CENTRALE EOLICA OFFSHORE BRINDISI

PARCO EOLICO MARINO ANTISTANTE LE COSTE DI BRINDISI - SAN PIETRO VERNOTICO E TORCHIAROLO

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

ELABORATO	TITOLO
SIA-08	**STUDIOMETEOMARINO DEL PARAGGIO DI CERANO**

Responsabile Progetto: Prof. Giuseppe Cesario Calò

Committente

TG Energie rinnovabili S.r.l.
Ravenna via Zuccherificio n.10
P.IVA 02260730391

Timbro e firma
energie rinnovabili
Il Presidente

Gruppo di progettazione

COORDINAMENTO DEL SIA

ARKE' INGEGNERIA S.r.l.
Via Imperatore Traiano n. 4
TEL/FAX 080/2022423
e-mail: segreteria@arkeingegneria.it

PROF.ING. ALBERTO FERRUCCIO PICCINNI
(Ordine degli Ingegneri della Provincia di Bari n. 7288)

ING. GIOACCHINO ANGARANO
(Ordine degli Ingegneri della Provincia di Bari n. 5970)

GESTIONE DOCUMENTO			
Rif. DWG		Prot. n.	
Disk/dir.		Data Prot.	
N° revisione	01	N° edizione	
Data revisione	23-03-2013	Data edizione	

Il presente documento è proprietà riservata di TG S.r.l. Ai sensi dell'art. 2575 C.C. è vietata la riproduzione, la pubblicazione e l'utilizzo senza espressa autorizzazione.

INDICE

1 PREMESSA 2

2 CARATTERISTICHE GENERALI DEL SITO E DEL MOTO ONDOSO 3

2.1 Inquadramento geografico e morfologico del paraggio 3
2.2 Piano Regionale delle Coste 5
2.3 Atlante delle spiagge 7
2.4 Linee Guida coste basse 8
2.5 Settore di traversia e fetch del paraggio 10

3 CLIMA ONDOSO AL LARGO 13

3.1 La boa di Monopoli 13
3.2 Elaborazione dei dati ondametrici 21
3.3 Relazione tra altezza d'onda e periodo di picco 28
3.4 Eventi estremi di moto ondoso al largo 30
3.5 Clima meteomarino equivalente del paraggio 37
3.6 Profondità di chiusura 39

4 CLIMA ANEMOMETRICO 41

4.1 La stazione anemometrica di Brindisi 41
4.2 Frequenze di apparizione annuali 43
4.3 Frequenze di apparizione stagionali 45
4.3.1 Inverno 45
4.3.2 Primavera 46
4.3.3 Estate 48
4.3.4 Autunno 49

5 MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA 52

5.1 Generalità 52
5.2 Il modello matematico SWAN 52
5.3 Griglie di calcolo 54
5.4 Propagazione sottocosta degli eventi estremi di moto ondoso 57
5.5 Propagazione sottocosta delle onde di modellazione 63

6 CORRENTI LONGITUDINALI 67

7 EVOLUZIONE DEL LITORALE 74

7.1 Analisi diacronica delle linee di riva 74

8 CORRENTI DI CIRCOLAZIONE 86

8.1 Dati e condizioni di input adottati dal modello matematico 86
8.2 Risultati e loro analisi 90

1 PREMESSA

La presente relazione è stata redatta nell'ambito degli studi propedeutici alla realizzazione di un impianto eolico offshore al largo del paraggio di Cerano, lungo il litorale a Sud della città di Brindisi (figura 1).

L'impianto eolico si svilupperà su una superficie acquea di circa 2000 ettari al largo della costa compresa tra Torre Cavallo, immediatamente a Sud di Brindisi, ed il litorale delle località Lendinuso e Casalabate.

In tutto saranno installati 36 aerogeneratori con distanza dalla costa variabile da 4.5 km a 7.0 km; gli aerogeneratori sanno fondati su fondali variabili da quota -20m a quota -35m rispetto al livello medio mare. Gli aerogeneratori saranno suddivisi in quattro sottocampi; per ogni sottocampo sarà realizzato un cavidotto elettrico sottomarino che collegherà gli aerogeneratori ad un punto di approdo che sarà realizzato in prossimità della centrale ENEL di Cerano.

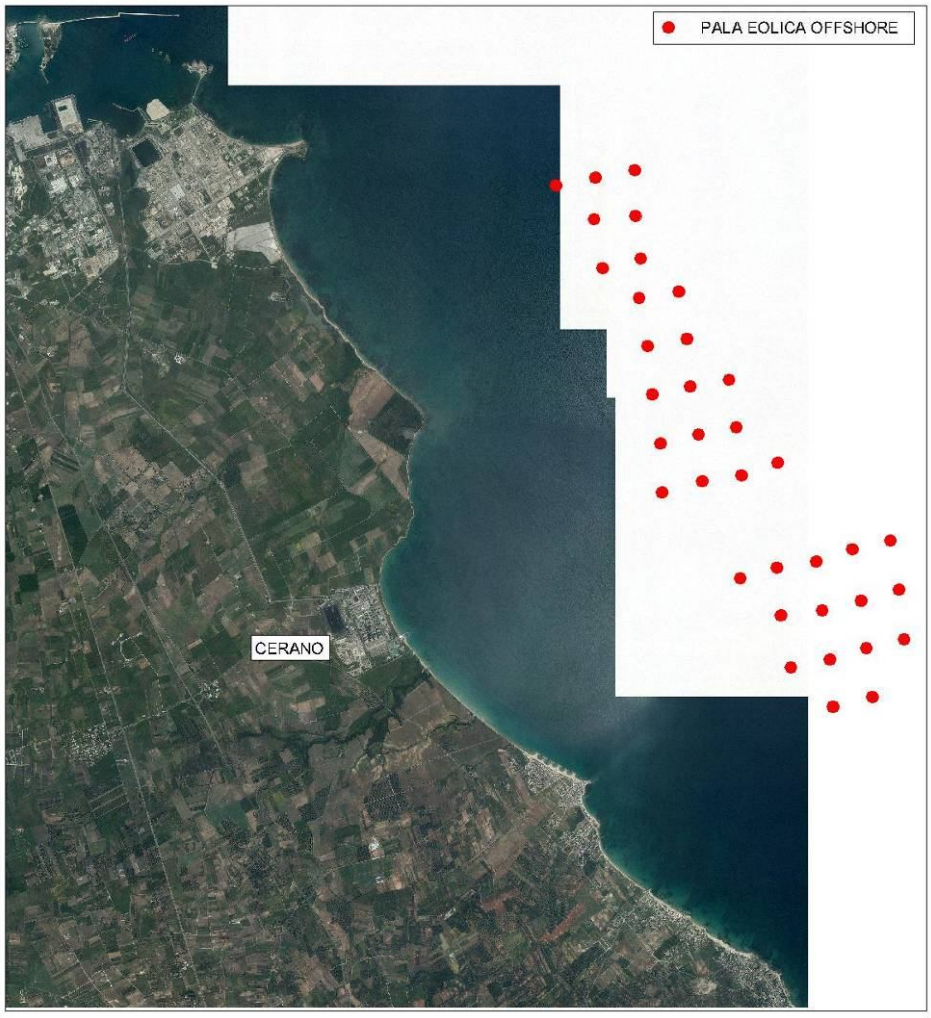


Figura 1: area di studio.

2 CARATTERISTICHE GENERALI DEL SITO E DEL MOTO ONDOSO

2.1 Inquadramento geografico e morfologico del paraggio

Il litorale di Cerano è ubicato lungo il versante meridionale della costa del territorio del Comune di Brindisi (figura 2.1.1).

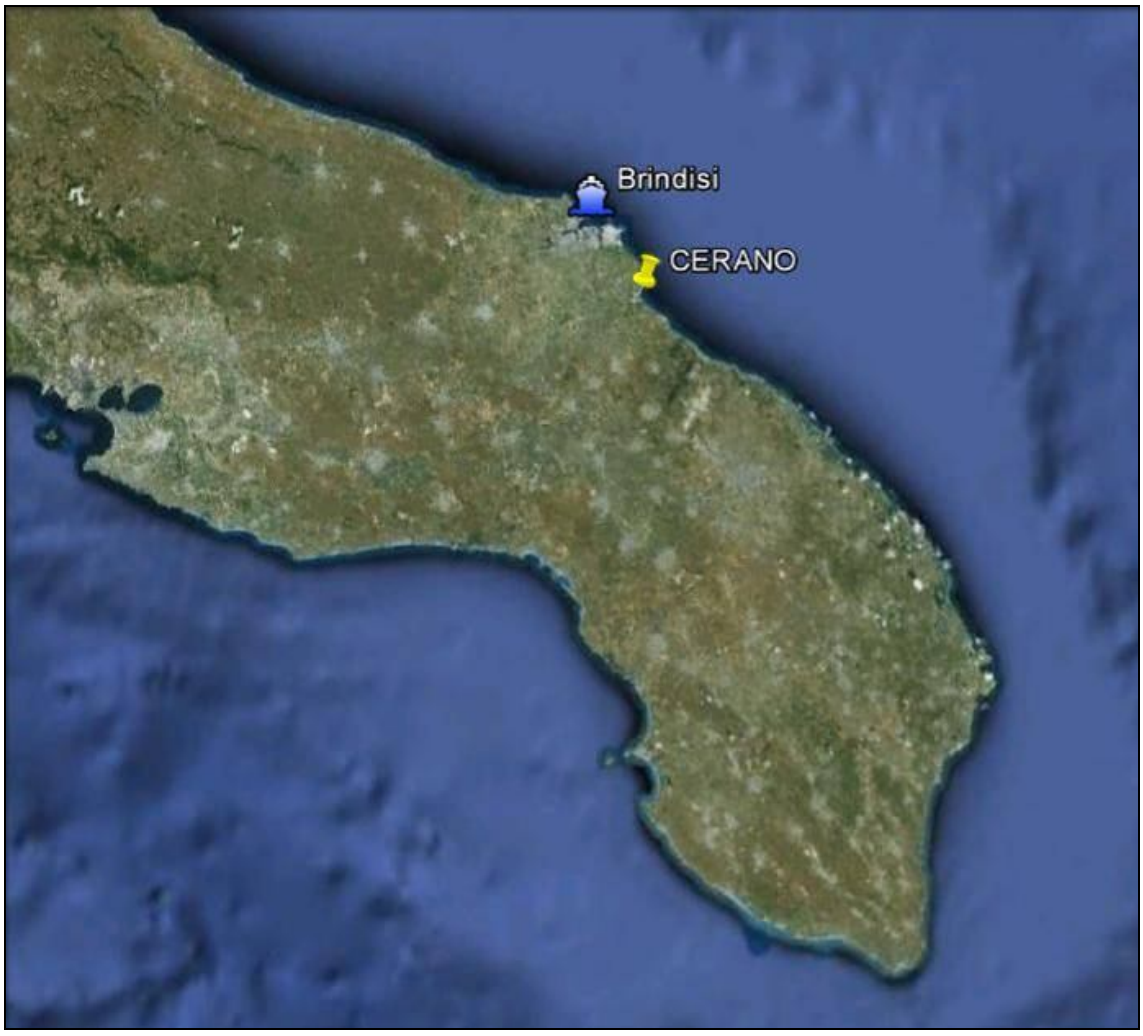


Figura 2.1.1: inquadramento territoriale.

Il litorale prospiciente lo specchio di mare interessato dall'intervento in esame presenta varie tipologie morfologiche.

Il tratto di costa compreso tra Torre Cavallo e Punta della Contessa è costituito quasi esclusivamente da spiaggia sabbiosa a meno della parte più meridionale

caratterizzata dalla presenza di costa rocciosa con spiaggia ciottolosa al piede, e dal tratto di litorale prospiciente il complesso petrolchimico dell'area industriale di Brindisi, protetto da una difesa radente in massi naturali per una lunghezza di circa 900 metri.

Il litorale oltre Punta della Contessa, fino alla centrale ENEL di Cerano, è costituito da falesia con presenza per brevi tratti di una stretta spiaggia ciottolosa al piede. In tale area è molto intenso il fenomeno dell'erosione costiera che sta determinando crolli e cedimenti in vari punti del costone roccioso.

In corrispondenza della centrale ENEL di Cerano, per contrastare il dissesto della falesia, è stato realizzato un sistema di protezione costituito da una barriera radente in massi naturali e riprofilatura del costone roccioso retrostante secondo una pendenza meno acclive (figura 2.1.2). L'irrigidimento della costa a seguito della realizzazione di tali opere ha bloccato in tale area il fenomeno erosivo, mentre lungo il litorale immediatamente a Sud il disgregamento della falesia ha determinato il crollo del fronte mare di un piccolo piazzale panoramico (figura 2.1.3).

Figura 2.1.2: litorale in corrispondenza della centrale ENEL di Cerano.

Figura 2.1.3: litorale a Sud della centrale ENEL di Cerano.

Proseguendo verso Sud fino alla località di Torre S. Gennaro, la costa è costituita da falesia con spiaggia sabbiosa al piede. A causa dei fenomeni erosivi in atto, lungo il litorale in questione sono state realizzate alcune opere di protezione costiera; nello specifico gli interventi realizzati consistono in 5 pennelli trasversali tra Cerano e Torre S. Gennaro, nonché 6 barriere distaccate longitudinali lungo la spiaggia antistante Torre S. Gennaro.

Il litorale a Sud di Torre S. Gennaro è ancora caratterizzato da falesia con spiaggia sabbiosa al piede; anche in questo caso si è avuto un consistente arretramento della costa per effetto dei fenomeni erosivi in atto.

2.2 Piano Regionale delle Coste

Nell'ambito del ***Piano Regionale delle Coste***, approvato con Del. G.R. Puglia n. 2273 del 13 ottobre 2011 in base alla L.R. n. 17 del 23/06/2006, il litorale pugliese è stato suddiviso in sette unità fisiografiche, dove ciascuna unità definisce un tratto di litorale delimitato da due sezioni attraverso le quali non vi è scambio longitudinale di sedimenti; ciascuna unità fisiografica, quindi, si evolve autonomamente rispetto ai tratti limitrofi.

Il litorale prospiciente lo specchio di mare interessato dalla realizzazione degli interventi in progetto ricade all'interno dell'unità fisiografica principale denominata "U.F. 4" che si estende da Punta Penne (Brindisi) fino al porto di Otranto (Lecce) per una lunghezza complessiva di circa 132km; in particolare il litorale in esame è ubicato nella sub-unità "S.U.F. 4.3" che da Torre Cavallo, subito a Sud di Brindisi, si sviluppa fino al porto di Otranto.Il *Piano Regionale delle Coste* ha individuato su tutta la fascia demaniale della costa pugliese differenti livelli di criticità all'erosione dei litorali e differenti livelli di sensibilità ambientale associata alle peculiarità territoriali del contesto.

La criticità all'erosione è stata definita in funzione di tre indicatori che individuano la tendenza evolutiva storica del litorale, la tendenza evolutiva recente e lo stato di conservazione dei sistemi dunali; la criticità all'erosione viene distinta in elevata, media e bassa.

La sensibilità ambientale è stata definita in funzione di una molteplicità di indicatori che rappresentano lo stato fisico della fascia costiera (comprendente l'area demaniale e il suo contesto territoriale di riferimento), in relazione al sistema delle norme di tutela che ne sottolineano la valenza ambientale; la sensibilità ambientale viene distinta in elevata, media e bassa.

Nella figura 2.2.1 è riportata la classificazione della costa in base ai criteri fissati dal *Piano Regionale delle Coste*. Il tratto di costa in esame è stato classificato mediamente con una criticità all'erosione di ordine basso (C3) o medio (C2); tratti di litorale in erosione sono presenti immediatamente a Sud di Torre S. Gennaro ed in località Lendinuso.

Per quanto riguarda la sensibilità ambientale, vi sono ampi tratti di litorale con sensibilità alta (S1) in corrispondenza delle aree protette degli "Stagni e saline di Punta della Contessa" e del "Bosco di Stramazzone"; un valore di sensibilità media (S2) compete alla costa a sud della Centrale Enel "Federico II", in corrispondenza della riserva naturale regionale del "Bosco di Cerano", mentre per tutti gli altri tratti è stata assegnata sensibilità ambientale bassa (S3).

Le *Norme Tecniche di Attuazione* del Piano nelle zone classificate C1 vietano il rilascio di nuove concessioni per un periodo di almeno tre anni a datare dalla data di approvazione definitiva del PRC e comunque fino a quando sia stata accertata - attraverso una attività continua e puntuale di monitoraggio - la cessazione dei fenomeni erosivi; al fine di stabilizzare i fenomeni erosivi possono essere messi in atto interventi di recupero e risanamento costiero.

Nelle zone classificate C2 il rilascio di nuove concessioni è subordinato all'accertamento che i fenomeni erosivi siano stabilizzati attraverso un'attività continua di monitoraggio, la quale deve proseguire durante il periodo concessorio; l'eventuale riattivazione del fenomeno erosivo comporta la revoca delle concessioni.

Figura 2.2.1: classificazione del litorale riportata nel Piano Regionale delle Coste.

Per quanto riguarda invece la sensibilità ambientale, nelle zone S1 o S2 le *Norme Tecniche di Attuazione* prevedono, salvo disponibilità di zone appartenenti - per la

stessa classe di criticità - ai livelli più bassi di sensibilità ambientale, in via prioritaria Spiagge Libere con Servizi (SLS) e, in via subordinata, Stabilimenti Balneari (SB). In entrambi i casi i servizi minimi di spiaggia devono essere molto contenuti ed essenzialmente limitati al chiosco bar-direzione e ai servizi igienico-sanitari, comunque da definirsi attraverso metodologie di verifiche di tipo ambientale.

2.3 Atlante delle spiagge

Uno strumento ampliamente utilizzato per l'inquadramento geomorfologico dei litorali italiani è l'***Atlante Italiano delle Spiagge*** (1997), compilato da ricercatori afferenti a diverse sedi universitarie e con il finanziamento del CNR. L'*Atlante Italiano delle Spiagge* dà un quadro omogeneo di tutti i litorali italiani; esso è costituito da 108 fogli in scala 1:100.000 compilati in un intervallo temporale che va dal 1981 al 1995; il litorale in esame è riportato nel foglio n. 203 dell'*Atlante* (figura 2.3.1).

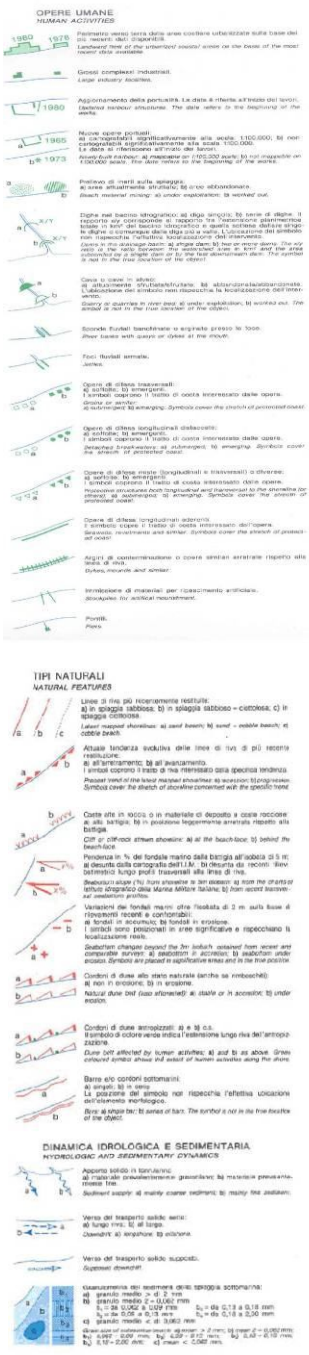
Dall'analisi della figura si evidenzia che il litorale in esame presenta ampi tratti in arretramento che hanno portato nel tempo alla realizzazione di varie opere di protezione dall'erosione costiera. In particolare dalla figura si evidenziano sistemi di difese radenti sia in corrispondenza del polo chimico immediatamente a Sud di Torre Cavallo, che in corrispondenza dell'area della Centrale ENEL di Cerano. Altre opere di protezione sono riportate in corrispondenza del villaggio di Torre S. Gennaro in cui sono state realizzate barriere frangiflutti distaccate.

La pendenza media della spiaggia sommersa è variabile lungo il litorale in esame, ed è compresa tra 0.6 – 0.7% nella zona più settentrionale della costa bassa sabbiosa, 2.0 – 2.2% nella zona centrale della falesia, e circa 1.3 – 1.6% a Sud di Torre S. Gennaro.

Il verso prevalente del trasporto solido longitudinale è indicato da Nord - Ovest verso Sud – Est.

Dall'analisi della figura si evidenzia inoltre una notevole espansione antropica, avvenuta intorno al 1995, sia in seguito all'ampliamento dell'area industriale di Brindisi e della realizzazione della Centrale ENEL di Cerano, sia all'espansione dei villaggi turistici a ridosso della costa (Torre S. Gennaro, Lendinuso, Casalabate).

Figura 2.3.1: Atlante Spiagge Italiane (CNR 1997).



2.4 Linee Guida coste basse

La Giunta Regionale Pugliese con Delibera n. 410 del 10/06/2011 (Bollettino Ufficiale n. 42 del 23/03/2011) ha approvato le ***Linee guida per l'individuazione di interventi tesi a mitigare le situazioni di maggiore criticità delle coste basse pugliesi***.

Tale documento definisce i criteri con cui redigere i progetti relativi a tutti gli interventi, di natura pubblica e privata, di mitigazione del rischio erosione e dissesto per le coste basse. In particolare nell'allegato 3.1 delle *Linee Guida* (All. 3.1: "*Individuazione di strutture di mitigazione del rischio in ciascuna unità fisiografica*"), sono specificate, per ciascun tratto di litorale pugliese, le tipologie di strutture compatibili con le dinamiche costiere in atto.

Per quanto riguarda la sub-unità tra Torre Cavallo e il porto di Otranto in cui ricade il litorale di Cerano, le *Linee guida* riportano che negli ultimi decenni si è avuto un forte deficit sedimentario con una generale tendenza all'arretramento della linea di riva. Il deficit è imputabile alle notevoli sistemazioni dei terreni, all'aumento dell'uso del suolo ed alla forte antropizzazione.

L'arretramento delle strette fasce di spiaggia al piede dei tratti di costa in falesia è particolarmente evidente nella stagione invernale ed in concomitanza delle mareggiate più intense durante le quali il moto ondoso investe direttamente la costa rocciosa e/o le infrastrutture esistenti.

Lungo la sub-unità in esame è stato rilevato un considerevole trasporto longitudinale dei sedimenti diretti sia verso Nord che verso Sud. Il bilancio dei sedimenti lungo il litorale dipende dalla direzione delle singole mareggiate e si possono avere consistenti variazioni stagionali. Per tali motivi, le *Linee Guida* escludono che si possano attuare interventi di protezione a mare con opere di tipo trasversale.

Per quanto riguarda nel dettaglio i tratti di falesia in erosione sia a Sud che a Nord di Cerano, le *Linee Guida* evidenziano che i terreni immediatamente a ridosso della costa sono a destinazione agricola e, ad esclusione dell'area della centrale ENEL di Cerano, peraltro già protetta con una barriera radente in massi naturali, non sono presenti altre strutture od opere di urbanizzazione tali da giustificare nuovi interventi di protezione della falesia. In tale ottica pertanto nelle *Linee Guida* si ritiene necessario che sul tratto di costa sia conservata la naturalità attuale.

Per i tratti di litorale a Sud di Torre S. Gennaro fino alla località di Casalabate, per contrastare la storica tendenza all'arretramento del litorale, intensificatesi negli ultimi anni, le *Linee Guida* escludono il ricorso a opere di difesa di tipo trasversale, mentre prevedono nell'immediato azioni di riqualificazione e salvaguardia dei cordoni dunali. Per i tratti più critici sarà opportuno realizzare dei ripascimenti protetti, che potranno essere in ghiaia o ciottoli arrotondati nei tratti a difesa delle porzioni di costa rocciosa.

Al fenomeno erosivo ha contribuito certamente anche l'innalzamento del livello medio mare che negli ultimi cinquant'anni è stato di circa 9 cm e può aver determinato un arretramento della linea di riva dei litorali sabbiosi compreso tra 4.5 e 9 m, valore significativo per i litorali caratterizzati con pendenze della spiaggia emersa molto basse, e per le strette spiagge sabbiose al piede di coste rocciose o di falesie.

2.5 Settore di traversia e fetch del paraggio

Come è noto, il settore di traversia di un paraggio A è dato dall'arco di circonferenza di centro A che comprendente tutte le direzioni da cui possono provenire le agitazioni ondose determinate dai venti foranei.

A partire da un punto fissato al largo del paraggio di Cerano sono stati tracciati i fetch geografici, dove per fetch geografico si intende la distesa di mare libero entro cui il vento spira con velocità e direzione costanti; il fetch geografico, quindi, rappresenta la porzione di mare, nella direzione del vento, sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso ad opera dell'azione esercitata dal vento.

Nella tabella 2.5.1 è riportato il valore dei fetch geografici misurati in corrispondenza delle varie direzioni di provenienza dei venti foranei.

DIR (°N)	FETCH GEOGRAFICI (km)	DIR (°N)	FETCH GEOGRAFICI (km)	DIR (°N)	FETCH GEOGRAFICI (km)
0	215	120	185	240	8
5	203	125	174	245	8
10	195	130	308	250	8
15	189	135	335	255	11
20	187	140	337	260	14
25	179	145	40	265	18
30	174	150	29	270	20
35	168	155	27	275	24
40	174	160	24	280	28
45	181	165	21	285	50
50	155	170	18	290	63
55	139	175	12	295	89
60	141	180	11	300	203
65	132	185	10	305	196
70	125	190	7	310	480
75	126	195	7	315	647
80	120	200	7	320	691
85	116	205	7	325	425
90	116	210	7	330	359
95	116	215	8	335	243
100	125	220	9	340	258
105	117	225	8	345	235
110	127	230	7	350	225
115	180	235	8	355	224

Tabella 2.5.1: fetch geografici nel paraggio di Cerano.

Il settore di traversia geografico del paraggio di Cerano comprende tutte le direzioni tra 300°N e 140°N.

La distribuzione dei fetch presenta quattro zone ben distinte:

- il settore compreso tra 300°N e 305°N è caratterizzato da fetch dell'ordine di 200km, limitati dal promontorio del Gargano;
- alle direzioni 310°N e 320°N competono i fetch più sviluppati, superiori a 500km, che si estendono fino alla costa veneta;
- dalla direzione 325°N alla direzione 140°N i fetch risultano limitati dalle coste iugoslave e albanesi;
- i fetch dalle direzioni 145°N a 295°N, sono limitati dalle coste pugliesi.

Oltre al fetch geografico è stato calcolato anche il valore del fetch efficace che viene introdotto per considerare sia l'effetto della larghezza del fetch, sia l'effetto della dispersione direzionale dell'energia dell'onda sullo sviluppo e sulla propagazione dell'onda. L'uso dei fetch efficaci è particolarmente appropriato nei mari di dimensioni ridotte sottoposti a perturbazioni ondose di lunga durata.

I fetch efficaci $F_{e,w}$ sono stati calcolati ogni 5 gradi, utilizzando la relazione:

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

in cui:

- $F_{e,w}$ 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;
- $\phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \phi_w + \theta$ è la direzione i-esima (riferita al Nord geografico) relativa ad un settore di ampiezza 2θ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w ;
- θ è l'ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso (il metodo di Saville prevede un valore di $\theta = \pm 45°$, mentre Seymour fa riferimento ad un valore di $\theta = \pm 90°$;
- n è un 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).

Nella figura 2.5.1 sono stati rappresentati i valori dei fetch efficaci e geografici; il settore di traversia efficace, se si considera un valore minimo del fetch pari a 100km, risulta compreso nell'intervallo 275°N - 155°N.

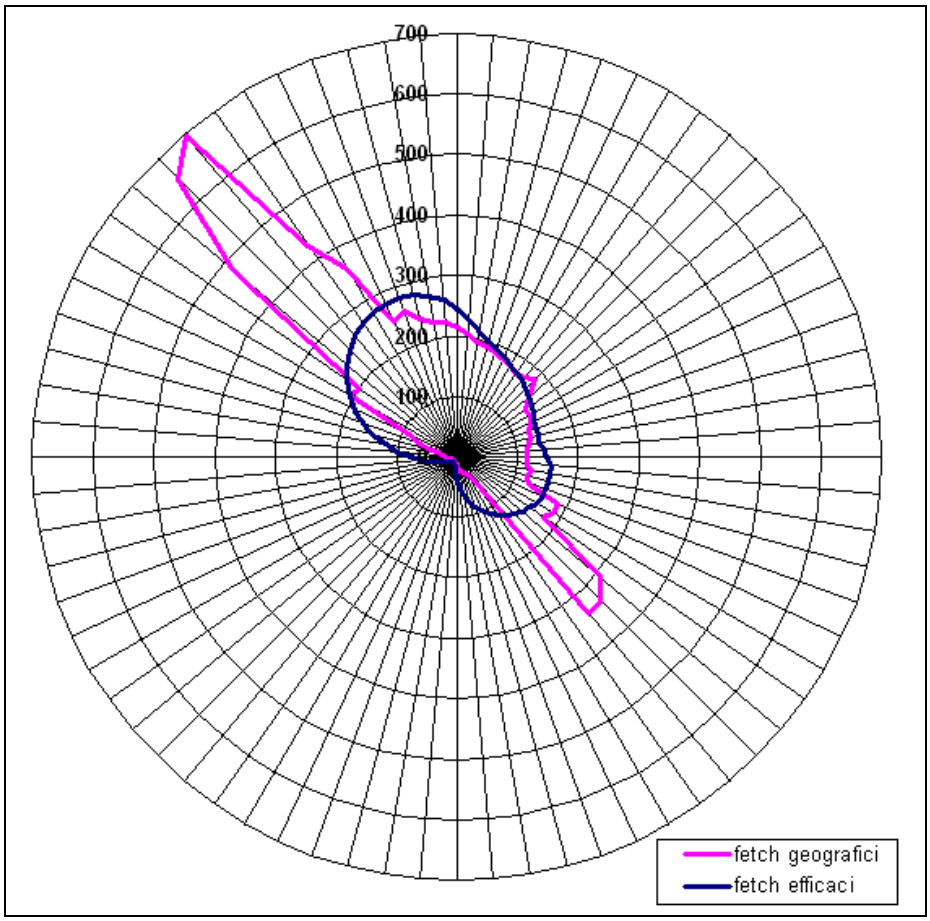


Figura 2.5.1: distribuzione dei fetch geografici ed efficaci nel paraggio di Cerano.

3 CLIMA ONDOSO AL LARGO

Per ricavare la ricostruzione storica delle mareggiate al largo di un paraggio possono essere adottati sia metodi indiretti, a partire dai dati di vento disponibili in qualche stazione anemometrica vicina, sia metodi diretti, a partire da misure dirette dello stato ondoso.

In entrambi i casi è necessario disporre di serie storiche piuttosto lunghe per conferire affidabilità alle procedure di tipo statistico necessarie per la previsione degli eventi estremi e per la ricostruzione del clima ondoso medio.

Per la determinazione del clima meteomarino al largo di Cerano è stato applicato il metodo diretto utilizzando i dati registrati dalla boa ondametrica RON ormeggiata al largo di Monopoli; la boa di Monopoli, infatti, è molto vicina al sito in esame e presenta una medesima esposizione rispetto al settore di traversia.

3.1 La boa di Monopoli

Per la determinazione del clima meteomarino al largo di Cerano è stato utilizzato il metodo della trasposizione geografica dei dati registrati dalla boa ondametrica ormeggiata al largo di Monopoli, che è peraltro l'unica stazione ondametrica RON nel basso Adriatico.

La Rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.), le cui boe sono dislocate lungo le coste italiane (figura 3.1.1), è attualmente gestita dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). Le boe ondametriche attualmente registrano in continuo, le misure vengono elaborate e restituite a cadenza semioraria. Le serie storiche rilevate dal 1989 al 2007 sono attualmente disponibili sul sito *www.idromare.com*.

L'importanza di tali dati risiede nella continuità e nel buon rendimento con cui sono stati acquisiti. I dati durante il periodo di acquisizione sono stati acquisiti dalla boa con regolarità, ad eccezione del 2007 (figura 3.1.2), per cui la percentuale di dati mancanti risulta pari al 14.38% di tutte le osservazioni (tabella 3.1.1).

Figura 3.1.1: ubicazione delle boe della RON.

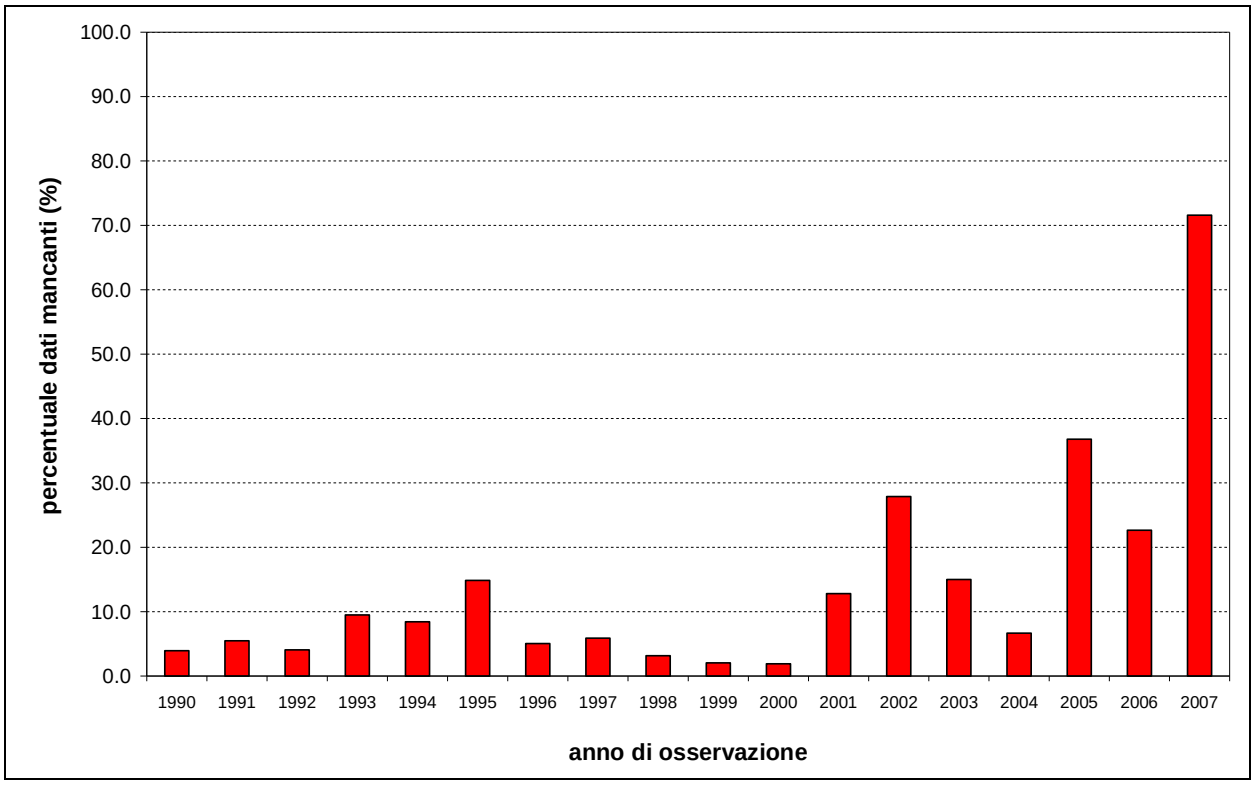


Figura 3.1.2: percentuale dei dati mancanti della boa di Monopoli.

PERIODO DI OSSERVAZIONE	TOTALE DATI	DATI NON VALIDI	% DATI NON VALIDI	DATI VALIDI
1990 - 2007	52592	7567	14.38%	45025

Tabella 3.1.1: caratteristiche della boa di Monopoli.

Le condizioni essenziali su cui si basa il metodo di trasposizione geografica consistono nella vicinanza e nell'analoga esposizione fra punto di misura e paraggio da investigare (figure 3.1.3 e 3.1.4). Il metodo di trasposizione si basa sull'ipotesi che le stesse condizioni anemometriche che hanno generato gli stati di mare rilevati dalla boa abbiano interessato anche l'area di generazione del paraggio in esame.

Si assume, quindi, che nei due siti si verifichi un evento anemometrico con la stessa direzione di provenienza, intensità e durata. La tecnica consente di determinare la corrispondenza tra le caratteristiche del moto ondoso (direzione, altezza e periodo) rilevate dalla boa e quelle del paraggio in esame.

Benché nel caso di studio in esame sia presente un settore angolare con fetch geografici molto estesi, va considerato che per la ricostruzione del moto ondoso nell'ambito del mar Mediterraneo, si è soliti considerare come limite superiore dell'estensione delle perturbazioni atmosferiche, responsabili del processo di generazione del moto ondoso, un valore massimo di 500 km, ipotizzando improbabile che le stesse condizioni di vento, in direzione ed intensità, possano

mantenersi costanti su una porzione di mare di lunghezza superiore. Alla luce di tali considerazioni, i fetch efficaci di Monopoli e di Brindisi sono stati calcolati a partire dai rispettivi fetch geografici con la limitazione della soglia massima di 500.

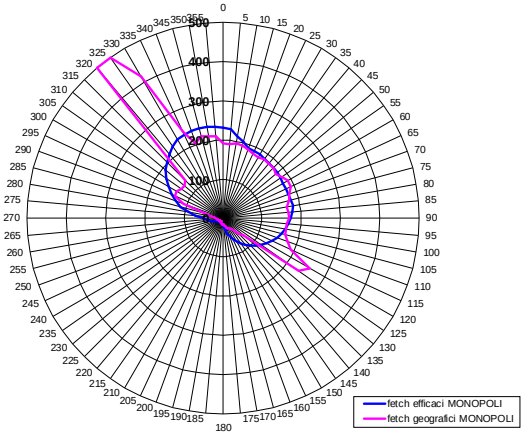


Figura 3.1.3: fetch geografici (magenta) ed efficaci (blu) del paraggio di Monopoli.

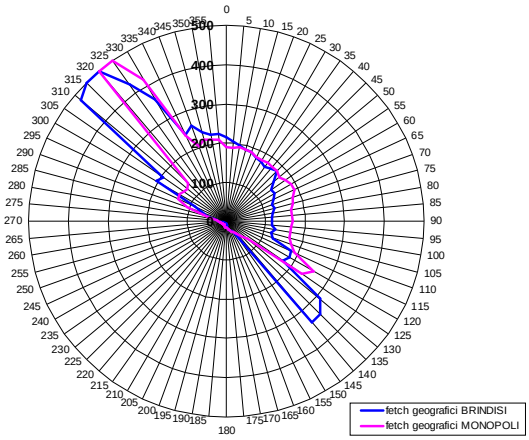


Figura 3.1.4: confronto tra i fetch geografici di Monopoli e di Brindisi.

