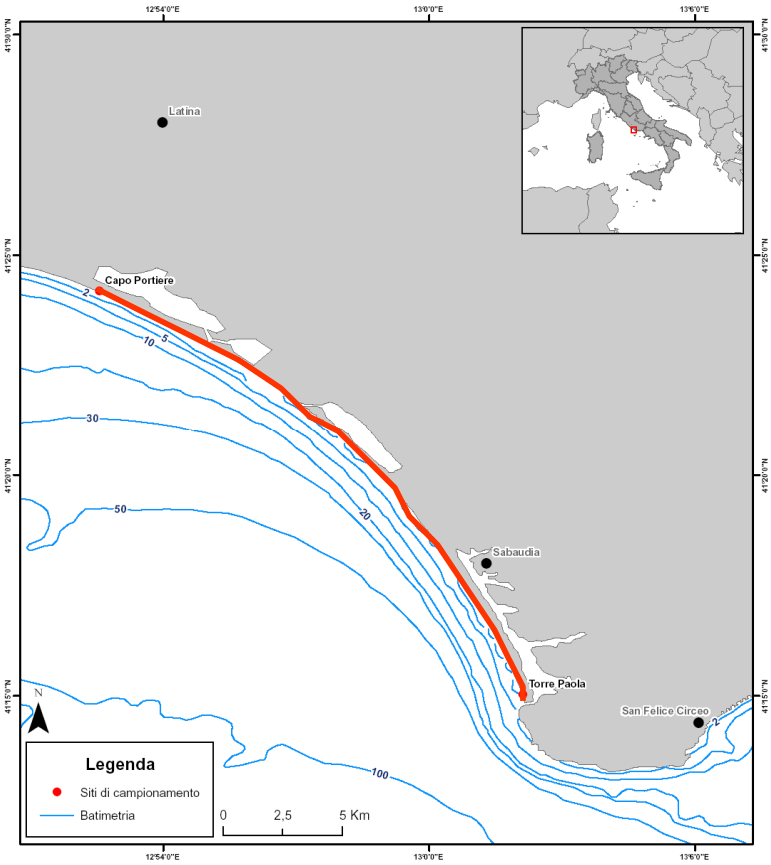
ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

PREDISPOSIZIONE DI UNO STUDIO PRELIMINARE AMBIENTALE RELATIVO AGLI INTERVENTI DI DIFESA DELLA COSTA IN AREE PROTETTE, PER LA RICOSTRUZIONE E LA DIFESA DEL LITORALE COSTIERO TRA CAPO PORTIERE E TORRE PAOLA NELLA PROVINCIA DI LATINA

Climatologia, morfologia del tratto compreso tra Capo Portiere e S. Felice Circeo

STUDI DI MODELLISTICA NUMERICA



ISPRA

Novembre 2008

Responsabile del Programma:

Dr. Luisa Nicoletti

Hanno collaborato per Hydrosoil S.r.l.:

- Ing. Massimo Tondello
- Ing. Silvia Beriotto
- Ing. Nicola Sguotti

INDICE

1 PREMESSA 5

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO 6

3 CLIMA ONDOSO AL LARGO 17

3.1 SETTORE DI TRAVERSIA 21

3.2 STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI 22

3.3 DISTRIBUZIONE PERIODI MEDI 25

4 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO 27

4.1 PROPAGAZIONE DEL CLIMA ONDOSO DALLA BOA DI PONZA AD UNA SERIE DI PUNTI SOTTOCOSTA 28

4.1.1 Settaggio del modello 30

4.1.2 Risultati propagazione Torre Astura (Punto P1) 32

4.1.3 Risultati propagazione Foce Verde (Punto P2) 35

4.1.4 Risultati propagazione Capo Portiere (Punto P3) 38

4.1.5 Risultati propagazione lago dei Monaci (Punto P4) 41

4.1.6 Risultati propagazione lago di Caprolace (Punto P5) 44

4.1.7 Risultati propagazione Foce Caterattino (Punto P6) 47

4.1.8 Risultati propagazione Torre Paola (Punto P7) 50

4.2 PROPAGAZIONE LOCALE DI MAREGGIATE SIGNIFICATIVE (DURATA DI 1 E 7 GG/ANNO) 53

4.2.1 Settaggio del modello 53

4.2.2 Caratteristiche delle mareggiate significative 55

4.2.3 Considerazioni sui risultati dei piani d'onda delle mareggiate significative 57

4.3 PROPAGAZIONE DI MAREGGIATE ESTREME 59

4.3.1 Caratteristiche delle mareggiate estreme 59

4.3.2 Considerazioni sui risultati dei piani d'onda delle mareggiate estreme 61

5 EVOLUZIONE MORFOLOGICA 62

5.1 TENDENZA EVOLUTIVA DEL LITORALE 62

5.1.1 Analisi delle linee di riva storiche 62

5.1.2 Analisi dei dati meteomarini (trasporto solido potenziale) 64

5.1.3 Analisi dei dati morfologici 65

5.1.4 Analisi dei dati sedimentologici 66

5.1.4.1 Analisi dei profili di spiaggia 66

5.1.4.2 Analisi delle curve granulometriche 80

5.2 TARATURA DEL MODELLO DI EVOLUZIONE MORFOLOGICA 84

5.2.1 Propagazione del moto ondoso sottocosta 85

5.2.2 Premessa alla modellazione 86

5.2.3 Profondità di chiusura e altezza di swash 87

5.2.4 Dati sedimentologici 88

5.2.5 Parametri utilizzati nel modello 88

5.2.6 Risultati della taratura 91

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 2.1 - Inquadramento geografico del paraggio 6
Fig. 2.2 – Torre Astura (promontorio e resti romani) 8
Fig. 2.3 – Litorale di Foce Verde (pontile su pali) 9
Fig. 2.4 – Pennelli semisommersi a Sud di Foce Verde 9
Fig. 2.5 – Litorale tra Foce Verde e Capo Portiere 10
Fig. 2.6 – Litorale a Sud di capo Portiere 10
Fig. 2.7 – Foce nuova di Fogliano 11
Fig. 2.8 – Rio Martino (Foce vecchia) 11
Fig. 2.9 – Litorale tra Rio Martino e Idrovora Lavorazione 12
Fig. 2.10 – Idrovora Lavorazione 12
Fig. 2.11 – Lago di Caprolace (foce e cordone dunale retrostante) 13
Fig. 2.12 – Litorale tra il Lago di Caprolace e Foce canale Caterattino 14
Fig. 2.13 – Foce canale Caterattino 14
Fig. 2.14 – Litorale tra Foce canale Caterattino e Torre Paola 15
Fig. 2.15 – Torre Paola (foce e promontorio del Circeo) 16
Fig. 3.1 – Ubicazione della boa di Ponza 17
Fig. 3.2 – Rosa delle registrazioni – Boa di Ponza 19
Fig. 3.3 – Rosa delle energie – Boa di Ponza 19
Fig. 3.4 – Rosa delle altezze massime – Boa di Ponza 20
Fig. 3.5 – Curva di durata – Boa di Ponza 20
Fig. 3.6 – Settore di traversia 21
Fig. 3.7 – Individuazione settori utilizzati nell'analisi statistica degli eventi estremi 23
Fig. 3.8 – Risultati analisi statistica di Gumbel 24
Fig. 3.9 – Analisi statistica dei periodi medi - Settore 120°-225°N (in rosso) e 240°-300°N (in blu) 26
Fig. 4.1 – Planimetria con punti di output – Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e lago dei Monaci 28
Fig. 4.2 – Planimetria con punti di output – Tratto di litorale compreso tra lago dei Monaci e Torre Paola 29
Fig. 4.3 – Griglia di calcolo - BIG GRID 31
Fig. 4.4 – Rose delle registrazioni nel punto P1 33
Fig. 4.5 – Rosa delle energie nel punto P1 33
Fig. 4.6 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P1 34
Fig. 4.7 – Curva di durata nel punto P1 34
Fig. 4.8 – Rose delle registrazioni nel punto P2 36
Fig. 4.9 – Rosa delle energie nel punto P2 36
Fig. 4.10 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P2 37
Fig. 4.11 – Curva di durata nel punto P2 37
Fig. 4.12 – Rose delle registrazioni nel punto P3 39
Fig. 4.13 – Rosa delle energie nel punto P3 39
Fig. 4.14 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P3 40
Fig. 4.15 – Curva di durata nel punto P3 40
Fig. 4.16 – Rose delle registrazioni nel punto P4 42
Fig. 4.17 – Rosa delle energie nel punto P4 42
Fig. 4.18 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P4 43
Fig. 4.19 – Curva di durata nel punto P4 43
Fig. 4.20 – Rose delle registrazioni nel punto P5 45
Fig. 4.21 – Rosa delle energie nel punto P5 45

Fig. 4.22 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P5 46
Fig. 4.23 – Curva di durata nel punto P5 46
Fig. 4.24 – Rose delle registrazioni nel punto P6 48
Fig. 4.25 – Rosa delle energie nel punto P6 48
Fig. 4.26 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P6 49
Fig. 4.27 – Curva di durata nel punto P6 49
Fig. 4.28 – Rose delle registrazioni nel punto P7 51
Fig. 4.29 – Rosa delle energie nel punto P7 51
Fig. 4.30 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P7 52
Fig. 4.31 – Curva di durata nel punto P7 52
Fig. 4.32 – Griglia di calcolo STWAVE (passo 50 m) 54
Fig. 4.33 – Settori e direzioni di provenienza mareggiate significative 56
Fig. 4.34 – Curve di durata suddivise per settori – Boa di Ponza 56
Fig. 4.35 – Particolari "a" e "b" rappresentati nelle tavole dei piani d'onda 58
Fig. 4.36 – Settori e direzioni di provenienza degli eventi estremi 60
Fig. 5.1 – Ubicazione profili nell'area di Foce Verde (rilievo settembre 2003) 67
Fig. 5.2 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Foce Verde (rilievo settembre 2003) 68
Fig. 5.3 – Ubicazione profili nell'area di Foce del Duca (rilievo settembre 2003) 69
Fig. 5.4 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Foce del Duca (rilievo settembre 2003) 70
Fig. 5.5 – Ubicazione profili nell'area di rio Martino (rilievo settembre 2003) 71
Fig. 5.6 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di rio Martino (rilievo settembre 2003) 72
Fig. 5.7 – Ubicazione profili nell'area di Foce Cavani (rilievo settembre 2003) 73
Fig. 5.8 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Foce Cavani (rilievo settembre 2003) 73
Fig. 5.9 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Foce Cavani (rilievo settembre 2003) 74
Fig. 5.10 – Ubicazione profili nell'area di Sabaudia (rilievo maggio 2007) 75
Fig. 5.11 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Sabaudia (rilievo maggio 2007) 76
Fig. 5.12 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Sabaudia (rilievo maggio 2007) 77
Fig. 5.13 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Sabaudia (rilievo maggio 2007) 78
Fig. 5.14 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Sabaudia (rilievo maggio 2007) 79
Fig. 5.15 – Ubicazione campioni prelevati nell'area di Rio Martino (punti in rosso) 81
Fig. 5.16 – Ubicazione campioni prelevati nell'area di Foce Cavani (punti in rosso) 82
Fig. 5.17 – Curve granulometriche dei campioni prelevati a rio Martino (in alto) e a foce Cavani (in basso) 83
Fig. 5.18 – Ubicazione delle boe virtuali (stazioni) poste alla profondità di –10 m s.m.m. 85
Fig. 5.19 – Individuazione H0,12 – Curva di durata in corrispondenza della boa di Ponza 87
Fig. 5.20 – Griglia di calcolo GENESIS - Prima fase 1992-2003 (in alto) e seconda fase 2003-2005 (in basso) 90
Fig. 5.21 – Planimetria con griglie di calcolo STWAVE e GENESIS 90
Fig. 5.22 – Andamento trasporto solido longitudinale (taratura 1992-2005) 91

