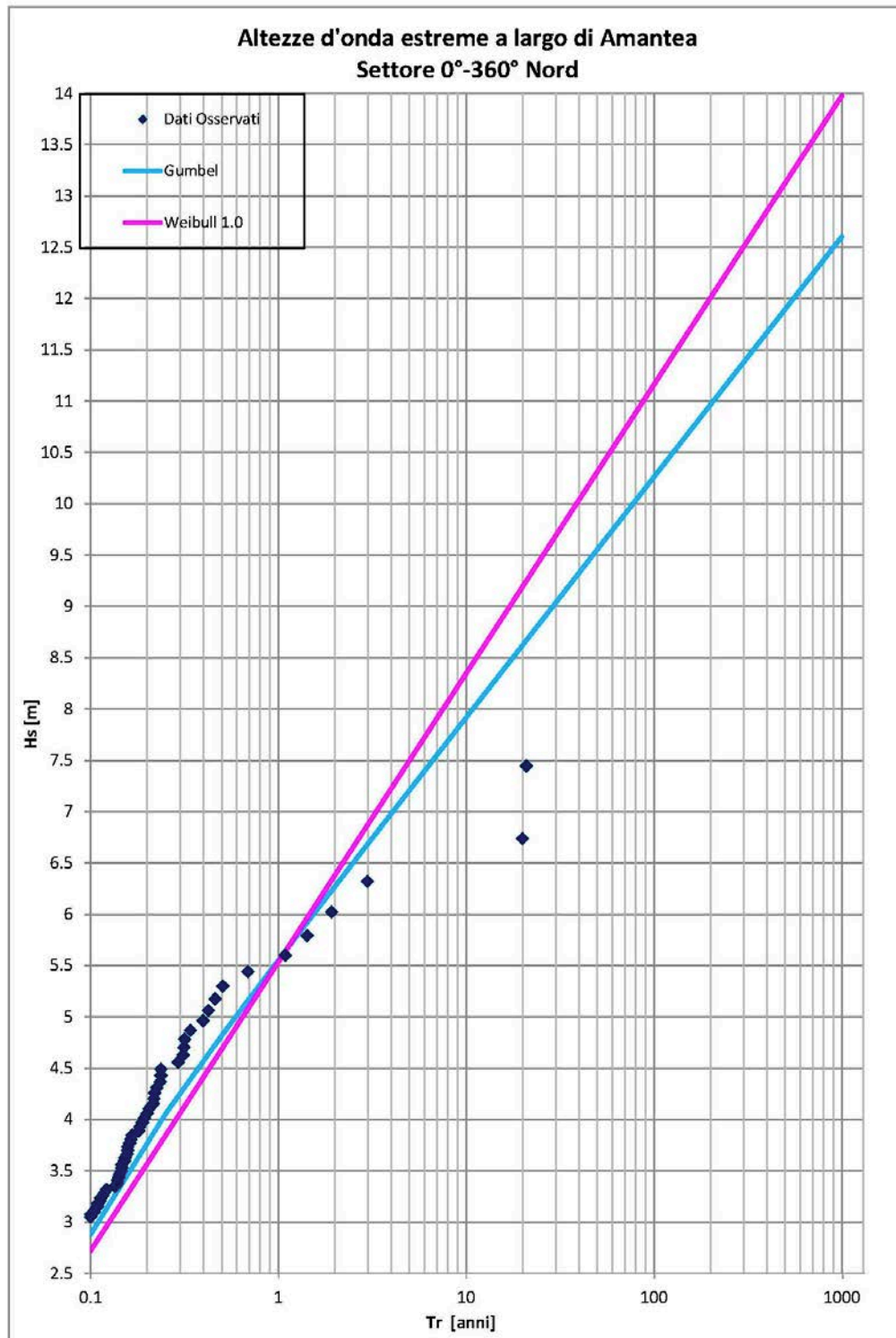


Figura 34: Variazione dell'altezza significativa, H_s (m), in funzione del periodo di ritorno per differenti settori direzionali al largo del paraggio di Amantea

I valori di altezza d'onda significativa presi in considerazione sono, come esposto in precedenza, quelli relativi alla distribuzione probabilistica che offre il maggior valore del grado di correlazione fra la variabile ridotta e l'altezza d'onda significativa al culmine della mareggiata

Clima meteomarino equivalente (onde di modellazione)

L'analisi dettagliata delle registrazioni ondamiche ed il trasferimento di queste sottocosta per il sito in esame, ha consentito di derivare utili indicazioni qualitative e quantitative sulle caratteristiche del clima di moto ondoso responsabile dei fenomeni evolutivi della fascia costiera del sito in esame.

Utilizzando la totalità delle misure di moto ondoso classificate in funzione della direzione di propagazione in settori di 10° si è calcolata, per ciascuna direzione di provenienza, un'onda avente un'altezza H_e ed un periodo T_e , con un contenuto energetico ($\cong H^2 \cdot T$) ed una ripidità ($\cong H/T^2$) rappresentative del contenuto energetico e della ripidità di tutte le onde provenienti dallo stesso settore.

Sotto queste ipotesi si può associare ad una particolare direzione di provenienza (assumendo la direzione media come rappresentativa del singolo settore di 10°) un singolo evento contraddistinto da un'onda H_e , T_e , definita nella letteratura specializzata come "onda di modellazione" o "onda morfologica", avente caratteristiche tali da indurre effetti sul litorale equivalenti a quelli indotti da tutte le onde provenienti da quella direzione in un anno statistico medio.

Derivando dalle serie di misure al largo e sottocosta dei paraggi di studio le coppie dei valori H_{si} e T_{pi} relative all'i-esimo tra gli N eventi di moto ondoso compresi in un dato settore di provenienza, l'onda di modellazione può essere determinata risolvendo il seguente sistema di due equazioni (Noli e Franco, 1989; De Girolamo e Di Risio, 2002):

$$\vec{F} = \left(\overrightarrow{H_e^2 \cdot T_e} \right) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overrightarrow{H_{si}^2 \cdot T_{pi}}$$

$$R = \frac{H_e}{T_e^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{H_{si}}{T_{pi}^2}$$

dove \vec{F} è la risultante del vettore del flusso di energia, ed R è la ripidità media delle onde. In particolare, sulla base delle due precedenti equazioni, l'onda di modellazione è definita da un'altezza e da un periodo forniti dalle seguenti espressioni:

$$H_e = \left(|F|^2 \cdot R \right)^{\frac{1}{5}} = \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{si}^2 \cdot T_{pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{H_{si}}{T_{pi}^2} \right]^{\frac{1}{5}}$$

$$T_e = \frac{|F|}{H_e^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{si}^2 \cdot T_{pi}}{\left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{si}^2 \cdot T_{pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{H_{si}}{T_{pi}^2} \right]^{\frac{2}{5}}}$$

dove il modulo del flusso energetico totale, $|F| = \sqrt{F_E^2 + F_N^2}$, essendo F_E e F_N , rispettivamente, le componenti del vettore del flusso energetico totale lungo la direzione O-E (Ovest-Est) e lungo la direzione S-N (Sud-Nord).