Nella tabella 3.1.2 è riportata la distribuzione delle frequenze di apparizione dei singoli stati di mare registrati dalla boa classificati per direzione di provenienza ed intensità. Le mareggiate sono ordinate per classi di altezza d'onda di 1.0m e per settori di provenienza di 30°, avendo assunto che le altezze d'onda inferiori a 0.25m sono calme. I dati sono stati rappresentati graficamente nel diagramma polare di figura 3.1.5 (percentuale di apparizione – direzione – intensità) e nel grafico di figura 3.1.6 (percentuale di apparizione – classe di altezza d'onda).

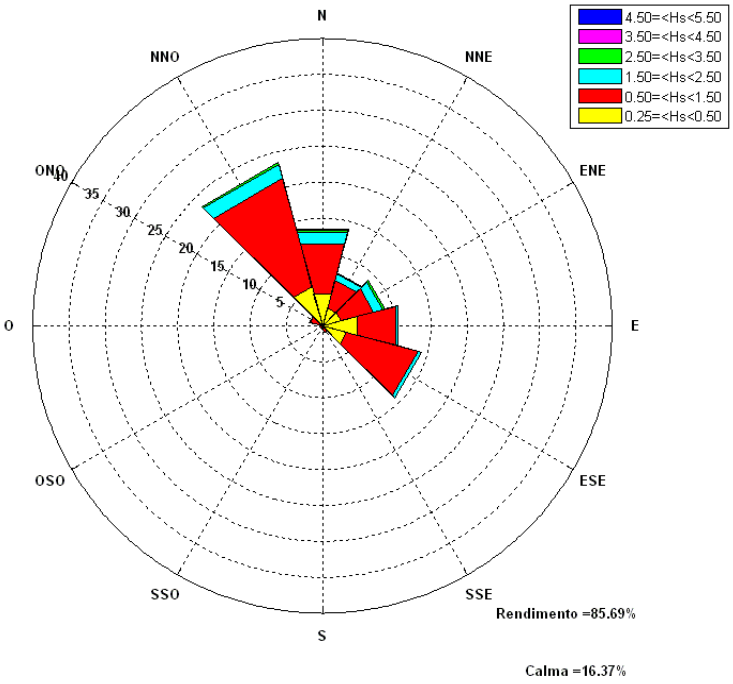


Figura 3.1.5: frequenze di apparizione annuali (boa di Monopoli).

Dall'analisi delle registrazioni effettuate risulta che il settore di traversia del paraggio di Monopoli è costituito

dalle direzioni comprese tra NNO e ESE. La massima frequenza di apparizione spetta alle mareggiate provenienti da NNO che fanno registrare una percentuale del 23.53%. Le mareggiate da ESE costituiscono il 14.19% dei dati registrati, mentre le mareggiate da Nord raggiungono il 13.85% di tutte le osservazioni. Le onde da Est sono piuttosto frequenti nel paraggio con una frequenza del 10.81%, mentre le onde da NNE ed ENE fanno registrare percentuali tra il 7.74% e l'8.99%.

dir (°N)	altezza significativa H_s (m)						
	0.25 0.50	0.50 1.50	1.50 2.50	2.50 3.50	3.50 4.50	4.50 5.50	totale
0	4.58	7.20	1.65	0.36	0.06	0.00	**13.85**
30	2.59	4.05	0.91	0.16	0.03	0.00	**7.74**
60	2.72	4.63	1.26	0.33	0.04	0.01	**8.99**
90	5.04	5.48	0.25	0.04	0.00	0.00	**10.81**
120	3.51	10.15	0.52	0.01	0.00	0.00	**14.19**
150	0.37	0.57	0.02	0.00	0.00	0.00	**0.96**
180	0.21	0.24	0.01	0.00	0.00	0.00	**0.46**
210	0.21	0.19	0.02	0.00	0.00	0.00	**0.42**
240	0.16	0.21	0.01	0.00	0.00	0.00	**0.38**
270	0.19	0.25	0.02	0.00	0.00	0.00	**0.46**
300	0.50	1.20	0.14	0.02	0.00	0.00	**1.86**
330	5.63	15.58	2.04	0.26	0.02	0.00	**23.53**
TOT	**25.71**	**49.75**	**6.85**	**1.18**	**0.15**	**0.01**	**83.65**

Tabella 3.1.2: percentuali annuali di apparizione del moto ondoso ordinate per classi di altezza d'onda e per direzione.

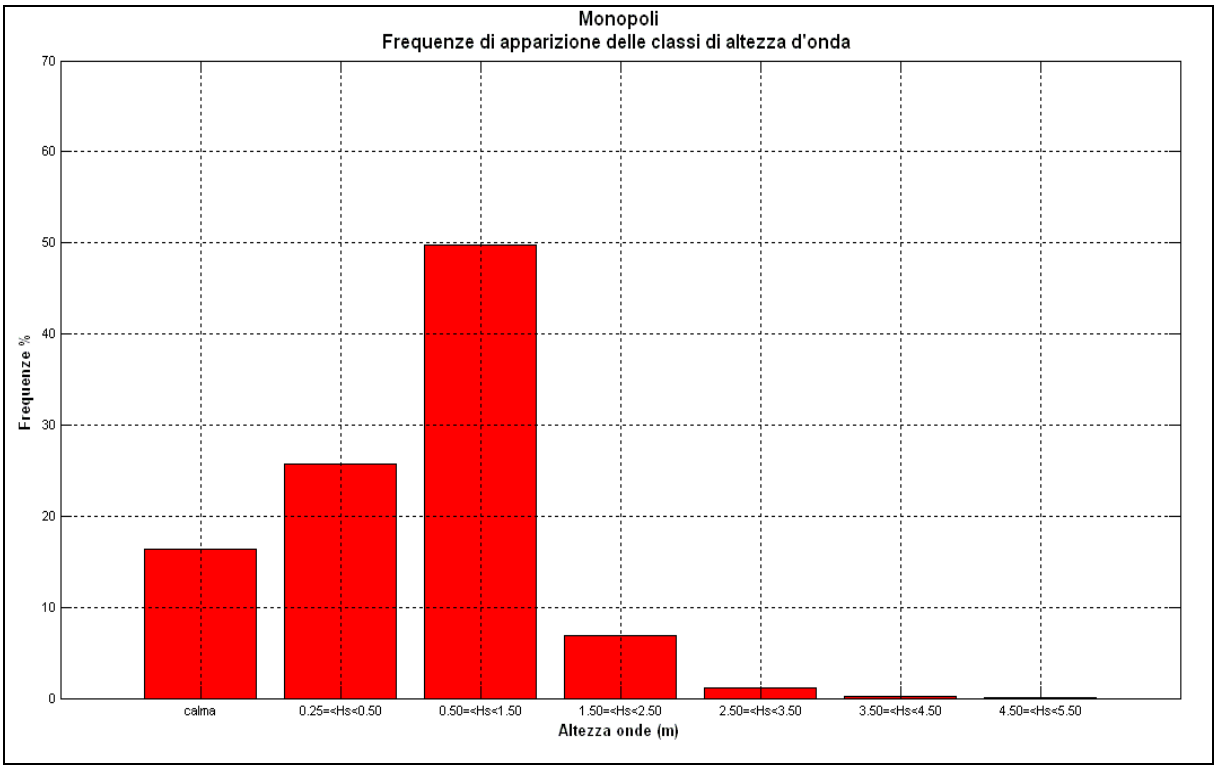


Figura 3.1.6 - Frequenze di apparizione annuali delle classi di altezza d'onda.

Se si classificano le onde secondo l'altezza significativa (figura 3.1.6) si osserva che le onde con altezza significativa minore di 0.5m rappresentano il 25.71% di tutte le osservazioni, mentre le onde con altezza compresa tra 0.5 e 1.5m costituiscono il 49.75% delle registrazioni e sono le mareggiate più frequenti. Risulta, inoltre, che il 6.8% delle osservazioni compete ad onde con altezza compresa tra 1.5 e 2.5m. Le mareggiate con altezza compresa tra 2.5 e 3.5m sono poco frequenti nel paraggio e fanno registrare una percentuale del 1.18%. E' stato anche osservato che lo 0.16% delle onde registrate nel paraggio ha altezza maggiore di 3.5m.

Nella figura 3.1.7 e nella tabella 3.1.3 i dati ondametrici della boa di Monopoli sono stati ordinati per periodo di picco e per direzione di provenienza della mareggiata.

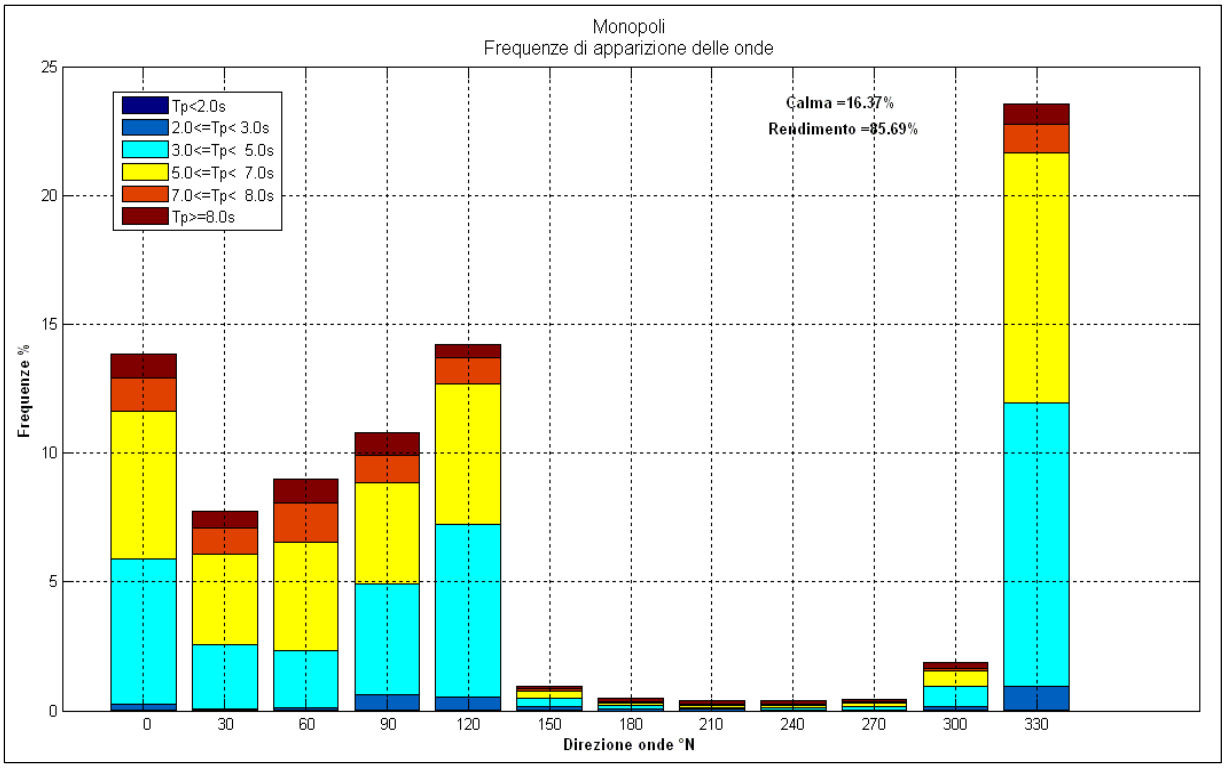


Figura 3.1.7: classificazione delle onde per periodo di picco e per direzione del moto ondoso.

dir (°N)	periodo di picco T_p (s)						
	< 2.0	2.0 3.0	3.0 5.0	5.0 7.0	7.0 8.0	≥ 8.0	totale
0	0.01	0.23	5.64	5.72	1.33	0.91	**13.84**
30	0.00	0.08	2.48	3.53	1.00	0.62	**7.71**
60	0.00	0.09	2.26	4.20	1.50	0.93	**8.98**
90	0.00	0.63	4.31	3.90	1.06	0.91	**10.81**
120	0.00	0.53	6.71	5.43	1.02	0.49	**14.18**
150	0.00	0.14	0.34	0.26	0.09	0.14	**0.97**
180	0.00	0.09	0.11	0.10	0.03	0.14	**0.47**
210	0.00	0.06	0.08	0.09	0.03	0.16	**0.42**
240	0.00	0.03	0.10	0.09	0.03	0.13	**0.38**
270	0.00	0.04	0.14	0.13	0.03	0.11	**0.45**
300	0.00	0.17	0.77	0.59	0.09	0.25	**1.87**
330	0.02	0.94	10.97	9.73	1.11	0.76	**23.53**
TOT	**0.03**	**3.03**	**33.91**	**33.77**	**7.32**	**5.55**	**83.61**

Tabella 3.1.3: percentuali annuali di apparizione del moto ondoso ordinate per periodo di picco e per direzione.

Dall'analisi dei dati si osserva che la frequenza di apparizione maggiore spetta alle onde con periodo compreso tra 3 e 7 secondi (67.68%); le onde con periodo di picco minore di 3 secondi rappresentano il 3.06% del totale, mentre le onde con periodo maggiore di 7 secondi costituiscono il 12.87%.

Nelle tabelle da 3.1.4 a 3.1.7 sono state riportate le percentuali di apparizione del moto ondoso suddivise per le quattro stagioni; le frequenze di apparizione stagionale sono state rappresentate nei grafici di figura 3.1.8.

Se si analizzano i dati ondametrici registrati su base stagionale si osserva che:

- in inverno le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da NNO (21.20%) e da Nord (19.18%); le direzioni da NNE, da ENE, da Est e da ESE fanno registrare percentuali tra il 9.80% ed il 12.13%; il 54.88% delle onde ha altezza compresa tra 0.5 e 1.5 m, mentre le onde di altezza superiore a 2.5 m costituiscono il 2.90% delle osservazioni totali stagionali;
- in primavera le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da NNO (25.60%), seguite dalle onde da ESE (16.49%) e dalle onde da Est (11.29%); durante la stagione primaverile si registra la più alta percentuale di onde di altezza inferiore a 0.5 m (30.36%);
- in estate le frequenze di apparizione maggiori provengono da NNO (32.42%), seguite dalle onde da Nord (13.50%); le altezze d'onda

registrate in questa stagione risultano di modesta entità ed infatti le onde con altezza inferiore a 0.5 m, comprese le calme, costituiscono il 53.30% del totale delle osservazioni stagionali;

- in autunno le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da ESE (19.04%), mentre si riduce di molto la frequenza delle onde da NNO (14.83%) rispetto agli altri riferimenti stagionali; significativo è il valore della percentuale di onde di altezza superiore a 2.5 m pari a 1.99%.

dir (°N)	altezza significativa H_s (m)						
	0.25 0.50	0.50 1.50	1.50 2.50	2.50 3.50	3.50 4.50	4.50 5.50	totale
0	3.64	10.66	3.79	0.89	0.20	0.00	**19.18**
30	2.15	5.51	1.83	0.27	0.04	0.00	**9.80**
60	2.17	6.22	2.58	0.68	0.09	0.02	**11.76**
90	4.60	6.65	0.38	0.04	0.00	0.00	**11.67**
120	2.31	9.17	0.64	0.01	0.00	0.00	**12.13**
150	0.34	0.62	0.05	0.01	0.00	0.00	**1.02**
180	0.12	0.21	0.01	0.00	0.01	0.00	**0.35**
210	0.11	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.18**
240	0.11	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.20**
270	0.19	0.28	0.01	0.00	0.00	0.00	**0.48**
300	0.41	1.02	0.25	0.02	0.00	0.00	**1.70**
330	3.41	14.38	2.79	0.55	0.06	0.01	**21.20**
TOT	**19.56**	**54.88**	**12.33**	**2.47**	**0.40**	**0.03**	**89.67**

Tabella 3.1.4: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione invernale.

dir (°N)	altezza significativa H_s (m)						
	0.25 0.50	0.50 1.50	1.50 2.50	2.50 3.50	3.50 4.50	4.50 5.50	totale
0	4.62	4.37	0.61	0.09	0.02	0.00	**9.71**
30	2.67	2.40	0.40	0.03	0.00	0.00	**5.50**
60	3.01	2.29	0.34	0.03	0.00	0.00	**5.67**
90	6.23	4.99	0.07	0.00	0.00	0.00	**11.29**
120	4.73	11.40	0.36	0.00	0.00	0.00	**16.49**
150	0.35	0.47	0.03	0.00	0.00	0.00	**0.85**
180	0.25	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.36**
210	0.22	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.31**
240	0.17	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	**0.28**
270	0.11	0.16	0.02	0.00	0.00	0.00	**0.29**
300	0.69	1.57	0.09	0.03	0.01	0.00	**2.39**
330	7.31	16.50	1.62	0.16	0.01	0.00	**25.60**
TOT	**30.36**	**44.44**	**3.56**	**0.34**	**0.04**	**0.00**	**78.74**

Tabella 3.1.5: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione primaverile.

dir (°N)	altezza significativa H_s (m)						
	0.25 0.50	0.50 1.50	1.50 2.50	2.50 3.50	3.50 4.50	4.50 5.50	totale
0	6.61	6.33	0.54	0.02	0.00	0.00	**13.50**
30	3.10	3.07	0.12	0.00	0.00	0.00	**6.29**
60	2.34	2.50	0.19	0.00	0.00	0.00	**5.03**
90	4.32	2.08	0.04	0.00	0.00	0.00	**6.44**
120	3.41	5.44	0.01	0.00	0.00	0.00	**8.86**
150	0.23	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.60**
180	0.16	0.15	0.00	0.02	0.00	0.00	**0.33**
210	0.12	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.26**
240	0.12	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	**0.20**
270	0.16	0.17	0.02	0.00	0.00	0.00	**0.35**
300	0.54	1.52	0.08	0.01	0.00	0.00	**2.15**
330	8.63	21.54	2.14	0.11	0.00	0.00	**32.42**
TOT	**29.74**	**43.38**	**3.15**	**0.16**	**0.00**	**0.00**	**76.43**

Tabella 3.1.6: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione estiva.

dir (°N)	altezza significativa H_s (m)						
	0.25 0.50	0.50 1.50	1.50 2.50	2.50 3.50	3.50 4.50	4.50 5.50	totale
0	3.43	7.69	1.80	0.47	0.03	0.00	**13.42**
30	2.40	5.32	1.33	0.32	0.07	0.00	**9.44**
60	3.30	7.60	2.02	0.62	0.08	0.01	**13.63**
90	4.95	8.25	0.50	0.11	0.00	0.00	**13.81**
120	3.50	14.45	1.06	0.02	0.01	0.00	**19.04**
150	0.57	0.82	0.02	0.00	0.00	0.00	**1.41**
180	0.30	0.49	0.03	0.00	0.00	0.00	**0.82**
210	0.38	0.46	0.06	0.00	0.00	0.00	**0.90**
240	0.24	0.56	0.03	0.00	0.00	0.00	**0.83**
270	0.29	0.38	0.03	0.00	0.01	0.00	**0.71**
300	0.34	0.71	0.16	0.01	0.00	0.00	**1.22**
330	3.04	9.88	1.68	0.23	0.00	0.00	**14.83**
TOT	**22.74**	**56.61**	**8.72**	**1.78**	**0.20**	**0.01**	**90.06**

Tabella 3.1.7: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione autunnale.

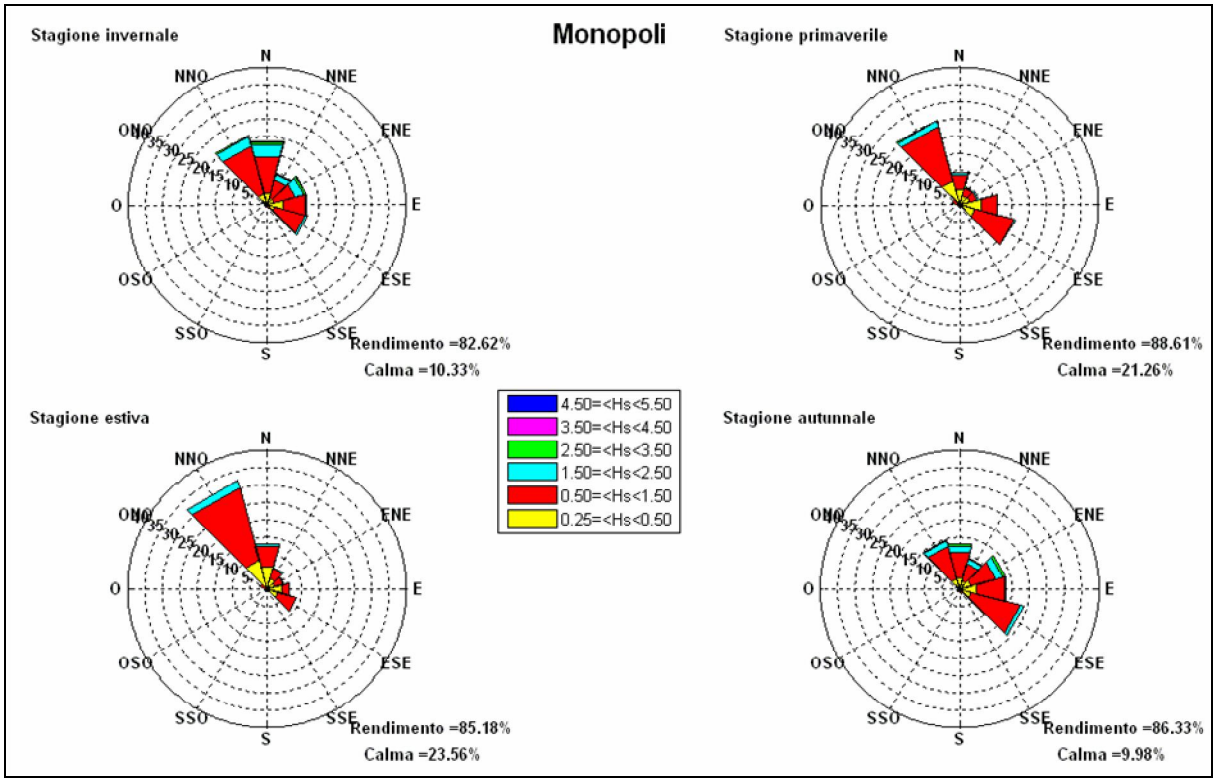


Figura 3.1.8: frequenze di apparizione stagionali (boa di Monopoli).

3.2 Elaborazione dei dati ondametrici

Nella tabella 3.2.1 sono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione del metodo di trasposizione geografica dei dati di boa di Monopoli al paraggio di Cerano; le mareggiate sono state ordinate per classi di altezza d'onda di 1.0m e per settori di provenienza di 30°, avendo assunto che le altezze d'onda inferiori a 0.25m sono calme; i dati elaborati sono stati rappresentati graficamente nel diagramma polare di figura 3.2.1 (percentuale di apparizione – direzione – intensità) e nel grafico di figura 3.2.2 (percentuale di apparizione – classe di altezza d'onda).

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)											
	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	TOT
	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	
0	7.15	2.75	1.41	0.81	0.37	0.17	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00	12.77
30	4.51	1.78	0.74	0.36	0.22	0.04	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	7.69
60	5.04	1.83	0.81	0.54	0.24	0.10	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	8.60
90	4.87	0.97	0.17	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.08
120	11.33	5.20	1.52	0.21	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.30
150	0.64	0.36	0.12	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.18
180	0.18	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27
210	0.24	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29
240	0.28	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38
270	0.31	0.10	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46
300	0.76	0.44	0.17	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.49
330	12.57	8.72	2.97	1.19	0.45	0.18	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00	26.18
TOT	47.87	22.32	7.99	3.27	1.35	0.54	0.22	0.08	0.02	0.00	0.00	83.67

Tabella 3.2.1: percentuali annuali di apparizione del moto ondoso ordinate per classi di altezza d'onda e per direzione.

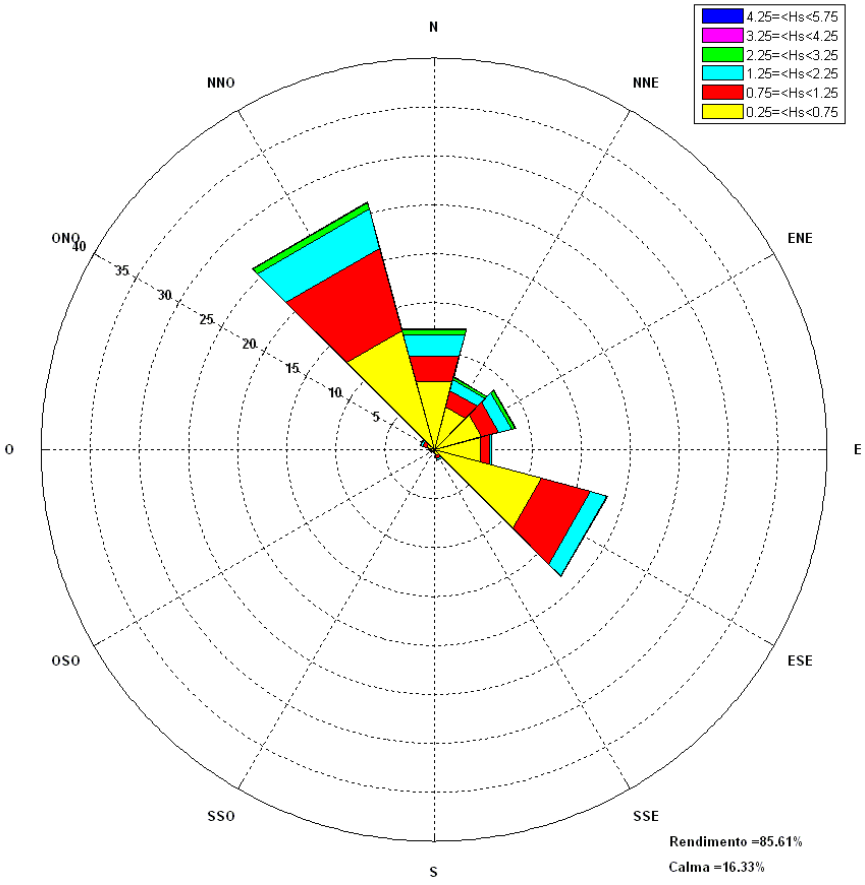


Figura 3.2.1: frequenze di apparizione annuali.

Dall'analisi delle registrazioni effettuate risulta che il settore di traversia del paraggio è costituito dalle direzioni comprese tra NNO ed ESE. La massima frequenza di apparizione spetta alle mareggiate provenienti da NNO che fanno registrare una percentuale del 26.18%. Le mareggiate da ESE costituiscono il 18.30% dei dati registrati, mentre le mareggiate da Nord raggiungono il 12.77% di tutte le osservazioni. Le onde dal I quadrante fanno registrare percentuali tra il 6.08% e l'8.60%.

Se si classificano le onde secondo l'altezza significativa (figura 3.2.2) si osserva che le onde con altezza significativa minore di 0.75m rappresentano il 64.20% di tutte le osservazioni, mentre le onde con altezza compresa tra 0.75 e 1.75m costituiscono il 30.31% delle registrazioni. Le mareggiate con altezza maggiore di 1.75m sono poco frequenti nel paraggio e fanno registrare una percentuale del 5.49%; le mareggiate caratterizzate dalle altezze d'onda maggiori provengono prevalentemente da NNO (1.92%) e da Nord (1.45%).

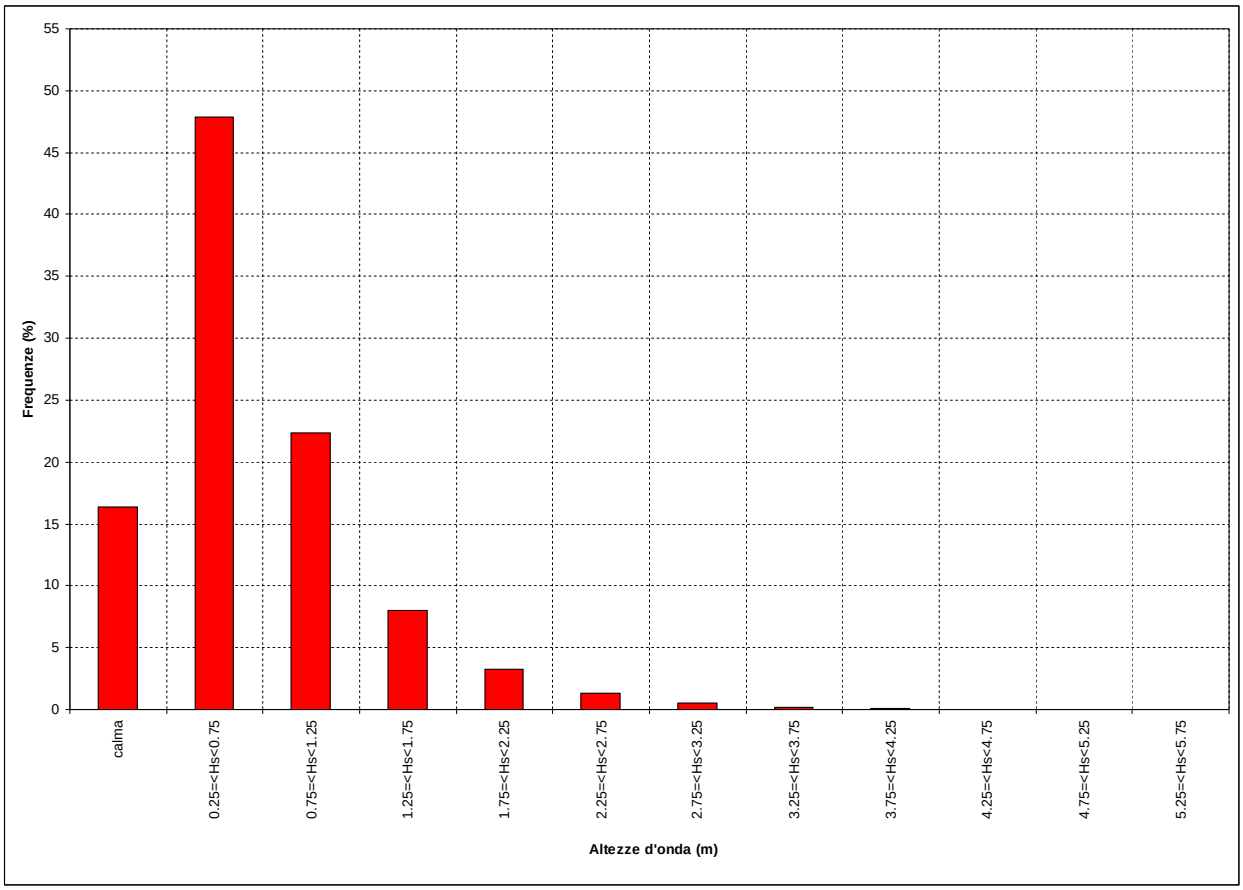


Figura 3.2.2: frequenze di apparizione annuali delle classi di altezza d'onda.

Nella tabella 3.2.2 ed in figura 3.2.3 i dati ricostruiti per il paraggio di Cerano sono stati ordinati per periodo di picco e per direzione di provenienza della mareggiata. Dall'analisi dei dati si osserva che la frequenza di apparizione maggiore spetta alle

onde con periodo compreso tra 5 e 7 secondi (34.64%); le onde con periodo di picco minore di 3 secondi rappresentano il 2.90% del totale, mentre le onde con periodo maggiore di 7 secondi costituiscono il 13.23%.

dir (°N)	periodo di picco Tp (s)						
	< 2.0	2.0 3.0	3.0 5.0	5.0 7.0	7.0 8.0	≥ 8.0	totale
0	0.01	0.16	4.73	5.44	1.41	1.02	12.77
30	0.00	0.09	2.69	3.44	0.92	0.55	7.69
60	0.01	0.15	2.79	4.01	1.16	0.48	8.60
90	0.00	0.48	2.61	2.11	0.45	0.43	6.07
120	0.00	0.83	8.60	6.73	1.36	0.78	18.30
150	0.00	0.07	0.34	0.27	0.12	0.38	1.18
180	0.00	0.05	0.07	0.05	0.02	0.09	0.27
210	0.00	0.04	0.07	0.07	0.01	0.09	0.29
240	0.00	0.03	0.12	0.08	0.02	0.13	0.38
270	0.00	0.04	0.09	0.15	0.05	0.13	0.46
300	0.00	0.11	0.52	0.44	0.12	0.29	1.49
330	0.02	0.78	10.30	11.85	1.84	1.38	26.18
TOT	0.05	2.85	32.90	34.64	7.48	5.74	83.67

Tabella 3.2.2: percentuali annuali di apparizione del moto ondoso ordinate per periodo di picco e per direzione.

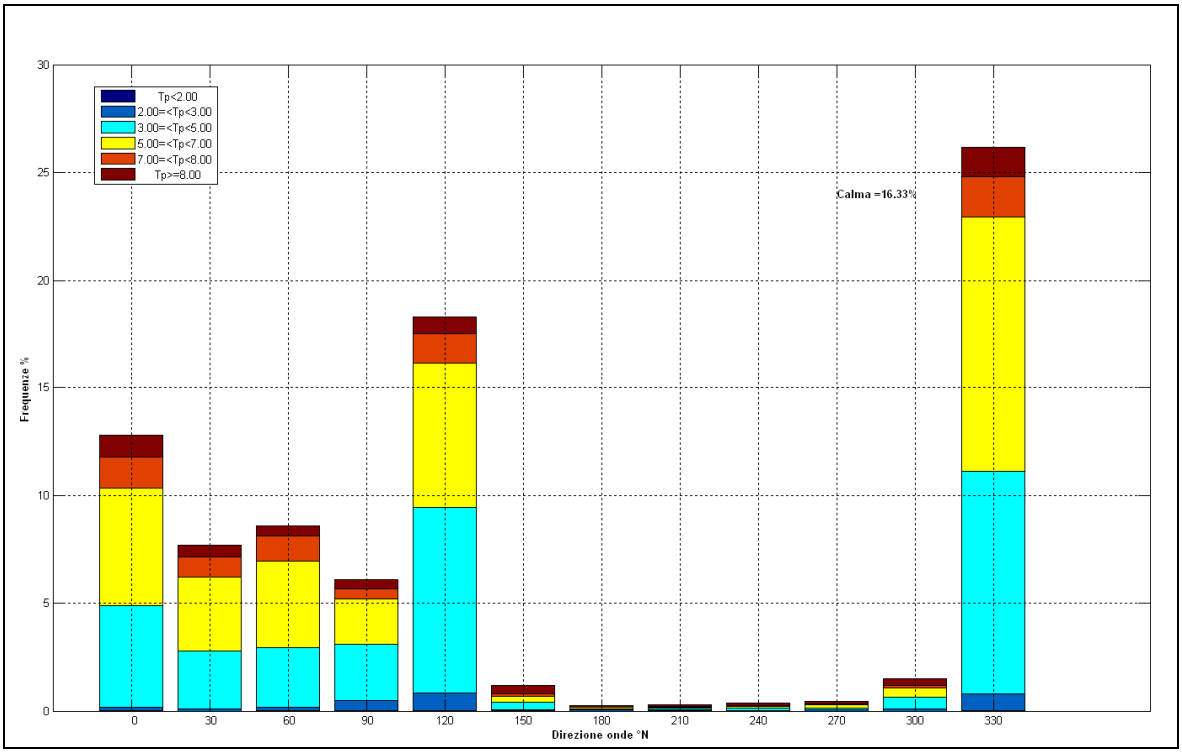


Figura 3.2.3: classificazione delle onde per periodo di picco e per direzione del moto ondoso.

Nelle tabelle da 3.2.3 a 3.2.6 sono state riportate le percentuali di apparizione del moto ondoso suddivise per le quattro stagioni; le frequenze di apparizione stagionale sono state rappresentate nei grafici di figura 3.2.4.

Se si analizzano i dati ondametrici registrati su base stagionale si osserva che:

- in inverno le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da NNO (24.14%), da Nord (18.00%) e da ESE (16.38%); l'89.57% delle onde ha altezza minore di 1.75m, mentre le onde di altezza superiore a 1.75m (10.43%) provengono prevalentemente da Nord (3.31%) e da NNO (3.11%);

- in primavera le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da NNO (27.84%), seguite dalle onde da ESE (21.42%); durante la stagione primaverile si registra una percentuale di onde di altezza inferiore a 1.75m molto alta (97.50%);

- in estate si registra la più alta percentuale di calme (23.44%); le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da NNO (35.83%), seguite dalle onde da Nord (11.78%) e da ESE (11.31%); le altezze d'onda registrate in questa stagione risultano di modesta entità ed infatti si registra la più elevata percentuale di onde di altezza inferiore a 1.75m (97.79%);

- in autunno le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da ESE (23.82%), seguite dalle onde da NNO (16.89%); le onde con altezza maggiore di 1.75m costituiscono il 7.14% delle apparizioni stagionali.

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)											
	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	TOT
	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	
0	6.74	4.65	3.30	1.84	0.72	0.42	0.19	0.10	0.04	0.00	0.00	18.00
30	4.46	2.60	1.49	0.79	0.44	0.05	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	9.92
60	5.13	2.59	1.49	1.13	0.55	0.20	0.04	0.05	0.02	0.00	0.00	11.19
90	5.33	1.15	0.26	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.80
120	8.76	5.25	2.06	0.26	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.38
150	0.54	0.33	0.16	0.07	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15
180	0.11	0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.19
210	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
240	0.18	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
270	0.31	0.17	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
300	0.57	0.42	0.25	0.10	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
330	8.50	8.79	3.75	1.62	0.82	0.39	0.20	0.07	0.01	0.01	0.00	24.14
TOT	40.74	25.97	12.82	5.86	2.64	1.10	0.52	0.22	0.07	0.01	0.01	89.96

Tabella 3.2.3: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione invernale.

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)											
	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	TOT
	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	
0	6.30	1.50	0.65	0.27	0.15	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	8.93
30	3.88	0.97	0.36	0.12	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.40
60	4.39	0.66	0.29	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.43
90	5.21	0.60	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.87
120	14.87	5.19	1.22	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.42
150	0.63	0.26	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99
180	0.09	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15
210	0.17	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18
240	0.22	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26
270	0.22	0.04	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29
300	1.09	0.48	0.22	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	1.89
330	14.95	9.12	2.34	0.87	0.41	0.09	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	27.84
TOT	52.01	18.90	5.23	1.57	0.66	0.16	0.09	0.03	0.00	0.00	0.00	78.64

Tabella 3.2.4: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione primaverile.