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 3.1 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (boa di Ponza) Periodo giugno 1989 – giugno 2005 18
Tab. 3.2 – Valori dei massimi annuali di Hs suddivisi per settori di provenienza 22
Tab. 3.3 - Risultati statistica di Gumbel (valori di altezza significativa in funzione del tempo di ritorno) 23
Tab. 4.1 – Caratteristiche dei punti di output del clima locale 28
Tab. 4.2 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P1) 32
Tab. 4.3 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P2) 35
Tab. 4.4 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P3) 38
Tab. 4.5 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P4) 41
Tab. 4.6 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P5) 44
Tab. 4.7 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P6) 47
Tab. 4.8 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P7) 50
Tab. 4.9 – Caratteristiche mareggiate significative propagate con il codice di calcolo STWAVE 55
Tab. 4.10 – Caratteristiche delle mareggiate estreme propagate con il codice di calcolo STWAVE 60
Tab. 5.1 – Risultati del confronto tra le linee di riva 1992 e 2005 63
Tab. 5.2 – Valori del flusso di energia calcolati sulla base dei risultati della propagazione del clima ondoso 64
Tab. 5.3 – Valori di D50 (Campioni rio Martino) 81
Tab. 5.4 – Valori di D50 (Campioni foce Cavani) 82
Tab. 5.5 - Parametri impiegati nel modello 89

ELENCO DEGLI ALLEGATI

Allegato A Descrizione dei codici di calcolo
Allegato B Piani d'onda
Figura 1a – TEST 1 (Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione)
Figura 1b – TEST 1 (Tratto di litorale compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola)
Figura 2a – TEST 2 (Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione)
Figura 2b – TEST 2 (Tratto di litorale compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola
Figura 3a – TEST 3 (Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione)
Figura 3b – TEST 3 (Tratto di litorale compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola
Figura 4a – TEST 4 (Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione)
Figura 4b – TEST 4 (Tratto di litorale compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola
Figura 5a – TEST 5 (Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione)
Figura 5b – TEST 5 (Tratto di litorale compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola
Figura 6a – TEST 6 (Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione)
Figura 6b – TEST 6 (Tratto di litorale compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola
Figura 7a – TEST 7 (Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione)
Figura 7b – TEST 7 (Tratto di litorale compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola
Figura 8a – TEST 8 (Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione)
Figura 8b – TEST 8 (Tratto di litorale compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola
Figura 9a – TEST 9(Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione)
Figura 9b – TEST 9 (Tratto di litorale compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola
Figura 10a – TEST 10 (Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione)
Figura 10b – TEST 10 (Tratto di litorale compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola

ELENCO DELLE TAVOLE:

Tavola 1a TARATURA GENESIS (Trasporto solido)
Tavola 1b TARATURA GENESIS (Evoluzione linea di riva)

1 PREMESSA

L'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), già ICRAM, nell'ambito della Convenzione di Ricerca per la salvaguardia del tratto di costa della Provincia di Latina compreso tra Capo Portiere Torre Paola (lettera del 20 giugno 2008, prot. ICRAM n. 6413/08), è stato incaricato di predisporre uno "Studio Preliminare Ambientale relativo agli interventi di difesa della costa in aree protette, per la ricostruzione e la difesa del litorale compreso tra Capo Portiere e Torre Paola nella Provincia di Latina".
Tale convenzione prevede l'esecuzione di diverse attività che hanno per oggetto l'individuazione delle criticità ambientali e la valutazione della fattibilità di diversi scenari di intervento di difesa costiera. Queste attività sono articolate in diversi studi di seguito descritti:

- Caratterizzazione ambientale (analisi critica dei dati bibliografici relativamente ai principali parametri ambientali (ATTIVITÁ A1);
- Campagne operative in mare per la verifica dei molluschi bivalvi di interesse commerciale presenti sulla fascia costiera (ATTIVITÁ A2);
- Caratterizzazione dell'apparato dunale (ATTIVITÁ B);
- Climatologia, morfologia e dinamica litoranea, completa di simulazione degli scenari evolutivi con diverse tipologie di intervento e valutazione economica comparativa (ATTIVITÁ C1 e C2);
- Predisposizione di documentazione per lo Studio Preliminare Ambientale (ATTIVITÁ C3).

Nella presente relazione vengono presentati i risultati dell'Attività C1 – "Climatologia e morfologia relative al tratto di costa laziale compreso tra Capo Portiere e Torre Paola (Latina)". In particolare, nell'ambito di questa attività, sono state eseguite le seguenti indagini:

- Definizione del clima ondoso al largo del paraggio;
- Determinazione del clima ondoso in una serie di punti antistanti i litorali di interesse;
- Modellazione matematica della propagazione del moto ondoso sottocosta (piani d'onda di eventi estremi e mareggiate significative per il paraggio);
- Analisi dei dati meteomarini e geomorfologici per la valutazione preliminare dei trend evolutivi e del trasporto solido potenziale, finalizzata alla costruzione e taratura del modello di evoluzione morfologica;
- Esecuzione di un rilievo della linea di riva.

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il tratto di litorale oggetto di studio si estende tra il promontorio di Torre Astura, a Nord, e il promontorio del Circeo, a Sud (Fig. 2.1).

Tra Torre Astura e il promontorio di Capo Circeo il litorale sabbioso si sviluppa per circa 35 km. Il litorale si presenta piuttosto uniforme, essendo interrotto soltanto dalle foci del Fiume Astura e di una serie di canali di bonifica ed emissari dei laghi costieri.

Di seguito, si riporta una breve descrizione del litorale compreso tra Torre Astura e Torre Paola, evidenziando per ciascun tratto di litorale le eventuali caratteristiche peculiari.
Le immagini riportate a corredo della descrizione, ad eccezione di quelle riguardanti il sito di Torre Astura (Fig. 2.2), sono state scattate nel corso di due recenti sopraluoghi eseguiti dagli scriventi (18 settembre e 16-17 ottobre 2008).

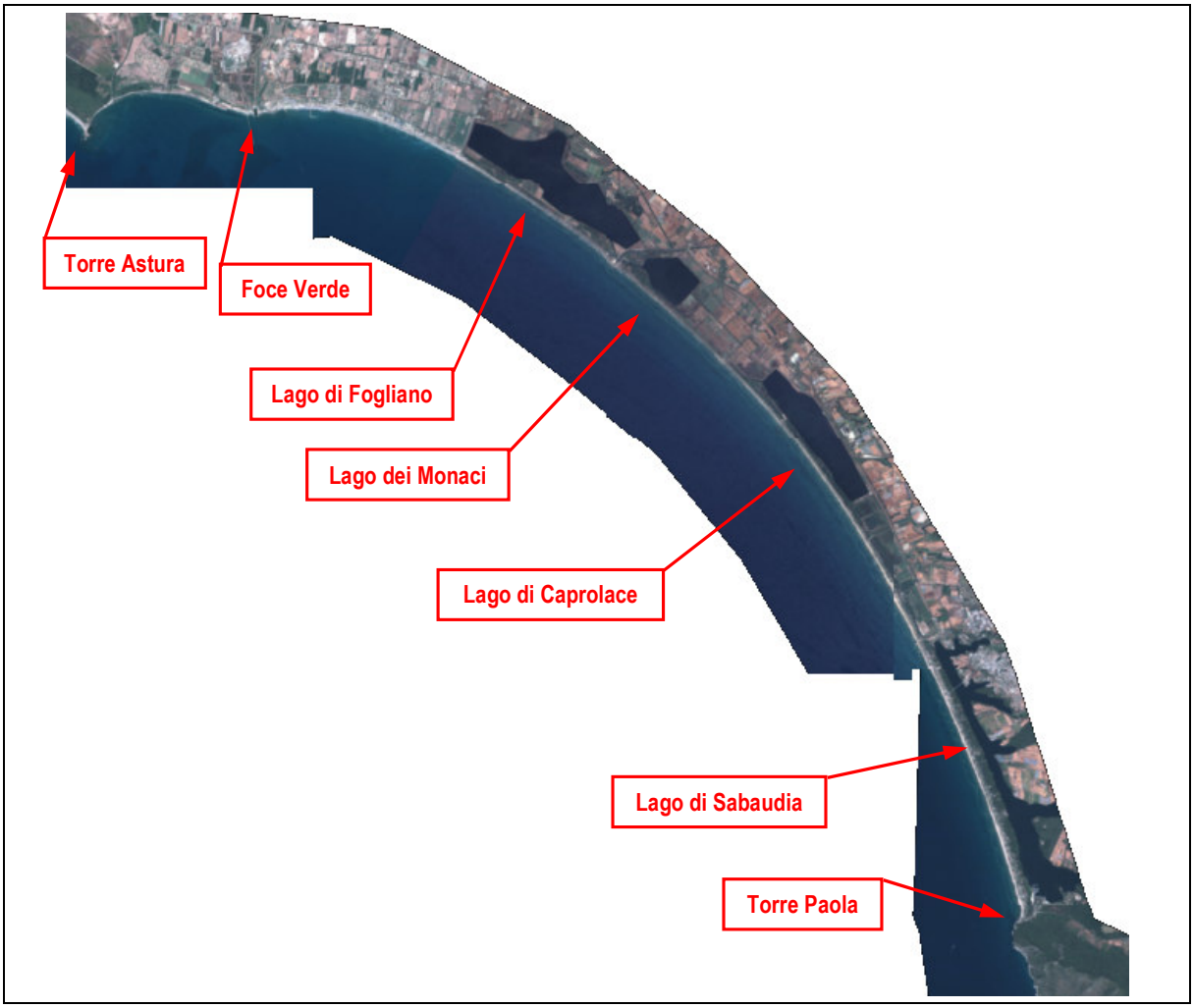


Fig. 2.1 - Inquadramento geografico del paraggio

Procedendo da Nord verso Sud, si incontra il promontorio di Torre Astura, caratterizzato dalla presenza del castello e dei resti della peschiera romana (Fig. 2.2). La fascia costiera è caratterizzata dalla presenza di una spiaggia di ridotte dimensioni e di una serie di opere radenti (sommerse di fronte alla torre), realizzate allo scopo di arrestare la progressiva erosione della costa.