In particolare, i valori delle componenti F_E e F_N risultano:

$$F_E = F \sin(\alpha); \quad F_N = F \cos(\alpha)$$

essendo α la direzione di propagazione del singolo stato di mare registrato.

Per ciò che riguarda la direzione di provenienza dell'onda di modellazione annuale e direzionale, θ , pari a quella del vettore del flusso di energia, è stata applicata, con riferimento all'esposizione meteomarina verso Ovest del sito costiero in esame, la seguente relazione :

$$\theta = \arctan\left(\frac{F_E}{F_N}\right) + 180^\circ \quad \text{se } \theta > 0^\circ$$

$$\theta = 360^\circ + \arctan\left(\frac{F_E}{F_N}\right) \quad \text{se } \theta < 0^\circ$$

La durata delle onde di modellazione può essere calcolata facendo riferimento al numero di eventi N estratti dalla serie storica, tenendo conto che i dati ondametrici in esame sono a carattere triorario. Si evidenzia inoltre che nei calcoli delle onde di modellazione è possibile escludere gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda significativa, H_s , inferiore a 0.5 m, in quanto dal punto di vista energetico, e quindi della capacità di “modellare” le spiagge, si possono ritenere trascurabili.

Flusso energetico del moto ondoso al largo

L'energia totale, E , posseduta da un sistema di onde progressive può essere suddivisa in una componente di energia potenziale, E_p , e in una componente di energia cinetica, E_c . L'energia è generalmente espressa come media temporale per unità di superficie valutata su un'intera lunghezza d'onda. In base alla teoria di Stokes al 1° ordine, si ottiene che la densità media dell'energia totale del moto ondoso, espressa in N/m, è pari a:

$$E = E_p + E_c = \frac{1}{16} \gamma H^2 + \frac{1}{16} \gamma H^2 = \frac{1}{8} \gamma H^2$$

dove:

γ (peso specifico dell'acqua salata) $\approx 10104 \text{ N/m}^3$;

H è l'altezza d'onda.

Si definisce flusso di energia, P , espresso in W/m, di un'onda progressiva per unità di lunghezza di fronte d'onda, il prodotto dell'energia totale, E , per la celerità di gruppo dell'onda:

$$P = E c_g = E n c$$

essendo:

c_g la celerità di gruppo;

$$n \text{ (funzione di dispersione)} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right);$$

k (numero d'onda) = $2\pi/L$;

d (profondità del fondale marino);

c (celerità di propagazione del moto ondoso) = L/T .

La direzione del vettore flusso di energia coincide con la direzione del treno d'onda considerato. A titolo esemplificativo, sono mostrati in Figura 35 i risultati relativi alla distribuzione spaziale del flusso di energia ondosa, P , per il paraggio di Amantea, considerando gli attacchi ondosi estremi per $T = 50$ anniprovenienti dai settori direzionali principali selezionati nell'analisi degli eventi estremi. Il flusso di energia risulta funzione del valore di altezza d'onda significativa, H_s , ottenuta attraverso le simulazioni numeriche effettuate con il modello SWAN. Dall'osservazione dei grafici del flusso di energia si evince che i maggiori valori di P risultano, per i paraggi in esame, al largo ed in corrispondenza di anomalie batimetriche. La concentrazione del flusso energetico ondoso è legato all'avvicinamento dei raggi d'onda fra loro contigui.

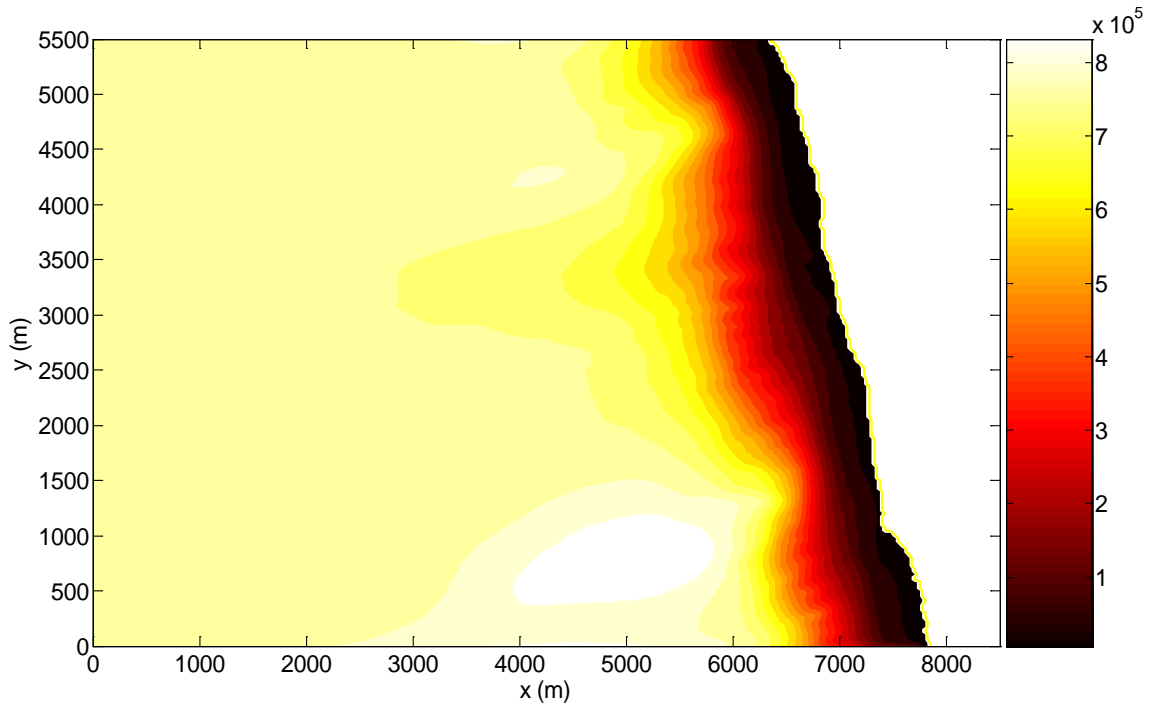


Figura 35: Distribuzione spaziale bidimensionale del flusso di energia ondosa, P (W/m)

Spesso, nella caratterizzazione del clima meteomarinico al largo di un paraggio, si ricorre al concetto di flusso di energia introdotto in precedenza. Pertanto, a partire dalla determinazione dei dati ondometrici al largo del paraggio di Amantea, è possibile calcolare il flusso energetico ondoso, P, per unità di lunghezza di fronte d'onda. Per ogni settore angolare di provenienza del moto ondoso, viene determinato il valore medio annuo del flusso d'energia ondosa, P_{mj} , degli stati di mare ricadenti nel settore di traversia del paraggio in esame, attraverso l'espressione:

$$P_{mj} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{N}$$

dove:

P_i è il flusso di energia del singolo stato di mare ricostruito;

n è il numero di eventi totali ricostruiti per la singola classe di direzione e provenienza delle onde;

N (numero di anni di ricostruzione del moto ondoso) = 8 anni.