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)											
	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	TOT
	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	
0	8.78	2.16	0.51	0.25	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.78
30	4.89	0.91	0.14	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.99
60	3.37	1.00	0.18	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.58
90	3.35	0.23	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.62
120	9.43	1.74	0.13	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.31
150	0.49	0.32	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.85
180	0.19	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.22
210	0.14	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18
240	0.16	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
270	0.27	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33
300	0.89	0.59	0.12	0.04	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.69
330	19.13	11.48	3.53	1.35	0.23	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	35.83
TOT	51.07	18.58	4.71	1.75	0.31	0.11	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	76.56

Tabella 3.2.5: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione estiva.

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)											
	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	TOT
	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	
0	6.80	2.83	1.30	0.96	0.57	0.23	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	12.76
30	4.81	2.68	1.01	0.49	0.39	0.11	0.08	0.04	0.00	0.00	0.00	9.60
60	7.26	3.12	1.30	0.95	0.41	0.21	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00	13.34
90	5.61	1.92	0.32	0.12	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.03
120	12.01	8.58	2.69	0.42	0.08	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	23.82
150	0.88	0.53	0.22	0.06	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.72
180	0.35	0.10	0.04	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51
210	0.52	0.11	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68
240	0.55	0.26	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85
270	0.44	0.15	0.11	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.73
300	0.48	0.27	0.10	0.08	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.97
330	7.50	5.52	2.32	0.97	0.36	0.18	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	16.89
TOT	47.20	26.07	9.49	4.09	1.87	0.82	0.26	0.09	0.01	0.00	0.00	89.89

Tabella 3.2.6: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione autunnale.

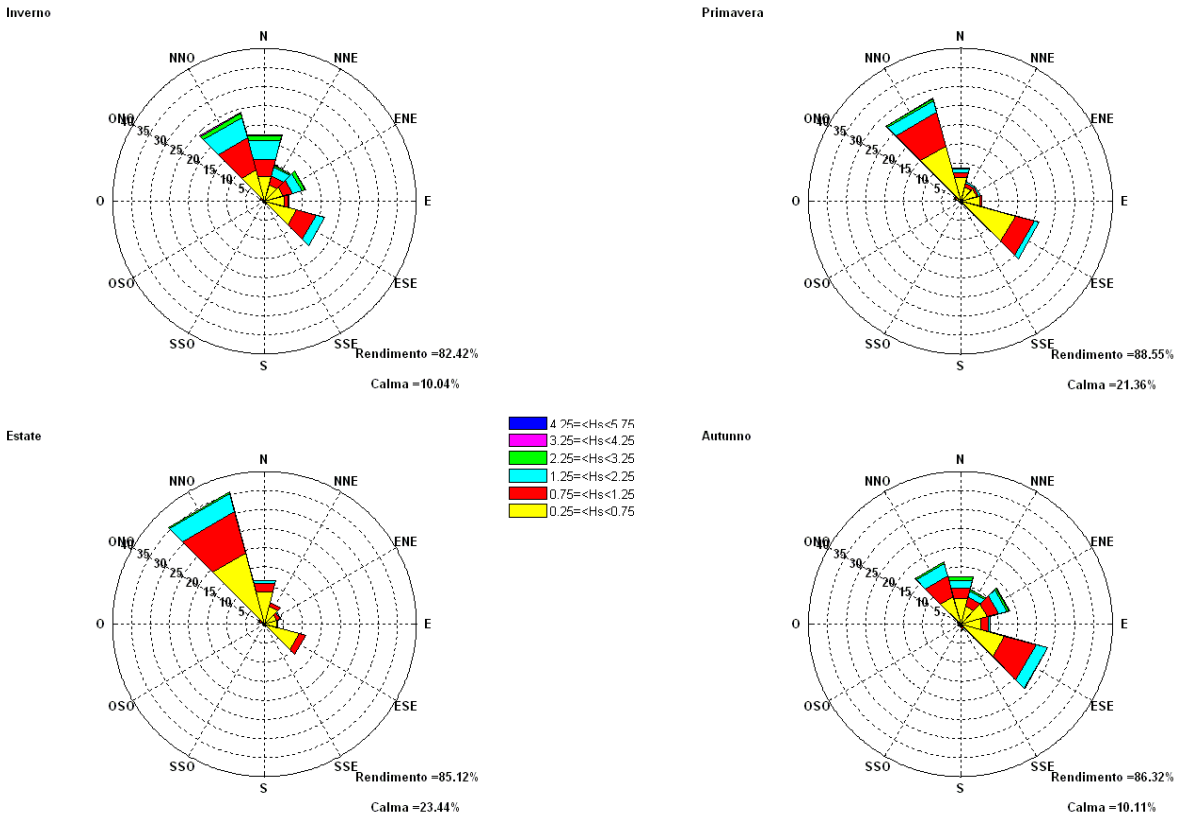


Figura 3.2.4: frequenze di apparizione stagionali.

3.3 Relazione tra altezza d'onda e periodo di picco

La correlazione tra l'altezza d'onda al largo e periodo di picco corrispondente è stata individuata attraverso l'analisi dei dati ricostruiti adottando la seguente formulazione matematica:

$$T = \alpha * H_s^{\beta}$$

dove:

T è il periodo dell'onda espresso in secondi;

H_s è l'altezza d'onda significativa espressa in metri;

α, β sono dei coefficienti di correlazione.

I dati d'onda sono stati suddivisi per altezze congruenti, fissando un fattore di soglia pari a 0.25m, 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 allora il periodo riferito alla i-esima onda come:

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^{n}\sum_{s=1}^{m} T_{sj} * b_s}{m}$$ espresso in secondi.

Il metodo è stato applicato sia a partire dai dati relativi all'intero paraggio, sia in riferimento a tre settori angolari in cui la traversia di Cerano è stata suddivisa. Nel dettaglio è stata utilizzata la partizione del settore di traversia proposta *nell'Atlante dei Mari Italiani*, in base alla quale la traversia del paraggio di Cerano è stata suddivisa così come riportato in tabella 3.3.1.

	dir (°N)
I settore	310° - 10°
II settore	10° - 70°
III settore	70° - 130°

Tabella 3.3.1: settori di traversia del paraggio di Cerano.

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} . I valori dei coefficienti di regressione sono riportati nella figure 3.3.1 per il periodo di picco T_p e per il periodo medio $T_{m,}$ in riferimento all'intero paraggio, mentre nella figura 3.3.2 sono riportate le curve di regressione altezza – periodo di picco, in riferimento ai tre settori angolari esaminati.

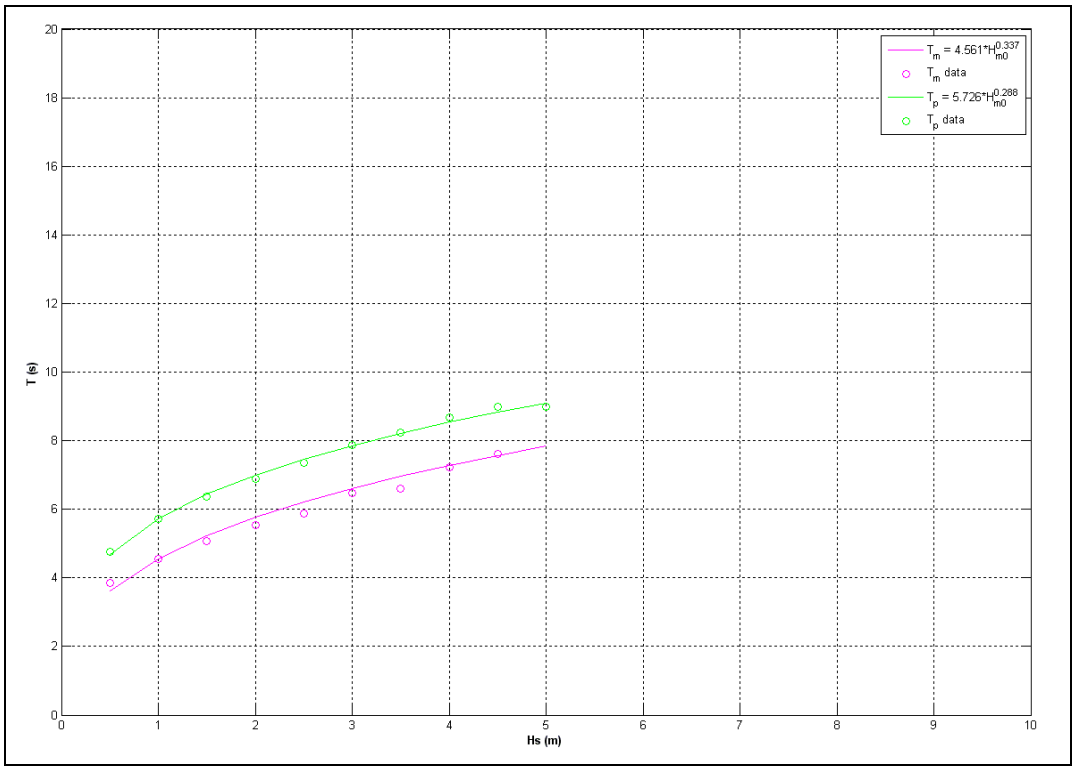


Figura 3.3.1: curve di regressione altezza d'onda - periodo di picco e altezza d'onda – periodo medio (paraggio).

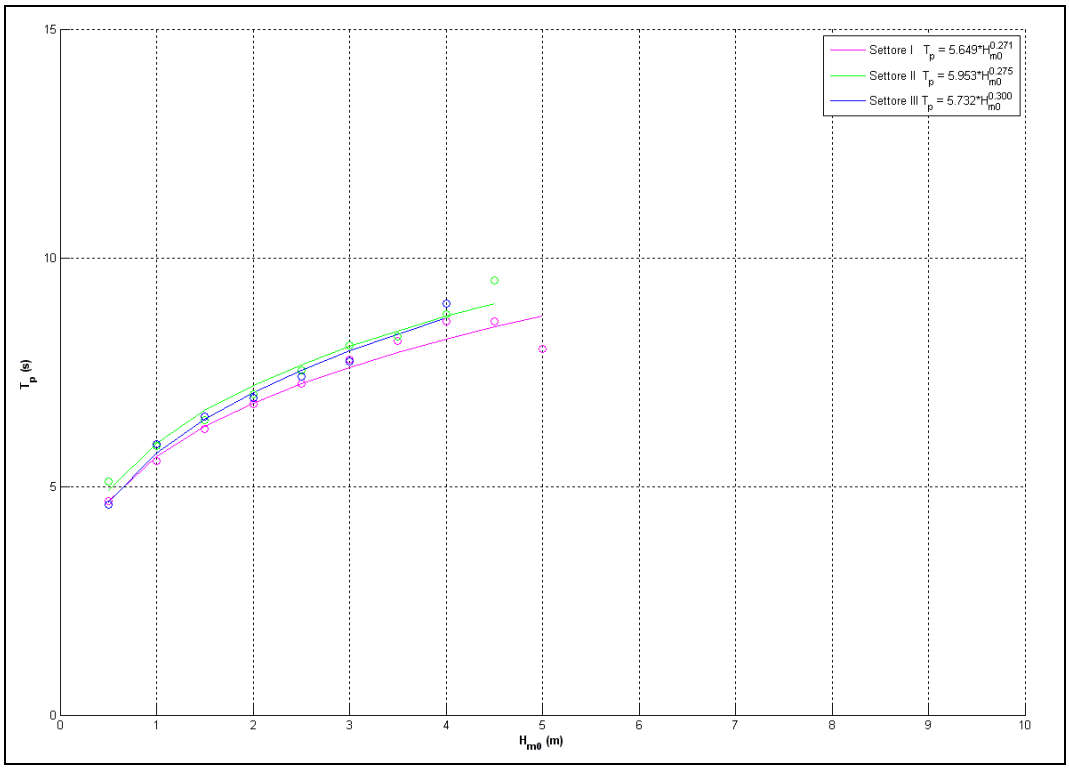


Figura 3.3.2: curve di regressione altezza d'onda - periodo di picco (settori).

3.4 Eventi estremi di moto ondoso al largo

Gli eventi estremi di moto ondoso non possono essere calcolati con metodi deterministici in quanto le altezze d'onda rientrano nella casistica degli eventi stocastici, per cui il margine di incertezza dei risultati ottenuti per il calcolo delle altezze d'onda massime è insito nel problema stesso.

I metodi probabilistici in uso consistono nella ricerca di una legge di distribuzione rappresentativa del campione di dati disponibile ed in una successiva estrapolazione di detta legge fino a tempi di ritorno congrui con l'importanza e le esigenze dello studio.

Per tempo di ritorno T_r si intende l'intervallo temporale fra due eventi di uguale intensità, ovvero, nel caso specifico, il tempo in cui una data altezza d'onda possa essere eguagliata o superata una sola volta.

Ovviamente, maggiori sono i tempi di ritorno considerati, maggiore deve essere la dimensione del campione analizzato, per non incorrere in una scarsa attendibilità dei risultati; sono generalmente accettate previsioni che superano di due o massimo tre volte la serie storica a disposizione.

Nel nostro caso il periodo di registrazione dei dati di moto ondoso (boa di Monopoli, 1990 - 2007, 18 anni) risulta sufficientemente lungo e affidabile per la determinazione degli eventi estremi che caratterizzano il paraggio in questione.

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.

Al fine di determinare le altezze d'onda significative a prefissato T_r , 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:

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

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

dove:

$F\left(H_s \le \hat{H}_s\right)$ è la probabilità che H_s non superi il valore di soglia di altezza significativa, $\hat{H}_s$;

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 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 posizionarli in ordine decrescente. Ad ogni valore di H_s viene assegnata una probabilità (plotting position) secondo le espressioni:

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

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

in cui:

$F\left(H_s \le H_{sm}\right)$ 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 rappresenta il numero degli eventi presenti nella classe di altezze d'onda significative considerate;

NT è il numero totale di tutti gli eventi presi in esame.

Per tutte le 5 distribuzioni (FT-I e Weibull con *k* = 0.75, 1.00, 1.40 e 2.00), sono stati considerati gli eventi con altezza al culmine della mareggiata superiore ad una soglia prefissata H_T (metodologia POT - *Atlante dei Mari Italiani*). I parametri *A* e *B* sono stati determinati verificando l'adattabilità ai dati delle 5 funzioni, attraverso un'analisi di regressione lineare effettuata con il metodo dei minimi quadrati e considerando le distribuzioni che offrono il più alto grado di correlazione.

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:

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

$y_r = \left[\ln(\lambda T)\right]^{1/k}$ (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).

Il calcolo delle onde estreme è stato effettuato applicando il metodo POT sia all'intero paraggio, sia a ciascuno dei tre settori angolari in cui la traversia è stata suddivisa. La partizione del settore di traversia è quella riportata nell'*Atlante dei Mari Italiani* (tabella 3.4.1), determinata sulla base della distribuzione geografica dei fetch, della frequenza di apparizione degli eventi ondosi e della direzione di provenienza dei picchi di mareggiata.

A ciascun settore di traversia è stata assegnata una diversa soglia H_T per la selezione della serie tronca (tabella 3.4.1).

	H_T (m)
I settore: 310° - 10°	2.5
II settore: 10° - 70°	2.5
III settore: 70° - 130°	2.0
paraggio	3.0

Tabella 3.4.1: valori di soglia adottati per l'applicazione del metodo POT.

Tra le varie leggi di distribuzione esaminate è stata utilizzata la legge di distribuzione di Weibull che risulta essere quella che meglio si adatta ad

interpretare la serie storica delle altezze d'onda significativa di valore superiore a quello delle soglie prefissate $H_{T.}$

Nella tabella 3.4.2 sono riportati i parametri della legge di distribuzione adottata suddivisi per ciascun settore di traversia; tali parametri sono stati ricavati con il metodo dei momenti.

	k	A	B
I settore: 310° - 10°	1.40	0.8758	2.3821
II settore: 10° - 70°	1.40	0.8639	2.4193
III settore: 70° - 130°	0.75	0.2329	2.0733
paraggio	1.40	0.7485	2.9154

Tabella 3.4.2: parametri della legge di distribuzione di Weibull.

Nella tabella 3.4.3 sono riportate le massime altezze significative al largo, relative all'intero paraggio, calcolate con la distribuzione di Weibull (figura 3.4.2) per assegnati tempi di ritorno T_r. Per i valori dei periodi di picco associati alle onde estreme così calcolate, è stata utilizzata la relazione altezza - periodo riportata nella figura 3.3.1.

Tempo di ritorno (anni)	$H_{s\ max}$ (m)	T_p (s)
100	5.64	10.71
75	5.55	10.62
50	5.42	10.50
25	5.18	10.27
20	5.11	10.19
10	4.86	9.94
5	4.60	9.67
1	3.92	8.93

Tabella 3.4.3: eventi estremi relativi all'intero paraggio.

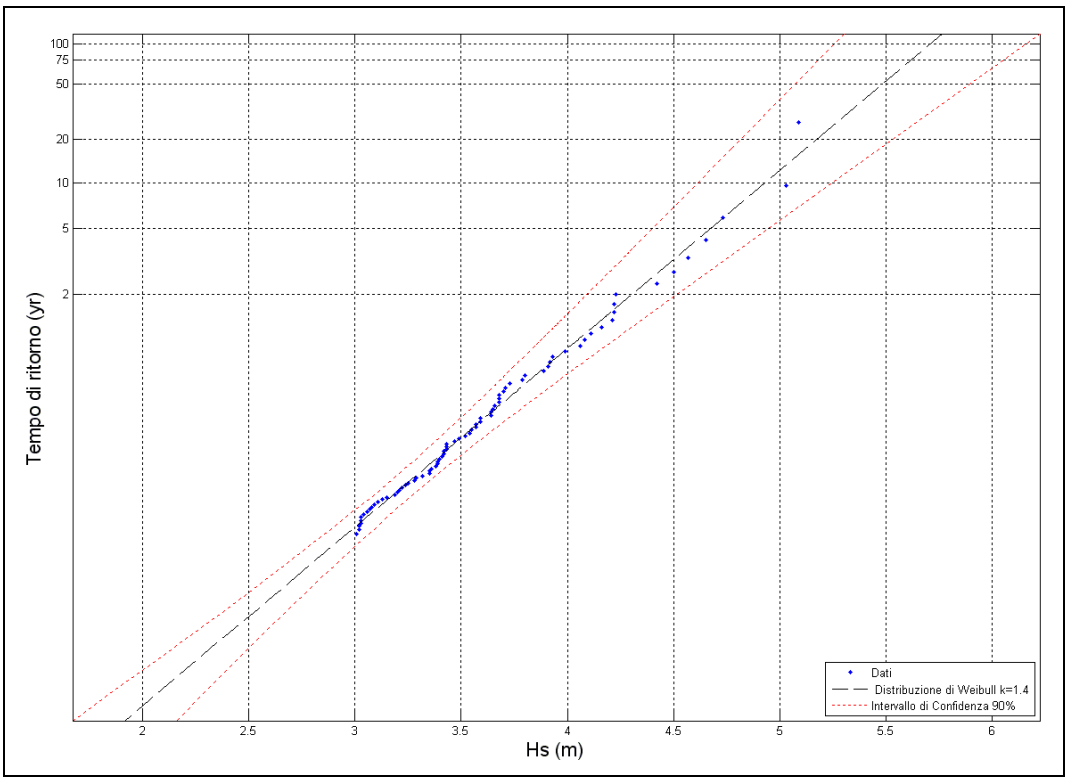


Figura 3.4.2: valori estremi di altezza d'onda nell'intero paraggio (distribuzione di Weibull).

La tabella 3.4.4 riporta le massime altezze significative relative al I settore di traversia adottato, compreso tra le direzioni 310°N-10°N, e calcolate con la distribuzione di Weibull rappresentata in figura 3.4.3.

Per i valori dei periodi di picco associati alle onde estreme così calcolate, è stata utilizzata la relazione altezza - periodo ricavata dall'analisi dei dati d'onda riferiti al I settore, di seguito riportata:

$$T_p = 5.649\ H_0^{\ 0.271}$$

Tempo di ritorno (anni)	$H_{s\ max}$ (m)	T_p (s)
100	5.69	10.75
75	5.58	10.65
50	5.43	10.51
25	5.16	10.24
20	5.07	10.15
10	4.79	9.87
5	4.49	9.56
1	3.72	8.70

Tabella 3.4.4: eventi estremi relativi al I settore di traversia 310°N - 10°N.

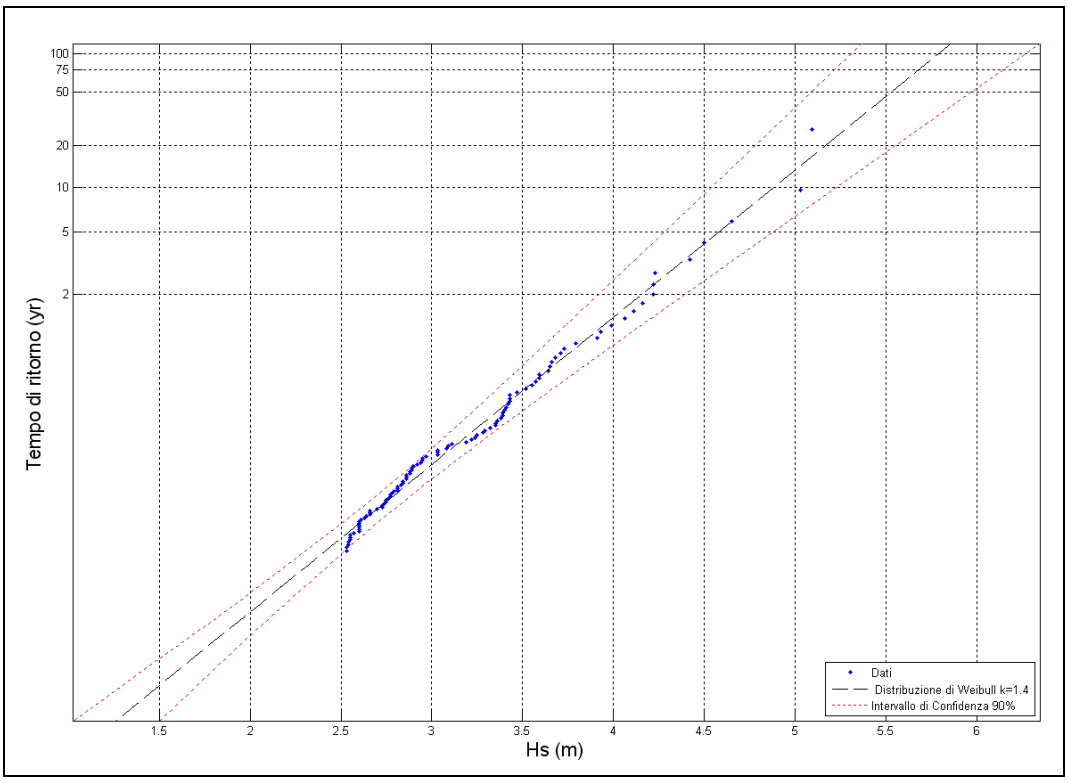


Figura 3.4.3: valori estremi di altezza d'onda nel I settore di traversia (distribuzione di Weibull).

La tabella 3.4.5 riporta le massime altezze significative relative al II settore di traversia adottato, compreso tra le direzioni 10°N-70°N, e calcolate con la distribuzione di Weibull rappresentata in figura 3.4.4.

Per i valori dei periodi di picco associati alle onde estreme così calcolate, è stata utilizzata la relazione altezza - periodo ricavata dall'analisi dei dati d'onda riferiti al solo II settore, di seguito riportata:

$$T_p = 5.953\ H_0^{\ 0.275}$$

Tempo di ritorno (anni)	$H_{s\ max}$ (m)	T_p (s)
100	5.31	10.39
75	5.20	10.29
50	5.04	10.13
25	4.76	9.84
20	4.67	9.75
10	4.37	9.43
5	4.05	9.08
1	3.17	8.03

Tabella 3.4.5: eventi estremi relativi al II settore di traversia 10°N - 70°N.

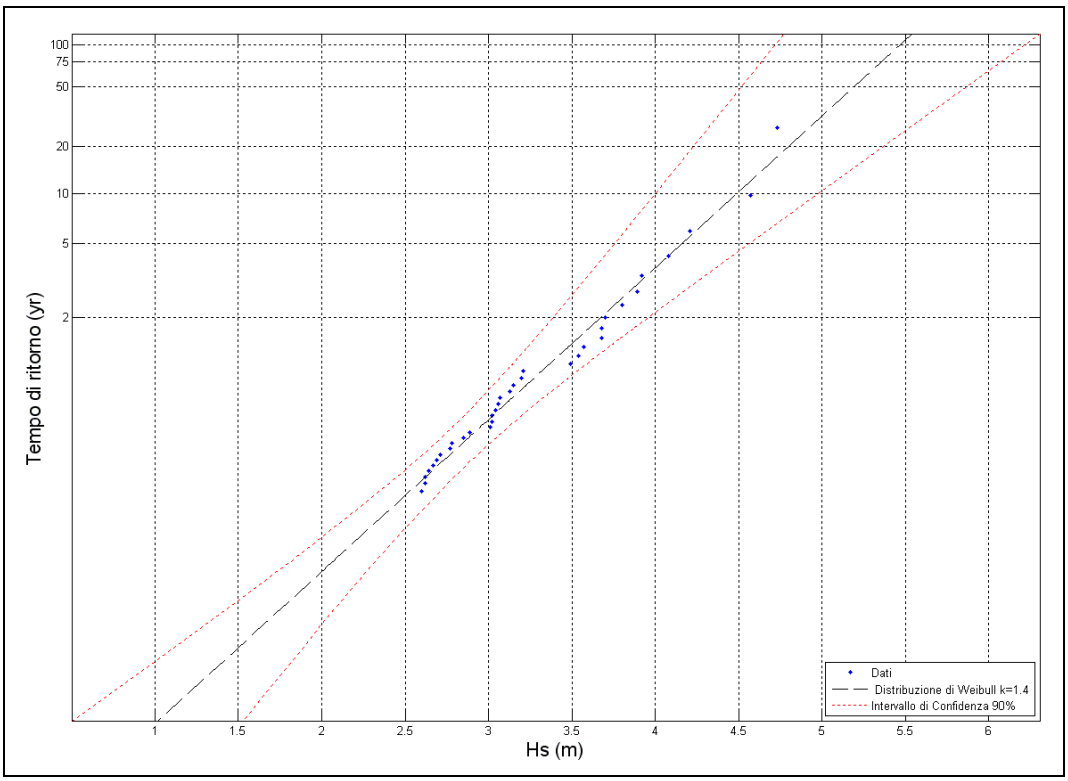


Figura 3.4.4: valori estremi di altezza d'onda nel II settore di traversia (distribuzione di Weibull).

La tabella 3.4.6 riporta le massime altezze significative relative al III settore di traversia adottato, compreso tra le direzioni 70°N-130°N, e calcolate con la distribuzione di Weibull rappresentata in figura 3.4.5.

Per i valori dei periodi di picco associati alle onde estreme così calcolate, è stata utilizzata la relazione altezza - periodo ricavata dall'analisi dei dati d'onda riferiti al solo III settore, di seguito riportata:

$$T_p = 5.732\ H_0^{\ 0.300}$$

Tempo di ritorno (anni)	$H_{s\ max}$ (m)	T_p (s)
100	4.03	9.05
75	3.88	8.88
50	3.67	8.64
25	3.33	8.23
20	3.23	8.1
10	2.92	7.71
5	2.64	7.32
1	2.13	6.58

Tabella 3.4.6: eventi estremi relativi al III settore di traversia 70°N - 130°N.

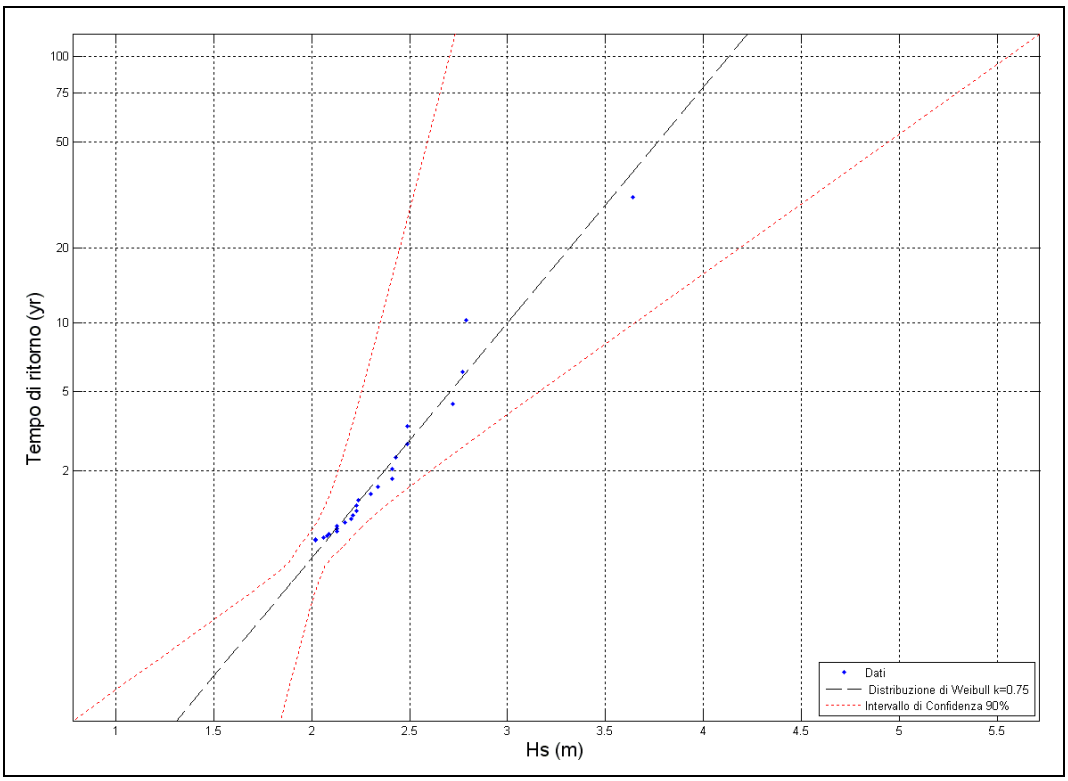


Figura 3.4.5: valori estremi di altezza d'onda nel III settore di traversia (distribuzione di Weibull).

Nella successiva tabella 3.4.7 sono stati stralciati dalle tabelle precedenti i valori di altezza d'onda, suddivisi per settore di traversia, associati al tempo di ritorno di 100 anni; con l'applicazione di un idoneo modello matematico a partire dalle suddette condizioni ondose al largo sono stati elaborati i corrispondenti piani d'onda da cui è stato possibile determinare i valori di altezza d'onda significativa in corrispondenza dello specchio di mare interessato dalla realizzazione delle pale eoliche in progetto.

settore di traversia	Tempo di ritorno 100 anni	
	$H_{s\,max}$ (m)	T_p (s)
310° - 10°N	5.69	9.40
10° - 70°N	5.31	9.30
70° - 130°N	4.03	8.60

Tabella 3.4.7: eventi estremi con Tr=100 anni suddivisi per settori di traversia.

3.5 Clima meteomarino equivalente del paraggio

Oltre alla modellazione del clima meteomarino medio al largo, risulta utile conoscere ai fini della caratterizzazione della dinamica dei litorali in esame, il clima meteomarino equivalente annuale, ovvero la cosiddetta onda di modellazione o morfologica.

Il clima meteomarino equivalente è stato valutato ricavando per ciascuna delle direzioni prescelte e per l'intero paraggio la mareggiata energeticamente equivalente all'intera serie storica disponibile.

L'onda di modellazione è caratterizzata da un'altezza d'onda H ed un periodo d'onda T, rappresentativi del contenuto energetico per il settore considerato. Tale onda è in grado di indurre sul litorale effetti equivalenti a quelli indotti da tutte le onde sulla base delle quali è stata calcolata.

L'altezza d'onda energeticamente equivalente per ciascuna direzione è stata calcolata con la relazione:

$$H_S = \sqrt{\frac{\sum_i H_{Si}^2 \cdot T_{pi} \cdot t_i}{\sum_i T_{pi} \cdot t_i}}$$

in cui la sommatoria è estesa al numero di mareggiate che compete a ciascuna direzione considerata e $H_{si,}$ T_{pi} e t_i sono rispettivamente l'altezza significativa, il periodo di picco e la durata di ciascuna mareggiata.

Analogamente il periodo da associare alla suddetta altezza d'onda è stato ricavato come media pesata dei periodi delle singole mareggiate rispetto alle relative durate secondo la relazione:

$$T_P = \frac{\sum_i T_{pi} \cdot t_i}{\sum_i t_i}$$

Per quanto riguarda l'individuazione dell'onda caratterizzante l'intero paraggio, si considerano ovviamente tutte le mareggiate calcolate nell'intero settore di traversia procedendo al calcolo dell'altezza e del periodo con la stessa metodologia innanzi descritta. In questo caso però si è reso necessario anche il calcolo della direzione di provenienza della mareggiata equivalente. A tale scopo, il flusso di energia è stato trattato come un vettore, le cui componenti hanno consentito di ricavare la direzione media con la seguente relazione:

$$\phi = \arctan\left[\frac{\sum_i H_{Si}^2 \cdot T_{pi} \cdot t_i \cdot \sin\vartheta_i}{\sum_i H_{Si}^2 \cdot T_{pi} \cdot t_i \cdot \cos\vartheta_i}\right]$$

Dallo studio del clima meteomarino medio del paraggio risulta che alla direzione Nord compete l'altezza d'onda energeticamente equivalente più elevata (1.19m), con una frequenza di apparizione pari al 15%; le mareggiate equivalente da NNO (1.11m) e da ESE (0.87m) sono le più frequenti con percentuali di apparizione pari rispettivamente al 31% e al 22%. L'onda caratteristica dell'intero paraggio ha un'altezza di 1.05m, periodo pari a 5.88s e direzione di provenienza 9°N (tabella 3.5.1).

	direzione (°N)	H_s (m)	T_p (s)	durata (ore)
	330	1.11	5.69	35358
	0	1.19	6.01	17250
	30	1.09	6.11	10386
	60	1.15	5.88	11613
	90	0.68	5.4	8205
	120	0.87	5.33	24717
PARAGGIO	9	1.05	5.88	113016

Tabella 3.5.1: onde equivalenti annue.

Le onde di modellazione sono in genere utilizzate per ottenere informazioni quali – quantitative sul trasporto solido costiero; si dimostra infatti che i flussi di energia per unità di lunghezza della cresta delle onde sono proporzionali, attraverso diversi fattori, al trasporto solido longitudinale.

3.6 Profondità di chiusura

E' stato eseguito il calcolo teorico della cosiddetta profondità di chiusura, o profondità di moto attivo dei sedimenti, che delimita lato mare la fascia litoranea interessata dal trasporto solido e da apprezzabili modifiche dei fondali per effetto di fenomeni di deposito o di erosione.

A tal fine è stata applicata la nota formula di Hallermaier che lega questa profondità all'altezza d'onda significativa superata 12 ore all'anno secondo la formula:

$$h_c = 2{,}28\ H_o - 10{,}9\ H_{so}^2/L_o$$

o quella modificata da Berkemeier:

$$h_c = 1{,}75\ H_o - 9{,}2\ H_{so}^2/L_o$$

dove:

- H_{so} rappresenta l'altezza d'onda significata al largo superata in media 12 ore/anno pari a circa 3.65m (figura 3.6.1);
- $L_o = gT_m^2/2\pi$ è la lunghezza dell'onda di altezza H_o pari a circa 78m;
- $T_m = T_p/1.25$ rappresenta il periodo medio dell'onda al largo superata in media 12 ore/anno pari a circa 7.1s.

Applicando la formula di Hallermaier si ottiene una profondità di chiusura h_c pari a circa 7.0m, mentre con la formula di Berkemeier si ottiene un valore minore pari a circa 5.3m.

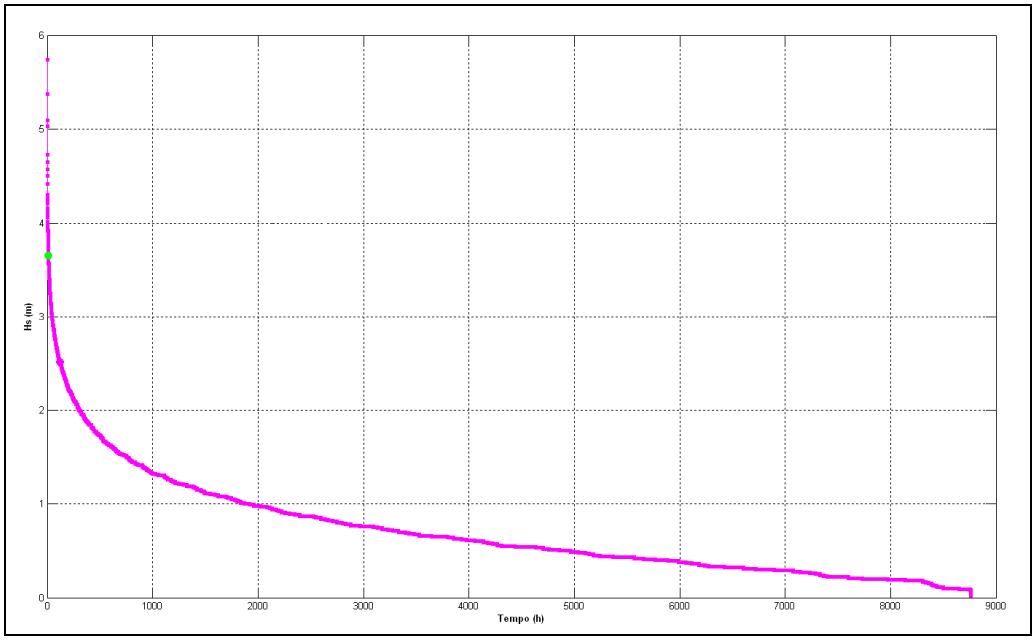


Figura 3.6.1: durate di apparizione delle altezze d'onda al largo di Cerano.

4 CLIMA ANEMOMETRICO

Lo studio anemometrico dell'area in esame è stato condotto attraverso l'analisi della serie storica della stazione anemometrica di Brindisi, da cui è stato possibile ricavare una conoscenza abbastanza accurata del campo di vento in prossimità del litorale di Cerano.

Attualmente in Italia esistono diversi Enti che si occupano del rilevamento sistematico del vento, anche se i dati più affidabili, per standard di acquisizione e per dimensione delle serie storiche disponibili, sono quelli rilevati dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare.

Esso acquisisce i dati di vento in superficie ed in quota, attraverso una rete di circa 150 stazioni dislocate sul territorio nazionale in modo opportuno e principalmente al fine di soddisfare esigenze aeronautiche (figura 4.1); in seguito alcune stazioni sono passate sotto la gestione dell'Ente Nazionale di Assistenza al Volo (ENAV).