Il tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Foce Verde risulta fortemente in erosione, a causa dell'attacco diretto del moto ondoso e del ridotto apporto solido proveniente sia dall'unità fisiografica di Capo d'Anzio che dal fiume Astura e dal fosso del Moscarello (Foce Verde). Questi aspetti, unitamente alla marcata antropizzazione del tratto di costa, hanno comportato nel tempo la necessità di una serie di interventi, mirati principalmente alla salvaguardia del litorale di Foce Verde.
Nel corso degli ultimi anni, infatti, sono stati eseguiti una serie di interventi di ripascimento, i quali hanno, in parte, ridotto il processo di arretramento naturale del lido di Latina. Vista la scarsa efficacia degli interventi di ripascimento non protetti realizzati dagli anni 90' in poi, si è recentemente optato per il potenziamento delle opere rigide di difesa del litorale. Pertanto, tra il 2003 e il 2005 sono stati realizzati i due moli di armatura del fosso del Moscarello e una barriera sommersa, a difesa del tratto di litorale immediatamente a Sud di Foce Verde. La barriera, che attualmente si estende per circa 1,5 km a partire dall'armatura di foce del fosso del Moscarello, è radicata a terra da pennelli trasversali, sommersi in testata ed emersi nel tratto di radice (Fig. 2.4). Alla realizzazione delle opere rigide è stato abbinato un massiccio intervento di ripascimento tra Foce Verde e capo Portiere.
Immediatamente a Nord del fosso del Moscarello è presente un pontile su pali, che si estende verso il largo per una lunghezza di circa 2 km (Fig. 2.3).

Tra Foce Verde e capo Portiere sono state recentemente realizzate ulteriori opere rigide, al fine di migliorare l'efficienza del recente intervento di ripascimento e ridurre i fenomeni erosivi litorale in oggetto, manifestatosi con particolarmente evidenza nel tratto sottoflutto alla barriera.
Questo tratto di litorale, caratterizzato da un notevole carico antropico, presenta un tratto di spiaggia di ridotta ampiezza. Il cordone dunale, che percorre ininterrotto tutto il litorale tra Torre Astura e Torre Paola, risulta in questo tratto pressoché inesistente (Fig. 2.5).
In corrispondenza dello sbocco a mare dell'idrovora di capo Portiere è presente un piazzale in calcestruzzo sopraelevato rispetto alla spiaggia.

Procedendo verso Sud, si incontra un tratto di costa dalle caratteristiche notevolmente differenti rispetto al precedente (Fig. 2.6). Gli insediamenti antropici sono molto limitati e la spiaggia riacquista, in parte, il suo assetto naturale. L'assetto naturale del litorale risulta, infatti, interrotto solo localmente dalla presenza delle armature delle foci di bonifica, che comunque non alterano significativamente la dinamica litoranea.

Il tratto di costa antistante il lago di Fogliano e il lago dei Monaci è caratterizzato dalla presenza di due foci di bonifica: la foce nuova di Fogliano (Fig. 2.7), a Nord, e quella vecchia, in corrispondenza di rio Martino, a Sud (Fig. 2.8). La fascia costiera è caratterizzata dalla presenza, a tergo della spiaggia, di un cordone dunale, che separa la spiaggia dai laghi costieri. Oltre la duna, si trovano i laghi di Fogliano e dei Monaci, che appartengono al patrimonio naturalistico del Parco Nazionale del Circeo.

Anche tra rio Martino e lo sbocco a mare denominato "Idrovora Lavorazione" (Fig. 2.10), la spiaggia risulta caratterizzata dalla presenza di un cordone dunale continuo (Fig. 2.9), anche se in questo caso si riscontrano localmente segni di degrado e abbandono della fascia costiera, con parziale compromissione della duna retrostante. In questo tratto, infatti, la strada litoranea, che costeggia la duna, risulta attualmente dismessa.

Tra Idrovora Lavorazione e la foce del canale Caterattino, la fascia costiera riprende il suo assetto naturale (Fig. 2.11, Fig. 2.12 e Fig. 2.13); si riscontra ancora la presenza, sul cordone dunale, della strada litoranea. In questo tratto di costa, anche a causa della maggiore presenza di struttura turistiche, è più evidente il fenomeno di degrado ed erosione della duna.

Analoga è la situazione in cui versa il tratto di spiaggia compreso tra la foce del Canale Caterattino e il molo della foce di Torre Paola. Il cordone dunale, interrotto localmente dalla presenza di costruzioni, si presenta parzialmente eroso e degradato (Fig. 2.14).
All'estremo Sud, oltre Torre Paola, si trova il promontorio del Circeo, caratterizzato da un scogliera a picco sul mare (Fig. 2.15).

Fig. 2.2 – Torre Astura (promontorio e resti romani)

Fig. 2.3 – Litorale di Foce Verde (pontile su pali)

Fig. 2.4 – Pennelli semisommersi a Sud di Foce Verde

Fig. 2.5 – Litorale tra Foce Verde e Capo Portiere

Fig. 2.6 – Litorale a Sud di capo Portiere

Fig. 2.7 – Foce nuova di Fogliano

Fig. 2.8 – Rio Martino (Foce vecchia)

Fig. 2.9 – Litorale tra Rio Martino e Idrovora Lavorazione

Fig. 2.10 – Idrovora Lavorazione

Fig. 2.11 – Lago di Caprolace (foce e cordone dunale retrostante)

Fig. 2.12 – Litorale tra il Lago di Caprolace e Foce canale Caterattino

Fig. 2.13 – Foce canale Caterattino

Fig. 2.14 – Litorale tra Foce canale Caterattino e Torre Paola

Fig. 2.15 – Torre Paola (foce e promontorio del Circeo)

3 CLIMA ONDOSO AL LARGO

I dati utilizzati nello studio sono stati forniti dal Committente e si riferiscono alla boa ondametrica di Ponza. La boa è ubicata nel Mar Tirreno, a Sud dell'isola di Ponza, in corrispondenza del punto di coordinate Long. 12° 56' 60.0", Lat. 40° 52' 0.1", su un fondale di circa 100 m (Fig. 3.1).

La Rete Ondametrica Nazionale è stata installata sotto la tutela della Direzione Generale delle Opere Marittime del Ministero dei Lavori Pubblici nel giugno 1989.

Durante il periodo 1989-2002 (periodo I) la RON ha funzionato con due diversi regimi operativi: nei periodi in cui lo strumento misurava altezze significative inferiori ad un livello di soglia fissato, la stazione registrava solo i dati con cadenza trioraria, mentre quando le misure superavano il livello di soglia, l'acquisizione diventava continua e i dati venivano registrati con cadenza semioraria. Grazie all'evoluzione dei sistemi di elaborazione, trasmissione ed archiviazione dei dati, il nuovo sistema di misura della RON opera dal 2002 (periodo II) esclusivamente in modalità continua. Questo permette di acquisire informazioni continue su base semioraria con due vantaggi principali: il primo è che facilita enormemente l'analisi statistica dell'insieme dei dati rispetto al caso di dati cronologicamente disomogenei, il secondo è che si possono studiare con migliore attenzione le fasi crescenti e decrescenti delle mareggiate ed i fenomeni ondosi associati a periodi più lunghi in assenza di onde di vento.
Per quanto riguarda la stazione di Ponza il periodo I va dal 1 giugno 1989 al 15 luglio 2002, mentre il periodo II va appunto dal 15 luglio 2002 ad oggi.

Nell'Atlante delle coste, disponibile sul sito dell'APAT, sono riportate le elaborazioni eseguite sui dati ondametrici relativi al periodo giugno 1989 – dicembre 2003. Tali dati sono forniti sottoforma di tabelle, in cui i dati sono ordinati per classi di altezza significativa, direzione di provenienza e periodo.
Oltre alle tabelle con i dati elaborati relativi al periodo 1989-2003, il Committente ha fornito la serie storica dei dati non elaborati da luglio 1989 a giugno 2005.

Fig. 3.1 – Ubicazione della boa di Ponza

Pertanto, si è provveduto ad aggiornare il database disponibile per la stazione di Ponza, elaborando anche i dati relativi al periodo gennaio 2004 – giugno 2005. Per mantenere l'uniformità dei dati di input sono stati elaborati solo i dati registrati con cadenza trioraria.
É stata, quindi, ricostruita una tabella delle registrazioni relativa al periodo giugno 1989 – giugno 2005, unendo i dati riportati nell'Atlante delle Coste con quelli relativi al periodo gennaio 2004 – giugno 2005. Di seguito, in Tab. 3.1, si riassumono i risultati delle elaborazioni condotte. Le registrazioni di moto ondoso al "largo" (in corrispondenza della boa di Ponza), sono state suddivise seguendo la schematizzazione adottata dall'APAT nell'Atlante delle Coste.

Le classi di direzione di provenienza hanno ampiezza di 15°, mentre quelle di altezza significativa (H_{m0}) hanno intervalli di ampiezza 0.5 m. Tutti gli intervalli sono centrati attorno al valore indicato in tabella. Sono state escluse dalle elaborazioni tutte le registrazioni con valori di altezza d'onda significativa inferiori a 0.25 m, che sono state catalogate come "calme".
Complessivamente, nel periodo giugno 1989 – giugno 2005, le registrazioni attese, con cadenza trioraria, avrebbero dovuto essere pari a 46752. I dati registrati dalla boa sono stati 41308, per cui risultano 5444 dati mancanti, pari a circa l'11.6%. Dei 41308 dati rilevati, 4940 onde sono state classificate come "calme" (altezza significativa inferiore a 0.25 m).

Sulla base dei dati riportati in Tab. 3.1 sono state ricostruite le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze massime al largo (Fig. 3.2, Fig. 3.3 e Fig. 3.4). Si può notare che gli eventi con percentuale di apparizione più elevata corrispondono a mareggiate provenienti da Ponente, da Libeccio e da Levante, con prevalenza di quelle provenienti da Ponente.
In termini di energia del moto ondoso, si evidenziano ancora dei picchi di energia in corrispondenza delle medesime direzioni osservate nella rosa delle registrazioni, con il picco di Ponente (270°N) molto più accentuato rispetto agli altri.

DIR	**H_{m0} (m)**													
(°N)	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.0**	**2.5**	**3.0**	**3.5**	**4.0**	**4.5**	**5.0**	**5.5**	**6.0**	**6.5**	**7.0**
0	84	38	7	***2***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	45	24	***7***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	55	30	5	1	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	102	37	8	***4***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	150	65	37	***7***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	386	367	233	95	18	***5***	0	0	0	0	0	0	0	0
90	775	774	544	177	56	15	2	***2***	0	0	0	0	0	0
105	719	444	192	73	24	6	2	***3***	0	0	0	0	0	0
120	560	263	108	60	15	***4***	0	0	0	0	0	0	0	0
135	559	327	159	68	40	13	8	***1***	0	0	0	0	0	0
150	536	235	125	76	20	3	1	***1***	0	0	0	0	0	0
165	531	280	119	62	18	***4***	0	0	0	0	0	0	0	0
180	680	364	189	82	41	8	2	***2***	0	0	0	0	0	0
195	948	546	261	149	64	16	12	***2***	0	0	0	0	0	0
210	1266	474	205	121	58	27	8	2	***1***	0	0	0	0	0
225	1395	547	308	152	72	44	20	11	1	***6***	0	0	0	0
240	1374	555	275	156	72	30	23	8	2	0	***1***	0	0	0
255	1557	736	443	269	130	63	34	18	9	1	***1***	0	0	0
270	2202	1322	901	623	294	213	116	64	23	9	9	1	2	***3***
285	2515	892	449	217	83	47	16	5	1	***1***	0	0	0	0
300	1271	295	84	30	8	10	3	***1***	0	0	0	0	0	0
315	469	145	54	16	***2***	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330	136	38	15	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
345	78	36	7	***3***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 3.1 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (boa di Ponza)
Periodo giugno 1989 – giugno 2005

La rosa delle altezze massime evidenzia la presenza di onde con altezza significativa massima pari a 7 m. Le onde più alte provengono dal settore di Libeccio e Ponente, settori caratterizzati anche dalla massima concentrazione di energia.
Utilizzando i dati riportati in Tab. 3.1, è stato possibile ricostruire la curva di durata nel punto al largo (Fig. 3.5). La curva di durata consente di mettere in relazione la durata di un evento con la sua altezza significativa.