In Tabella 16 e nei diagrammi polari mostrati in Figura 36 sono illustrati i risultati relativi al flusso di energia medio annuo al largo del paraggio di Amantea.

FLUSSO DI ENERGIA MEDIO ANNUO (W/m)											
DIR	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)										TOT.
(°N)	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	> 5.0	TOT.
10											
20											
30											
40											
50											
60											
70											
80	2.328	1.252									3.5804
90	1.778				7.261						9.0386
100	3.042			3.443							6.4847
110	1.965	2.128	4.732		5.583						14.409
120	11.27	7.248	4.169	10.02	6.61				30.32		69.629
130	13.96	17.24	8.625	3.568	18.37	7.023					68.778
140	7.223	7.336	9.94	3.017	19.64	6.447					53.605
150	7.011	9.74		3.18	10.3				20.27		50.501
160	9.352	3.443	4.169	4.757	8.813						30.533
170	4.707	3.355	2.041	2.391							12.494
180	4.331	0.864	1.84	9.427		9.189	14.16				39.81
190	13.86	10.65	12.89	3.53	5.195	15.07					61.204
200	23.81	13.58	4.745	8.05							50.188
210	23.3	9.064	8.325	9.427	5.27						55.383
220	22.28	9.827	27.03	13.23		7.361					79.732
230	18.75	20.39	16.42	25.8	5.596						86.968
240	29.96	30.16	62.71	25.86	20.46						169.14
250	88.37	131.4	149	100.4	38.78	44.78					552.73
260	255.6	347.9	326.1	231.7	154.1	176.9	55.6	46.14		29.04	1623.1
270	289.7	442.3	426.6	254.5	128.3	114.6	83.4	15.4		123.3	1878.2
280	223.3	332.2	271.2	149	126.1	106.3	117.3	14.06		77.39	1416.9
290	170	188.2	211.8	164.9	96.58	50.18	79.59	52.2	48.44	121.1	1182.9
300	64.73	72.03	65.94	42.45	35.65	25.71	40.92		85.57	99.36	532.37
310	43.62	46.93	39.8	19.83	84.41	65.11	41.73	19.79	61.62	29.33	452.17
320	37.07	23.08	11.44		56.08	99.81	56.4	55.43	29.77	68.34	437.43
330	47.3	23.51	27.25	14.15		49.55	15.55	20.02		279.9	477.2
340	23.11	32.49	17.3	28.84	8.738	20.37	16.94		21.11	124.6	293.53
350	18.75	19.24	24.19	4.131	33.83		16.24	37.83	22.41	60.33	236.94
360	3.555	0.839	2.429						23		29.82
TOT.	1464	1806	1741	1136	875.7	798.4	537.8	260.9	342.5	1013	9974.8

Tabella 106: Flusso d'energia ondosa medio annuo al largo del paraggio di Amantea

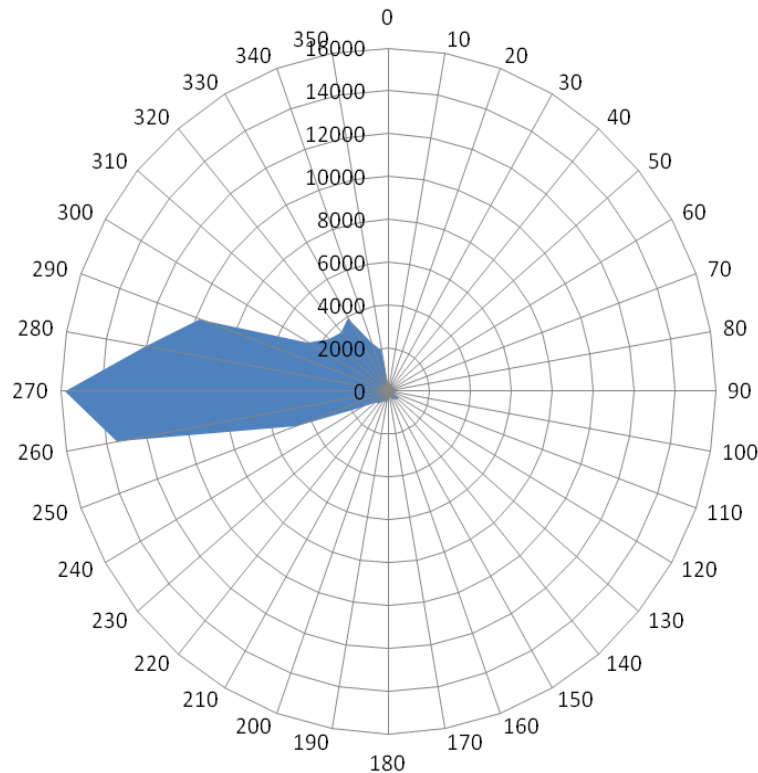


Figura 36: Diagramma polare del flusso di energia ondosa medio annuo, Pm (W/m), al largo di Amantea

Onde a Largo	
Altezza d'onda equiv. (m)	1.323
Direz. risul. energetica (°N)	280
Durata Hs > 0.5 m (mesi)	5.246

Tabella 17: Onda di modellazione al largo annuale per il paraggio di Amantea

Flusso energetico del moto ondoso sottocosta

La direzione risultante del flusso energetico del moto ondoso sottocosta lungo un litorale è utile per le considerazioni sul regime della dinamica litoranea. Infatti, la componente longitudinale del trasporto solido può essere correlata alla componente longitudinale del flusso di energia del moto ondoso al frangimento. Poiché il coefficiente di correlazione tra le due quantità risulta essere funzione di alcuni parametri che possono essere individuati solo sulla base della

conoscenza storica dell’evoluzione planimetrica del litorale e delle caratteristiche dei sedimenti effettivamente presenti, quando ci si riferisce al solo flusso di energia del moto ondoso frangente, cioè in assenza degli elementi che consentono di calibrare la dipendenza funzionale tra le due quantità, si è soliti fare riferimento al trasporto solido potenziale.