I sensori anemometrici attualmente in uso presso le stazioni dell'Aeronautica Militare sono del tipo a tubo di Pitot e forniscono intensità e direzione del vento; molti sensori sono stati di recente sostituiti. Essi effettuano registrazioni triorarie, alle ore 0:00, 3:00, 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00 (il valore di ciascuna registrazione è ottenuto come media dei valori rilevati nei 10 minuti antecedenti l'ora sinottica).

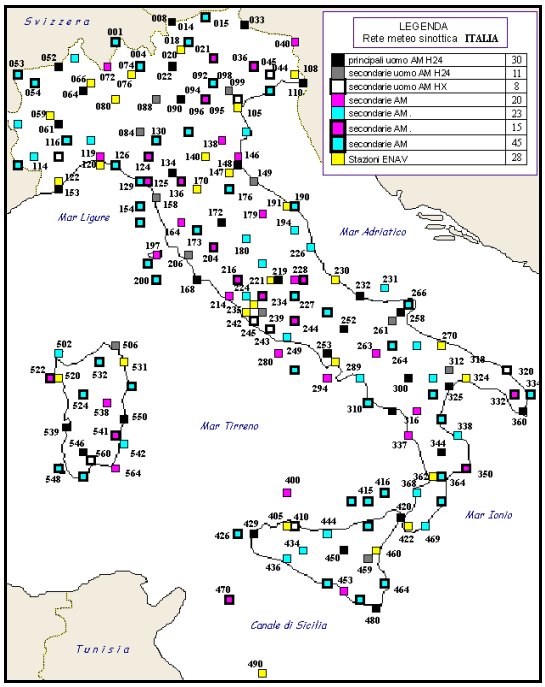


Figura 4.1: rete meteo - sinottica italiana.

La prima fase di un qualsiasi studio consiste proprio nella scelta della stazione che meglio rappresenta l'area sottoposta ad indagine. Gli elementi che inducono alla scelta sono molteplici (rendimento della stazione, esposizione, ecc.), anche se è evidente che, nel caso della ricostruzione del clima meteomarino a partire da dati di vento, dovranno essere scelte le stazioni più prossime alla costa.

4.1 La stazione anemometrica di Brindisi

In questo studio è stata analizzata la serie storica dei dati registrati dalla stazione di Brindisi dal 1951 fino al 31 dicembre 2005. La tabella 4.1.1 riporta i dati salienti della stazione esaminata.

identificativo stazione	località	periodo di osservazione	% dati validi	Lat. Nord	Long. Est	quota [m s.m.l.]
320	Brindisi	1951 - 2005	99.73	40°38'	17°56'	10

Tabella 4.1.1: caratteristiche della stazione anemometrica analizzata.

Attraverso l'analisi dei dati triorari della serie storica della stazione di Brindisi sono state individuate le direzioni di provenienza dei venti regnanti (venti con più alte frequenze di apparizione), dei venti dominanti (venti di elevata intensità), dei venti prevalenti (venti che combinano l'alta frequenza di apparizione con le alte velocità) e le durate dei periodi di calma che si verificano durante l'anno. Sono stati anche analizzati separatamente i diversi periodi dell'anno, per definire la distribuzione di frequenza dei venti in ogni stagione.

La classificazione dei dati secondo la direzione di provenienza è stata effettuata suddividendo la rosa dei venti in settori di 30°, mentre per l'intensità dei venti si è fatto riferimento alla scala Beaufort. Per ogni settore di 30° prescelto e per ogni classe di intensità si è provveduto a valutare la frequenza di apparizione. I risultati ottenuti sono stati rappresentati in forma grafica attraverso diagrammi polari, ed in forma tabellare. Le indagini sono state effettuate inizialmente per l'intero campione di dati disponibile, ottenendo così il clima anemometrico annuale medio, quindi suddividendo il campione in stagioni, ottenendo così il clima anemometrico stagionale.

La serie storica disponibile è costituita dalle registrazioni acquisite nel periodo 1951-2005, durante il quale non si sono verificate interruzioni di rilievo nella raccolta dati e la percentuale di rilevazioni effettive sul totale delle misurazioni teoriche risulta di poco inferiore al 100% (tabella 4.1.2 e figura 4.1.1).

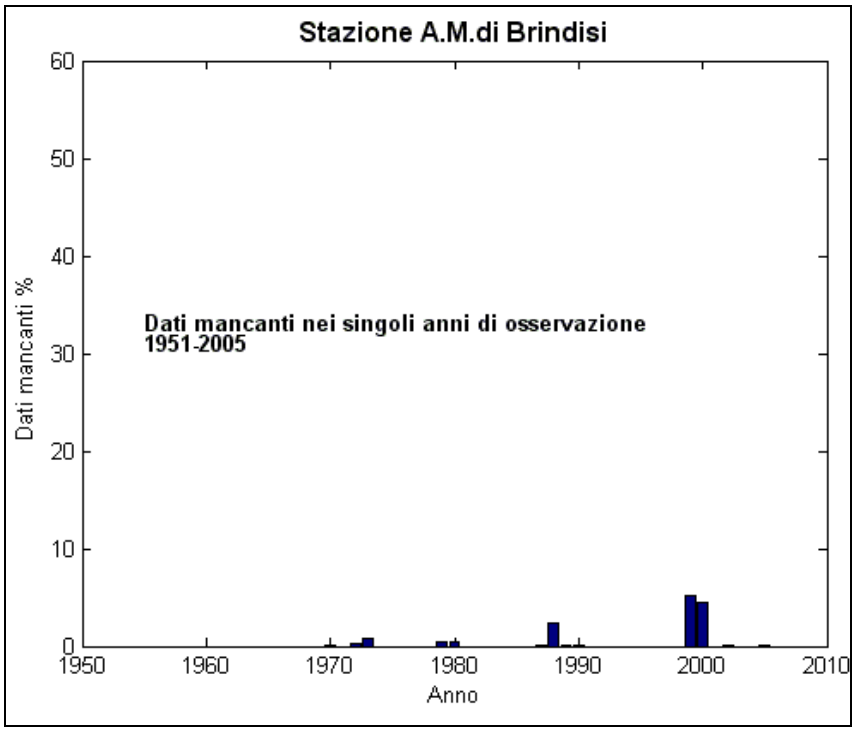


Figura 4.1.1: percentuale di dati anemometrici mancanti della stazione A.M. di Brindisi.

anno	n° dati attesi	% dati mancanti	anno	n.° dati attesi	% dati mancanti
1951	2920	0.00	**1979**	2920	0.51
1952	2928	0.00	**1980**	2928	0.41
1953	2920	0.00	**1981**	2920	0.00
1954	2920	0.00	**1982**	2920	0.00
1955	2920	0.00	**1983**	2920	0.00
1956	2928	0.00	**1984**	2928	0.00
1957	2920	0.00	**1985**	2920	0.00
1958	2920	0.00	**1986**	2920	0.00
1959	2920	0.00	**1987**	2920	0.10
1960	2928	0.00	**1988**	2928	2.36
1961	2920	0.00	**1989**	2920	0.07
1962	2920	0.00	**1990**	2920	0.17
1963	2920	0.00	**1991**	2920	0.00
1964	2928	0.00	**1992**	2928	0.00
1965	2920	0.00	**1993**	2920	0.00
1966	2920	0.00	**1994**	2920	0.00
1967	2920	0.00	**1995**	2920	0.00
1968	2928	0.00	**1996**	2928	0.00
1969	2920	0.00	**1997**	2920	0.00
1970	2920	0.07	**1998**	2920	0.00
1971	2920	0.00	**1999**	2920	5.17
1972	2928	0.31	**2000**	2928	4.51
1973	2920	0.82	**2001**	2920	0.14
1974	2920	0.00	**2002**	2920	0.03
1975	2920	0.00	**2003**	2920	0.00
1976	2928	0.00	**2004**	2928	0.00
1977	2920	0.00	**2005**	2920	0.03
1978	2920	0.00			

Tabella 4.1.2: rendimento della stazione di Brindisi.

4.2 Frequenze di apparizione annuali

Dall'elaborazione statistica della serie completa delle registrazioni (tabella 4.2.1, figura 4.2.1) risulta che mediamente in un anno la classe delle calme è piuttosto frequente, esse costituiscono, infatti, il 17.93% dell'intera popolazione. Dalla distribuzione delle frequenze di apparizione dei venti per direzione di provenienza risulta che il maggior numero di osservazioni spetta ai venti da NNO, la cui percentuale di presenze rispetto all'intera popolazione è del 16.20%. Seguono i venti da ONO e da Sud con una frequenza rispettivamente del 10.99% e del 10.23%. I venti da Nord fanno registrare una percentuale pari al 7.55%, mentre a SSE compete un frequenza pari al 7.01% di tutte le osservazioni. I venti provenienti dal primo e secondo quadrante hanno un'incidenza piuttosto esigua; il

vento da NNE si attesta intorno al 6.24%, mentre i venti da ENE, Est ed ESE fanno registrare il minor numero di casi con percentuali intorno al 3%.

	VELOCITA' (nodi)						
dir (°N)	**1<U≤4**	**4<U≤7**	**7<U≤11**	**11<U≤17**	**17<U≤22**	**U>22**	**TOT**
0	0.74	1.61	1.88	1.96	0.87	0.49	7.55
30	1.01	1.84	1.42	1.15	0.55	0.27	6.24
60	0.64	1.19	0.74	0.43	0.15	0.07	3.22
90	0.45	1.05	0.77	0.31	0.09	0.04	2.71
120	0.42	1.01	1.01	0.66	0.24	0.08	3.42
150	0.79	1.92	1.76	1.62	0.65	0.27	7.01
180	1.16	2.68	2.67	2.46	0.95	0.31	10.23
210	0.98	1.99	1.62	1.15	0.30	0.09	6.13
240	1.00	1.46	0.79	0.38	0.11	0.04	3.78
270	1.02	1.66	1.01	0.63	0.20	0.08	4.60
300	1.10	2.62	3.20	3.02	0.83	0.22	10.99
330	1.25	3.02	4.31	4.84	2.07	0.71	16.20
TOT	10.56	22.05	21.18	18.61	7.01	2.67	82.07

Tabella 4.2.1: frequenze di apparizione annuali.

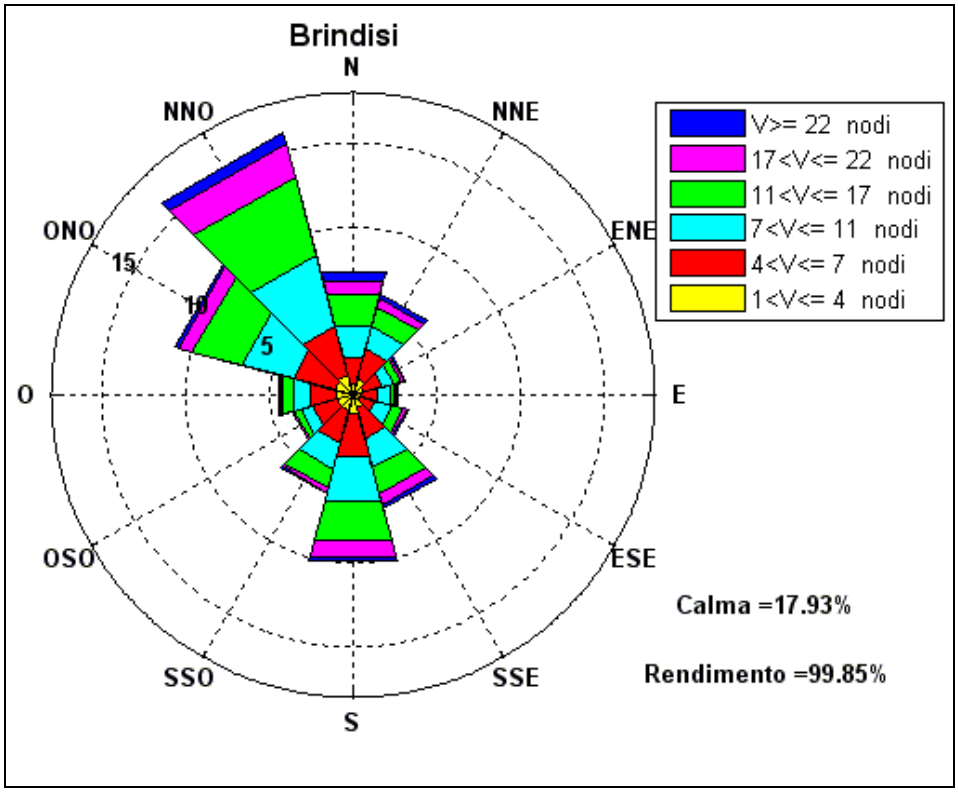


Figura 4.2.1: frequenze di apparizione annuali.

Se si classificano i dati secondo l'intensità si osserva che i venti con velocità minore di 7 nodi (calma, I e II classe Beaufort) rappresentano il 50.53% della popolazione, pertanto, si giunge alla soglia della III classe con una percentuale disponibile del 49.47%. I venti di III e IV classe costituiscono da soli il 39.79% della popolazione, mentre i venti con velocità maggiore di 17 nodi costituiscono il restante 9.68% del totale. Se si passa a considerare solo i venti con velocità superiore a 17 nodi si osserva che le frequenze maggiori spettano ai venti da NNO. Anche i venti spiranti da Nord, da Sud e da ONO presentano un'alta intensità, mentre i venti spiranti dalle altre direzioni sono caratterizzati da velocità piuttosto basse.

4.3 Frequenze di apparizione stagionali

4.3.1 Inverno

Durante la stagione invernale la classe delle calme risulta meno frequente che nelle altre stagioni; esse costituiscono infatti il 15.14% dell'intera popolazione (tabella 4.3.1.1, figura 4.3.1.1). Dalla distribuzione delle frequenze di apparizione dei venti per direzione di provenienza risulta che il maggior numero di osservazioni spetta ai venti da NNO, ONO e Sud la cui percentuale di presenze rispetto all'intera popolazione si aggira intorno a valori prossimi al 12%. Al secondo posto si collocano i venti da SSE con una frequenza del 8.8%. I venti da Nord fanno registrare una percentuale pari a circa il 7.5%, mentre al vento da NNE compete un frequenza pari al 7% di tutte le osservazioni. I restanti venti provenienti dal primo e secondo quadrante hanno un'incidenza piuttosto esigua con percentuali del 3%.

Se si classificano i dati secondo l'intensità si osserva che i venti con velocità minore di 7 nodi (calma, I e II classe Beaufort) rappresentano circa il 45% della popolazione, pertanto, si giunge alla soglia della III classe con una percentuale disponibile del 55%. I venti di III e IV classe costituiscono da soli il 41.6% della popolazione, mentre i venti con velocità maggiore di 17 nodi costituiscono il restante 13.7% del totale. Se si passa a considerare solo i venti con velocità superiore a 17 nodi si osserva che le frequenze maggiori spettano ai venti da NNO e da Nord. Anche i venti spiranti da NNE, da Sud, da ONO e da SSE presentano un'alta intensità, mentre i venti spiranti dalle altre direzioni sono caratterizzati da velocità piuttosto basse.

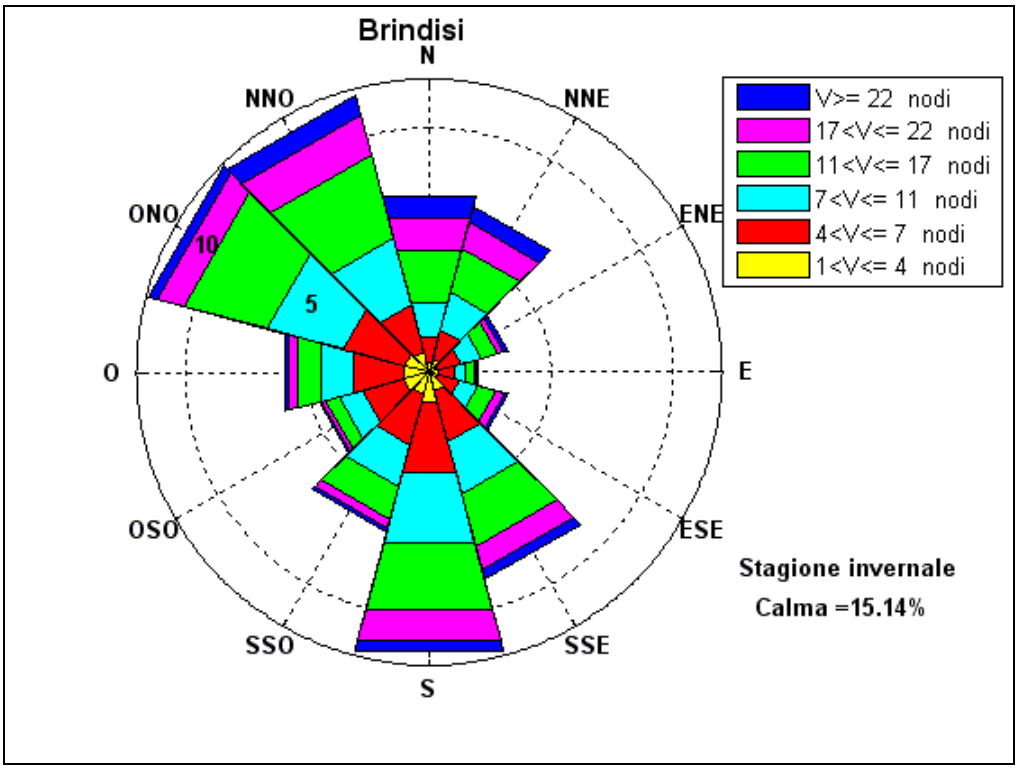


Figura 4.3.1.1: frequenze di apparizione invernali

	VELOCITA' (nodi)						
dir (°N)	**1<U≤4**	**4<U≤7**	**7<U≤11**	**11<U≤17**	**17<U≤22**	**U>22**	**TOT**
0	0.44	1.03	1.48	2.21	1.36	0.95	7.47
30	0.54	1.25	1.58	1.87	1.12	0.67	7.03
60	0.39	0.96	0.85	0.69	0.26	0.18	3.33
90	0.36	0.71	0.48	0.33	0.15	0.07	2.10
120	0.39	0.88	0.80	0.78	0.38	0.13	3.36
150	0.81	2.15	2.17	2.26	0.99	0.40	8.78
180	1.23	3.04	2.98	2.82	1.32	0.42	11.81
210	0.95	2.12	1.77	1.41	0.38	0.12	6.75
240	1.10	1.75	0.99	0.57	0.17	0.08	4.66
270	1.09	2.08	1.42	1.02	0.36	0.18	6.15
300	1.03	2.61	3.24	3.53	1.10	0.41	11.92
330	0.86	1.99	2.82	3.53	1.71	0.79	11.70

Tabella 4.3.1.1: frequenze invernali.

4.3.2 Primavera

Dall'elaborazione delle registrazioni relative alla stagione primaverile emerge che la classe delle calme risulta molto frequente, esse costituiscono il 19.15%

dell'intera popolazione (figura 4.3.2.1, tabella 4.3.2.1). Dalla distribuzione delle frequenze di apparizione dei venti per direzione di provenienza risulta che il maggior numero di osservazioni spetta ai venti da NNO la cui percentuale di presenze rispetto all'intera popolazione si aggira intorno al 17%. Al secondo posto si collocano i venti da ONO e da S rispettivamente del 11.7% e del 10.7%. I venti da Nord e da SSE fanno registrare una percentuale pari a circa il 6%, mentre al vento da SSO compete un frequenza pari al 7% di tutte le osservazioni. I venti provenienti dal primo e secondo quadrante hanno un'incidenza piuttosto esigua con percentuali mediamente del 3%.

Se si classificano i dati secondo l'intensità si osserva che i venti con velocità minore di 7 nodi (calma, I e II classe Beaufort) rappresentano il 53.16% della popolazione, pertanto, si giunge alla soglia della III classe con una percentuale disponibile del 46.8%. I venti di III e IV classe costituiscono da soli il 39.1% della popolazione, mentre i venti con velocità maggiore di 17 nodi costituiscono il restante 7.8% del totale. Se si passa a considerare solo i venti con velocità superiore a 17 nodi si osserva che le frequenze maggiori spettano ai venti da NNO. Anche i venti spiranti da Sud, da ONO e da Nord presentano un'alta intensità, mentre i venti spiranti dalle altre direzioni sono caratterizzati da velocità piuttosto basse.

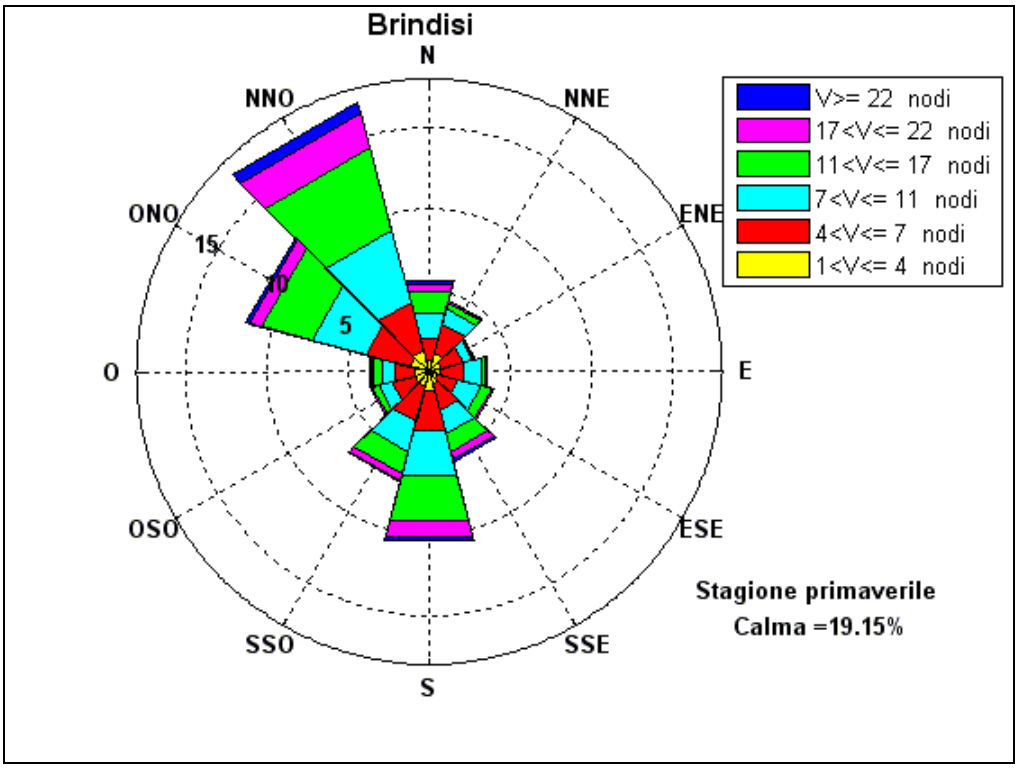


Figura 4.3.2.1: frequenze di apparizione primaverili.

	VELOCITA' (nodi)						
dir (°N)	1<U≤4	4<U≤7	7<U≤11	11<U≤17	17<U≤22	U>22	TOT
0	0.72	1.40	1.60	1.33	0.50	0.23	5.78
30	1.17	1.90	0.96	0.38	0.12	0.03	4.56
60	0.79	1.35	0.61	0.16	0.03	0.00	2.94
90	0.65	1.58	1.10	0.26	0.04	0.01	3.64
120	0.53	1.35	1.41	0.68	0.15	0.02	4.14
150	0.80	1.71	1.44	1.14	0.48	0.18	5.75
180	1.19	2.55	2.81	2.92	0.97	0.31	10.75
210	1.01	2.17	1.89	1.47	0.39	0.10	7.03
240	0.94	1.48	0.85	0.36	0.14	0.04	3.81
270	0.94	1.29	0.75	0.55	0.15	0.05	3.73
300	1.23	2.81	3.45	3.21	0.79	0.18	11.67
330	1.34	3.11	4.52	5.25	2.20	0.69	17.11

Tabella 4.3.2.1: frequenze primaverili.

4.3.3 Estate

Durante la stagione estiva la classe delle calme risulta molto frequente, esse costituiscono il 20.18% dell'intera popolazione (figura 4.3.3.1, tabella 4.3.3.1). Dalla distribuzione delle frequenze di apparizione dei venti per direzione di provenienza si osserva inoltre una concentrazione dei venti di NNO la cui percentuale di presenze rispetto all'intera popolazione si aggira intorno al 22.9%. Al secondo posto si collocano i venti da ONO con una frequenza superiore al 12%. I venti da Nord fanno registrare una percentuale superiore al 9%, mentre ai venti da Sud ed ENE compete un frequenza pari al 6% di tutte le osservazioni. I venti provenienti dal primo e secondo quadrante hanno un'incidenza piuttosto esigua con percentuali del 3%.

Se si classificano i dati secondo l'intensità si osserva che i venti con velocità minore di 7 nodi (calma, I e II classe Beaufort) rappresentano il 54.21% della popolazione, pertanto, si giunge alla soglia della III classe con una percentuale disponibile del 45.8%. I venti di III e IV classe costituiscono da soli il 39.3% della popolazione, mentre i venti con velocità maggiore di 17 nodi costituiscono il restante 6.5% del totale. Se si passa a considerare solo i venti con velocità superiore a 17 nodi si osserva che le frequenze maggiori spettano ai venti da NNO. Anche i venti spiranti da ONO e da Nord presentano un'alta intensità, mentre i venti spiranti dalle altre direzioni sono caratterizzati da velocità piuttosto basse.

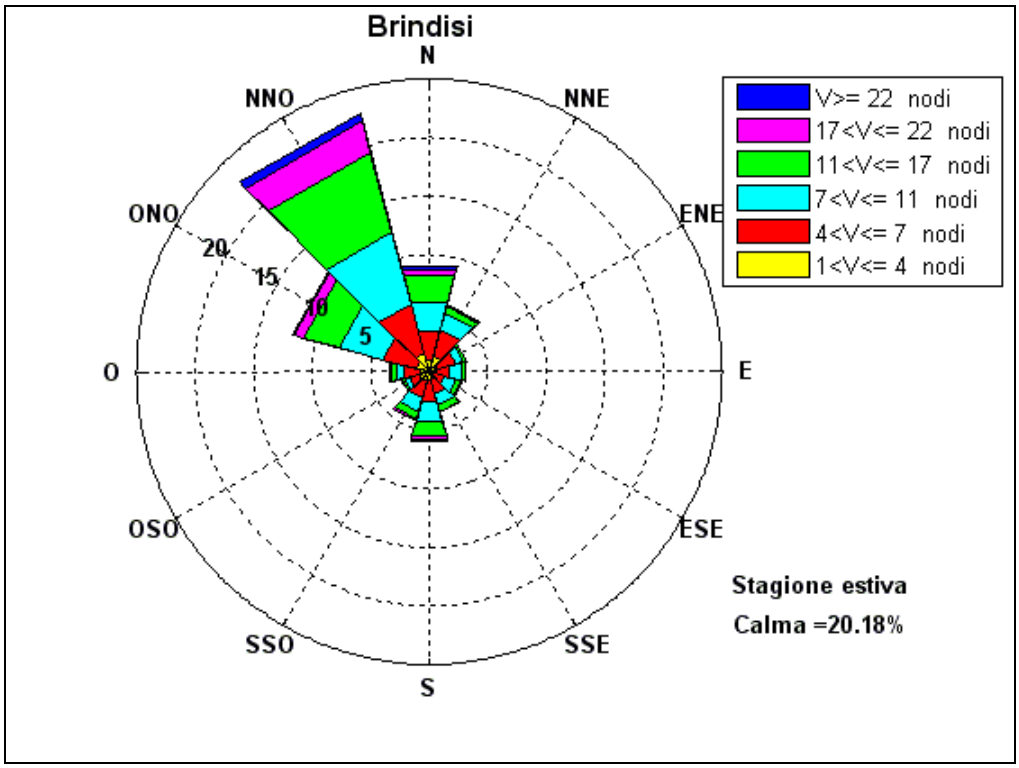


Figura 4.3.3.1: frequenze di apparizione estive.

	VELOCITA' (nodi)						
dir (°N)	**1<U≤4**	**4<U≤7**	**7<U≤11**	**11<U≤17**	**17<U≤22**	**U>22**	**TOT**
0	1.05	2.54	2.61	2.25	0.60	0.23	9.28
30	1.32	2.47	1.43	0.62	0.13	0.04	6.01
60	0.86	1.52	0.69	0.21	0.05	0.01	3.34
90	0.51	1.29	1.04	0.27	0.03	0.00	3.14
120	0.40	1.01	1.01	0.46	0.08	0.01	2.97
150	0.73	1.30	0.91	0.60	0.11	0.01	3.66
180	0.77	1.84	1.70	1.35	0.37	0.07	6.10
210	0.81	1.55	1.16	0.71	0.14	0.03	4.40
240	0.88	0.92	0.41	0.22	0.04	0.01	2.48
270	0.84	1.33	0.73	0.40	0.10	0.02	3.42
300	1.13	2.96	3.95	3.15	0.83	0.13	12.15
330	1.62	4.38	6.38	7.02	2.77	0.71	22.88

Tabella 4.3.3.1: frequenze estive.

4.3.4 Autunno

Dall'elaborazione delle registrazioni riferite alla stagione autunnale emerge che la classe delle calme risulta molto frequente, esse costituiscono il 17.28%

dell'intera popolazione (tabella 4.3.4.1, figura 4.3.4.1). Dalla distribuzione delle frequenze di apparizione dei venti per direzione di provenienza risulta che il maggior numero di osservazioni spetta ai venti da NNO la cui percentuale di presenze rispetto all'intera popolazione si aggira intorno al 13%. Al secondo posto si collocano i venti da Sud con una frequenza superiore al 12%. I venti da SSE fanno registrare una percentuale pari a circa il 10%, mentre ai venti da Nord e da NNE compete un frequenza superiore al 7% di tutte le osservazioni. I venti provenienti dal primo e secondo quadrante hanno un'incidenza piuttosto esigua con percentuali del 3%.

Se si classificano i dati secondo l'intensità si osserva che i venti con velocità minore di 7 nodi (calma, I e II classe Beaufort) rappresentano il 50% della popolazione, pertanto, si giunge alla soglia della III classe con una percentuale disponibile del 50%. I venti di III e IV classe costituiscono da soli il 39.4% della popolazione, mentre i venti con velocità maggiore di 17 nodi costituiscono il restante 10.7% del totale. Se si passa a considerare solo i venti con velocità superiore a 17 nodi si osserva che le frequenze maggiori spettano ai venti da NNO. Anche i venti spiranti da Sud, da Nord e da NNE presentano un'alta intensità, mentre i venti spiranti dalle altre direzioni sono caratterizzati da velocità piuttosto basse.

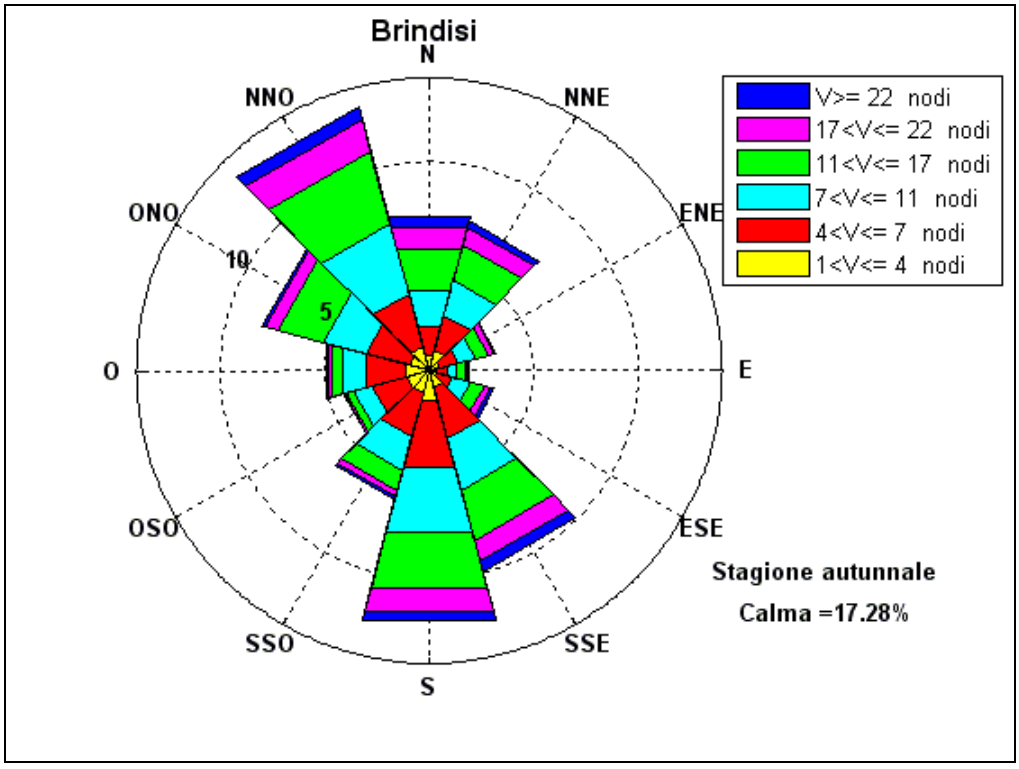


Figura 4.3.4.1: frequenze di apparizione autunnali.

	VELOCITA' (nodi)						
dir (°N)	**1<U≤4**	**4<U≤7**	**7<U≤11**	**11<U≤17**	**17<U≤22**	**U>22**	**TOT**
0	0.72	1.44	1.82	2.04	1.02	0.58	7.62
30	1.01	1.75	1.73	1.74	0.85	0.33	7.41
60	0.54	0.91	0.83	0.67	0.28	0.09	3.32
90	0.30	0.62	0.46	0.37	0.14	0.09	1.98
120	0.36	0.82	0.84	0.73	0.33	0.16	3.24
150	0.84	2.55	2.51	2.50	1.00	0.50	9.90
180	1.45	3.31	3.23	2.79	1.15	0.46	12.39
210	1.13	2.14	1.66	1.02	0.28	0.10	6.33
240	1.10	1.71	0.92	0.38	0.11	0.03	4.25
270	1.20	1.94	1.13	0.57	0.19	0.06	5.09
300	1.00	2.11	2.18	2.20	0.61	0.17	8.27
330	1.17	2.61	3.51	3.56	1.58	0.63	13.06

Tabella 4.3.4.1: frequenze autunnali.

5 MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA

5.1 Generalità

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.

Nella presente relazione attraverso l'applicazione di un idoneo modello matematico sono stati elaborati i piani d'onda che riproducono l'andamento dei raggi d'onda dal largo fino al litorale in prossimità della centrale ENEL di Cerano.

5.2 Il modello matematico SWAN

La propagazione del clima ondoso da largo verso riva è stata simulata con il modello numerico **SWAN**, acronimo di **S**imulating **WA**ves **N**earshore, 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.

In funzione dei molteplici processi che l'algoritmo di calcolo del modello riesce a simulare, attraverso la sua applicazione nel caso del paraggio di Cerano è stato possibile riprodurre con buona approssimazione le trasformazioni delle onde dal largo fino alla costa in prossimità dell'area in esame.

Il modello SWAN 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(σ, θ)), 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.

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. Nelle propagazioni effettuate con lo SWAN è stato utilizzato uno spettro di tipo Jonswap con γ (coefficiente di picco dello spettro) pari a 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.

L'applicazione del modello prevede la definizione di una griglia di base rappresentativa della batimetria del paraggio; l'output del modello consiste nella definizione delle condizioni ondose, in ciascun nodo della griglia di calcolo fissata, espresse in termini di altezza d'onda, periodo e direzione.

Nello specifico il modello SWAN è stato applicato per riprodurre le trasformazioni dal largo verso costa delle onde estreme con tempo di ritorno T_r pari a 100 anni, e delle onde morfologiche, o equivalenti, significative per descrivere il trasporto solido longitudinale lungo il paraggio in esame.

5.3 Griglie di calcolo

Il primo passo nello studio di propagazione del clima ondoso dal largo verso la riva con il modello SWAN ha riguardato la preparazione di griglie di calcolo ricavate dalla batimetria in corrispondenza del paraggio di Cerano.

Le quote batimetriche al largo sono state desunte dalle carte nautiche della zona prodotte dall'Istituto Idrografico della Marina. Sono state utilizzate le tavole IIM n. 29 e n. 30, in scala 1:100.000; le tavole IIM sono state informatizzate e georeferenziate secondo la rappresentazione conforme di Gauss-Boaga con reticolato piano nel sistema nazionale (Gauss-Boaga) riferito all'ellissoide Roma 40.

Utilizzando un software commerciale di topografia, i punti batimetrici della tavola IIM sono stati opportunamente digitalizzati e quindi, attraverso l'interpolazione per triangolazione delle quote batimetriche, è stato ricostruito il modello digitale della batimetria da cui infine sono stati ricavati i valori di profondità nei nodi di griglie di calcolo prefissate.

Nella zona più prossima alla riva, le informazioni desunte dalla carta nautica IIM sono state integrate con i dati estratti dal rilievo batimetrico di dettaglio effettuato nella zona di intervento.

Per l'applicazione del modello è stato necessario determinare griglie differenti a seconda della direzione di provenienza del moto ondoso al largo.

Nello specifico per le mareggiate con direzione compresa tra 330°N e 60°N è stata predisposta una griglia generale orientata con l'asse delle X secondo la direzione 130°N, e con l'asse Y perpendicolare al primo ed orientato secondo la direzione 40°N; la griglia generale a maglia quadrata con passo di lunghezza pari a 50 m (figura 5.3.1.a e 5.3.1.b) è costituita da 580 righe (// asse X) e 960 colonne (// asse Y) ed ha origine nel punto di coordinate Gauss-Boaga 2756330E, 4509070N.

Per le mareggiate con direzione al largo 120°N, la griglia generale è stata orientata con l'asse delle X secondo la direzione Est (90°N) e con l'asse Y orientato secondo la direzione Nord (0°N); la maglia 50 x 50 m è costituita da 820 colonne (// asse Y) e 456 righe (// asse X) ed ha origine nel punto di coordinate 2774280E, 4483620N (figura 5.3.2.a e 5.3.2.b).