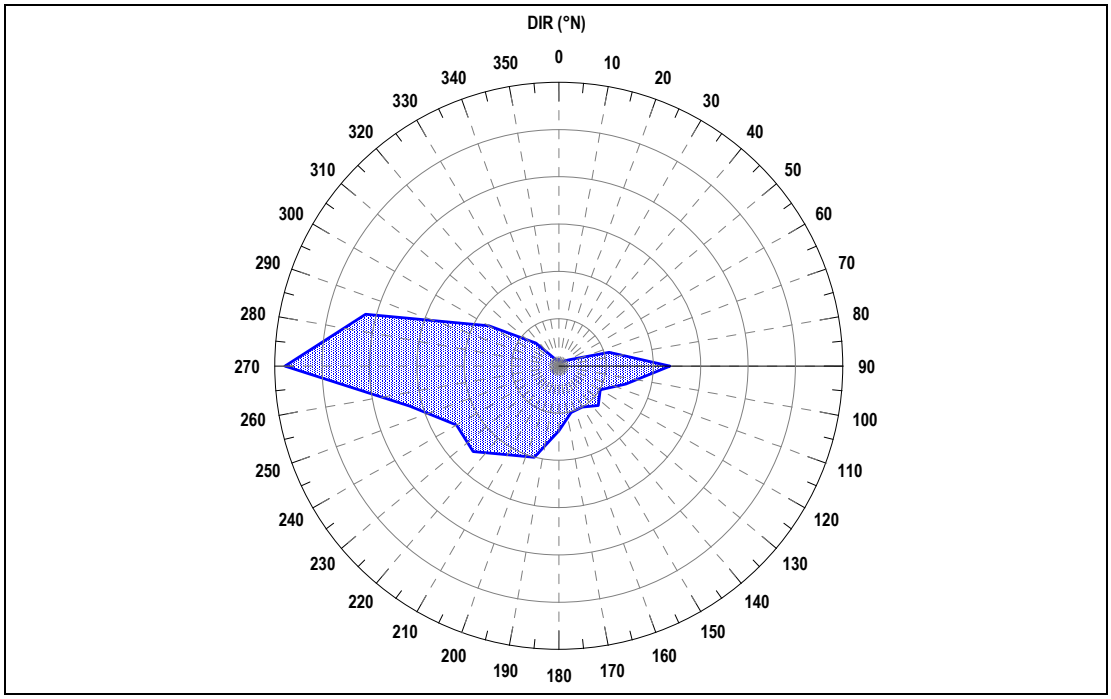


Fig. 3.2 – Rosa delle registrazioni – Boa di Ponza

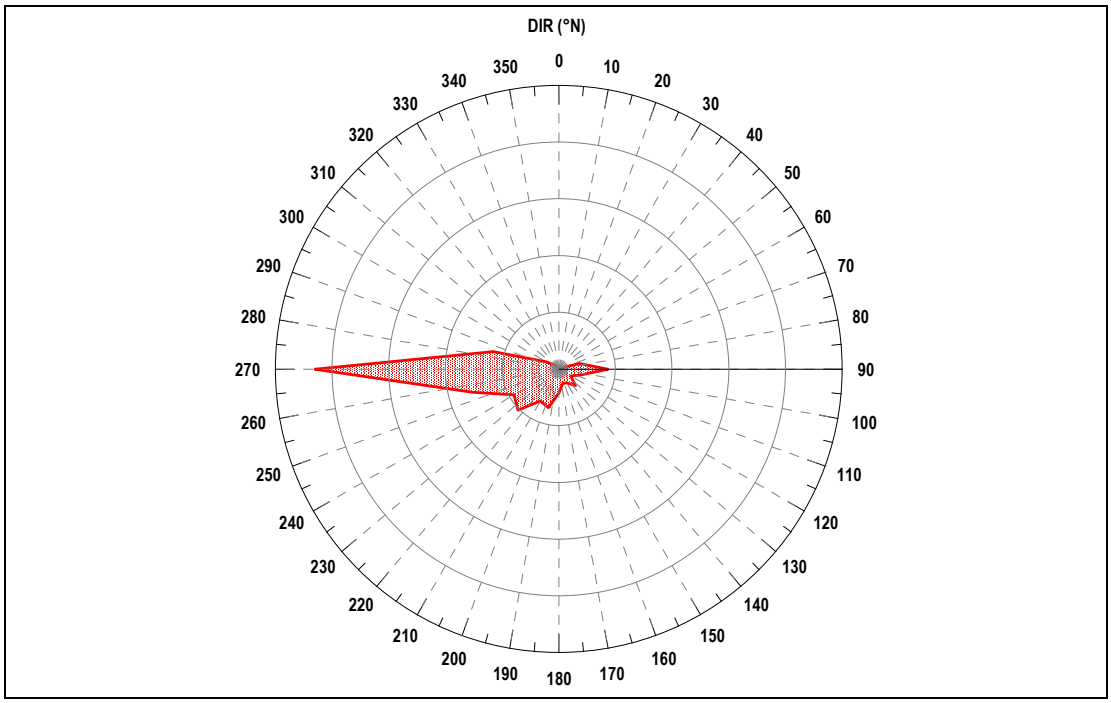


Fig. 3.3 – Rosa delle energie – Boa di Ponza

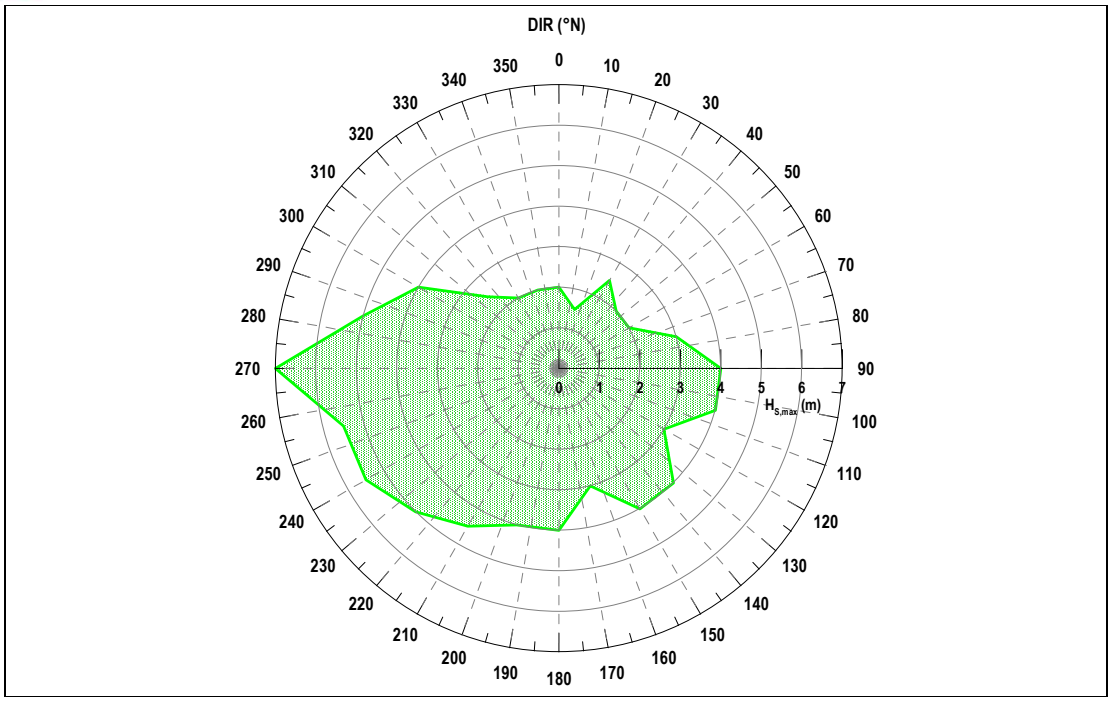


Fig. 3.4 – Rosa delle altezze massime – Boa di Ponza

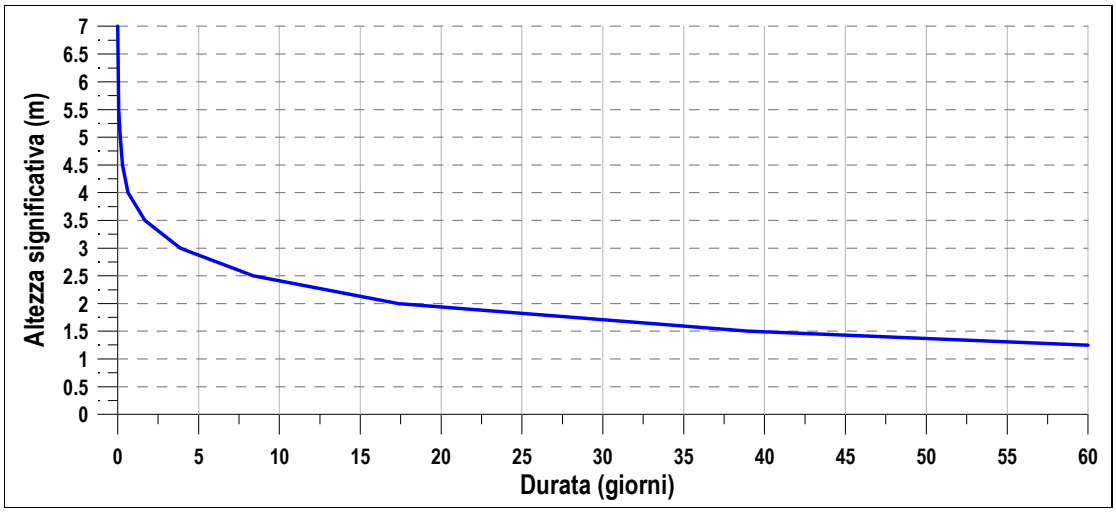


Fig. 3.5 – Curva di durata – Boa di Ponza

3.1 Settore di traversia

Sulla base dell'analisi del clima ondoso al largo e della conformazione geografica del tratto di litorale oggetto di studio, è stato possibile individuare il settore di traversia caratteristico del paraggio, che risulta compreso tra 120° e 300°N. Di conseguenza, le propagazioni del clima ondoso dal largo ad alcuni punti sottocosta, descritte in dettaglio nel successivo paragrafo 4.1, sono state condotte propagando gli eventi ondosi compresi all'interno del settore di traversia.