In pratica, la conoscenza della componente longitudinale del flusso di energia del moto ondoso frangente implica la conoscenza del “motore” dei sedimenti (trasporto potenziale); l’effettivo trasporto solido ovviamente dipende sia dalla disponibilità dei sedimenti sia dalle caratteristiche che ne determinano la mobilità. Pertanto la conoscenza di una adeguata serie storica relativa alla componente longitudinale del flusso di energia delle onde al frangimento (trasporto potenziale) consente di determinare in modo accurato il verso del trasporto solido medio annuo, mentre fornisce solo una stima della sua effettiva quantità. Tuttavia tale stima risulta di fondamentale importanza in quanto consente di eseguire numerose considerazioni di interesse applicativo e gestionale.

A tal fine risulta preliminarmente necessario ricostruire il clima ondoso poco oltre la linea di frangenti lungo una serie di punti considerati rappresentativi del litorale in esame.

Per ciascun punto è così possibile determinare, per ogni stato di mare ricostruito, il flusso di energia P del moto ondoso per unità di fronte d’onda. Successivamente, per ogni direzione di provenienza, è possibile determinare il valore medio del flusso energetico del moto ondoso, P_{mj} , degli stati di mare ricadenti nel settore di traversia.

Nel calcolo, in genere, si escludono gli eventi caratterizzati da un’altezza significativa inferiore ai 50 cm, in quanto dal punto di vista energetico e quindi della capacità di modellazione delle spiagge si possono ritenere trascurabili. In Tabella 18 sono mostrati i valori del flusso energetico medio annuo per il punto di riferimento sottocosta per il tratto litoraneo di Amantea in esame. In Figura 37 sono mostrati i diagrammi polari del flusso energetico medio annuo sottocosta per Amantea.

FLUSSO DI ENERGIA MEDIO ANNUO (W/m)											
DIR	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA H_s (m)										TOT.
(°N)	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	> 5.0	
10											
20											
30											

REGIONE CALABRIA
 COMUNE DI AMANTEA (CS)
 "MIGLIORAMENTO INFRASTRUTTURALE DEL PORTO TURISTICO DI AMANTEA"

R08 – STUDIO METEOMARINO

40											
50											
60											
70											
80											
90											
100											
110											
120											
130											
140											
150											
160											
170	1.772	0.727									2.499
180	14.98	6.519	5.421								26.921
190	12.59	6.519	5.686								24.792
200	23.14	10.95	11.29	6.294	5.117						56.79
210	35.71	13.09	11.27	6.135	16.66						82.864
220	23.36	16.38	19.98	10.45							70.171
230	22.09	13.61	28.3	6.214	6.677						76.887
240	34.91	48.82	61.3	29.68	21.51						196.22
250	111	172.3	186.5	103.7	62.92	23.79					660.25
260	328.3	463	403.3	277.1	230	201.3	72.42		57.73	89.14	2122.3
270	338.2	483.6	449.1	266.5	140	192.3	68.85		69.88	108.3	2116.6
280	270.7	340.2	272.1	201.5	87.72	108.8	45.09	128.2		122	1576.4
290	137	123.5	79.29	153	107.2	52.32	123.7			38.3	814.37
300	45.47	44.47	48.22	57.9	70.71	18.27					285.05
310	30.21	38.48	17.74	20.14	7.087						113.66
320	14.17	16.47	5.448								36.097
330	4.469	2.631									7.1004
340	0.291										0.2909
350											
360											
TOT.	1448	1801	1605	1139	755.6	596.8	310	128.2	127.6	357.7	8269.3

Tabella 11: Flusso d'energia ondosa medio annuo sottocosta per il paraggio di Amantea

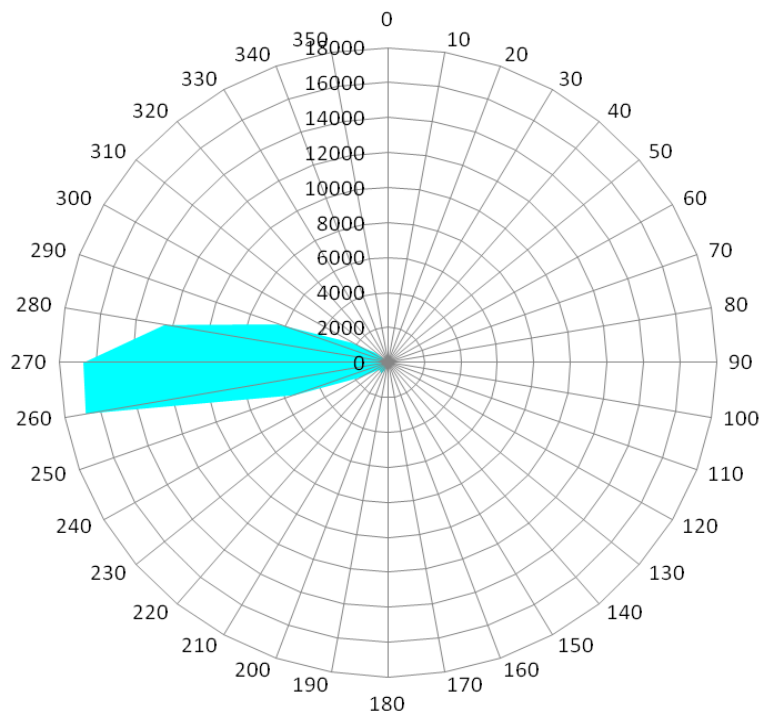


Figura 37: Flusso d’energia medio annuale sottocosta per il paraggio di Amantea

Onde a Largo	
Altezza d’onda equiv. (m)	1.3
Direz. risul. energetica (°N)	268.7
Durata Hs > 0.5 m (mesi)	4.967

Tabella 19: Onda di modellazione annuale nel sottocosta per il paraggio di Amantea

Determinazione dell'onda di progetto

In ogni opera marittima si deve valutare la durata di vita presunta, in relazione al progetto in cui è inserita, tenuto conto delle sue caratteristiche funzionali.

Si valuta inoltre, il livello di rischio o probabilità di superamento dell'onda di progetto, tenuto conto dei danni che tali onde possono arrecare all'opera e della possibilità di ripristinare la normale funzionalità con operazioni di manutenzione.

Nelle Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe frangiflutti edite dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (1996) si consigliano i valori riportati nella Tabella 20 20.