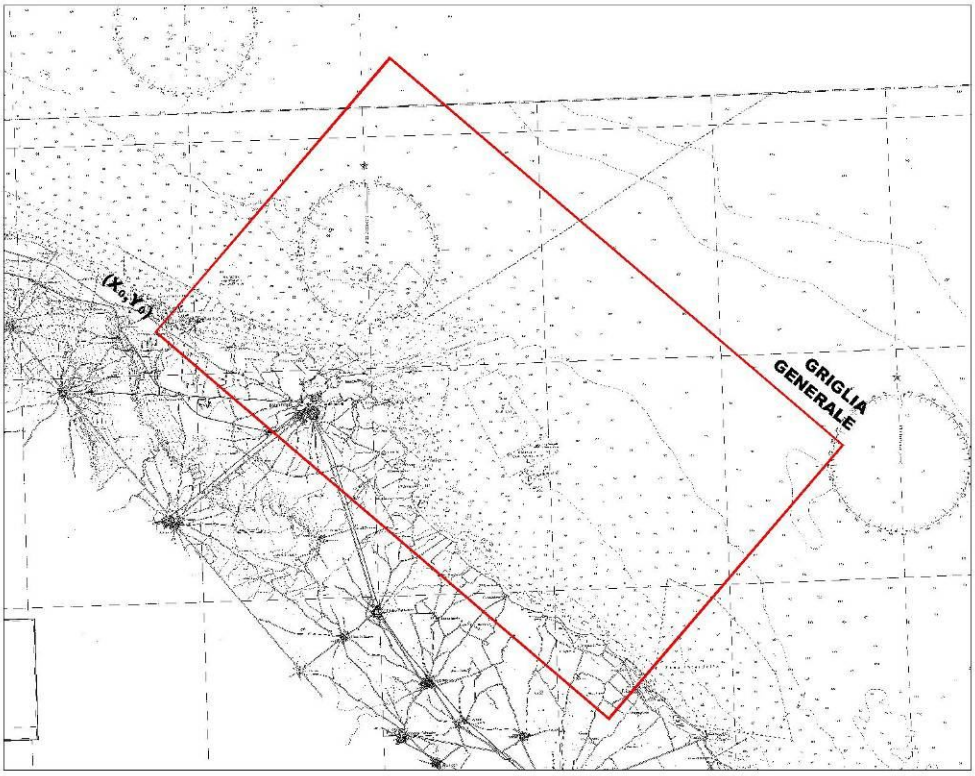


Figura 5.3.1.a: carta nautica IIM con individuazione della griglia di calcolo per le mareggiate comprese tra 330° - 90°N.

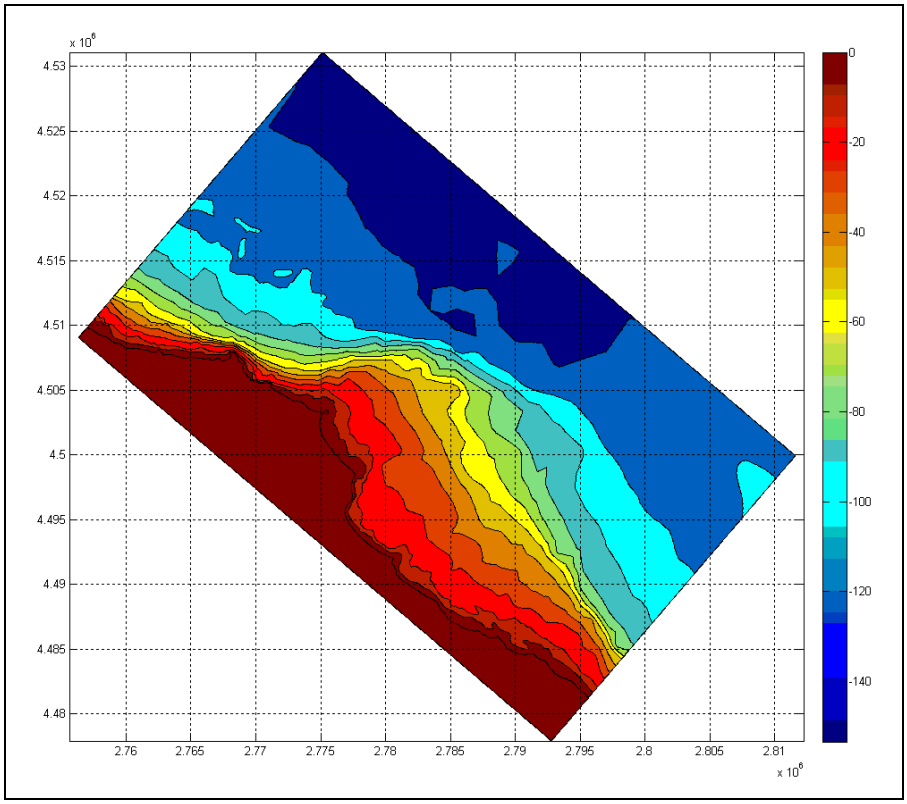


Figura 5.3.1.b: griglia di calcolo per le mareggiate comprese tra 330° - 90°N.

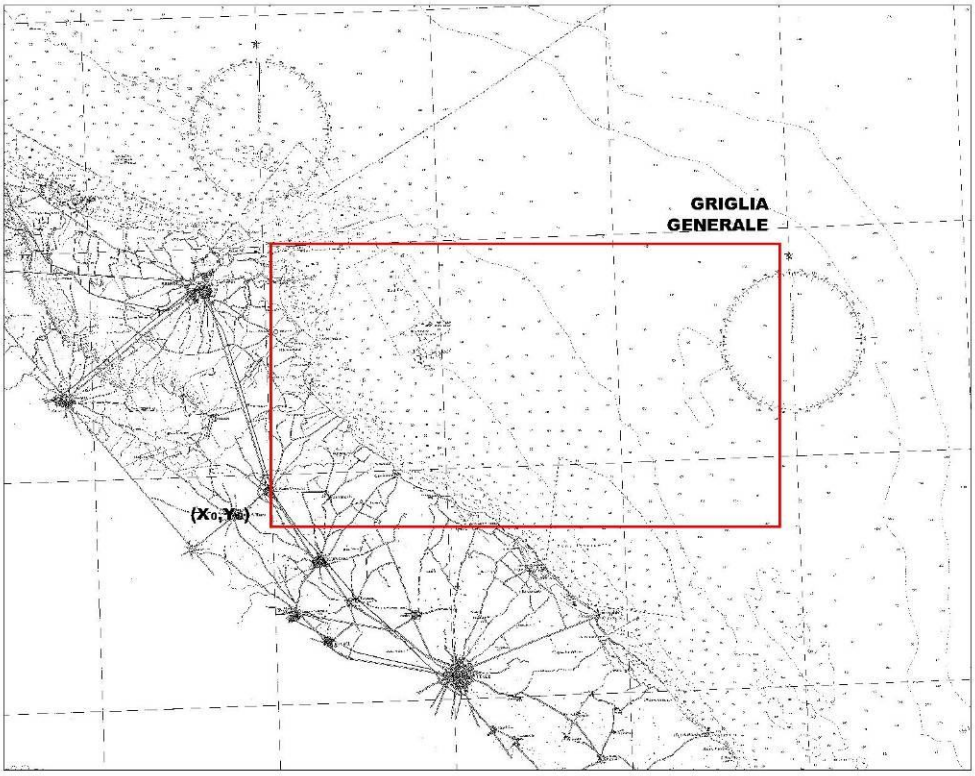


Figura 5.3.2.a: carta nautica IIM con individuazione della griglia di calcolo per le mareggiate da 120°N.

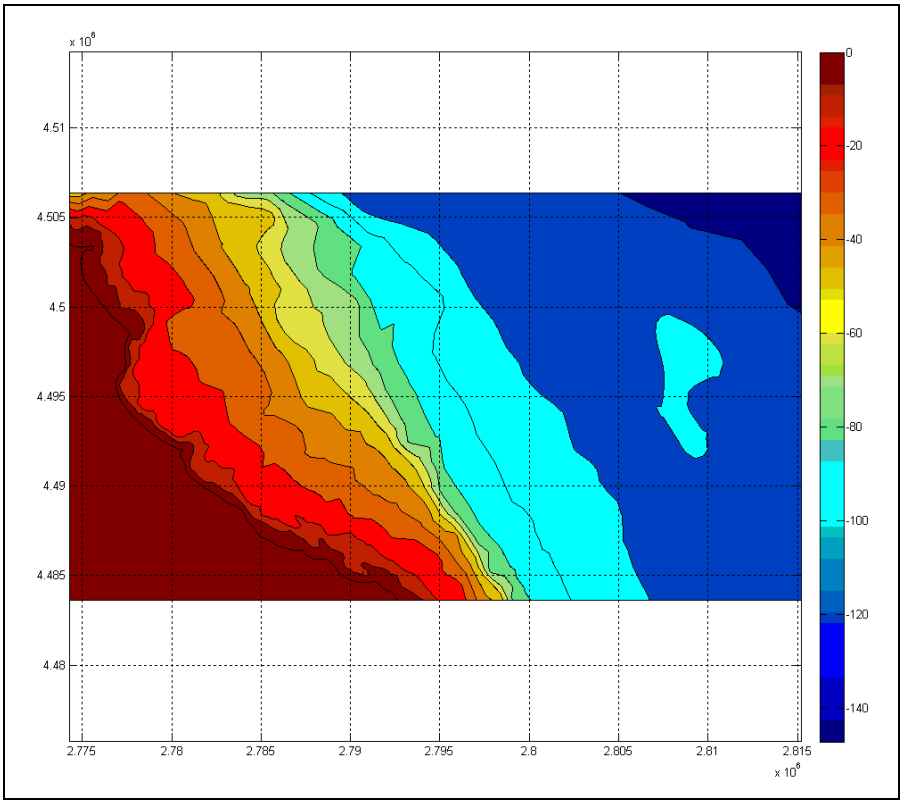


Figura 5.3.2.b: griglia di calcolo per le mareggiate da 120°N.

5.4 Propagazione sottocosta degli eventi estremi di moto ondoso

La propagazione da largo verso riva degli eventi estremi di moto ondoso associati ai periodi di ritorno più significativi, risulta utile nel dimensionamento e nella verifica delle strutture costiere, in cui sono necessari i valori delle onde di progetto che possono direttamente incidere su di esse.

Nel presente studio sono state propagate le onde riportate in tabella 5.4.1.

dir (°N)	Tempo di ritorno T_r 100 anni	
	$H_{s\ max}$ (m)	T_p (s)
330	5.69	9.40
0	5.69	9.40
30	5.31	9.30
60	5.31	9.30
90	4.03	8.60
120	4.03	8.60

Tabella 5.4.1: eventi estremi di moto ondoso al largo simulati con il modello SWAN.

Le figure da 5.4.1 a 5.4.6 rappresentano le mappe di agitazione ondosa ricostruite con il modello a partire dai valori di altezza d'onda di cui alla tabella precedente.

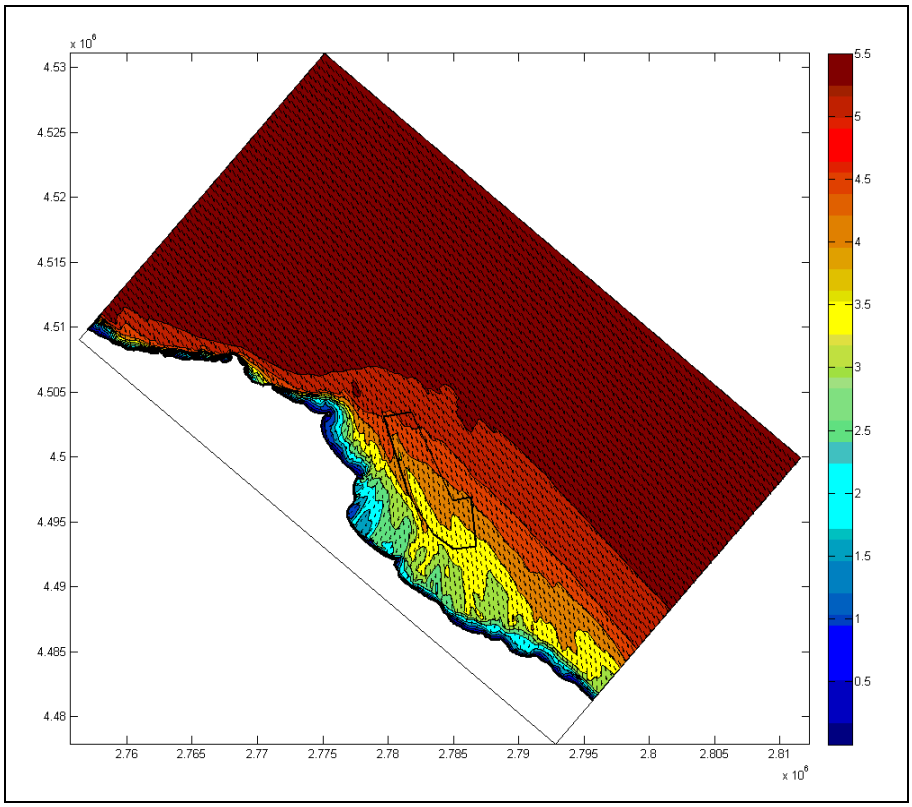


Figura 5.4.1: propagazione del moto ondoso da 330°N – Tr = 100anni.

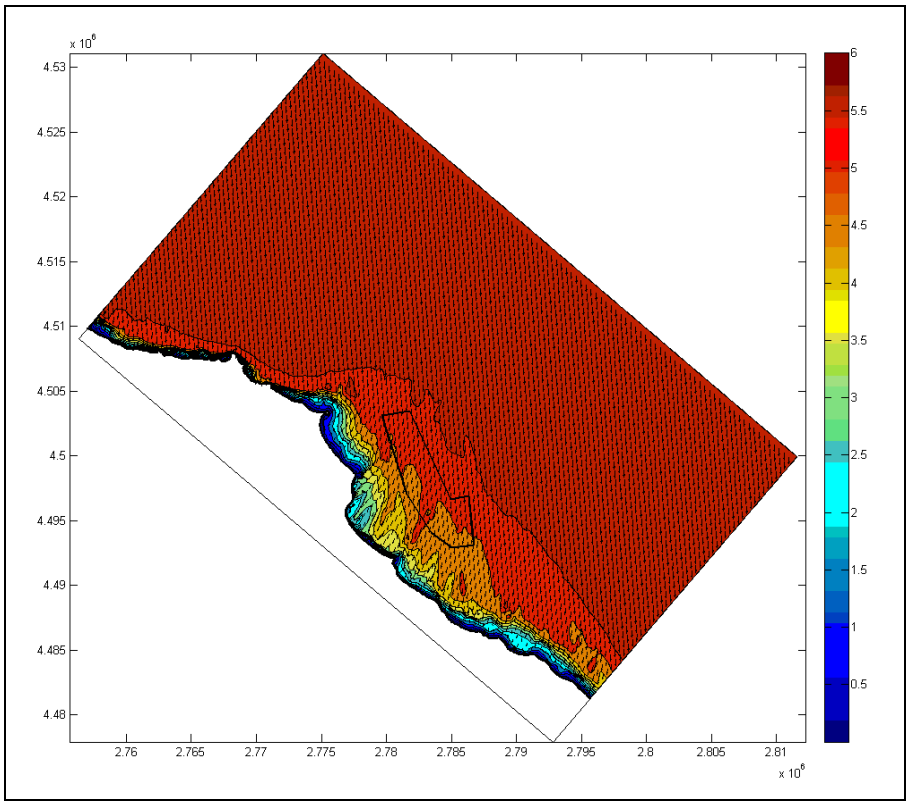


Figura 5.4.2: propagazione del moto ondoso da 0°N - Tr = 100 anni.

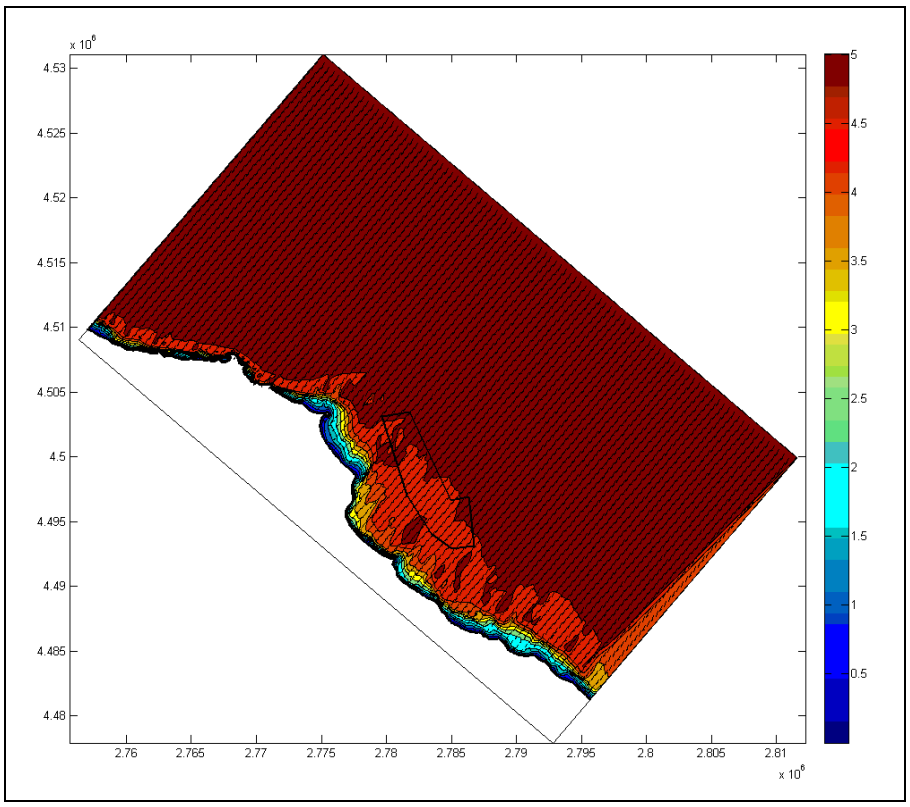


Figura 5.4.3: propagazione del moto ondoso da 30°N - Tr = 100 anni.

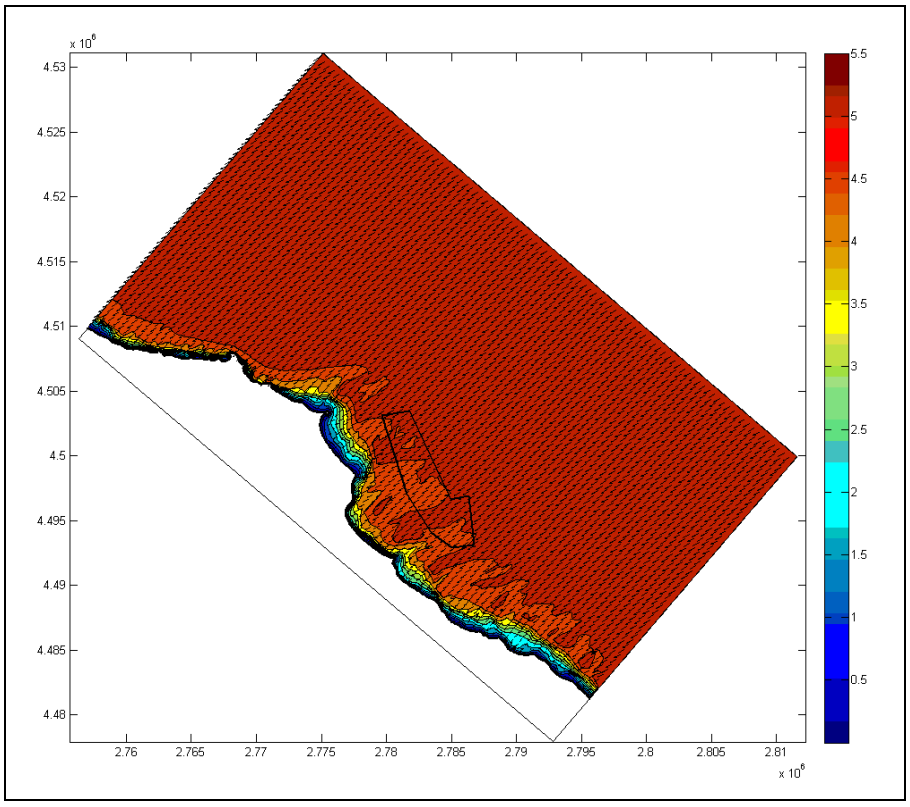


Figura 5.4.4: propagazione del moto ondoso da 60°N - Tr = 100 anni.

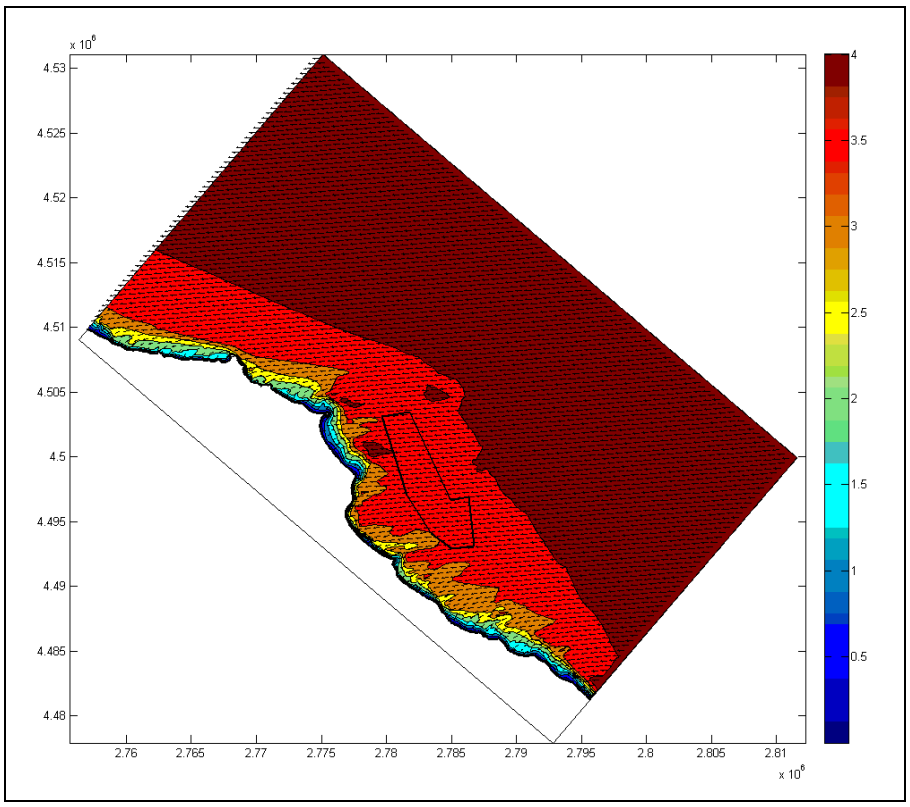


Figura 5.4.5: propagazione del moto ondoso da 90°N - Tr = 100 anni.

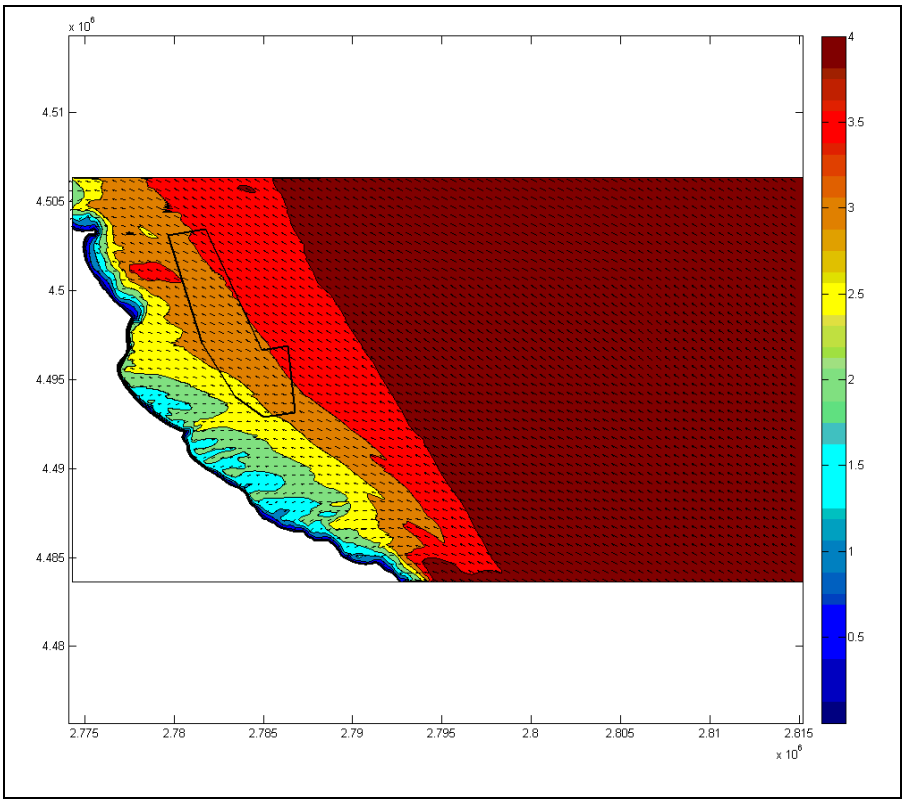


Figura 5.4.6: propagazione del moto ondoso da 120°N - Tr = 100 anni.

Dai piani d'onda precedentemente riportati sono stati estrapolati i valori di altezza d'onda calcolati in alcuni punti di misura ubicati in corrispondenza dello specchio acqueo interessato dalla realizzazione del parco eolico offshore (figura 5.4.7). Nella tabella 5.4.2 sono riportati i valori di altezza d'onda nei punti di misura precedentemente descritti per ciascuna delle mareggiate considerate.

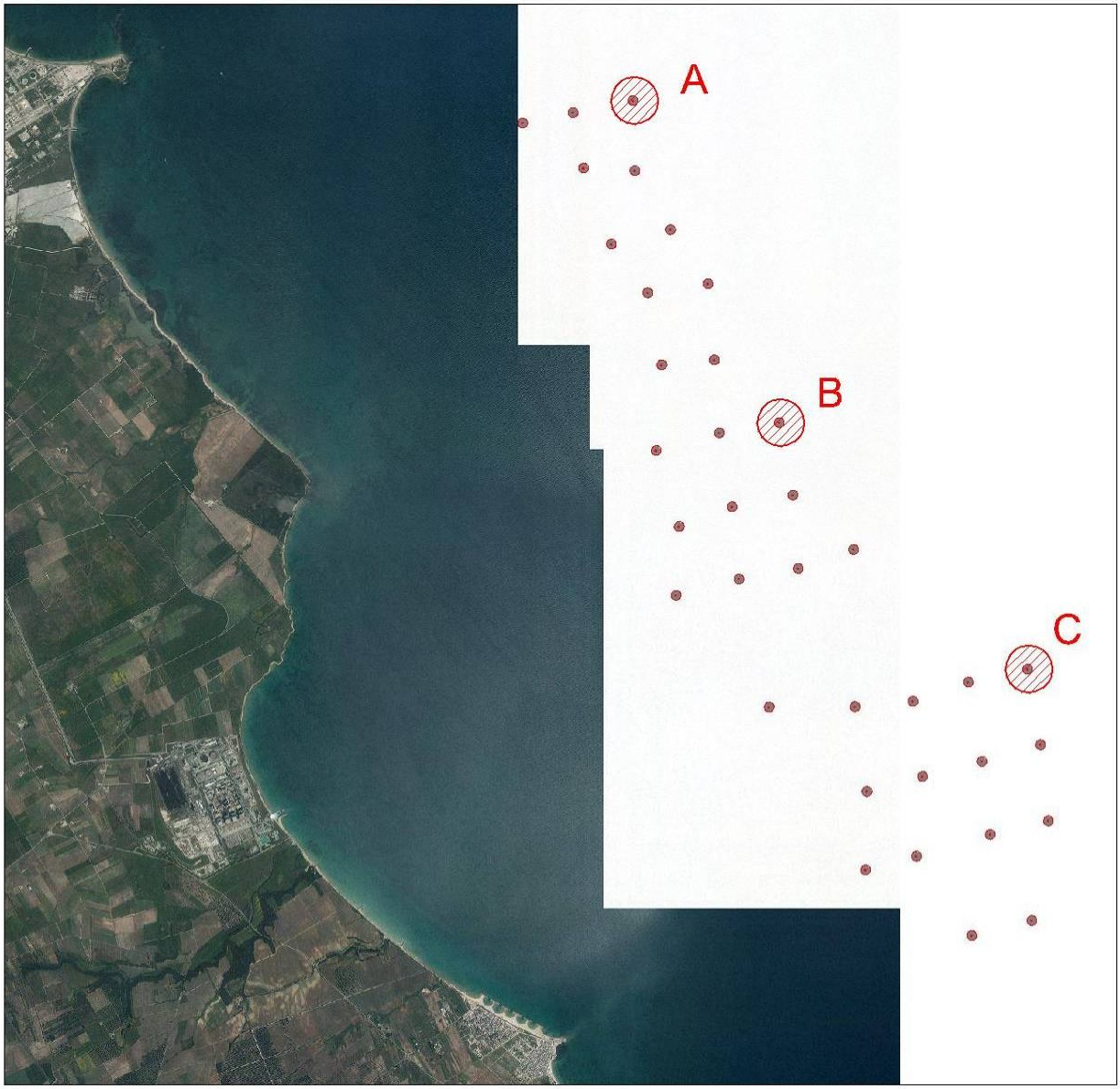


Figura 5.4.7: punti di misura in prossimità dell'area in esame.

onda al largo (T_r = 100)			punto A			punto B			punto C		
H_s (m)	T_p (s)	dir (°N)	H_s (m)	T_p (s)	dir (°N)	H_s (m)	T_p (s)	dir (°N)	H_s (m)	T_p (s)	dir (°N)
5.69	9.40	330	5.08	9.56	338	4.31	9.56	345	4.28	9.56	342
5.69	9.40	0	5.31	9.56	4	5.10	9.56	7	5.09	9.56	5
5.31	9.30	30	5.01	9.56	31	5.00	9.56	32	5.06	9.56	32
5.31	9.30	60	5.10	9.56	60	5.01	9.56	60	5.05	9.56	60
4.03	8.60	90	3.79	8.39	88	3.77	8.39	88	3.83	8.39	89
4.03	8.60	90	3.55	8.39	114	3.37	8.39	113	3.51	8.39	115

Tabella 5.4.2: altezze d'onda nei punti di misura in prossimità dell'area in esame.

I valori precedentemente riportati rappresentano l'altezza d'onda significativa H_s calcolata nei punti di misura selezionati, ossia l'onda sinusoidale semplice con ampiezza pari all'ampiezza media del terzo delle onde più alte e periodo pari al periodo medio delle onde predette.

Il valore dell'altezza d'onda massima H_{max} presente in un treno d'onda è invece indeterminabile a priori; comunque è possibile determinare il valore più probabile dell'altezza d'onda massima in funzione del numero di onde presenti nella registrazione.

Il valore di H_{max} può essere stimato in base a considerazioni sulla durata delle tempeste e sul numero di onde. In genere il valore dell'altezza d'onda massima varia tra:

$$H_{max} = 1.6 \div 2.0\ H_s$$

Longuet-Higgins (1952) dimostrarono che le onde seguono la distribuzione di Rayleigh e che per una tempesta con un numero relativamente alto di onde N, il valore atteso di altezza dell'onda più alta H_{max} è pari a:

$$H_{max} = 0.707\ H_s\ (\ln N)^{0.5}$$

Applicando la formula precedente al caso in esame, prendendo il massimo valore di altezza d'onda significativa H_s calcolata nei punti di misura adottati (H_s = 5.31m, T_p = 9.56s), nell'ipotesi di una mareggiata di 3 ore ($T_m = T_p / 1.25$ = 7.65s, N = 1412), si ottiene un valore di H_{max} pari a 10.11m.

Sottocosta, l'onda più alta potrebbe essere limitata dal frangimento; in ogni caso in acque profonde, oltre il limite di frangimento, il valore di H_{max} così determinato risulta appropriato.

5.5 Propagazione sottocosta delle onde di modellazione

Nei precedenti paragrafi è stata già richiamata l'importanza dell'individuazione delle onde di modellazione ai fini della determinazione del trasporto solido longitudinale. Attraverso il modello matematico SWAN sono stati riprodotti i piani d'onda relativi alle onde di modellazione, o morfologiche, riportate nella tabella 5.5.1.

	dir (°N)	$H_{s\ max}$ (m)	T_p (s)
	330	1.11	5.69
	0	1.19	6.01
	30	1.09	6.11
	60	1.15	5.88
	90	0.68	5.40
	120	0.87	5.33
paraggio	**9**	1.05	5.88

Tabella 5.5.1: onde di modellazione simulate con il modello SWAN.

Le figure da 5.5.1 a 5.5.7 rappresentano le mappe di agitazione ondosa ricostruite con il modello a partire dai valori di altezza d'onda di cui alla tabella precedente.

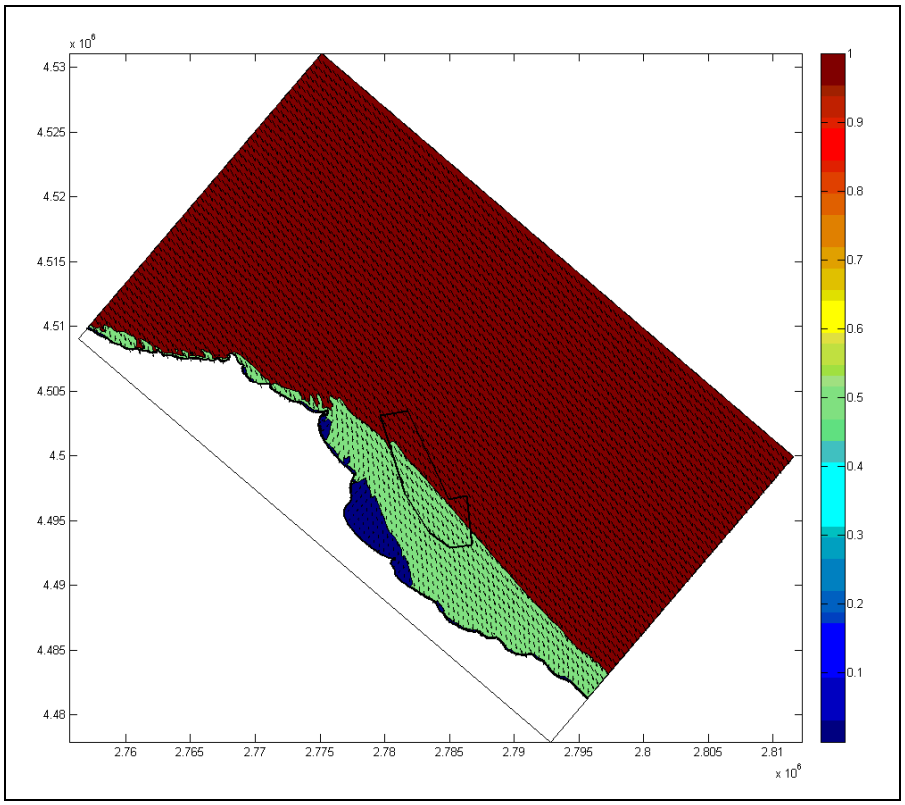


Figura 5.5.1: propagazione del moto ondoso da 330°N – Hs = 1.11m, Tp = 5.69s.

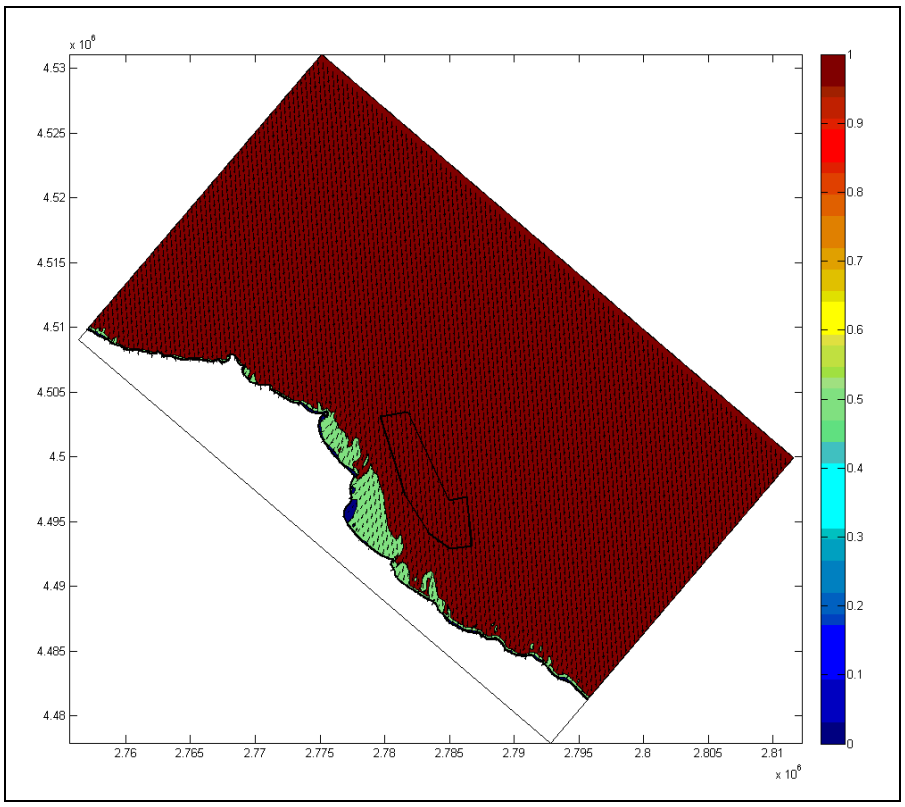


Figura 5.5.2: propagazione del moto ondoso da 0°N - Hs = 1.19m, Tp = 6.01s.

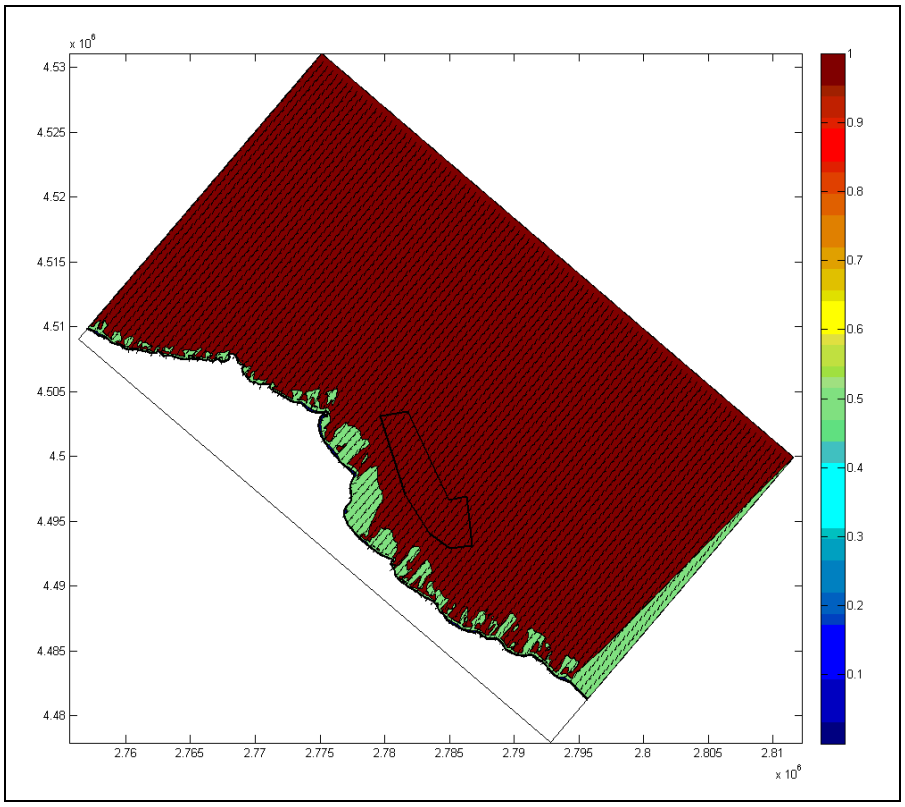


Figura 5.5.3: propagazione del moto ondoso da 30°N - Hs = 1.09m, Tp = 6.11s.