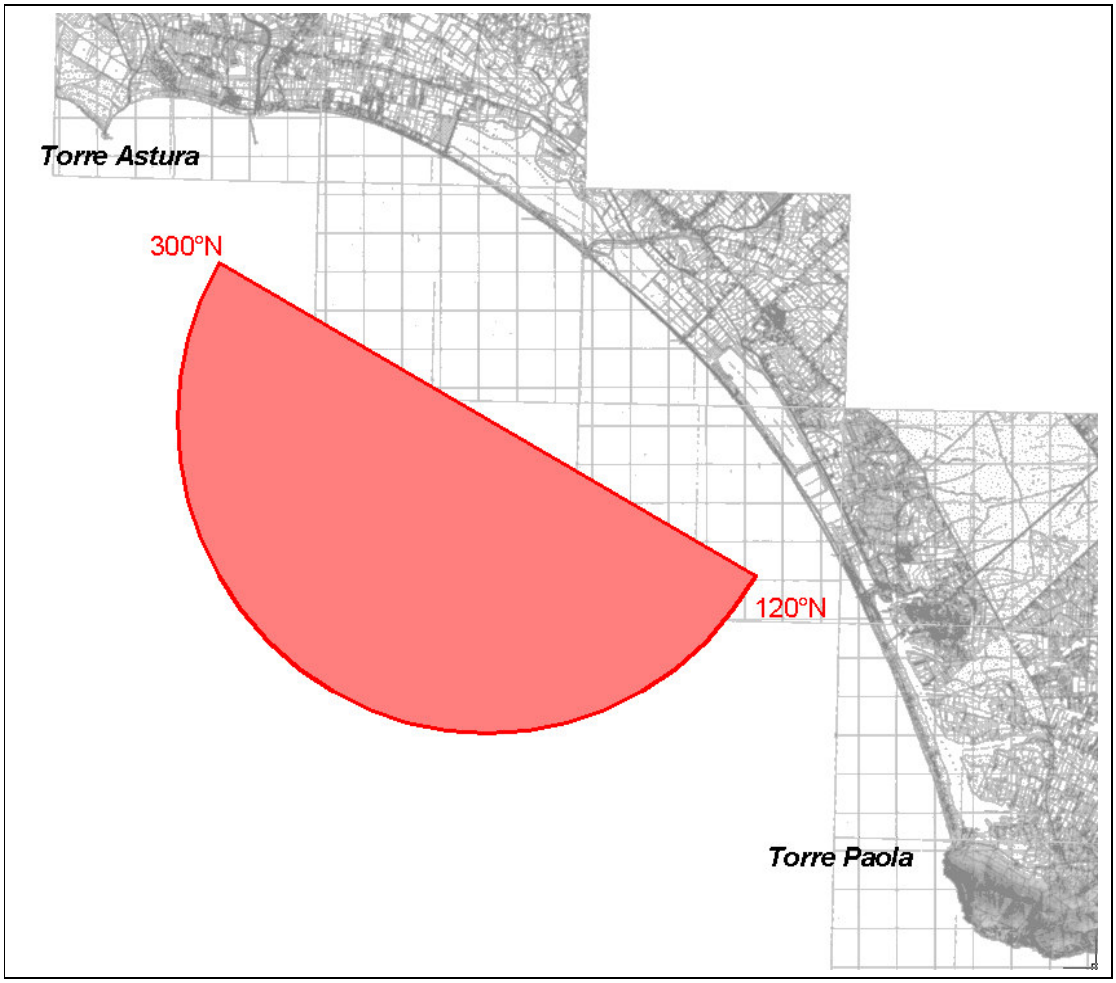


Fig. 3.6 – Settore di traversia

3.2 Statistica degli eventi estremi

L'analisi statistica degli eventi estremi è stata condotta con riferimento alla serie storica dei dati relativi alla boa di Ponza, forniti dal Committente.
Nell'analisi sono stati considerati gli eventi estremi registrati dalla boa nel periodo gennaio 1990 – dicembre 2004 (15 anni di osservazioni). Le altezze significative massime registrate negli anni 1989 e 2005 non sono state considerate perché, in entrambi i casi, si riferiscono ad un periodo di osservazione di circa sei mesi e non risultano pertanto rappresentative per l'analisi dei massimi annuali. Fa eccezione al criterio descritto il caso eventuale in cui il valore massimo registrato nell'anno parziale corrisponda al valore massimo di altezza significativa registrato nell'intero periodo di misura.

L'analisi statistica è stata condotta suddividendo il settore di traversia, definito nel precedente paragrafo 3.1, in tre sottosettori, individuati sulla base della distribuzione della rosa delle altezze massime della boa di Ponza (cfr. Fig. 3.7): settore di Scirocco-Mezzogiorno (120°-190°N), settore di Libeccio (190°-250°N) e settore di Ponente (250°-300°N).
Per condurre l'analisi statistica degli estremi, sono stati considerati tutti i dati registrati dalla boa di Ponza nel periodo gennaio 1990 – dicembre 2004 (sia quelli registrati con cadenza trioraria che, ove presenti, quelli registrati con cadenza semioraria).

Nell'analisi, condotta secondo l'approccio proposto da Gumbel, sono stati quindi considerati, per ciascuno dei tre settori di provenienza individuati, i valori massimi annuali dell'altezza significativa; i dati sono riportati in Tab. 3.2.

Di seguito, in Fig. 3.8, sono riportati in un unico grafico i risultati delle elaborazioni statistiche condotte per i tre settori considerati: 120°-190°N, 190°-250°N e 250°-300°N.
Per maggiore chiarezza, in Tab. 3.3, si riportano, per ciascuno dei tre settori analizzati, le altezze significative corrispondenti ai diversi tempi di ritorno.

Settore 120°-190°N				Settore 190°-250°N				Settore 250°-300°N			
Data	H_s (m)	T_m (s)	DIR (°N)	Data	H_s (m)	T_m (s)	DIR (°N)	Data	H_s (m)	T_m (s)	DIR (°N)
24/11/1991	2.80	8.4	131	16/11/1991	3.60	7.3	224	20/12/1991	5.60	9.4	272
26/03/1992	3.90	6.8	137	06/12/1992	4.70	8.4	248	06/12/1992	5.70	8.9	256
01/03/1993	3.40	6.8	128	02/03/1993	5.60	9.6	231	25/12/1993	5.10	8.8	274
23/12/1994	3.10	7.1	184	19/05/1994	3.60	7.5	234	01/01/1994	4.10	7.2	250
29/11/1995	3.30	7.3	141	30/11/1995	5.20	9.4	229	13/05/1995	6.90	9.3	270
09/12/1996	3.30	7.1	129	20/11/1996	5.10	8.5	220	21/11/1996	6.50	11.6	273
21/04/1997	2.60	7.1	162	04/01/1997	3.40	7.1	231	03/12/1997	6.50	9.8	273
04/12/1998	3.00	6.8	184	04/12/1998	5.00	8.8	230	13/09/1998	5.00	8.8	269
21/11/1999	3.10	6	188	19/11/1999	5.50	7.7	238	28/12/1999	7.90	9.1	266
06/11/2000	2.60	5.3	188	06/11/2000	3.70	6.3	201	26/11/2000	4.80	7.2	273
28/02/2001	3.10	5.7	156	30/12/2001	2.90	6.3	243	09/01/2001	4.30	6.9	270
16/11/2002	4.11	6.9	142	22/11/2002	2.80	5.8	246	07/08/2002	3.70	6.6	287
26/11/2003	3.28	6.5	188	07/01/2003	4.50	7.0	246	07/01/2003	5.00	7.7	253

Tab. 3.2 – Valori dei massimi annuali di H_s suddivisi per settori di provenienza

T_R (anni)	H_S (m)		
	Settore 120°-190°N	Settore 190°-250°N	Settore 250°-300°N
2	3.18	4.12	5.24
5	3.68	5.10	6.49
10	4.00	5.75	7.32
25	4.41	6.57	8.37
50	4.72	7.18	9.15
100	5.02	7.79	9.92

Tab. 3.3 - Risultati statistica di Gumbel (valori di altezza significativa in funzione del tempo di ritorno)

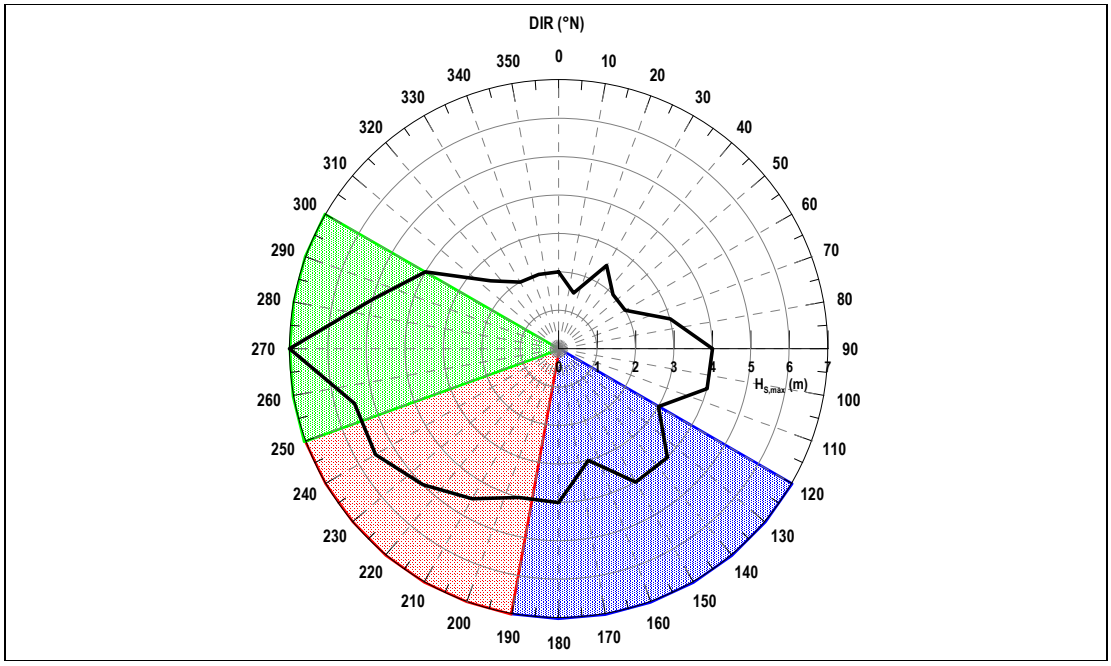


Fig. 3.7 – Individuazione settori utilizzati nell'analisi statistica degli eventi estremi

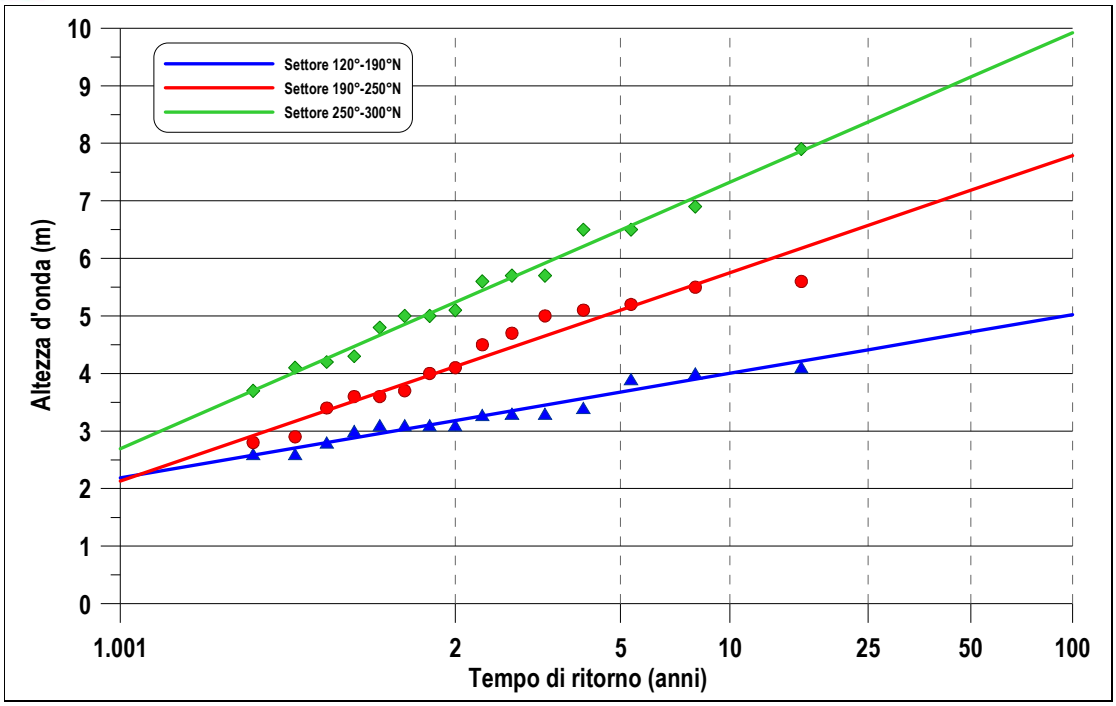


Fig. 3.8 – Risultati analisi statistica di Gumbel

3.3 Distribuzione periodi medi

Per procedere con la propagazione del moto ondoso dalla boa di Ponza al paraggio oggetto di studio, è necessario attribuire a ciascun evento riportato nella tabella del clima ondoso al largo (Tab. 3.1), un periodo medio rappresentativo.