Tipo dell'opera	Livello di sicurezza richiesto		
	1	2	3
	Vita di progetto (anni)		
Infrastrutture di uso generale	25	50	100
Infrastrutture ad uso specifico	15	25	50

Tabella 20- Durata minima di vita per opere o strutture di carattere definitivo T_v

Per infrastrutture di uso generale si intendono opere di difesa di complessi civili o industriali, che non siano destinati ad uno specifico scopo e per i quali non è chiaramente identificabile il termine della vita funzionale dell'opera. Per infrastrutture ad uso specifico si intendono le opere di difesa di singole installazioni industriali, di porti industriali, di depositi o piattaforme di carico e scarico, di piattaforme petrolifere, ecc.

Il livello di sicurezza 1 si riferisce ad opere o installazioni di interesse locale ed ausiliario, comportanti un rischio minimo di perdita di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso della stessa (difese costiere, opere in porti minori o marina, scarichi a mare, strade litoranee ecc.).

Il livello di sicurezza 2 si riferisce ad opere e installazioni di interesse generale, comportanti un moderato rischio di perdita di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso dell'opera (opere di grandi porti, scarichi a mare di grandi città, ecc.).

Il livello di sicurezza 3 si riferisce ad opere o installazioni per la protezione dall'inondazione o di interesse sopranazionale, comportanti un elevato rischio di perdita di vite umane o di danno ambientale in caso di collasso della stessa (difese di centri urbani o industriali, ecc.).

Nel caso di Amantea le opere di difesa progettate devono essere considerate come infrastrutture civili di uso generale con un livello di sicurezza pari ad 1 associato ad un tempo di vita dell'opera pari a 25 anni.

Danneggiamento incipiente		
Ripercussione economica	Rischio per la vita umana	
	Limitato	Elevato
Bassa	0.50	0.30
Media	0.30	0.20
Alta	0.25	0.15

Distruzione totale		
Ripercussione economica	Rischio per la vita umana	
	Limitato	Elevato
Bassa	0.20	0.15
Media	0.15	0.10
Alta	0.10	0.05

Tabella 21: Massima probabilità (P_f) di danneggiamento ammissibile nel periodo di vita operativa dell'opera

Per quanto riguarda la probabilità di occorrenza dell'onda di progetto, si assumeranno le probabilità corrispondenti al danneggiamento incipiente od alla distruzione totale in relazione alle deformazioni-modificazioni subite dall'opera in caso di danneggiamento ed alla difficoltà di riparare il danno subito.

Nel caso in esame, per strutture flessibili, o comunque per opere riparabili (ad es. scogliere), si assume la probabilità corrispondente al danneggiamento incipiente inteso come il livello di danneggiamento predefinito in relazione al tipo di struttura, al di sopra del quale il danno è apprezzabile e risulta necessario intervenire con lavori di manutenzione.

Per queste opere si deve comunque verificare anche lo scenario di rovina totale, cioè del superamento di un livello di danneggiamento predefinito in relazione al tipo di struttura, al di sopra del quale l'opera cessa di svolgere un'apprezzabile funzione protettiva.

Per rischio limitato per la vita umana si intendono i casi in cui a seguito del danneggiamento non è prevista alcuna perdita di vite umane. Quando queste perdite sono preventivabili, il rischio è elevato.

Per ripercussione economica bassa, media ed alta si intendono casi in cui il rapporto fra i costi diretti del danneggiamento, sommati a quelli indiretti dovuti alla perdita di funzionalità delle opere protette ed, il costo totale per la realizzazione dell'opera è minore di 5, è compreso fra 5 e 20 o è maggiore di 20. La combinazione dei tempo di vita dell'opera T_v e della probabilità di danneggiamento P_f , determina il tempo di ritorno dell'evento di progetto T_{rp} :

$$T_{rp} = -\frac{T_v}{\ln(1 - P_f)}$$

Nel caso in esame si può considerare un rischio limitato di perdita di vita umana ed una ripercussione economica medio-bassa. Assumendo il criterio del danno incipiente si impone $P_f = 0,4$ e quindi $T_{rp} = 25/[-\ln(0.6)] = 50$ anni.

In relazione a questo tempo di ritorno, dalla statistica degli eventi estremi, si può desumere che:

- l'altezza d'onda significativa di progetto è pari a 9.56 m con periodo di 12,83 s al largo con la direzione di provenienza del moto ondoso compresa tra 225° e 315° N;

L'onda significativa così valutata ha approssimativamente la probabilità P_f (detta anche probabilità di incontro) di essere superata nell'arco di vita dell'opera.

Profondità di chiusura di spiaggia

La profondità di chiusura di una spiaggia risulta la massima profondità del fondale in cui un'onda fa sentire i suoi effetti ai fini del trasporto solido litoraneo.

Il calcolo del suo valore può avvenire tramite la comparazione dei rilievi batimetrici delle medesime sezioni effettuate in anni diversi. In mancanza di queste informazioni, come nel caso dei paraggi in esame, si può usare una delle relazioni semiempiriche riconosciute in letteratura. In particolare, per il paraggio di Amantea si è fatto riferimento alla relazione di Hellermeier, secondo cui:

$$h_c = 1.6H_{0,12}$$

dove:

h_c è la profondità di chiusura;

$H_{0,12}$ è l'altezza d'onda a largo che compare per 12 ore l'anno, nel settore di traversia considerato per il paraggio oggetto di studio.

Il valore di $H_{0,12}$ si ricava dall'analisi statistica effettuata sui dati d'onda disponibili, calcolando preliminarmente la percentuale di apparizione delle onde relative a tutti gli eventi registrati, n , pari a:

$$n = \frac{NT}{n_{H\alpha}}$$

dove NT (numero totale di stati di mare individuati al largo del paraggio di Amantea, esclusi gli eventi di calma), ed $n_{H\alpha}$ rappresenta il numero di apparizioni che compete all'onda di altezza H_s e direzione α negli 8 anni di osservazione derivanti dalle registrazioni della boa di Cetraro.

Noto il valore di n , si ricava il tempo $t_{H\alpha}$:

$$t_{H\alpha} = n_{oreanno} \cdot n$$

essendo $n_{oreanno}$ (numero di ore in un anno) = 8760 ore.

Quindi, si contano tutte le classi d'altezza d'onda significativa determinate al largo di Amantea, prescindendo dalla direzione e si sommano per tutte le direzioni considerate, determinando il tempo di apparizione totale della singola onda per tutto il settore di traversia, t_H :

$$t_H = \sum_{\alpha=\alpha_1}^{\alpha_2} t_{H\alpha}$$

dove α_1 e α_2 sono le direzioni estreme del settore di traversia.