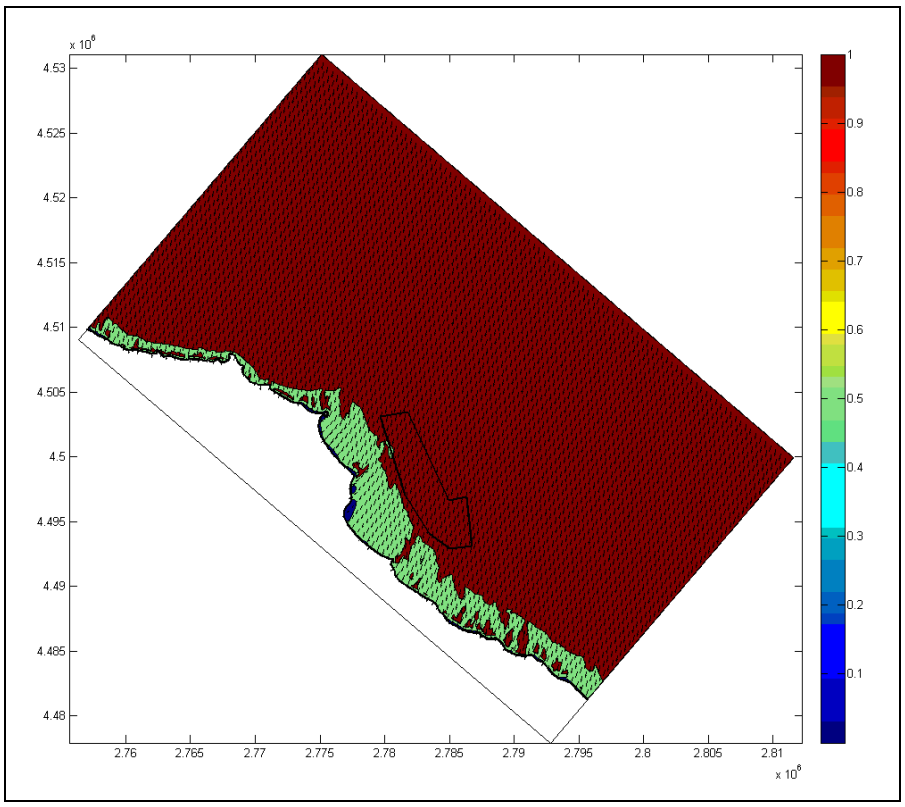


Figura 5.5.4: propagazione del moto ondoso da 60°N - Hs = 1.15m, Tp = 5.88s.

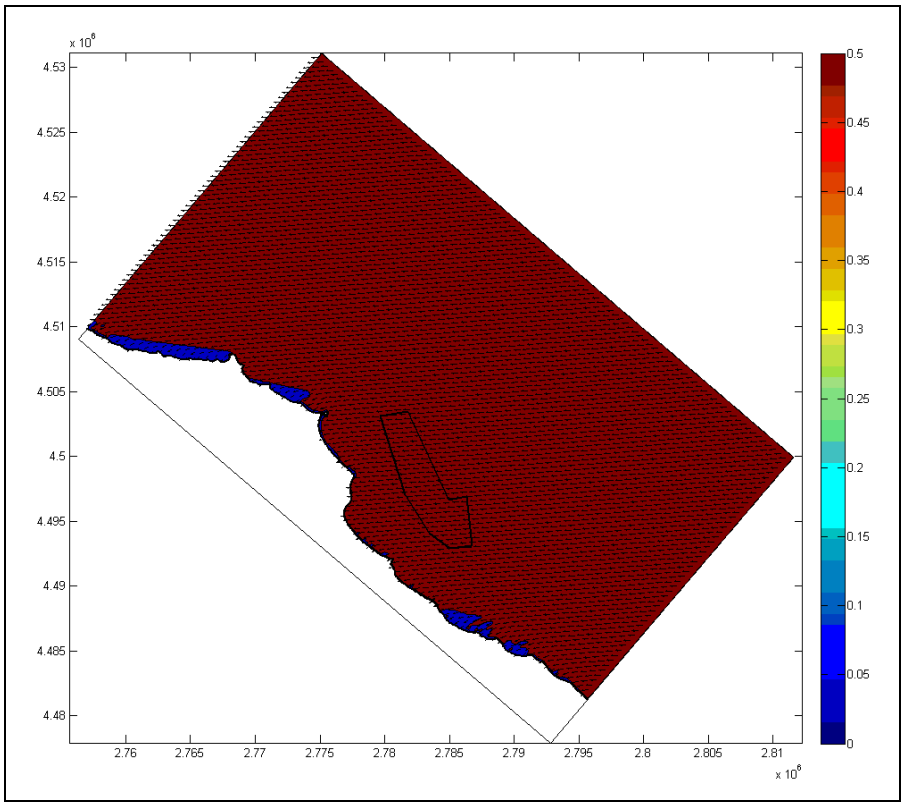


Figura 5.5.5: propagazione del moto ondoso da 90°N - Hs = 0.68m, Tp = 5.40s.

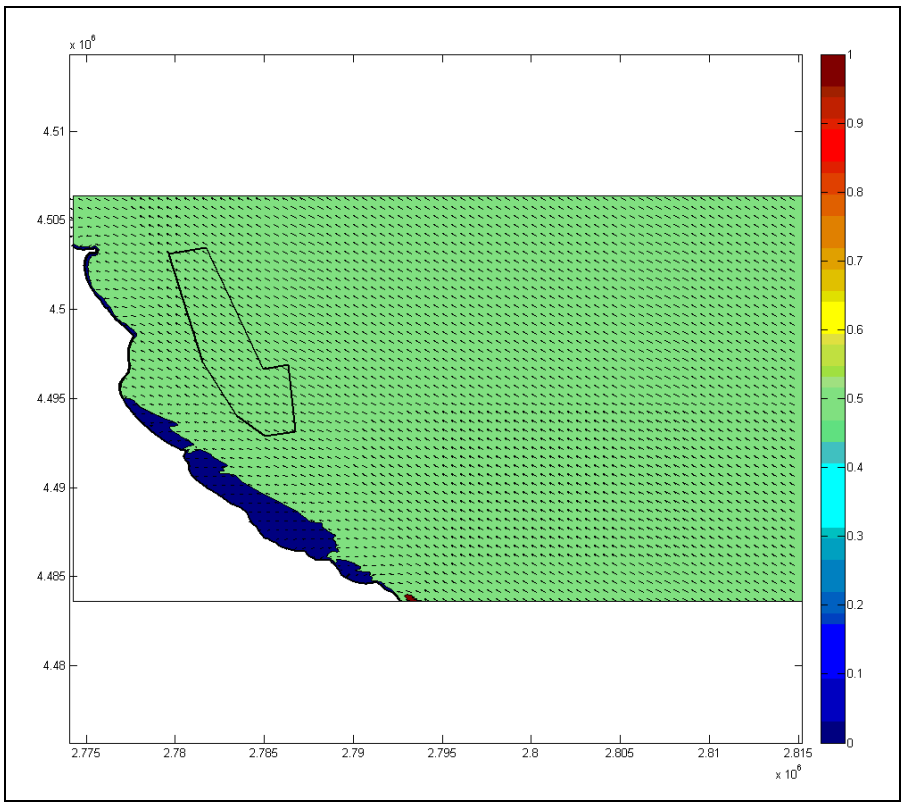


Figura 5.5.6: propagazione del moto ondoso da 120°N - Hs = 0.87m, Tp = 5.33s.

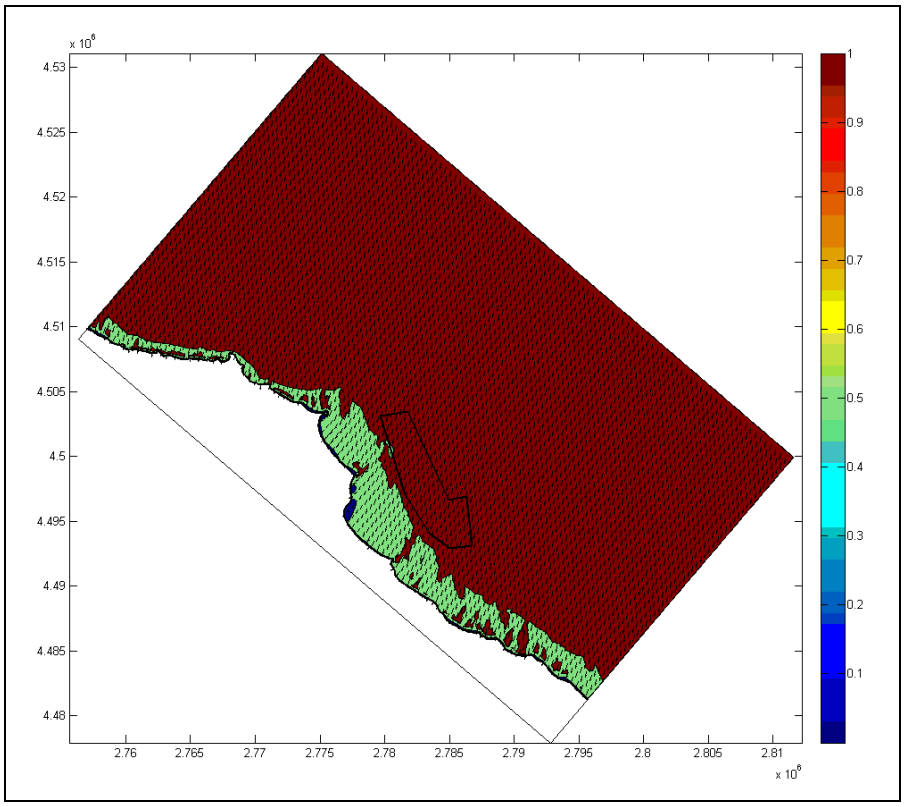


Figura 5.5.7: propagazione del moto ondoso da 9°N - Hs = 1.05m, Tp = 5.88s.

6 CORRENTI LONGITUDINALI

Il metodo per la valutazione del trasporto solido basato sul flusso dell'energia assume che la portata longshore dipenda dalla componente di flusso di energia parallelo alla linea di riva e valutato nella surf zone. Tale flusso viene calcolato partendo dall'approssimazione della conservazione del flusso di energia nella zona di shoaling ed usando la teoria delle onde di piccola ampiezza.

La linea di costa in esame è stata dapprima discretizzata in un opportuno numero di segmenti in modo da riprodurre l'andamento generale del litorale, quindi, per ciascuno dei segmenti individuati, attraverso i valori di altezza d'onda estrapolati dalle mappe di agitazione relative alle onde di modellazione, è stato calcolato il valore del flusso di energia del moto ondoso incidente al frangimento, all'interno della fascia attiva della spiaggia sommersa.

Il flusso di energia per unità di lunghezza della cresta dell'onda è:

$$\overline{P} = \overline{E} C_g = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g$$

dove:

- ρ densità dell'acqua;
- g accelerazione di gravità;
- H altezza d'onda;
- C_g celerità di gruppo.

Se il fronte dell'onda forma un angolo α con la linea di costa, il flusso di energia per unità di lunghezza della riva è:

$$\overline{P} \cos\alpha = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \cos\alpha$$

e la sua componente longshore P_l è:

$$P_l = \overline{P} \cos\alpha \sin\alpha = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \cos\alpha \sin\alpha$$

o, poiché:

$$\cos\alpha \sin\alpha = \frac{1}{2} \sin 2\alpha$$

si ha:

$$P_l = \frac{1}{16} \rho g H^2 C_g \sin 2\alpha$$

Al frangimento il valore è dato da:

$$P_{lb} = \frac{1}{16}\rho g H_b{}^2 C_b \sin 2\alpha_b$$

dove:

H_b altezza d'onda al frangimento;

C_b celerità di gruppo al frangimento.

Le equazioni sopra riportate sono valide se il treno d'onde è caratterizzato da un solo periodo ed una sola altezza. In realtà le onde di mare sono caratterizzate da una certa varietà di altezze con una distribuzione probabilistica di Rayleigh. Ciononostante le mareggiate vengono descritte in termini di altezza significativa H_s e pertanto si potrà scrivere che:

$$P_{ls} = \frac{1}{16}\rho g H_{sb}{}^2 C_{gb} \sin 2\alpha_b$$

Il valore di P_{ls} espresso dalla precedente formula non è in realtà il flusso di energia reale della mareggiata, giacché esso dovrebbe essere calcolato con riferimento ad H_{rms} (altezza d'onda quadratica media) che, nel caso di una distribuzione alla Rayleigh delle altezze d'onda, risulta correlato all'altezza significativa attraverso la relazione $H_s^2 = 2\ H_{rms}^2$. Ciò significa che P_{ls} è proporzionale al flusso di energia, e non uguale ad esso. Pertanto P_{ls} viene definito come il "fattore del flusso di energia longshore".

E' importante osservare che il fattore del flusso di energia longshore è proporzionale al flusso di peso sommerso della sabbia messa in movimento secondo la relazione:

$$I_l \left[\frac{N}{s}\right] = K\ [\text{adim.}]\ P_{ls} \left[\frac{N}{s}\right]$$

dove I_l è il flusso di peso sommerso della sabbia messa in movimento (ovvero la portata in termini di peso sommerso della sabbia, le cui dimensioni sono [forza]/[tempo]), K è un coefficiente adimensionale e P_{ls} è il fattore del flusso di energia longshore, le cui dimensioni sono [energia]/([lunghezza][tempo])=[forza]/[tempo].

Il trasporto volumetrico di sabbia Q può essere ottenuto come segue:

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho)ga'} P_{ls} = K' P_{ls}$$

Il fattore K' ha le dimensioni ([volume][tempo])/([forza][tempo]) e diversi autori hanno proposto un valore legato ai propri studi sperimentali. In definitiva, i flussi d'energia longshore sono proporzionali, attraverso diversi fattori, al trasporto solido longitudinale.

Da quanto detto sopra emerge che attraverso il calcolo dell'entità e del verso del fattore del flusso di energia longshore è possibile ottenere una stima qualitativa del trasporto solido longshore. In base a tale evidenza sono stati calcolati i valori del fattore del flusso di energia longshore in alcuni punti distribuiti uniformemente lungo il litorale in esame.

Dall'analisi dei risultati si riescono a cogliere indicazioni globali e, talvolta, puntuali sull'azione di singoli attacchi ondosi. Si deve rilevare come le caratteristiche delle onde utilizzate come input del calcolo, siano quelle relative alle mareggiate equivalenti provenienti da ogni direzione (tabella 4.5.1). Si deve infatti considerare che i flussi di energia che determinano il trasporto non si riferiscono ad ogni singola mareggiata che ha effettivamente investito il paraggio, bensì a valori medi annui.

Nelle figure da 6.1 a 6.7 i risultati ottenuti sono stati rappresentati con delle frecce orientate nel verso della componente longshore delle onde incidenti.

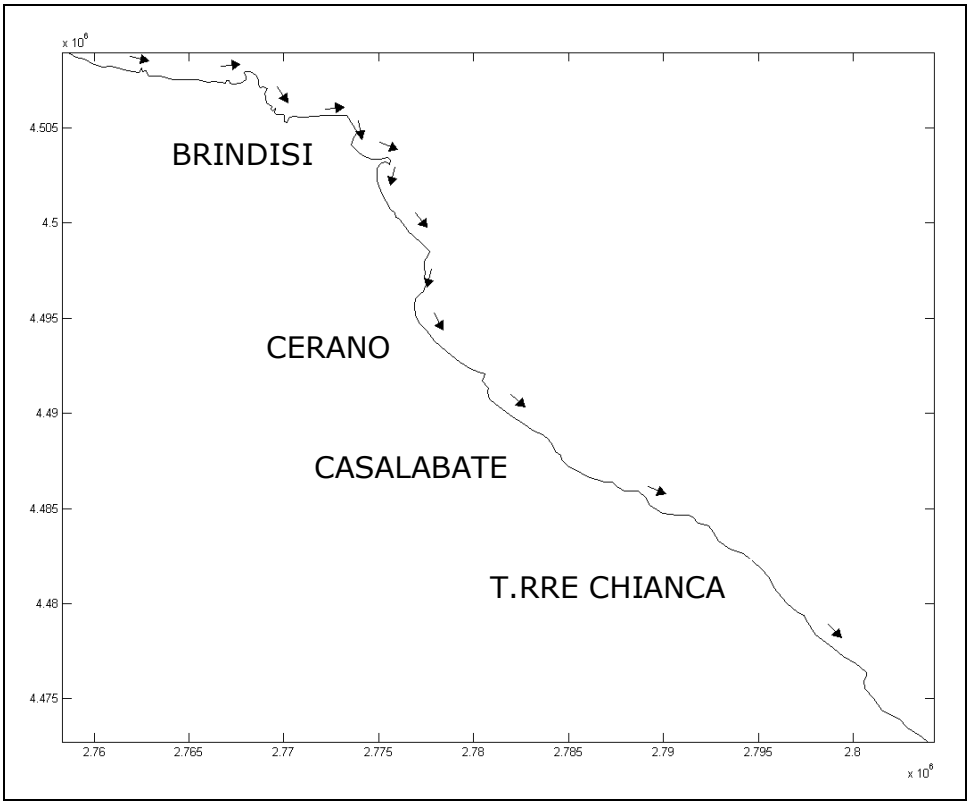


Figura 6.1: corrente longitudinale – mareggiata da NNO (330°N).

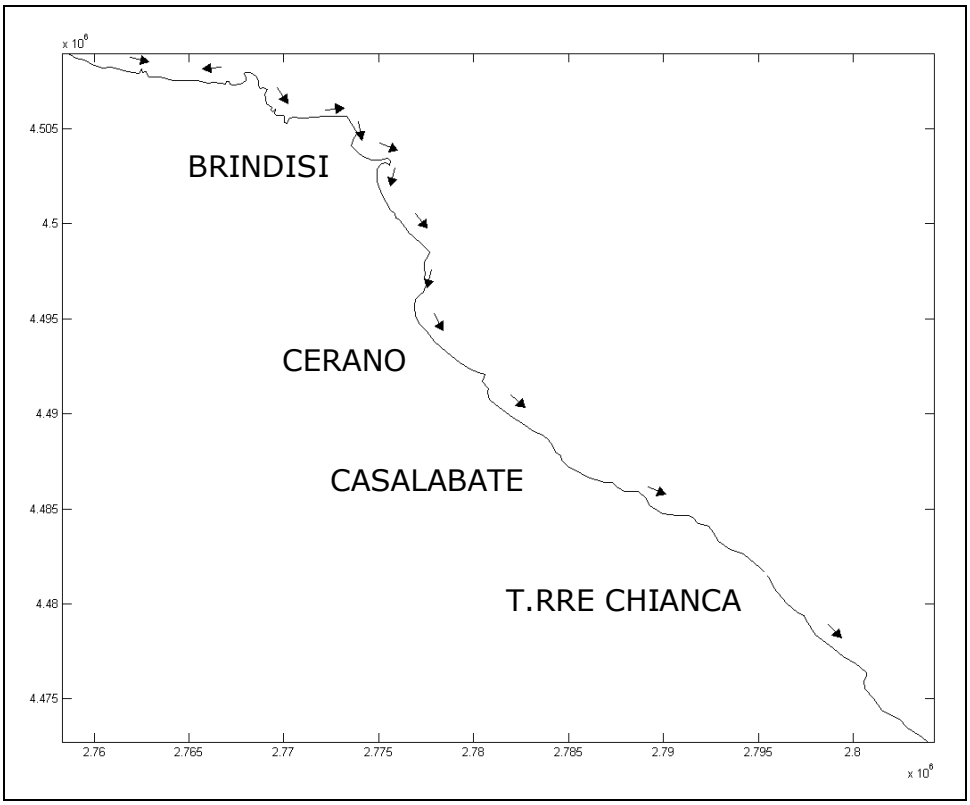


Figura 6.2: corrente longitudinale – mareggiata da Nord (0°N).

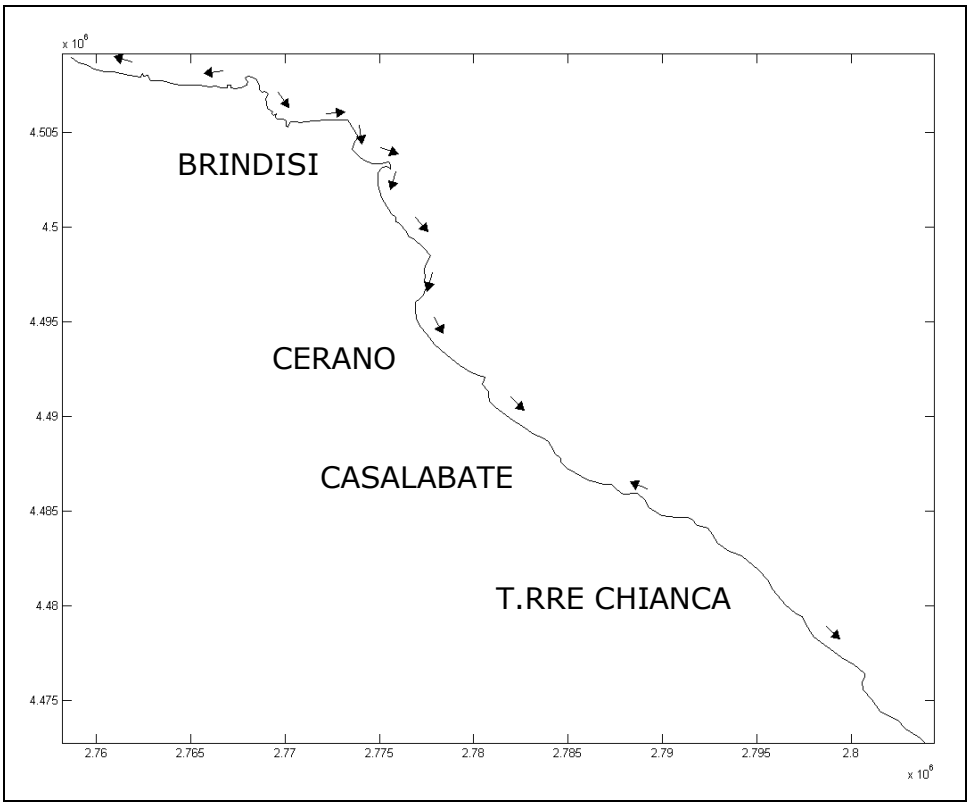


Figura 6.3: corrente longitudinale – mareggiata da NNE (30°N).

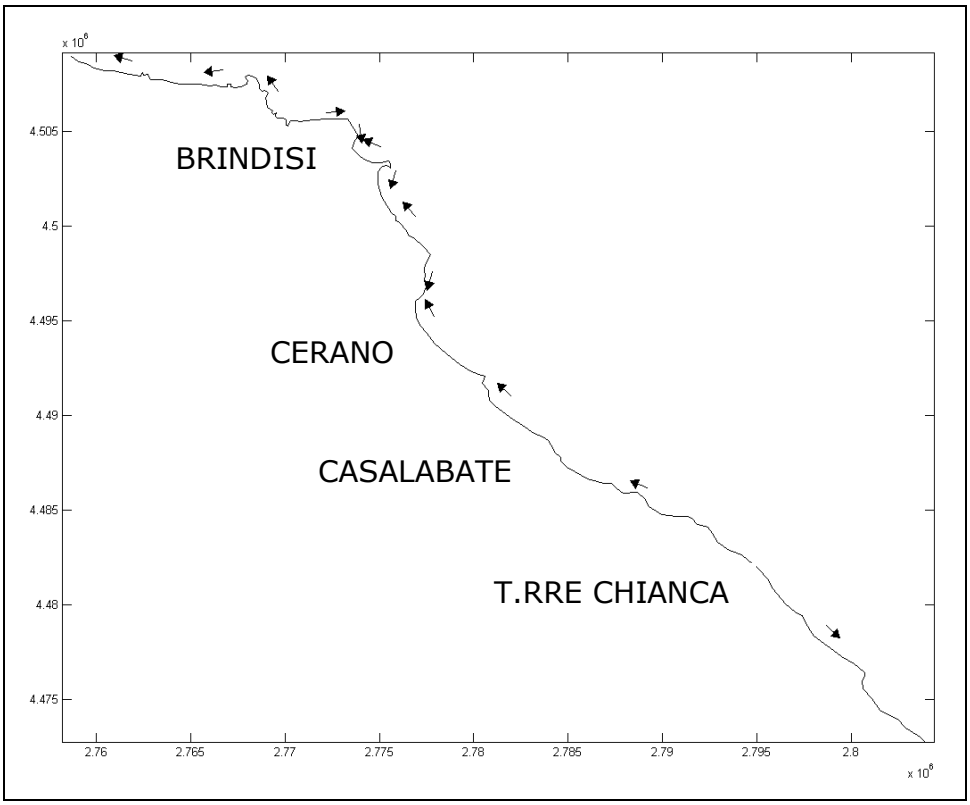


Figura 6.4: corrente longitudinale – mareggiata da ENE (60°N).

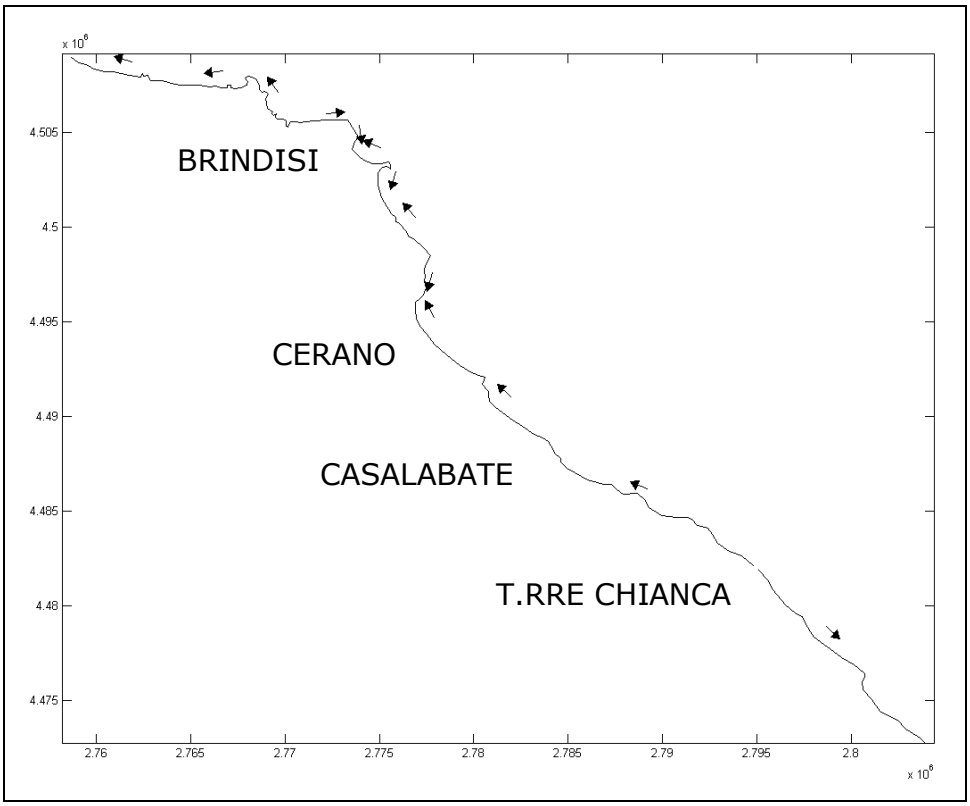


Figura 6.5: corrente longitudinale – mareggiata da Est (90°N).

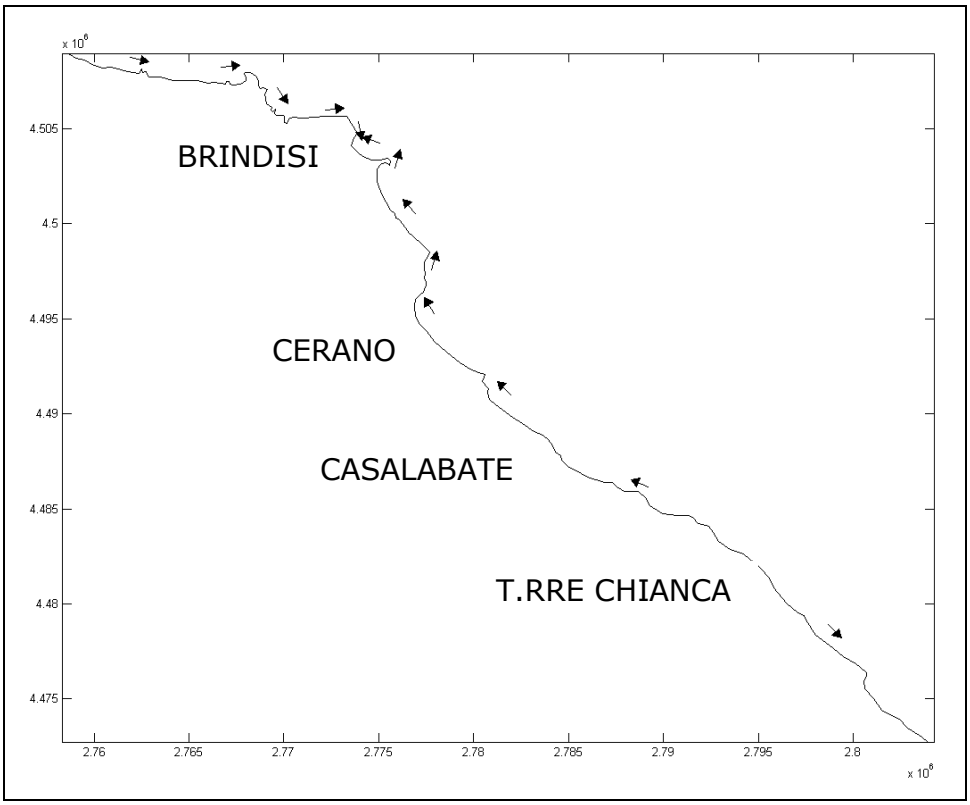


Figura 6.6: corrente longitudinale – mareggiata da ESE (120°N).

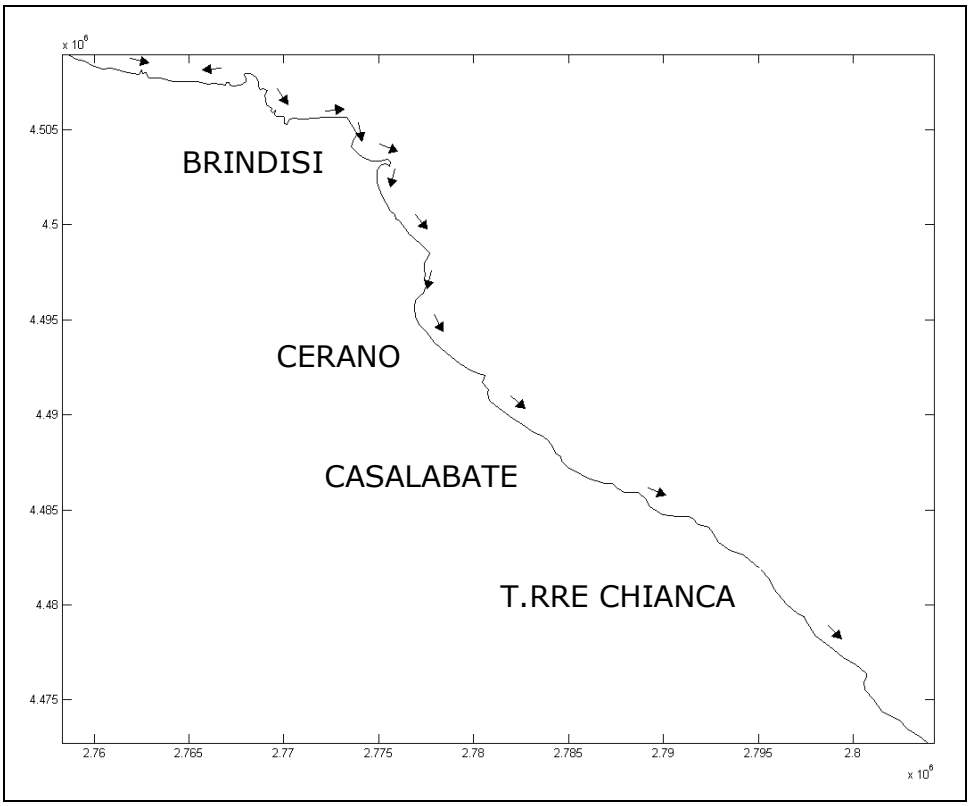


Figura 6.7: corrente longitudinale – mareggiata equivalente del paraggio (9°N).

Dall'analisi delle figure si osserva che il verso delle correnti longitudinali per le mareggiate provenienti da NNO (figura 6.1) e da Nord (figura 6.2) è orientato da NO verso SE lungo tutto il litorale esaminato da Brindisi fino a Torre Chianca (Lecce).

Anche le mareggiate da NNE (figura 6.3) determinano lungo il litorale di Cerano un verso delle correnti longitudinali diretto verso Sud, mentre lungo la costa a Sud di Casalabate si registra un inversione del verso delle correnti con la formazione di un punto di confluenza.

È importante evidenziare che le aree in cui si ha la confluenza delle correnti longitudinali costituiscono zone di potenziale accumulo dei sedimenti, quindi di avanzamento della linea di riva, mentre i tratti di litorale in cui si verifica la divergenza del verso delle correnti sono a rischio erosione.

Nel caso delle mareggiate da ENE (figura 6.4) e da Est (figura 6.5) il verso delle correnti longitudinali è mediamente orientato da SE verso NO con la presenza di punti di confluenza in prossimità di Cerano e di Torre Cavallo, immediatamente a Sud di Brindisi, e di un punto di divergenza dei versi delle correnti in corrispondenza di Torre Chianca.

Le mareggiate da ESE (figura 6.6) mostrano un andamento delle correnti longitudinali diretto da SE verso NO con l'eccezione del litorale in corrispondenza di Torre Chianca in cui si registra nuovamente un punto di divergenza.

Dal punto di vista delle durate di apparizioni, le mareggiate equivalenti che determinano in corrispondenza del litorale di Cerano correnti longitudinali con direzione NO-SE, rappresentano il 55% del totale delle apparizioni, mentre le mareggiate che determinano componenti longshore da SE verso NO ne costituiscono il 39%.

La risultante delle correnti longitudinali associate alle singole mareggiate è bene rappresentata dalla figura 6.7 relativa all'onda energeticamente equivalente dell'intero paraggio, in cui è evidenziato che il litorale esaminato è caratterizzato da un trasporto solido longshore prevalente orientato da NO verso SE; va comunque sottolineato che esiste un'alta percentuale di apparizione di eventi ondosi che determinano trasporto longitudinale con verso opposto.

7 EVOLUZIONE DEL LITORALE

7.1 Analisi diacronica delle linee di riva

Il litorale in prossimità di Cerano è costituito da falesia con presenza al piede di spiaggia sabbiosa di larghezza molto ridotta; la falesia è costituita da terreni sabbioso-argillosi, talora debolmente cementati, comunque facilmente erodibili dall'aggressione del moto ondoso incidente. Tale morfologia è presente su tutto l'arco di costa che si sviluppa da Punta della Contessa fino a Torre S. Gennaro, con assenza di spiaggia al piede lungo i tratti a Nord di Cerano, e fasce sabbiose molto ridotte lungo il versante meridionale della suddetta falcata.

La linea di costa è in forte erosione per effetto dell'incessante azione di smantellamento delle mareggiate che, abradendo il piede dei versanti della falesia, instaurano condizioni precarie di equilibrio alle quali conseguono crolli e cedimenti dei costoni.

Dalle ricerche ed analisi effettuate sui campioni di terreno prelevati dalla spiaggia emersa e sommersa in prossimità di Cerano, risulta che il materiale costituente la spiaggia è composto da sedimenti sabbiosi con bassissima percentuale della frazione fine. Tale dato indica che il materiale franato dalla falesia si impoverisce molto rapidamente della frazione fine che viene trasportata verso il largo ove si deposita, e non contribuisce quindi alla formazione delle spiagge. Se si considera inoltre la mancanza di scambio di sedimenti con i tratti di costa contigui, si evince che il materiale di approvvigionamento è molto esiguo per cui le spiagge presenti sono di dimensioni molto ridotte e non offrono un'adeguata protezione all'azione del mare.

Il consistente arretramento della linea di riva ha portato nel tempo alla realizzazione di alcune opere di difesa costiera. Già prima del 1992 il tratto di costa antistante la centrale ENEL di Cerano era stato protetto con una barriera radente in massi naturali, mentre intorno al 1992 in prossimità di Torre S. Gennaro furono realizzate 6 barriere frangiflutti distaccate in massi naturali; lungo la costa tra Cerano e Torre S. Gennaro sono stati realizzati dapprima 3 pennelli trasversali, con interasse di circa 700 metri, quindi dopo il 1997 altri due pennelli subito a Nord del tratto protetto con le barriere emerse.

La realizzazione delle barriere frangiflutti distaccate ha prodotto negli anni un notevole accumulo di sedimenti nella zona protetta dalle scogliere determinando la formazione delle caratteristiche configurazioni a tombolo (figura 7.1.1). Lungo il litorale protetto con i pennelli si è registrato un discreto accumulo di sedimenti sul lato esposto a Nord ed erosione al piede della falesia sul lato a Sud, significativo del verso prevalente del trasporto solido longitudinale diretto da Nord verso Sud (figura 7.1.2).

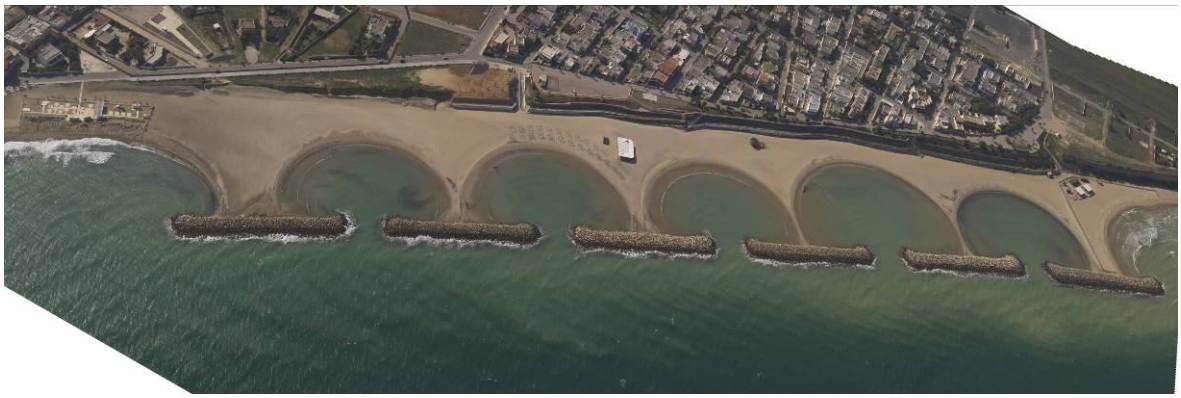


Figura 7.1.1: barriere frangiflutti in località Torre S. Gennaro.