I risultati delle elaborazioni condotte da APAT sui dati relativi al periodo 1989-2003, descritti in dettaglio nell'Atlante delle Coste permettono di correlare il periodo medio e il periodo di picco all'altezza significativa dell'onda o alla direzione di provenienza. Non è stata, invece, condotta un'analisi combinata che permetta di ricavare una correlazione tra periodo e altezza significativa variabile in funzione della direzione media di provenienza dell'evento ondoso.

Pertanto, si è provveduto ad eseguire un ulteriore elaborazione dei dati disponibili (serie storica giugno 1989 – giugno 2005), finalizzata alla propagazione del clima sottocosta. Sono state quindi considerate solamente le registrazioni con cadenza trioraria ricadenti all'interno del settore di traversia del paraggio (120°-300°N).
Con riferimento alla distribuzione dei picchi di energia della rosa relativa alla boa di Ponza (Fig. 3.3), sono stati distinti due settori di provenienza per i quali si ritiene necessario condurre separatamente l'analisi statistica della correlazione tra l'altezza significativa e il periodo medio.
I due settori sono: 120°-225°N e 240°-300°N.
Per uniformare il metodo di analisi utilizzato per l'elaborazione dei periodi medi con quello utilizzato per l'elaborazione delle altezze significative, nella suddivisione dei due settori si è fatto riferimento agli intervalli di direzione rappresentati nell'Atlante delle Coste. Pertanto, il settore 120°-225°N diventa 112.5°-232.5°N, mentre il settore 240°-300°N diventa 232.5°-307.5°N.

Per ciascun settore è stata condotta una interpolazione delle coppie di valori H_s-T_m, individuando l'espressione dell'equazione che meglio approssimava la distribuzione dei dati registrati dalla boa. I risultati dell'analisi sono rappresentati nella successiva Fig. 3.9. Sono state eliminate dall'interpolazione le coppie di valori caratterizzate da altezze significative inferiori a 0.25 m (eventi considerati come "calme").

Le correlazioni ricavate tra periodo medio e altezza significativa sono le seguenti:

- Settore 120°-225°N $T_m = 3.26 + 1.22 \cdot H_S^{0.88}$
- Settore 240°-300°N $T_m = 1.63 + 3.09 \cdot H_S^{0.46}$

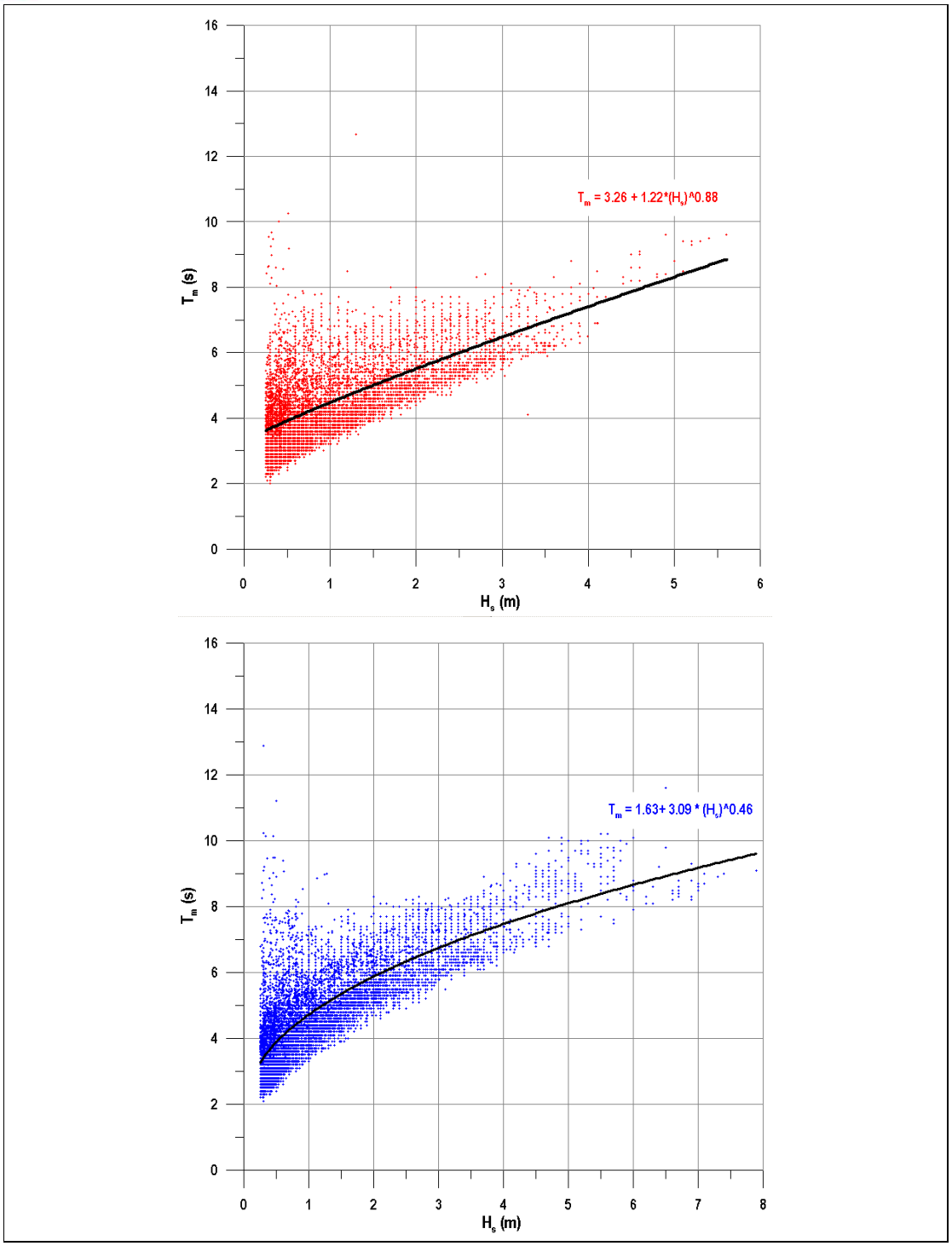


Fig. 3.9 – Analisi statistica dei periodi medi - Settore 120°-225°N (in rosso) e 240°-300°N (in blu)

4 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO

Nel presente paragrafo sono descritti i risultati della propagazione del moto ondoso dal largo (boa di Ponza) all'area oggetto di studio.

In particolare, lo studio della propagazione del moto ondoso è stato suddiviso in tre parti:

- propagazione del clima ondoso dalla boa di Ponza ad una serie di punti sottocosta, antistanti i siti di interesse (codice di calcolo SWAN; cfr. paragrafo 4.1);
- propagazione locale di alcune mareggiate significative (durata 1 e 7 giorni/anno) (codice di calcolo STWAVE; cfr. paragrafo 4.2);
- propagazione di eventi estremi (derivanti dall'analisi statistica condotta nel paragrafo 4.3), corrispondenti a tempi di ritorno di 25 e 50 anni (codice di calcolo STWAVE; cfr. paragrafo 4.2).

4.1 Propagazione del clima ondoso dalla boa di Ponza ad una serie di punti sottocosta

La propagazione del clima ondoso dal largo ad alcuni punti sottocosta è stata condotta mediante il modello numerico SWAN (**S**imulating **WA**ve **N**earshore), descritto in dettaglio nell'allegato "A".

Le propagazioni hanno consentito di determinare il clima in corrispondenza di sette punti antistanti i litorali di interesse. I punti di output del clima locale, ubicati in corrispondenza della batimetrica -10 m s.m.m., risultano rappresentativi dei seguenti tratti di litorale (Fig. 4.1 e Fig. 4.2): Torre Astura, Foce Verde, Capo Portiere, lago dei Monaci, lago di Caprolace, foce Caterattino e Torre Paola.
Di seguito, in Tab. 4.1, si riportano le caratteristiche dei punti di output del clima locale. Le coordinate dei punti sono espresse nel sistema di riferimento UTM33 ED50.

PUNTO	SITO	EST (m)	NORD (m)	Profondità (m s.m.m.)
P1	**Torre Astura**	313371	4585958	-10.0
P2	**Foce Verde**	317399	4585818	-10.0
P3	**Capo Portiere**	321688	4585239	-10.1
P4	**Lago dei Monaci**	325658	4582624	-9.9
P5	**Lago di Caprolace**	329427	4578886	-10.4
P6	**Foce Caterattino**	332305	4574345	-10.2
P7	**Torre Paola**	334737	4568057	-9.9

Tab. 4.1 – Caratteristiche dei punti di output del clima locale

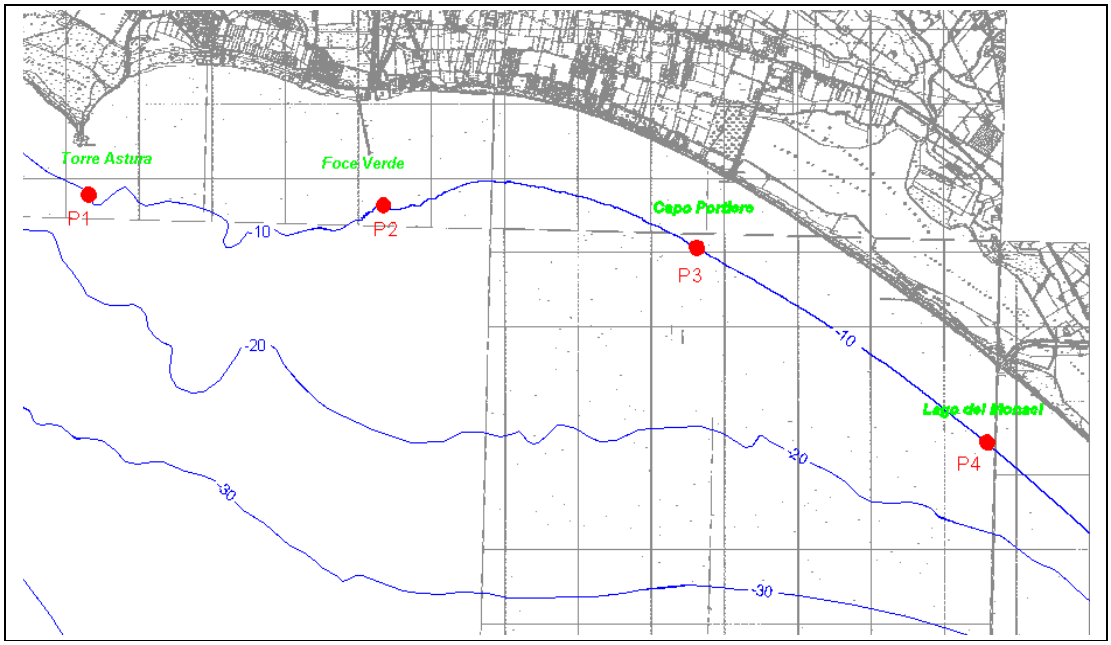


Fig. 4.1 – Planimetria con punti di output – Tratto di litorale compreso tra Torre Astura e lago dei Monaci