Noto il valore di t_H è possibile ricavare una relazione fra H e t_H costruendo una curva che restituisce i tempi di apparizione di ogni singola onda.

Il valore di $H_{0,12}$ è immediatamente determinato intersecando la curva di apparizione con la retta parallela all'asse delle ascisse e passante per il punto di ordinata $t = 12$ h.

In Figura 38 è mostrata la curva di apparizione delle onde per il paraggio di Amantea

Dall'intersezione fra la curva di apparizione e la retta, si ricava $H_{0,12} = 4.32$ m (vedi Figura 39) e si determina, attraverso la succitata relazione di Hallermeier, il corrispondente valore della profondità di chiusura, $h_c = 6.91$ m.

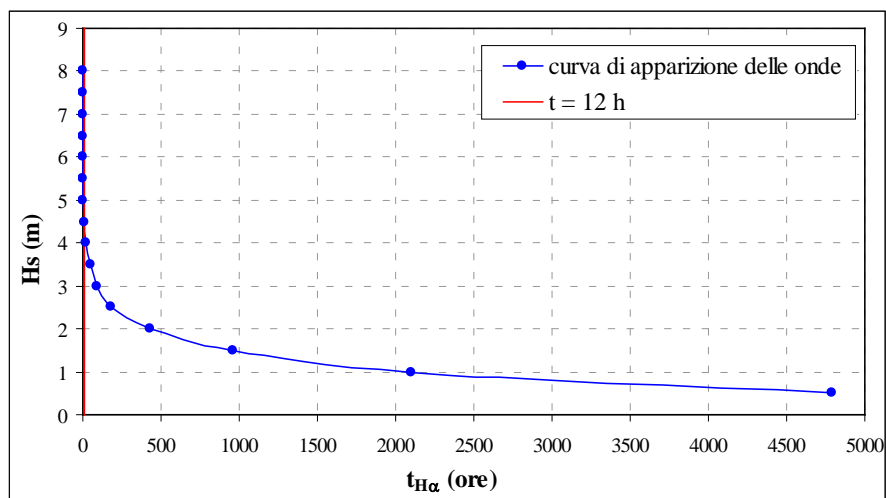


Figura 38: Curva di apparizione delle onde (paraggio di Amantea)

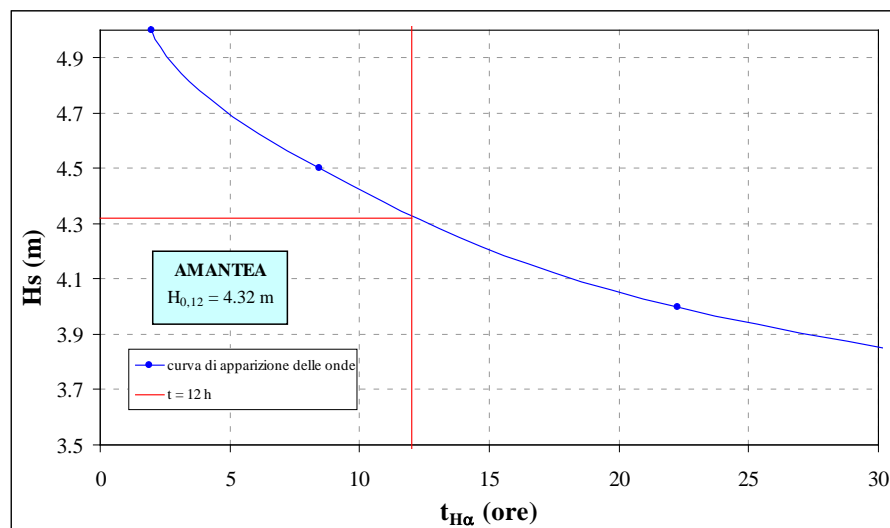


Figura 39: Particolare della curva di apparizione delle onde (paraggio di Amantea)

Analisi dei livelli

La conoscenza delle massime variazioni quasi statiche del livello marino, dovute a cause diverse (principalmente marea astronomica e meteorologica), è necessaria per molteplici scopi, quali la corretta progettazione delle quote da assegnare ad eventuali opere di difesa e la determinazione dell'altezza limite di swash (quota della spiaggia emersa raggiunta dal mare).

In generale per quanto riguarda le variazioni a breve termine, periodiche e non, occorre distinguere gli effetti della marea astronomica da quelli della marea “meteorologica” (indotta essenzialmente dall’azione del vento e dalle variazioni di pressione atmosferica). Nella zona del Mar Tirreno ove ricade il paraggio costiero in esame le escursioni del livello del mare sono di fatto modeste. Per la stima della componente oscillatoria della marea astronomica è possibile ricorrere all’analisi dei livelli basata sulla serie mareografiche.

Nel calcolo del sovrizzo indotto dagli eventi meteorologici è necessario considerare i contributi dovuti all’azione del moto ondoso (wave setup), all’azione del vento (wind setup) e all’effetto barico inverso.

Una prima causa è quindi il sovrizzo indotto dal frangimento del moto ondoso. Tale fenomeno è dovuto alla trasformazione di energia cinetica in potenziale, necessaria per alimentare le correnti di ritorno. Dopo un primo abbassamento nella zona dei frangenti, il livello medio aumenta avvicinandosi alla linea di battigia, ove si ha un massimo pari a circa ad un sesto dell’altezza d’onda frangente. Il sovrizzo di vento si genera quando il vento comincia a spirare sulla superficie del mare, cosicché la sua azione tangenziale tende in primo luogo a spingere la massa d’acqua verso la costa, accelerandola. Le variazioni di livello marino determinate da un aumento o da una diminuzione della pressione atmosferica sono indicate come effetto barometrico inverso, poiché ad un aumento di pressione dell’area corrisponde un abbassamento dell’acqua sottostante e viceversa.

Per quanto riguarda l’azione del moto ondoso è possibile calcolare il sovrizzo (wave setup), S_w , ad esso dovuto, ricorrendo alla seguente formulazione:

$$S_w = 0.15d_b - \frac{0.536\sqrt{H_b^3}}{T\sqrt{g}} = 0.59 \text{ m}$$

dove:

d_b e H_b rappresentano il valore della profondità e di altezza d’onda in condizioni di frangimento, pari, rispettivamente, a 4.66 m e 3.63 m (dalla propagazione al frangimento effettuata con il modello numerico SWAN dell’evento estremo più elevato

T (periodo medio dell’onda) = 11.25 s;

g (accelerazione di gravità) = 9.81 m/s^2 .