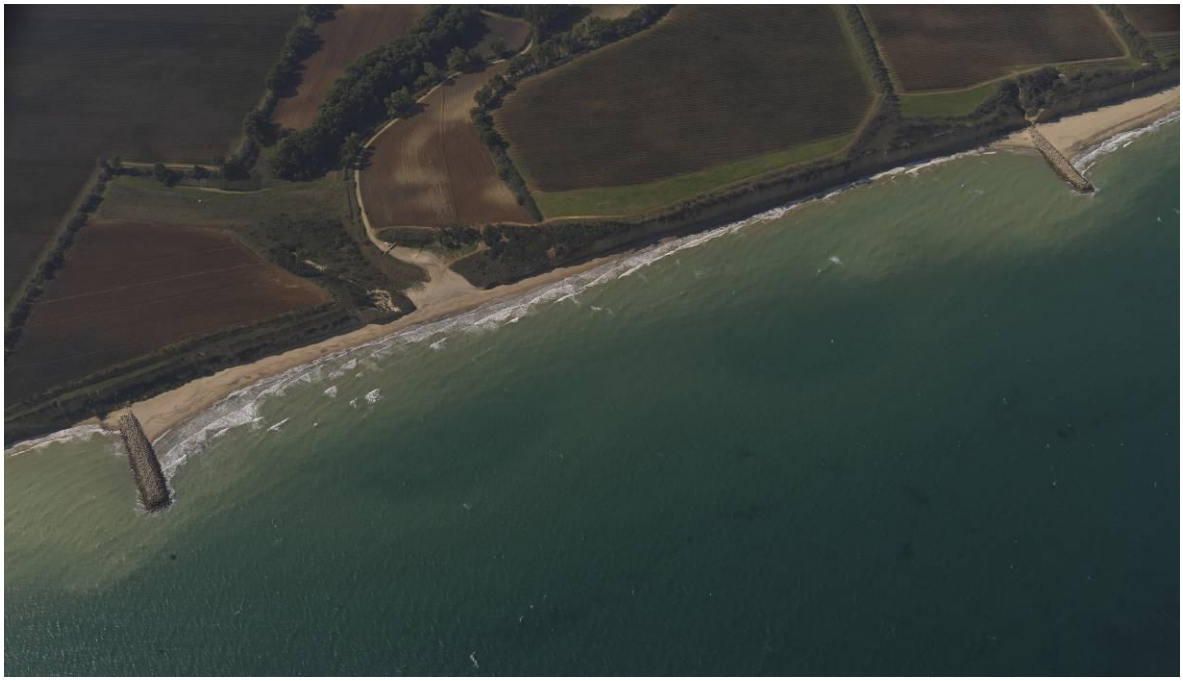


Figura 7.1.2: pennelli trasversali a Sud di Cerano.

Per ricostruire l'evoluzione storica recente della costa in prossimità di Cerano, nel tratto compreso tra Punta della Contessa e Torre S. Gennaro, sono state analizzate le linee di riva ricavate da una serie di riprese aeree della zona riferite ad epoche diverse. Nel presente lavoro sono state digitalizzate, ed opportunamente sovrapposte per il confronto, le linee di riva relative alle seguenti ortofoto:

- ortofoto 1992 (figura 7.1.3);
- ortofoto 1997 (figura 7.1.4);
- ortofoto 2005 (figura 7.1.5);
- ortofoto 2008 (figura 7.1.6);
- ortofoto 2010 (figura 7.1.7).

Nella procedura di sovrapposizione delle varie linee di riva ricostruite a partire dalle immagini aeree è stato tenuto conto delle approssimazioni dovute a diverse cause:

- incertezza nella georeferenziazione delle immagini aeree legata agli errori nella procedura di posizionamento dei punti di riferimento noti;
- incertezza nella individuazione della linea di riva dalle immagini aeree a causa della difficoltà di interpretazione delle foto aeree scattate durante le mareggiate;
- mancanza di indicazioni sulle condizioni di marea a cui le immagini aeree si riferiscono; in funzione della pendenza della spiaggia, infatti, a piccole variazioni di marea possono corrispondere consistenti escursioni della linea di riva desumibile;
- difformità tra le linee di riva ricavate da immagini aeree relative a profili di spiaggia invernali (ortofoto 2005, 2010) rispetto alle linee di riva estratte da immagini aeree scattate in periodo estivo (ortofoto 1992, 1997, 2008).

Per la presenza inevitabile di tali approssimazioni, in genere si tende a considerare gli scarti di valore inferiore a 5.0 metri nell'ambito dell'incertezza.

Figura 7.1.3: ortofoto 1992.

Figura 7.1.4: ortofoto 1997.

Figura 7.1.5: ortofoto 2005.

Figura 7.1.6: ortofoto 2008.

Figura 7.1.7: ortofoto 2010.

Il confronto tra le linee di riva è stato effettuato rispetto ad una linea di riferimento, o baseline, lungo una serie di transetti tracciati perpendicolarmente a quest'ultima (figura 7.1.8).

Per ciascun transetto individuato è stato restituito il valore del parametro NSM (Net Shoreline Movement) che rappresenta la distanza fra la più recente e la più vecchia delle due linee di costa messe a confronto.

Per l'analisi dell'evoluzione del litorale in esame è stato definito un asse di riferimento con un andamento che segue il profilo della costa da Nord verso Sud; tra i transetti è stato adottato un interasse pari a 20m. In totale sono stati individuati 421 transetti per una lunghezza complessiva del tratto di litorale esaminato pari a circa 8400 metri.

Il modello è stato applicato in cinque step in ciascuno dei quali sono state confrontate rispettivamente le linee di riva riferite ai seguenti archi temporali:

1) 1992 – 1997;
2) 1997 – 2005;
3) 2005 – 2008;
4) 2008 – 2010;
5) 1992 – 2010.

Nelle figure da 7.1.9 a 7.1.13 è riportato l'andamento degli scarti misurati tra le posizioni della linea di riva in riferimento a ciascuno degli archi temporali analizzati. Nella figura 7.1.14 è riportato invece l'andamento del rateo annuo medio di variazione della linea di riva calcolato nell'intero arco temporale analizzato con l'indicazione della deviazione standard ricavata dagli scarti riferiti a ciascun intervallo parziale.

Figura 7.1.8: transetti.

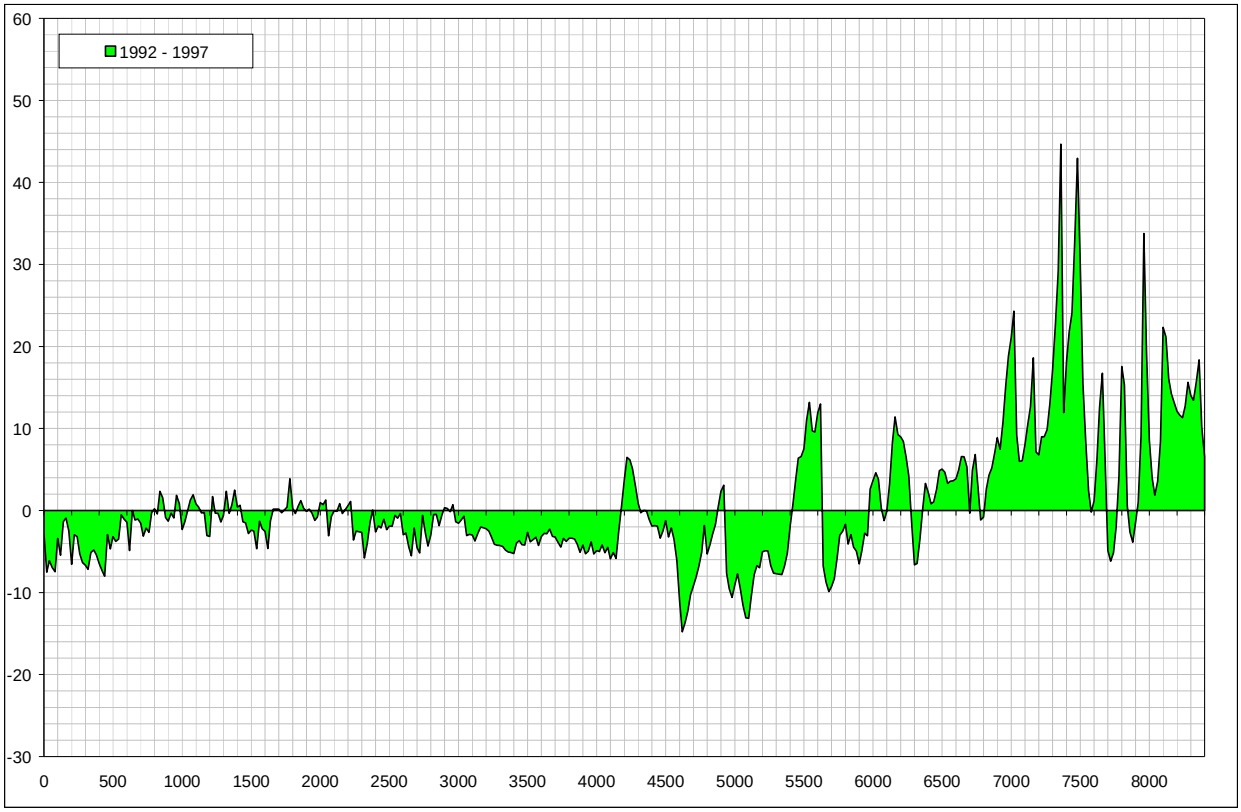


Figura 7.1.9: evoluzione litorale 1992 – 1997.

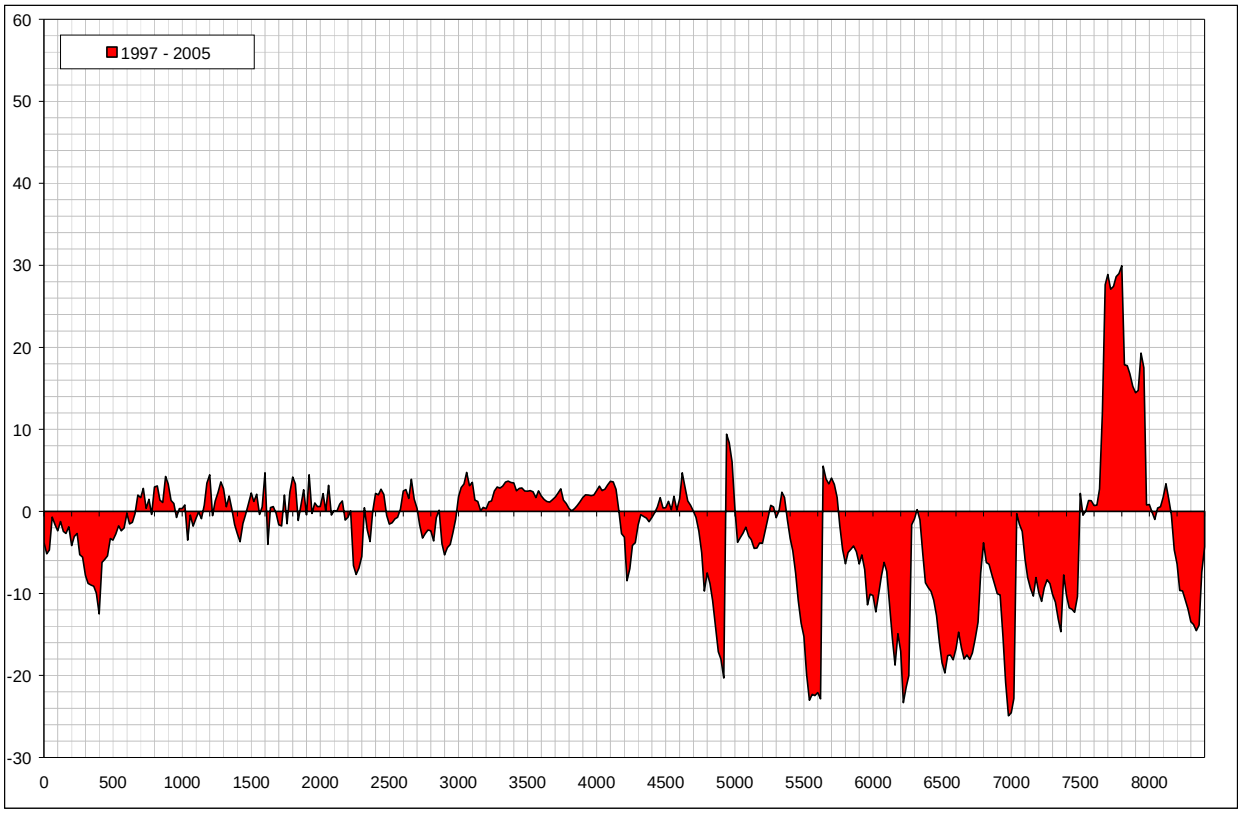


Figura 7.1.10: evoluzione litorale 1997 – 2005.

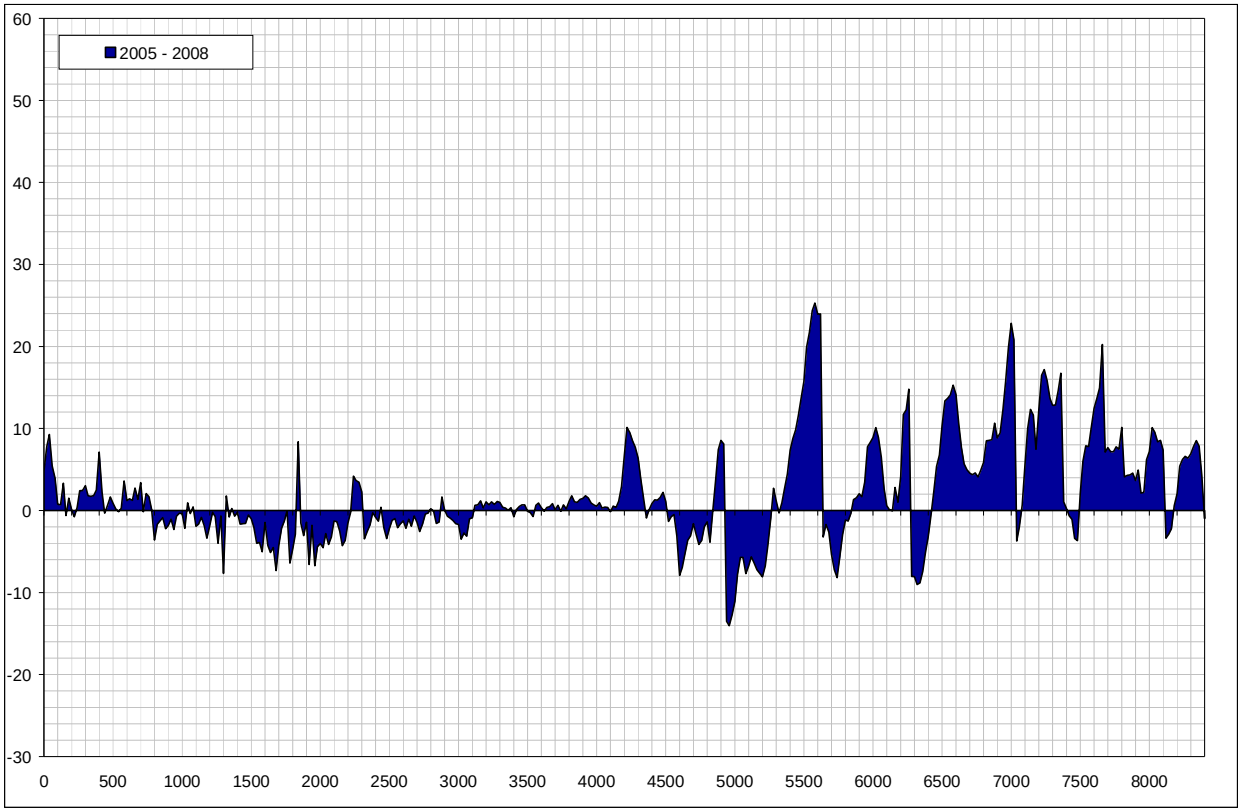


Figura 7.1.11: evoluzione litorale 2005 – 2008.

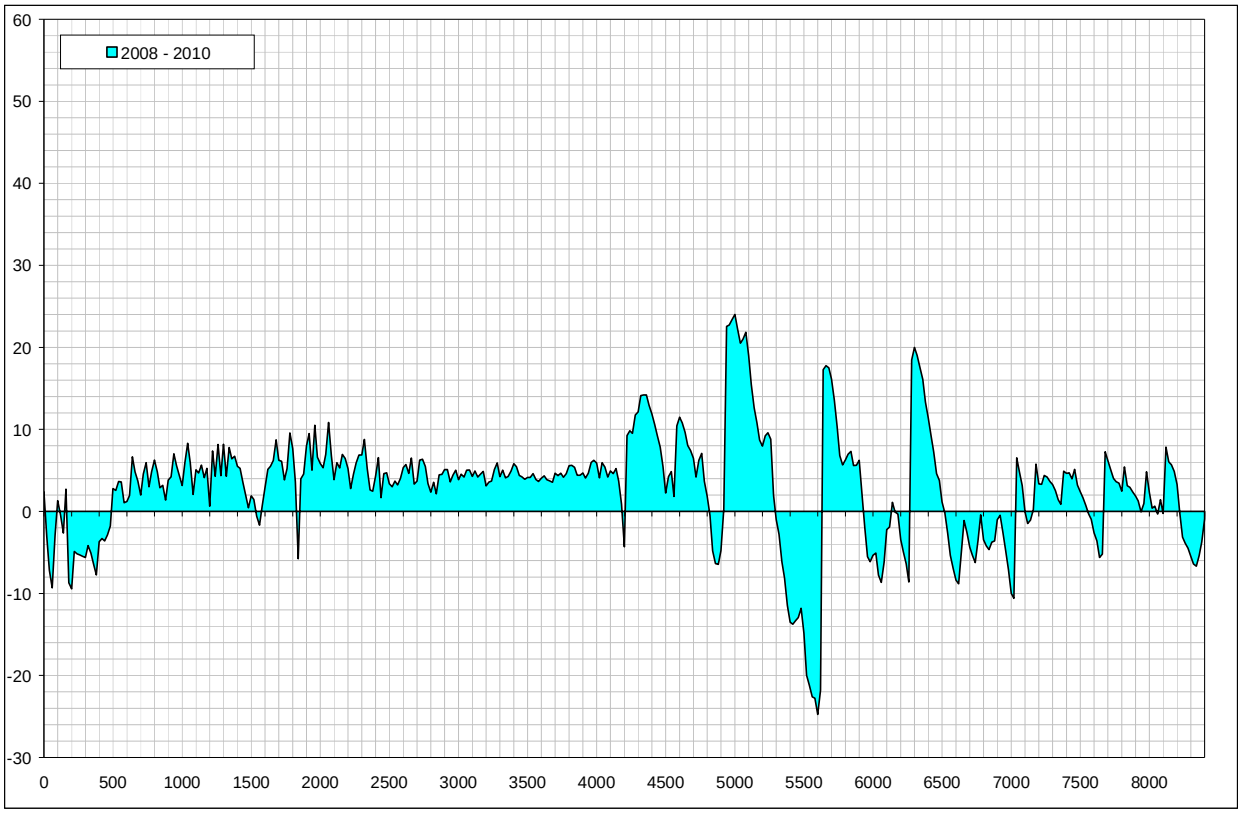


Figura 7.1.12: evoluzione litorale 2008 - 2010.

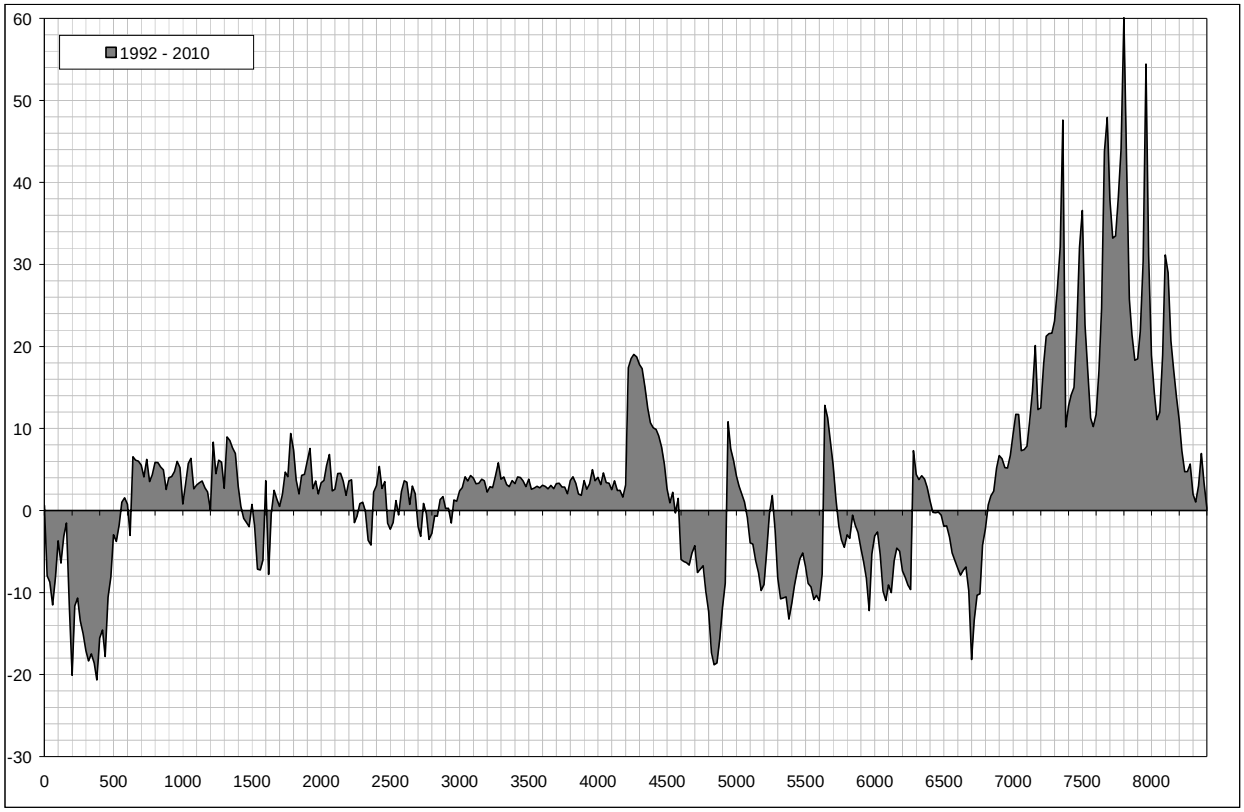


Figura 7.1.13: evoluzione litorale 1992 – 2010.

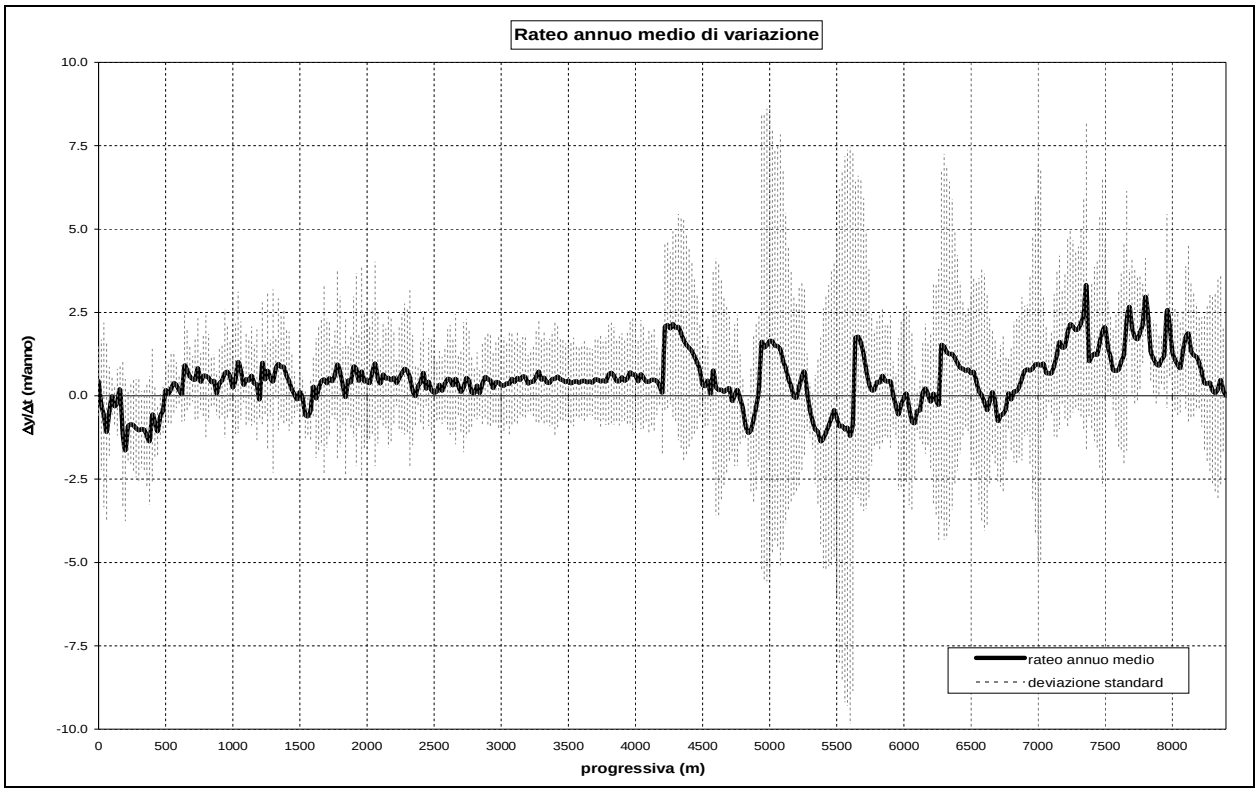


Figura 7.1.14: rateo annuo medio di variazione della linea di riva con indicazione della deviazione standard dei dati (1992 – 2010).

Dall'analisi dell'evoluzione delle linee di riva riferite ai vari archi temporali analizzati è emerso una sostanziale differenza tra il litorale posto a Nord rispetto allo scarico della centrale ENEL di Cerano, il litorale ubicato invece sul versante meridionale del tratto di costa esaminato, fino alla località di Torre S. Gennaro, ed infine il tratto più meridionale protetto dalla barriere emerse.

Per quanto riguarda il settore settentrionale (coord. 0 – 4200), sono state rilevate fasi alterne di modesti avanzamenti o arretramenti della linea di costa; tale fenomenologia è legata essenzialmente al disfacimento della falesia esistente per opera del moto ondoso incidente con la relativa formazione di piccole spiagge di detriti al piede della stessa falesia. Sempre per effetto dell'azione del mare, i detriti formatisi vengono in breve tempo facilmente frantumati e trascinati al largo, o verso Sud, permettendo nuovamente l'attacco diretto delle onde sui costoni rocciosi.

La ricostruzione storica delle linee di riva sull'intero periodo 1992 – 2010 (figura 7.1.13) ha evidenziato che nel settore a Nord dello scarico della centrale ENEL di Cerano si è avuto un leggero avanzamento del litorale (< 5.0m) a meno del tratto più settentrionale in cui invece l'arretramento è stato molto sensibile. Tale risultato mostra un ulteriore caratteristica della morfodinamica di tale paraggio in quanto indica che il verso prevalente del trasporto solido longitudinale dei sedimenti è diretto da NO verso SE, ed infatti il materiale asportato dalle spiagge poste a Nord si ritrova come materiale di approvvigionamento della costa a Sud.

Il litorale compreso tra lo scarico della centrale ENEL di Cerano e il tratto di costa protetto dalle barriere distaccate in prossimità di Torre S. Gennaro (coord. 4200 – 7000) è quello in cui si sono avuti i maggiori problemi di erosione. L'analisi diacronica delle linee di riva ha mostrato un trend erosivo omogeneo in ciascuno degli archi temporali analizzati a meno del periodo 2008 – 2010 in cui la tendenza evolutiva ha subito un'inversione.

La realizzazione dei pennelli trasversali non è riuscita a contrastare l'arretramento della linea di costa se non nella misura di piccoli avanzamenti del litorale in corrispondenza delle aree immediatamente a ridosso delle strutture suddette; a secondo del verso prevalente del trasporto solido registrato nei vari periodi analizzati, infatti, si sono verificati accumuli di sedimenti sul lato di sopraflutto dei pennelli rispetto al verso del trasporto, ed arretramento della costa sul lato opposto. Nelle figure 7.1.15 e 7.1.16 sono riportati due esempi di tale comportamento morfodinamico: nel primo caso (evoluzione del litorale tra il 2005 ed il 2008), l'accumulo di sedimenti si è registrato sul lato settentrionale dei pennelli, mentre nel secondo caso (evoluzione del litorale tra il 2008 ed il 2010), il trasporto longitudinale registrato è stato di verso opposto per cui l'accumulo dei sedimenti è avvenuto sul lato dei pennelli rivolto a Sud.

Per quanto riguarda il tratto di costa protetto dalle barriere distaccate in prossimità della località di Torre S. Gennaro (coord. 7000 – 8400), si può vedere che a partire dal 1992, anno di ultimazione delle strutture, il litorale è risultato sempre in progressivo avanzamento. Tutto il materiale proveniente dal litorale in erosione posto a Nord, e movimentato per effetto delle correnti longitudinali prevalenti orientate verso Sud, ha progressivamente alimentato la spiaggia a ridosso dell'area

protetta dalle barriere assumendo la caratteristica configurazione a tombolo (figure 7.1.17 e 7.1.18).

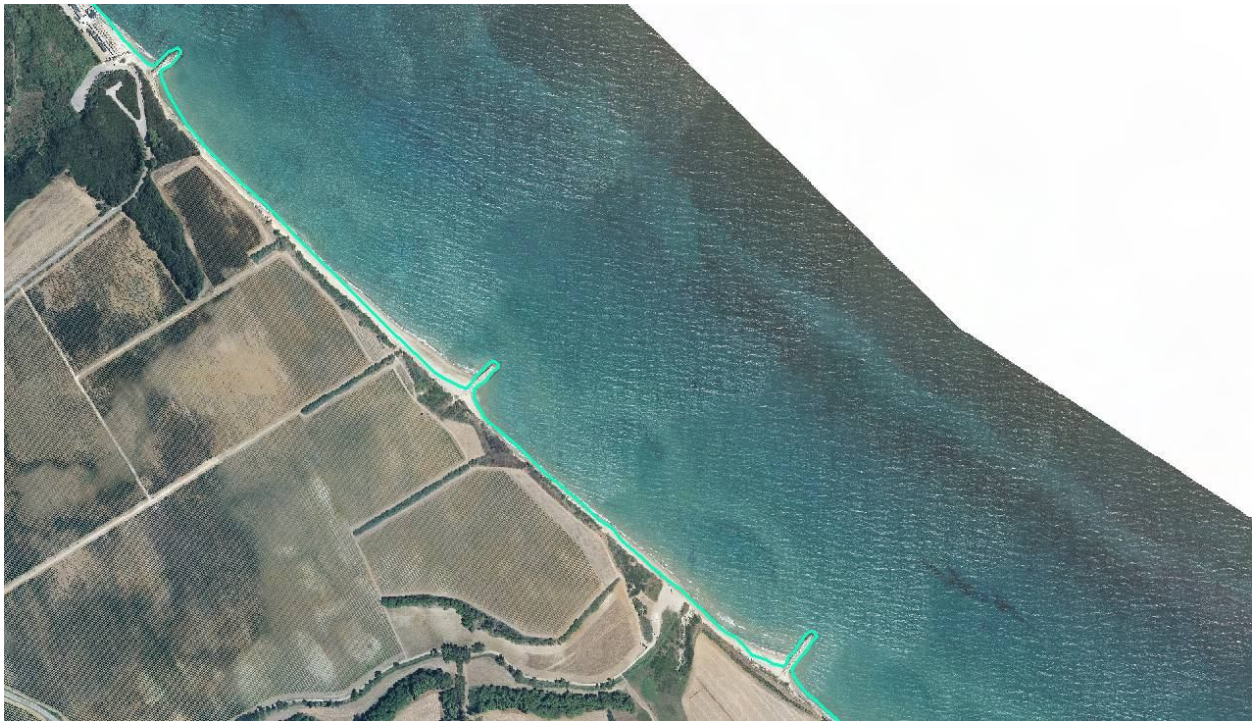


Figura 7.1.15: linea di riva 2005 (ciano) su ortofoto 2008 - particolare pennelli.

Figura 7.1.16: linea di riva 2008 (rosso) su ortofoto 2010 – particolare pennelli.

Figura 7.1.17: litorale Torre S. Gennaro (ortofoto 1992).

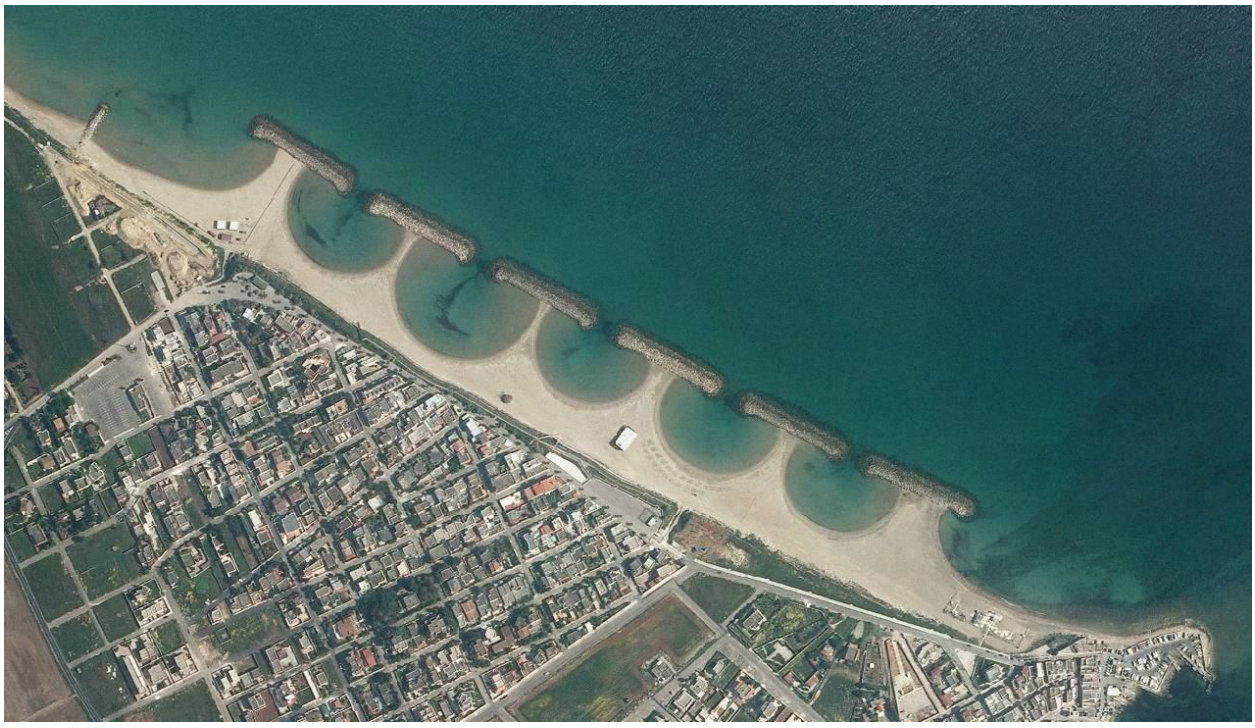


Figura 7.1.18: litorale Torre S. Gennaro (ortofoto 2010).

8 CORRENTI DI CIRCOLAZIONE

In questo capitolo è presentata l'analisi delle condizioni medie di corrente al largo ed a specifiche profondità, nell'area di mare situata di fronte alla centrale ENEL di Cerano (BR).

Nel lavoro vengono descritte le simulazioni numeriche, relative al caso oggetto di studio, articolando la trattazione in descrizione dei dati di input del modello matematico ed analisi dei risultati ottenuti.

Le elaborazioni eseguite sono state condotte utilizzando come forzanti la marea ed il vento, in condizioni barotropiche e nelle condizioni meteo-climatiche del paraggio più frequenti, con lo scopo di individuare quali siano i valori delle correnti indotte dalle suddette forzanti, utili per una corretta progettazione delle strutture offshore previste nell'area oggetto di indagine.

8.1 Dati e condizioni di input adottati dal modello matematico

Le correnti marine sono determinate da un insieme di fattori, come ad esempio le maree e/o differenti condizioni meteorologiche agenti simultaneamente. Nel presente lavoro l'attenzione è stata posta sulla idrodinamica del paraggio compreso nella fascia costiera passante per il porto di Brindisi, tra Torre Guaceto e Torre Chianca (figura 8.1.1), ed è rappresentato dall'area individuata dalle coordinate Gauss Boaga 2760100.0 ÷ 2803894.2 longitudine Est e 4499077.8 ÷ 4507760.0 latitudine Nord, con inclinazione di 40.5° N, in cui la massima batimetrica presa in considerazione è di circa 128m.

Particolare attenzione è richiesta dal modello per la batimetria (figura 8.1.2), riprodotta con una griglia rettangolare di 365 righe e 650 colonne, con passo orizzontale costante di 60m. Riguardo alla risoluzione verticale, sono stati presi in considerazione nello specifico quattro layers corrispondenti alle profondità rispettivamente di 4.5m, 20m, 30m e 40m; le profondità 20 metri e 30 metri in particolare sono state adottate quali profondità previste per la posa delle strutture offshore, in modo da indagare ivi quali siano le correnti medie.

Le simulazioni sono state condotte in ambiente barotropico impiegando come meccanismo forzante (i) la forza rotazionale terrestre, (ii) una marea di tipo semidiurno e (iii) la tensione tangenziale indotta da venti di intensità e direzione differenti.

In particolare, la marea considerata lungo i tre contorni aperti, di tipo semidiurno, è caratterizzata da un'ampiezza pari a 0.15m (altezza 0.30m) e da un periodo di 12 ore. L'andamento della marea viene simulato dal programma come variazione sinusoidale dell'elevazione della superficie tramite la formula:

Figura 8.1.: dominio di indagine che comprende il tratto di mare tra Torre Guaceto e Torre Chianca.