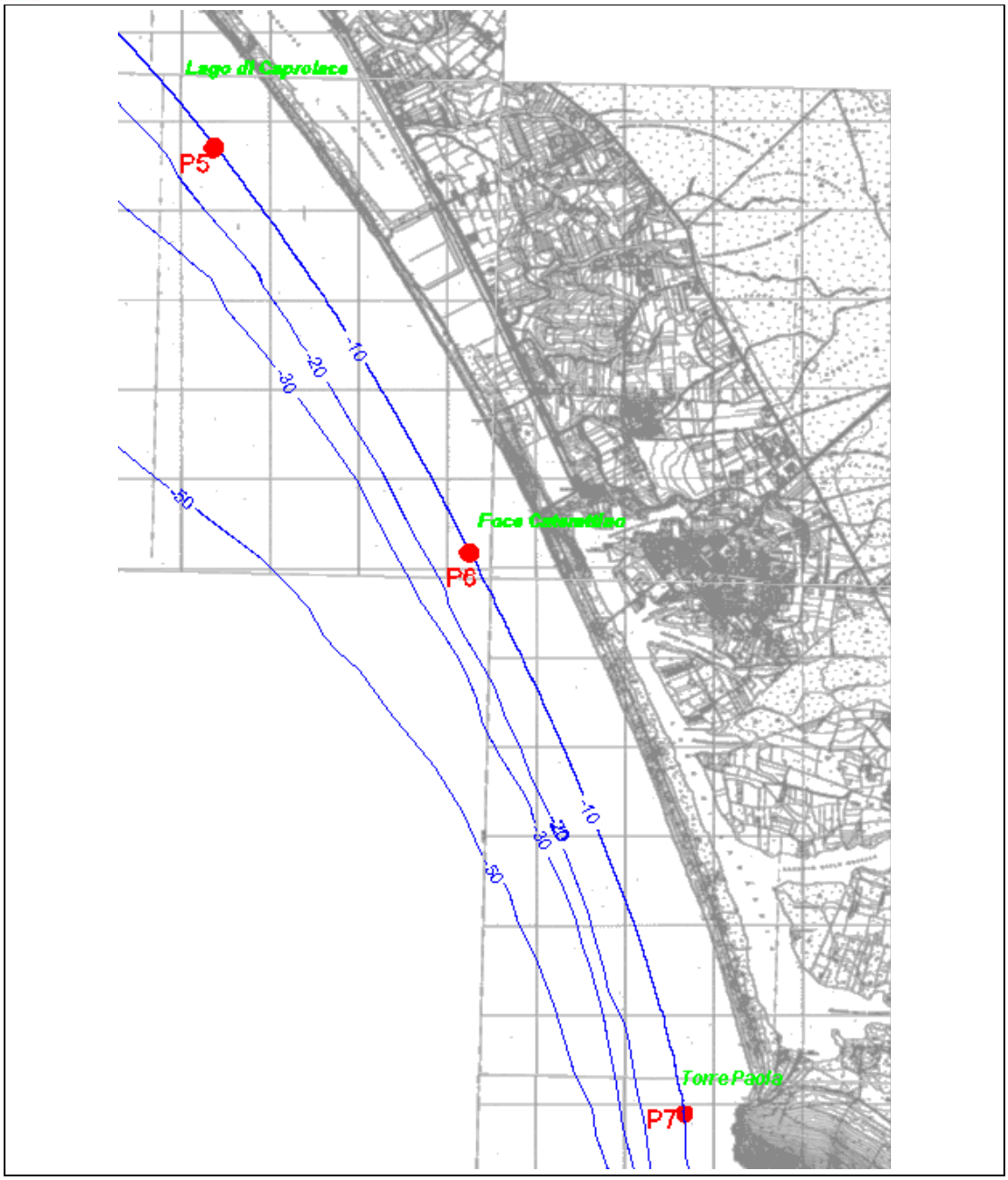


Fig. 4.2 – Planimetria con punti di output – Tratto di litorale compreso tra lago dei Monaci e Torre Paola

4.1.1 Settaggio del modello

La propagazione del moto ondoso, condotta mediante il modello numerico SWAN, è stata basata sulla batimetria aggiornata del sito, ricavata in base alle carte nautiche e ad alcuni recenti rilievi locali forniti dal Committente.
In particolare, per il tratto di litorale compreso tra Torre Astura e foce Verde, non essendo disponibili rilievi più recenti, le batimetriche ricavate dalla carta nautica sono state confrontate con quelle del rilievo eseguito nel 1998. Vista l'esiguità del numero di punti battuti in corrispondenza del tratto in oggetto (da cui deriva un andamento anomalo delle linee batimetriche interpolate sulla base del rilievo 1998), si è deciso, per il tratto a Nord di foce Verde, di utilizzare direttamente le batimetrie ricavate dalla carta nautica.
Per il tratto di litorale compreso tra foce Verde e il lago di Caprolace, invece, è stato utilizzato un rilievo eseguito nel settembre 2003. Infine, per rappresentare le batimetrie del tratto di litorale più a Sud (tra il lago di Caprolace e Torre Paola) è stato utilizzato un rilievo eseguito a maggio 2007.

Nel modello, il dominio di calcolo è stato discretizzato mediante una griglia di calcolo (BIG GRID) comprendente tutta l'area oggetto di studio (Fig. 4.3) e avente le seguenti caratteristiche:

- origine nel punto di coordinate (329605 m EST; 4548500 m NORD);
- dimensioni 24'000 x 51'000;
- maglia quadrata con passo 100 m;
- inclinazione di 42° rispetto all'orizzontale;

Le coordinate dell'origine della griglia di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento UTM33 ED50.

I parametri significativi del moto ondoso sono stati rappresentati con uno spettro bidimensionale di tipo JONSWAP avente fattore di appuntimento del picco (γ) e "spreading" direzionale (s), desunti dalla ripidità dell'onda (mediante la formula di Wilson, 1965). Lo spettro è stato poi discretizzato in 25 frequenze (f1=0.04 Hz, fn+1=1.1 fn) e 24 direzioni (equispaziate di 15°).
Le condizioni al contorno sono state assunte costanti lungo i bordi della griglia (e pari a quelle esistenti in corrispondenza della boa di Ponza), con l'accortezza di scalare i parametri d'onda in funzione della profondità nella porzione di bordo prossima alla riva, dove avvengono fenomeni di frangimento dovuti al fondo.
Il bordo offshore della griglia è posto su profondità dell'ordine di 100-200 m; pertanto, ad esso sono state ragionevolmente assegnate in input le caratteristiche del clima della boa di Ponza, che si trova più al largo rispetto al bordo della griglia, ma su fondali analoghi e con esposizione molto simile.
Gli altri settaggi del modello sono stati operati mirando alla conservatività dei risultati. Questa scelta è stata suggerita dal fatto che, nelle simulazioni in cui non viene fornito al modello l'input del vento, la diffusività intrinseca dello schema numerico di avvezione tende a ridurre leggermente l'altezza d'onda in assenza di fenomeni dissipativi.
Come già accennato al precedente paragrafo 3.1, le propagazioni del clima ondoso in corrispondenza dei punti di output del clima locale sono state condotte propagando gli eventi ondosi del clima ala largo compresi all'interno del settore di traversia 120°-300°N. Utilizzando la suddivisione degli intervalli di direzione adottata dall'APAT nell'Atlante delle Coste, sono stati propagati tutti gli eventi riportati in Tab. 3.1 e ricadenti all'interno del settore 112.5°-307.5°N. Complessivamente, il numero di eventi ricadenti all'interno del settore di traversia considerato sono 29747.
Sulla base dell'analisi riportata al precedente paragrafo 3.3, a ciascuna coppia (H_{m0},DIR) è stato associato un periodo medio differenziato a seconda del settore di provenienza dell'evento ondoso (120°-225° N oppure 240°-300°N).

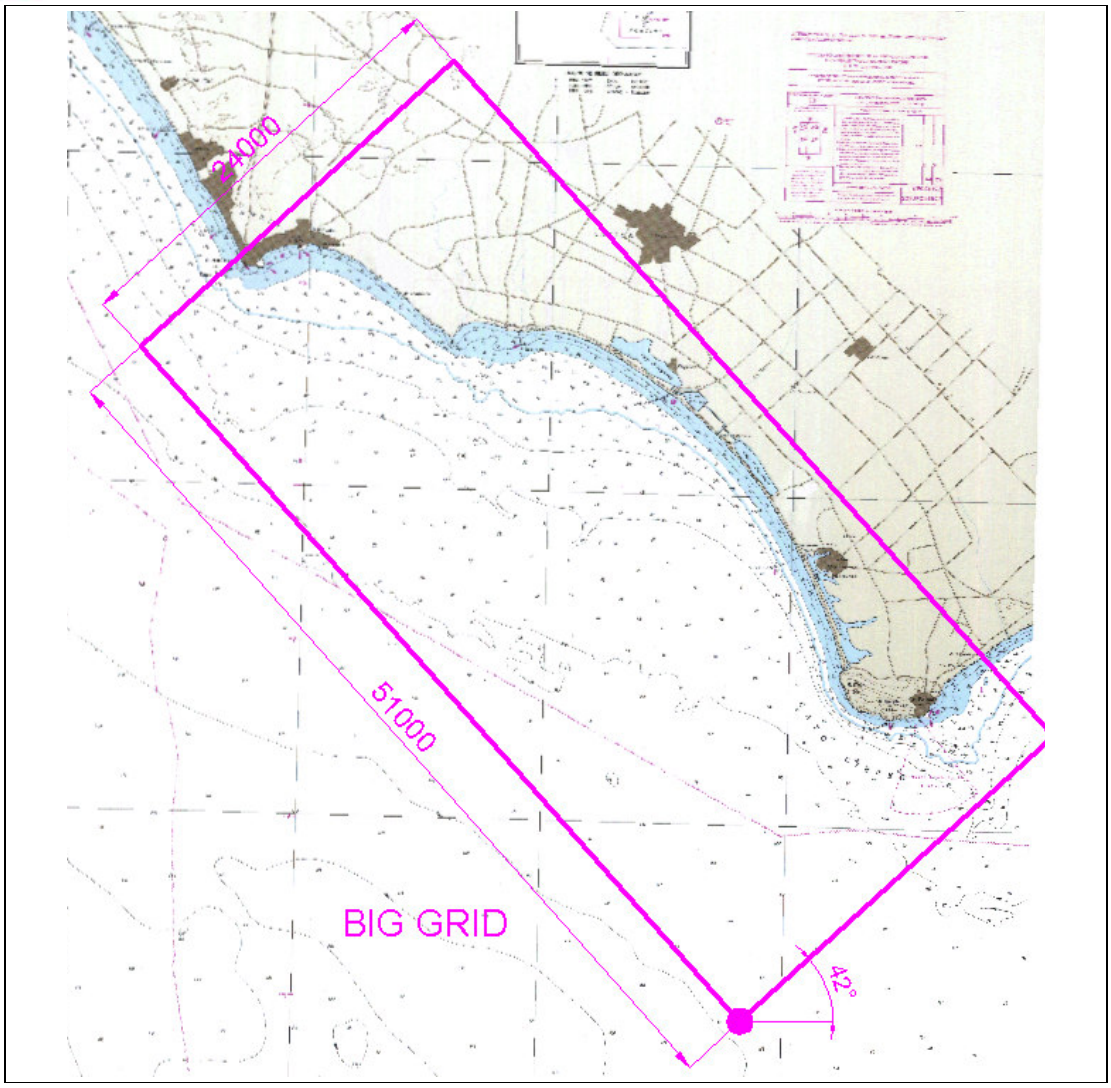


Fig. 4.3 – Griglia di calcolo - BIG GRID

4.1.2 Risultati propagazione Torre Astura (Punto P1)

Nella successiva Tab. 4.2 sono riportate le registrazioni del moto ondoso nel punto P1, ordinate per classi di altezza significativa e direzione di provenienza; i dati sono stati ottenuti per mezzo delle simulazioni condotte con il codice di calcolo SWAN.