In questo caso, al fine di determinare il valore del massimo livello d'acqua sulla spiaggia emersa, si considerano i valori di d_b e H_b riferiti ad un'onda di progetto avente $T = 50$ anni, calcolata in base all'analisi degli eventi estremi. Il periodo T risulta quello medio (T_m), legato al valore di H_s per $T = 50$ anni.

Viene successivamente preso in considerazione il sovrizzo dovuto all'azione del vento (storm surge o wind setup), S_v , calcolabile attraverso la seguente relazione implicita, risolta per successive iterazioni:

$$S_v = \left[\frac{kU^2 x_p}{g(D_p - d - S_v)} \right] \ln \left(\frac{D_p}{d + S_v} \right) = 0.057 \text{ m}$$

essendo:

U (velocità, costante, del vento foraneo di tempesta di lunga durata diretto verso la costa) $\approx 100 \text{ km} = 27.78 \text{ m/s}$;

D_p è la profondità della piattaforma continentale, pari a 200 m ;

x_p è l'estensione della piattaforma continentale, che risulta pari alla distanza nella direzione del vento fra la profondità D_p e la profondità d , dove si calcola il sopralzo (in questo caso, si pone $d = 0$ sulla linea di riva, ove viene calcolato il sopralzo di vento); per la conformazione batimetria al largo di Amantea, il valore di $x_p = 5892 \text{ m}$;

k (coefficiente empirico) = $3 \cdot 10^{-6}$.

La limitata estensione della piattaforma continentale fa sì che il sovrizzo di vento sia un termine pressoché trascurabile per il paragone in esame ai fini del calcolo del sovrizzo totale.

Infine, per quanto riguarda la componente dovuta all'effetto barico inverso, si può considerare una condizione di minimo barico (legata al passaggio dei centri di bassa pressione caratterizzanti i cicloni) nell'area in esame pari a 975 mb rispetto ad una condizione media di 1013 mb , essendo $1 \text{ mb (millibar)} = 1 \text{ cm}$. Ne consegue (da un punto di vista prettamente statico) un effetto di sovrizzo marino massimo pari a 0.38 m , calcolabile come differenza fra la condizione media di pressione e quella legata alla condizione di minimo barico.

Per ciò concerne la determinazione dei massimi livelli di marea astronomica, sono stati analizzati i dati mareali acquisiti dal mareografo di Ginostra (Stromboli) facente parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN). I dati mareometrici sono scaricabili, previa registrazione, presso il sito www.idromare.it.

Le registrazioni orarie analizzate, per una durata complessiva di più di 2 anni (2011-2013), sono sufficienti per uno studio mareografico della zona in esame. In Figura 41 è illustrato l'andamento temporale dei massimi livelli mareali registrati, che vengono presi per l'analisi del massimo valore del livello mareale astronomico da adottare.

L'analisi per la determinazione del massimo livello mareale è orientata all'analisi dell'evento estremo mareale legato ad un tempo di ritorno, $T = 50$ anni. Si effettua pertanto, sulla falsariga della procedura di calcolo per gli eventi estremi ondosi, un'analisi statistica delle maree a lungo termine. Gli eventi mareali significativi sono stati esaminati scegliendo una soglia di livello mareale pari a 0.05 m.

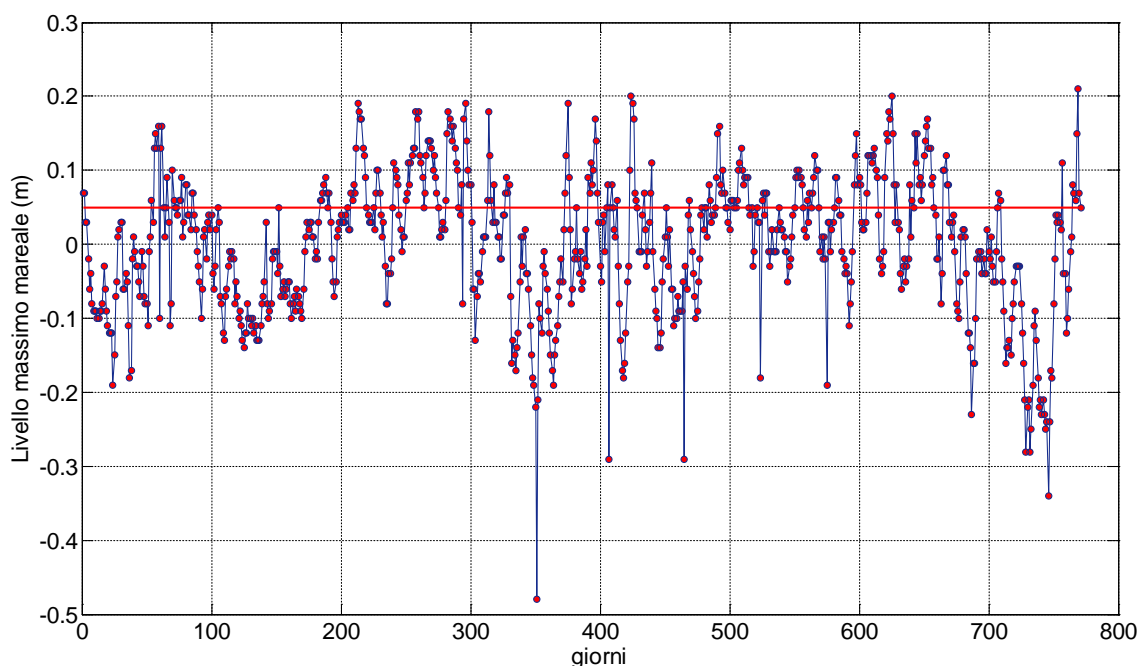


Figura 41: Andamento temporale dei massimi livelli mareali registrati dal mareografo di Palinuro

Successivamente, sono state adottate le distribuzioni probabilistiche di Gumbel e di Weibull con k variabile. La distribuzione probabilistica utilizzata per il calcolo del livello di mare

astronomica di progetto risulta quella di Weibull con $k = 1.4$. Tale distribuzione presenta il coefficiente di correlazione più alto fra i valori dei livelli mareali sopra soglia e la variabile ridotta della distribuzione, dipendente dalla probabilità di non superamento.