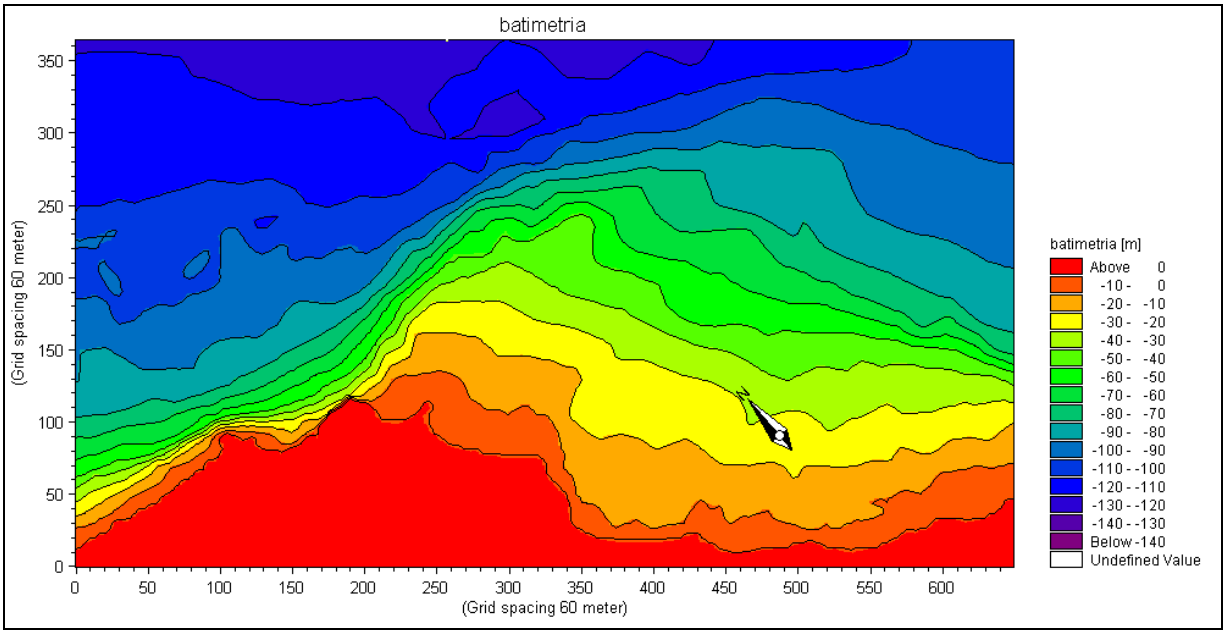


Figura 8.1.2: batimetria del dominio in esame secondo la griglia di calcolo.

$$Value = ref.level + \frac{1}{2} range \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{N \cdot \Delta t - Phase}{Period}\right) \quad (1)$$

dove N è il numero di steps temporali e Δt lo step temporale. Lo stesso valore è usato su tutti i punti della griglia lungo i tre contorni aperti del dominio.

Per quanto riguarda la scelta dei venti utilizzati come forzanti nelle simulazioni, si è fatto riferimento ai dati forniti principalmente dalla stazione anemometrica di Brindisi (figura 8.1.3). Dalla distribuzione delle frequenze di apparizione annuali dei venti per direzione di provenienza risulta che il maggior numero di osservazioni spetta ai venti da NNO, seguono i venti provenienti da ONO e quelli provenienti da S, tutti con velocità compresa tra 7 e 17 nodi.

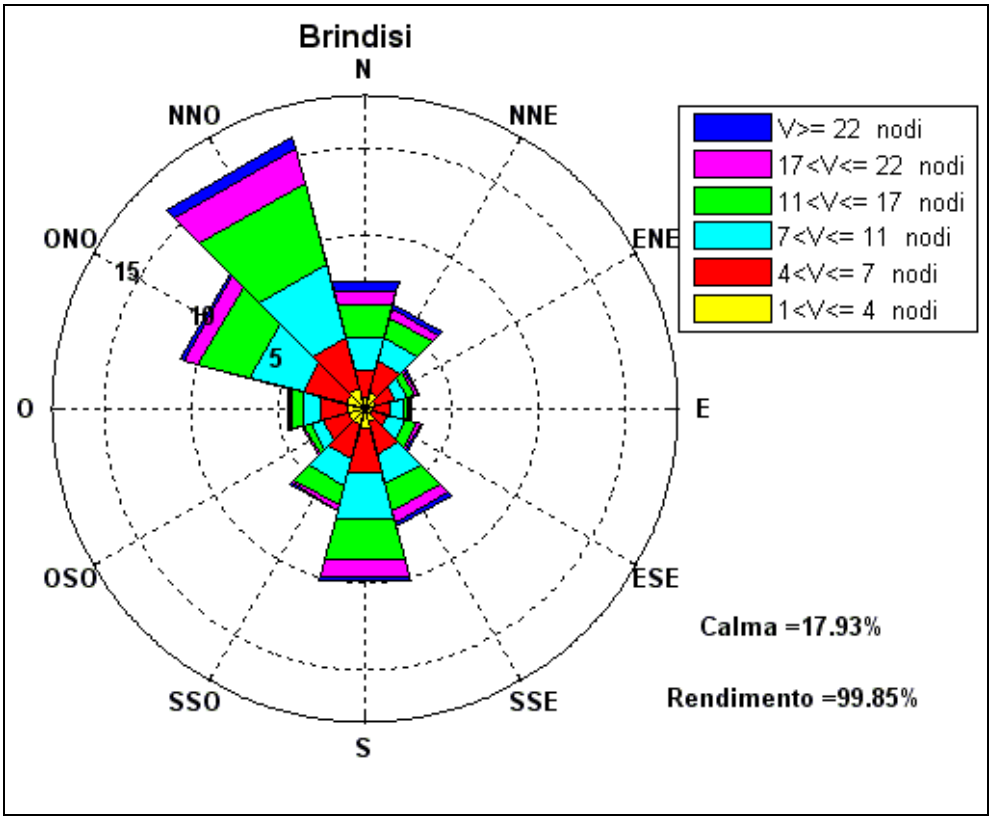


Figura 8.1.3: frequenze di apparizione annuali relative alla stazione di Brindisi.

Pertanto, come ulteriore forzante, accanto alla marea, è stata considerata la tensione tangenziale indotta dapprima da un vento uniforme proveniente da NNO avente velocità pari a 14 nodi (7.21 ms-1), valore massimo più frequente rilevato, e dunque scelto a vantaggio di sicurezza, e successivamente da un vento proveniente da Sud avente velocità pari a 9.92 nodi (5.11 ms-1), valore ricavato da

una media pesata dei valori a disposizione di intensità di vento avente tale direzione.

Le suddette differenti configurazioni permettono dunque di testare l'influenza della variazione della direzione della forzante vento, la più frequente rilevata, sulla struttura di circolazione del dominio oggetto di studio.

La tensione tangenziale τ dovuta al vento viene calcolata dal programma tramite la formula

$$\tau = C_D \rho_a W^2 \qquad (2)$$

in cui al coefficiente di drag C_D viene assegnato un valore pari a 2.26×10^{-3}, la densità dell'aria ρ_a è assunta pari a 1.247 kg m^{-3} ed a W vengono assegnati i valori della velocità del vento relativi ad una distanza di 10m sulla superficie del mare.

Avendo imposto come forzante in input un campo di vento omogeneo, la condizione di stazionarietà viene raggiunta in tempi brevi. Kuzmic *et al.* (1985) e Orlic *et al.* (1986) hanno rilevato il periodo temporale caratteristico di un comportamento transitorio del modello pari a due giorni di simulazione. Tuttavia, per garantire il raggiungimento della condizione di stazionarietà anche per la forzante marea, nelle elaborazioni è stato fissato un periodo di simulazione pari a 4 giorni, a partire dalle ore 12.00 del primo giorno, con uno step temporale di integrazione Δt=9 sec, partendo da una condizione di quiete.

Il massimo numero di Courant, definito come:

$$C_R = c \frac{\Delta t}{\Delta s} \qquad (3)$$

in cui Δt rappresenta lo step temporale di integrazione, Δs il passo della griglia in una delle direzioni orizzontali e c la celerità data dall'espressione:

$$c = \sqrt{gh} \qquad (4)$$

è stato valutato dal programma pari a 5.31 e rappresenta il numero di punti della griglia che vengono analizzati in uno step temporale. In particolare, si è provveduto a mantenere il valore di tale parametro minore di 10, in modo da garantire la stabilità dell'algoritmo di risoluzione adottato dal modello di calcolo.

Per ciò che concerne il modello di turbolenza, al coefficiente di viscosità turbolenta ν_t è stato assegnato un valore costante sull'intero dominio d'indagine, pari a 0.5 $m^2 s^{-1}$.

A tutto il dominio è stata assegnata una salinità costante nello spazio e nel tempo di 38 psu ed una altrettanto costante temperatura di 20°C. Gli stessi valori sono stati imposti ai confini aperti per l'intera durata delle simulazioni. In merito alla

diffusività delle stesse grandezze è stato considerato un numero di Prandtl-Smith σ_t pari a 10, a cui corrisponde un fattore di dispersione $1/\sigma_t = 0.1$.

L'analisi dei risultati ottenuti considerando le diverse simulazioni vuole essere di ausilio per il progettista in fase di progettazione delle strutture offshore previste.

8.2 Risultati e loro analisi

Si riportano di seguito le mappe bidimensionali sia della corrente mediata sull'intera profondità del dominio di calcolo, che della corrente ottenuta dalle simulazioni alle specifiche profondità rispetto al pelo libero del mare di 4.5 m, 20 m, 30 m e 40 m, la seconda e la terza corrispondenti alla profondità del letto di posa delle strutture offshore, in maniera da visualizzare e facilmente interpretare i risultati ottenuti in veste grafica (figure da 8.2.1 ad 8.1.10).

I risultati su descritti si riferiscono, a loro volta, all'ultimo giorno di simulazione, quando ormai le correnti di circolazione hanno assunto un andamento stabile.

I risultati delle elaborazione riportate nelle figure da 8.2.1 a 8.2.5 si riferiscono alle correnti che si generano per effetto di un vento proveniente da Sud con intensità di 5.11 ms^{-1}; dall'analisi delle figure si evidenzia che le correnti si propagano verso Nord e sono piuttosto deboli al largo, con valori inferiori a 0.01 ms^{-1}, mentre tendono ad intensificarsi sottocosta, dove presentano una lieve variabilità di direzione, che risente maggiormente della batimetria piuttosto che della forzante vento. In particolare, un confronto dei risultati ottenuti alle diverse profondità (figure da 8.2.2 a 8.2.5) evidenzia una riduzione dei moduli di velocità, come era ovvio aspettarsi, vista la minore influenza della forzante vento negli strati di mare inferiori. Tale riduzione è però poco significativa, dunque può dirsi in genere che il valore della corrente in corrispondenza dell'area oggetto di indagine si mantiene al di sotto di 0.1 ms^{-1}.

Nelle figure da 8.2.6 a 8.2.10 è stata simulata la condizione meteo climatica corrispondente ad un vento proveniente da NNO e con intensità di 7.21 ms^{-1}; in queste condizioni le correnti più intense si generano in prossimità della costa, mentre al largo risultano essere piuttosto deboli, con valori in questo caso uguali o superiori a 0.01 ms^{-1} e con direzione prevalente di propagazione questa volta verso Sud. Inoltre, si conferma il risultato summenzionato della riduzione dell'intensità delle correnti all'aumentare della profondità (figure da 8.2.7 a 8.2.10), seppure tale aumento sia di modesto valore. Dunque, per quanto attiene i risultati delle elaborazioni relative alle simulazioni con vento da NNO si può ritenersi attendibile per le correnti marine mediamente il valore di 0.07 ms^{-1}.

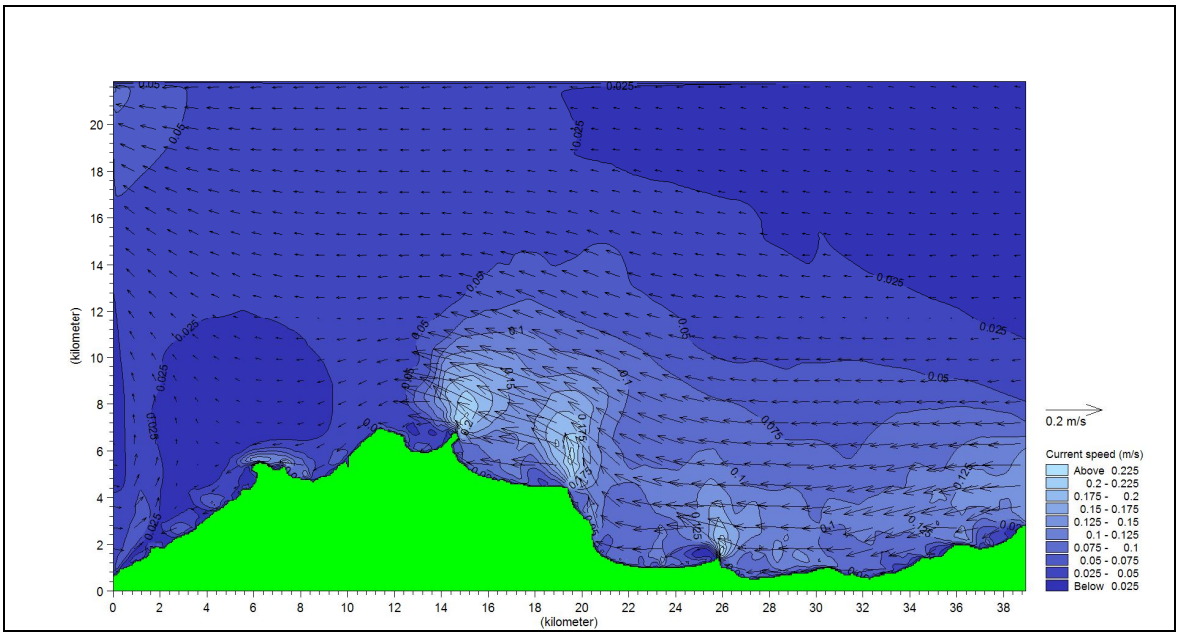


Figura 8.2.1: elaborazione vento da Sud (5.11 ms-1). Mappa delle correnti mediate sulla profondità al termine della simulazione (3 gg).

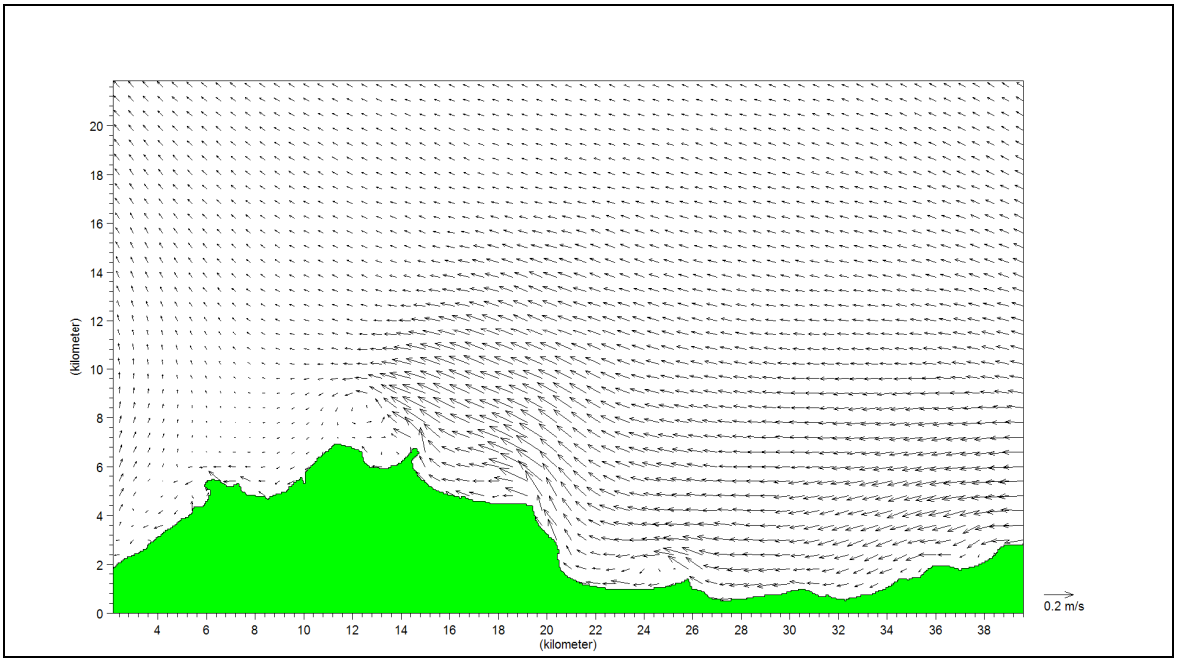


Figura 8.2.2: elaborazione vento da Sud (5.11 ms-1). Mappa delle correnti a 4.5 m di profondità al termine della simulazione (3 gg).

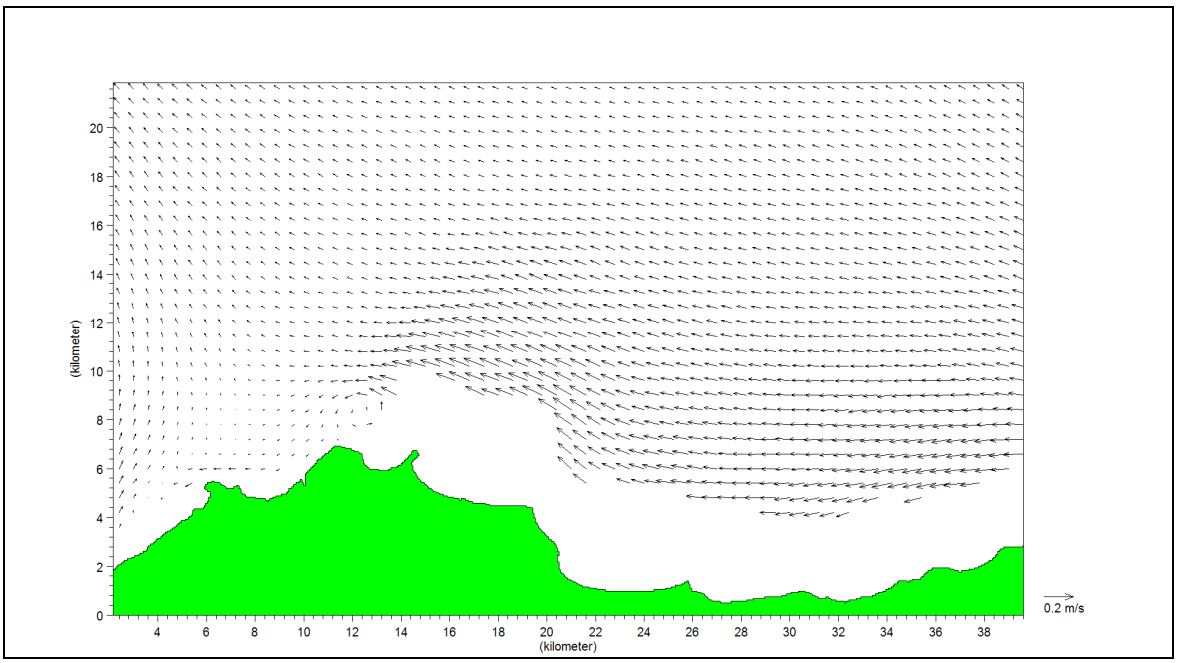


Figura 8.2.3: elaborazione vento da Sud (5.11 ms-1). Mappa delle correnti a 20 m di profondità al termine della simulazione (3 gg).

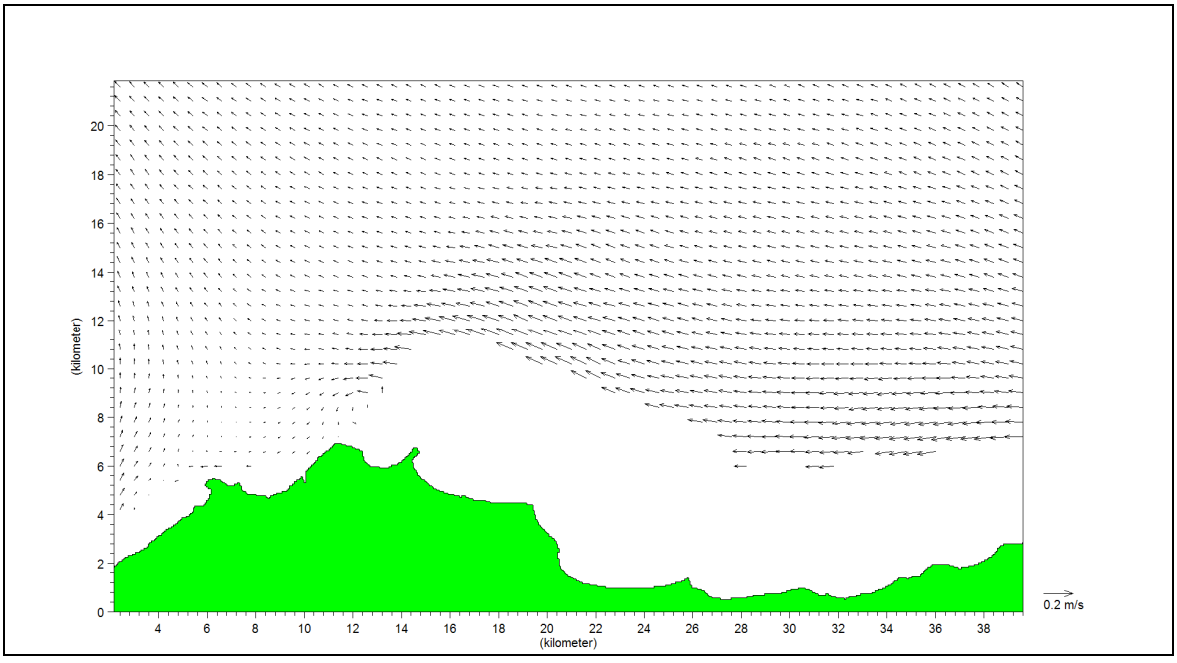


Figura 8.2.4: elaborazione vento da Sud (5.11 ms-1). Mappa delle correnti a 30 m di profondità al termine della simulazione (3 gg).

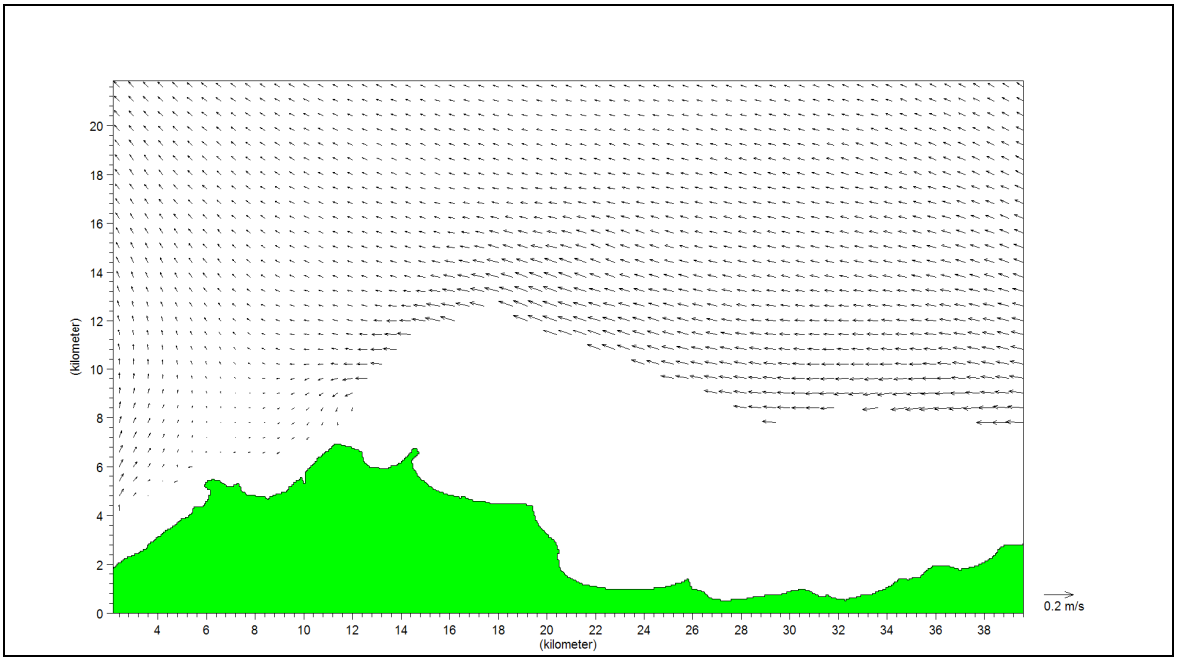


Figura 8.2.5: elaborazione vento da Sud (5.11 ms-1). Mappa delle correnti a 40 m di profondità al termine della simulazione (3 gg).

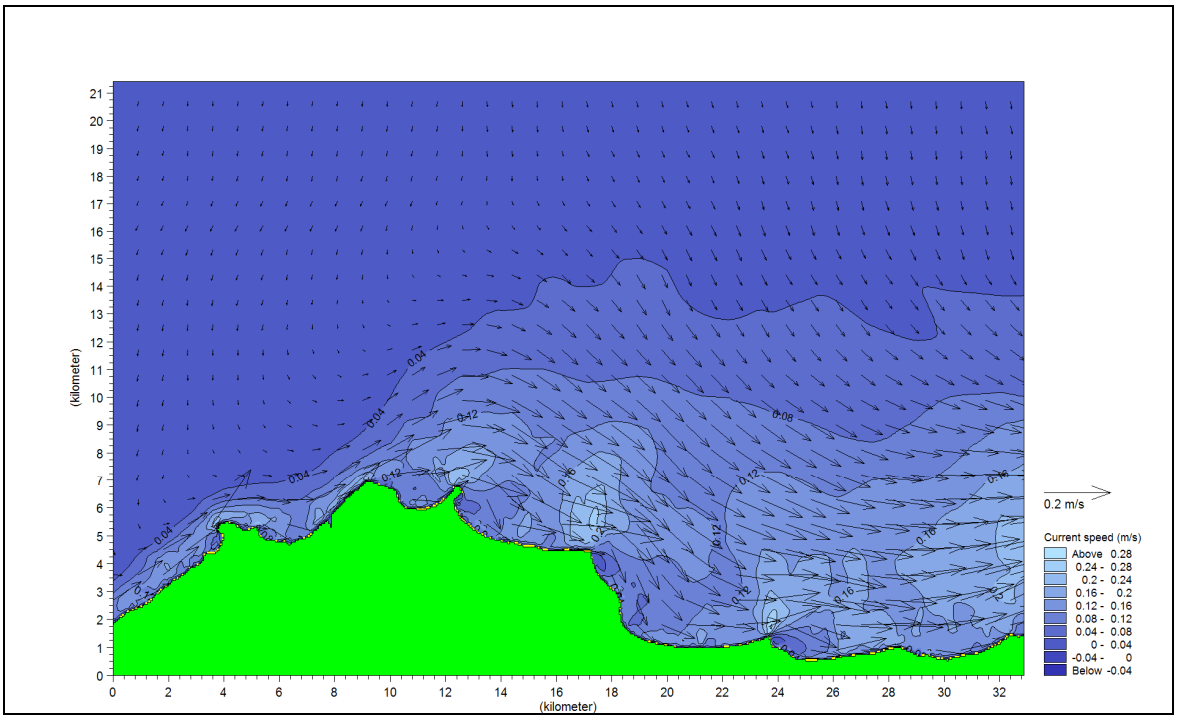


Figura 8.2.6: elaborazione vento da NNO (7.21 ms^{-1}). Mappa delle correnti mediate sulla profondità al termine della simulazione (3 gg).

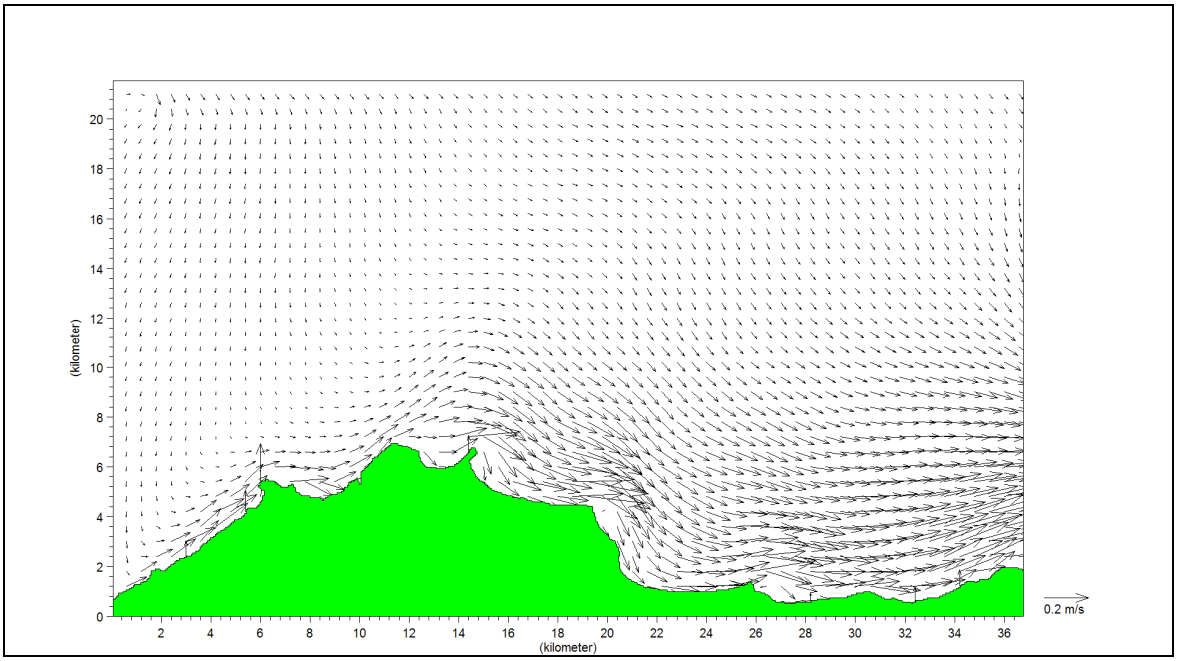


Figura 8.2.7: elaborazione vento da NNO (7.21 ms^{-1}). Mappa delle correnti a 4.5 m di profondità al termine della simulazione (3 gg).

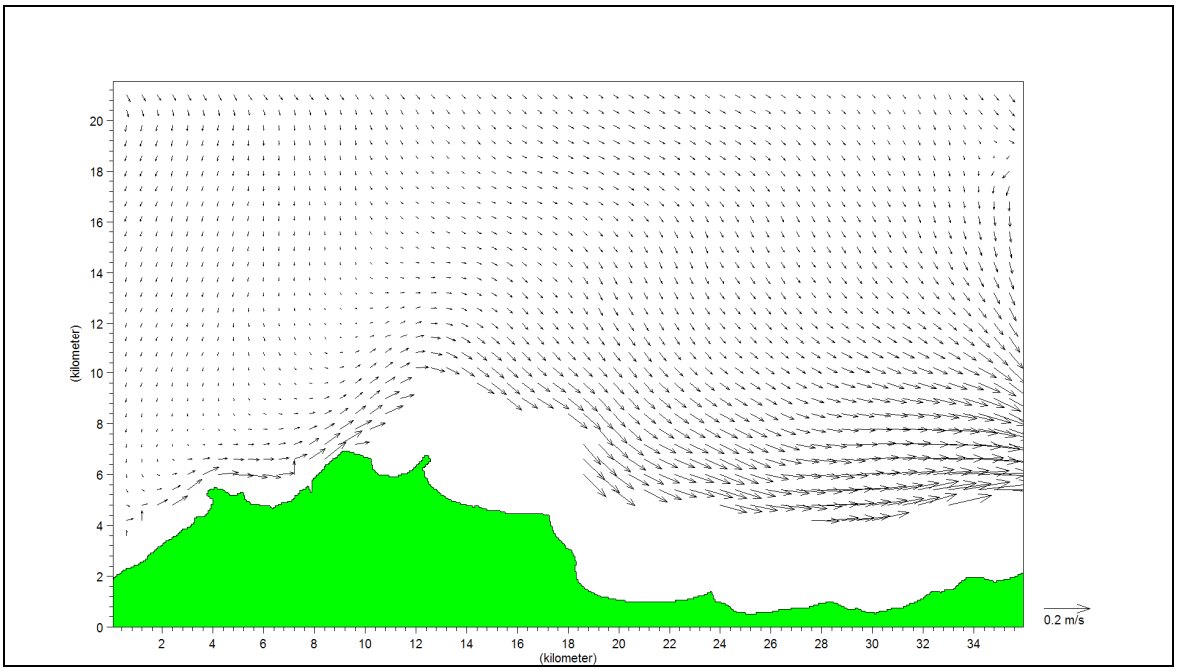


Figura 8.2.8: elaborazione vento da NNO (7.21 ms^{-1}). Mappa delle correnti a 20 m di profondità al termine della simulazione (3 gg).

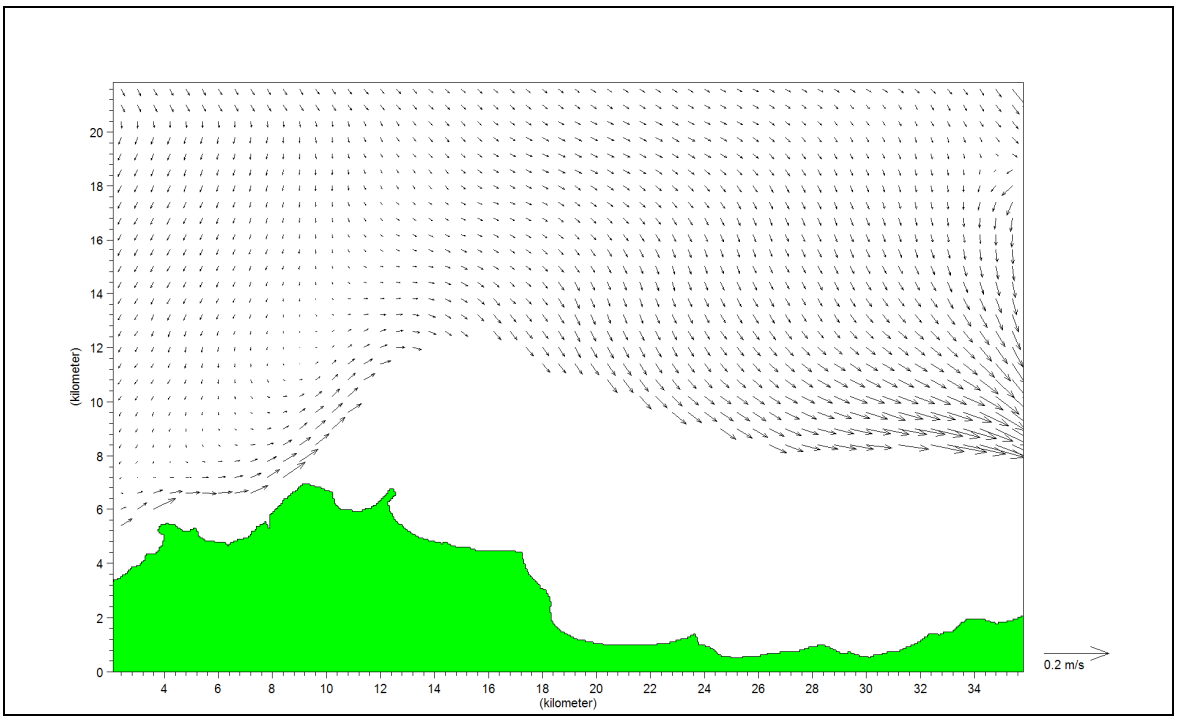


Figura 8.2.9: elaborazione vento da NNO (7.21 ms^{-1}). Mappa delle correnti a 30 m di profondità al termine della simulazione (3 gg).

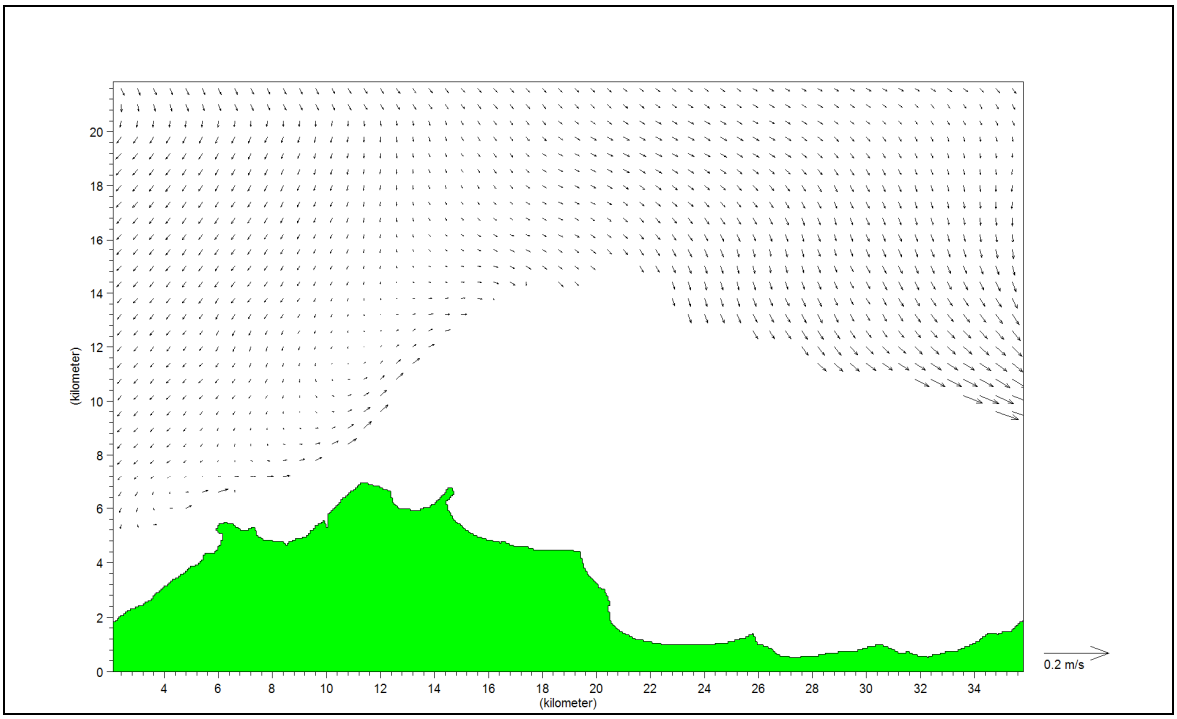


Figura 8.2.10: elaborazione vento da NNO (7.21 ms^{-1}). Mappa delle correnti a 40 m di profondità al termine della simulazione (3 gg).