Distribuzione	R ²
Gumbel	0.955
Weibull k = 0.75	0.823
Weibull k = 1	0.925
Weibull k = 1.4	0.972
Weibull k = 2	0.967

Tabella 22: Coefficienti di correlazione per le distribuzioni di probabilità adottate per la marea astronomica di progetto

Tr (anni)	Altezza mareale (m)
1	0.217
5	0.258
10	0.274
20	0.290
50	0.310

Tabella 23: Eventi estremi a prefissato tempo di ritorno

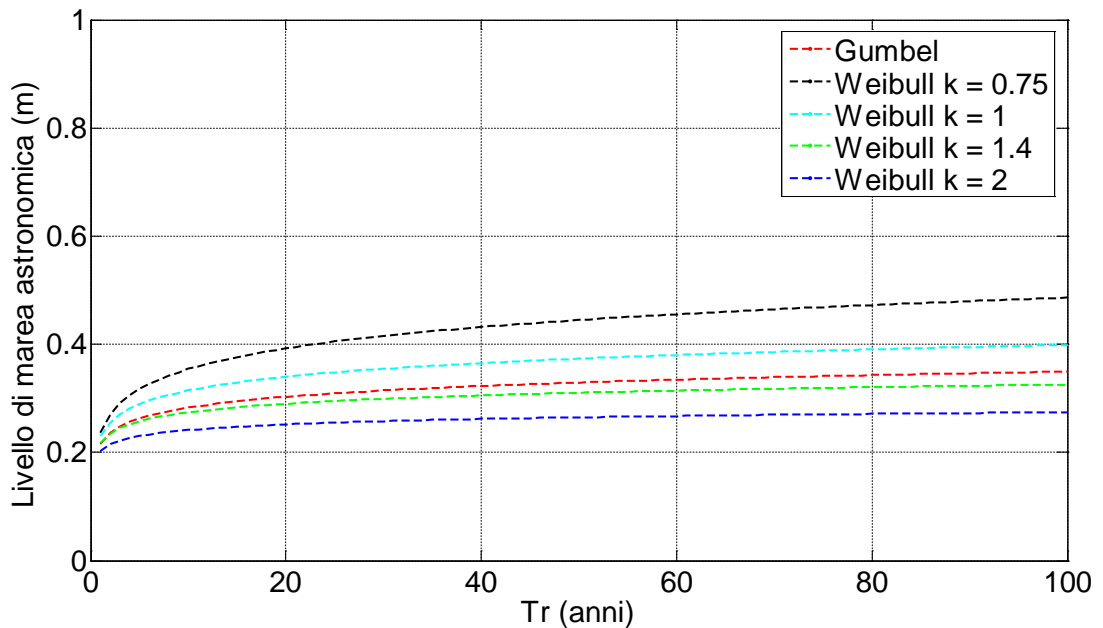


Figura 42: Andamento temporale del livello di marea astronomica in funzione del tempo di ritorno

Determinati i valori dei massimi livelli di marea meteorologica e astronomica, è possibile calcolare il sovrizzo di tempesta, inteso come somma di tutti i succitati contributi: sovrizzo d'onda e di vento, effetto barico inverso e marea astronomica, ottenendo un valore complessivo pari a 1.34 m.

Risalita del moto ondoso sulla spiaggia

Il run up (risalita sulla spiaggia del moto ondoso) è definito come la quota più alta raggiunta dall'acqua su una spiaggia nel corso di una mareggiata. In generale, a parità di altezza d'onda al frangimento, il run up è tanto maggiore quanti maggiori sono la lunghezza d'onda e la pendenza della spiaggia emersa. Convenzionalmente, si intende run up di uno stato di mare la quota di spiaggia che viene superata in media da 2 onde su 100, essendo definito come $R_{u2\%}$. La valutazione del run up risulta utile ai fini della progettazione di opere di marittime che si trovano sulla spiaggia emersa come pennelli radicati a terra, in cui si vuole determinare la posizione di radicamento a terra di tale struttura.

Con riferimento ad un assegnato stato di mare, viene determinato il massimo valore del run up, $R_{u2\%}$, utilizzando la relazione empirica proposta da Waal e Van Deer Meer (1992):

$$R_{u2\%} = 1.5H_{sb}\xi\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta \quad \text{se } \xi < 2$$

$$R_{u2\%} = 3H_{sb}\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta \quad \text{se } \xi \geq 2$$

Nella relazione di Waal e Van Deer Meer, il run up dipende da:

H_{sb} (altezza d'onda significativa al frangimento riferita ad un tempo di ritorno di progetto, $T = 50$ anni) = 3.63 m;

ξ (numero di Irribarren o parametro di frangimento), risulta pari a:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_{sb}}{L_{p0}}}} = 0.456$$

essendo:

$\tan(\alpha)$ (pendenza media della spiaggia sottocosta) = 0.039 = 3.9 %;

L_{p0} (lunghezza di picco in acque profonde) = $1.56 \cdot T_{p0}^2 = 502.1$ m, essendo T_{p0} (periodo di picco dell'evento estremo di moto per $T = 50$ anni) = 17.94 s;

Nelle formule per il calcolo del run up, i valori di γ rappresentano dei fattori di riduzione che tiene conto di diversi fattori. In particolare (Waal e Van Deer Meer, 1992):

γ_r (coefficiente di riduzione dipendente dalla scabrezza) = 1 (per spiaggia sabbiosa);

γ_b (coefficiente di riduzione dipendente dalla presenza di strutture a berma) = 1 (in assenza di strutture a berma);

γ_h (fattore di riduzione che tiene conto dell'influenza del moto ondoso in acque basse) = 1 (poiché le altezze d'onda seguono sostanzialmente la distribuzione di Rayleigh sia in acque profonde che in acque basse);

γ_β (fattore di riduzione che tiene conto della direzione d'incidenza del moto ondoso rispetto alla struttura) = 0.8 (poiché la direzione dell'onda di progetto con $T = 50$ anni risulta avere un angolo d'incidenza rispetto alla normale al litorale di circa 7.1°).

Poiché $\xi < 2$, si adotta la prima formulazione di Waal e Van Deer Meer per il calcolo del massimo run up indotto da un evento ondoso estremo, $R_{u2\%} = 1.99$ m.

Per determinare il massimo valore di risalita del livello d'acqua sulla spiaggia emersa, il valore del massimo run up va sommato al valore del sovrizzo di tempesta, pari a 1.34 m e inteso come somma del massimo sovrizzo di tempesta meteorologica (onde, venti ed effetto barico inverso) e del massimo della marea astronomica. Pertanto il valore massimo del livello idrico sul pennello, R , rispetto al l.m.m. risulta:

$$R = \text{Sovralzo di tempesta} + R_u = \mathbf{3.33 \text{ m}}$$

Si evidenzia, infine, che il valore della fascia attiva di spiaggia ove si muove il trasporto solido risulta compreso pertanto fra il valore massimo, $R = +3.33$ m sul l.m.m., e il valore della profondità di chiusura, h_c , pari a -6.91 m sul l.m.m.