Le tabelle del clima ondoso in corrispondenza dei punti di output locali del clima sono state ottenute dai risultati delle propagazioni, suddividendo i dati ottenuti per classi di altezza significativa e direzione di provenienza, secondo la schematizzazione adottata dall'APAT nell'Atlante delle Coste. Anche in questo caso, come per il clima al largo, le onde con altezza significativa inferiore a 0.25 m sono state considerate come "calme".
Al fine di facilitare il confronto tra il clima ricostruito nei diversi punti di output, si è deciso di mantenere invariata, per ciascuna grandezza rappresentata (registrazioni, energie, altezze massime), la scala impiegata nella rappresentazione delle rose.

Di seguito (Fig. 4.4, Fig. 4.5 e Fig. 4.6) sono riportate rispettivamente le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze significative massime nel punto P1, posto di fronte al capo di Torre Astura.

Dall'analisi delle rose delle energie e delle altezze massime, risulta evidente come l'energia del moto ondoso sia concentrata nel settore 150°-260°N. La rosa delle energie presenta due picchi principali in corrispondenza delle direzioni di Mezzogiorno-Libeccio (195°N) e Libeccio-Ponente (255°N).
Le mareggiate caratterizzate dai massimi valori di altezza significativa (di poco superiori ai 4 m) provengono dal settore di Libeccio.

Nella successiva Fig. 4.7 si riporta la curva di durata relativa al punto P1. Si osserva come i 2.00 m di altezza significativa vengano superati mediamente per 7-8 giorni all'anno.

DIR	**H_{m0} (m)**										
(°N)	**Calme (<0.25)**	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.0**	**2.5**	**3.0**	**3.5**	**4.0**	**4.5**	**5.0**
135	0	***263***	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	560	1422	267	143	***4***	0	0	0	0	0	0
165	0	531	515	244	116	36	***10***	0	0	0	0
180	0	680	364	189	144	59	4	***1***	0	0	0
195	0	948	546	261	149	64	24	14	***4***	0	0
210	0	1266	474	205	121	58	35	2	***1***	0	0
225	0	1395	547	308	152	116	20	11	***8***	0	0
240	0	1374	555	544	358	93	170	21	13	***3***	0
255	0	1557	3176	1162	571	122	***1***	0	0	0	0
270	1271	5988	***487***	0	0	0	0	0	0	0	0
285	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.2 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P1)

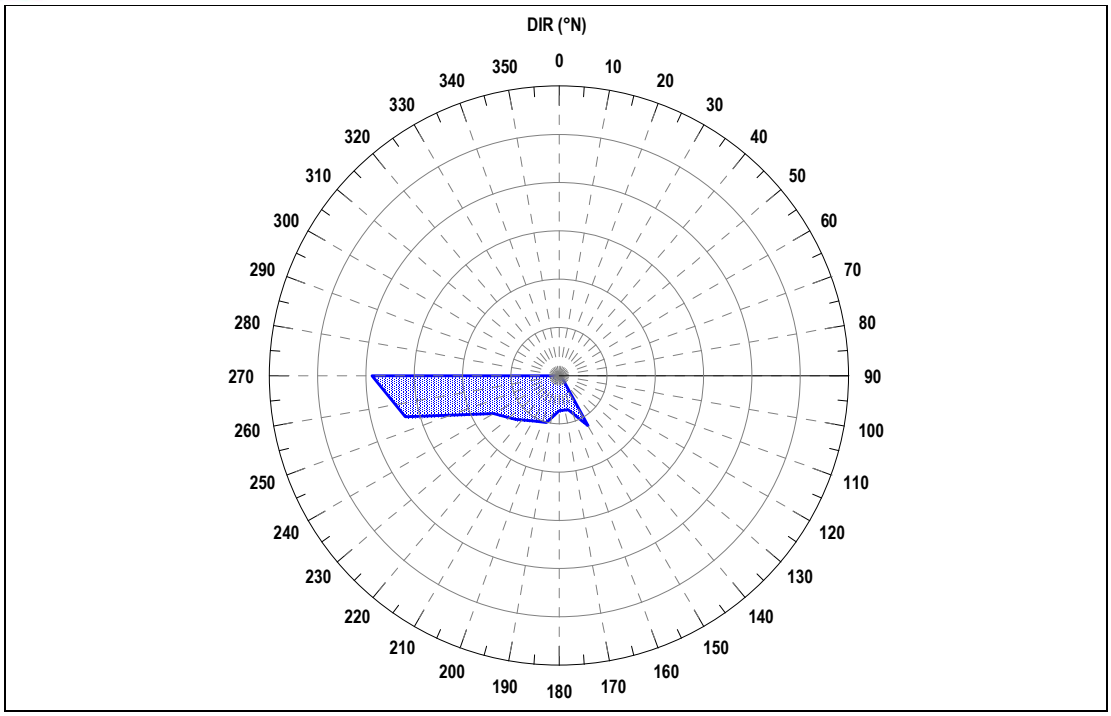


Fig. 4.4 – Rose delle registrazioni nel punto P1

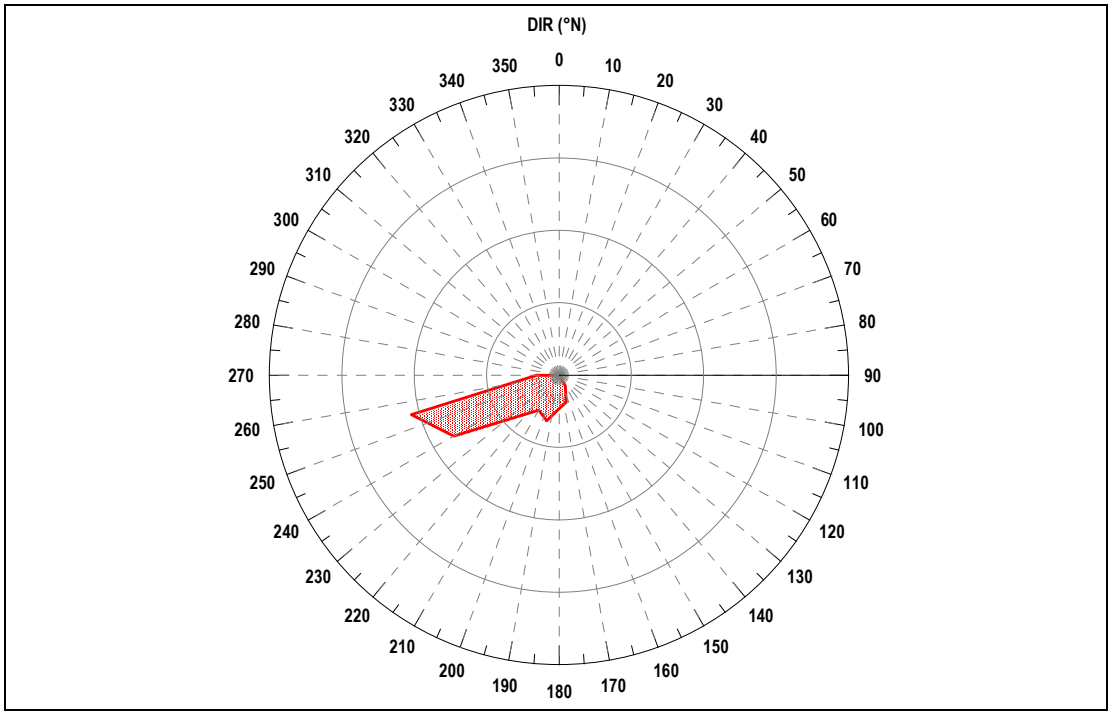


Fig. 4.5 – Rosa delle energie nel punto P1

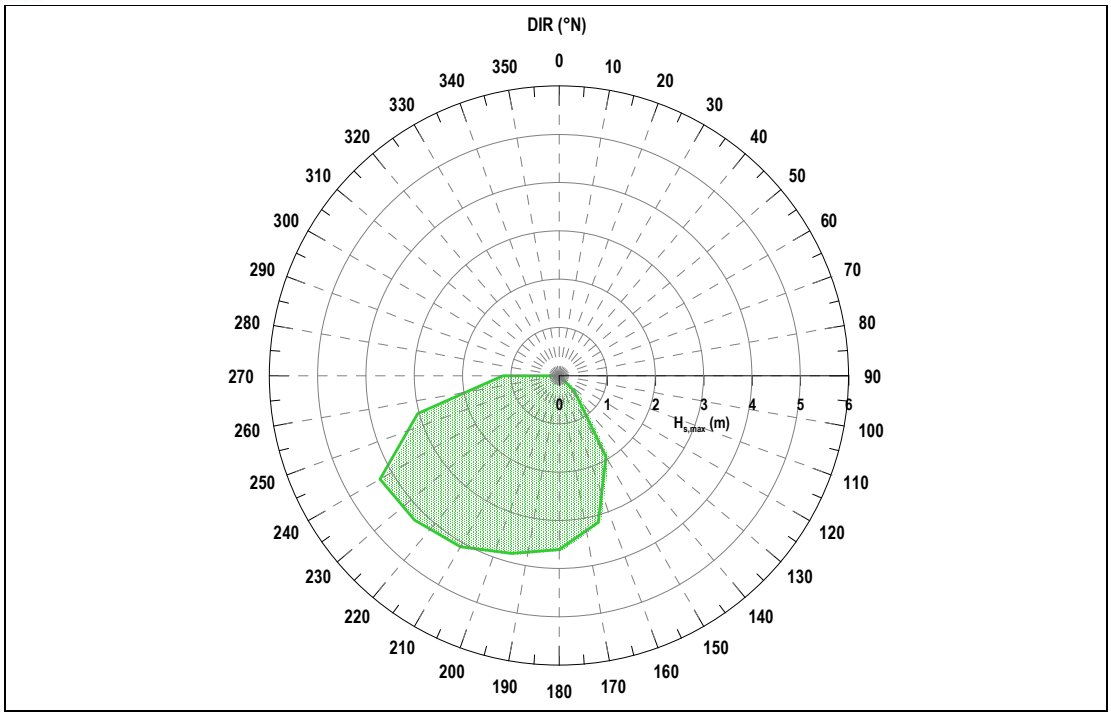


Fig. 4.6 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P1

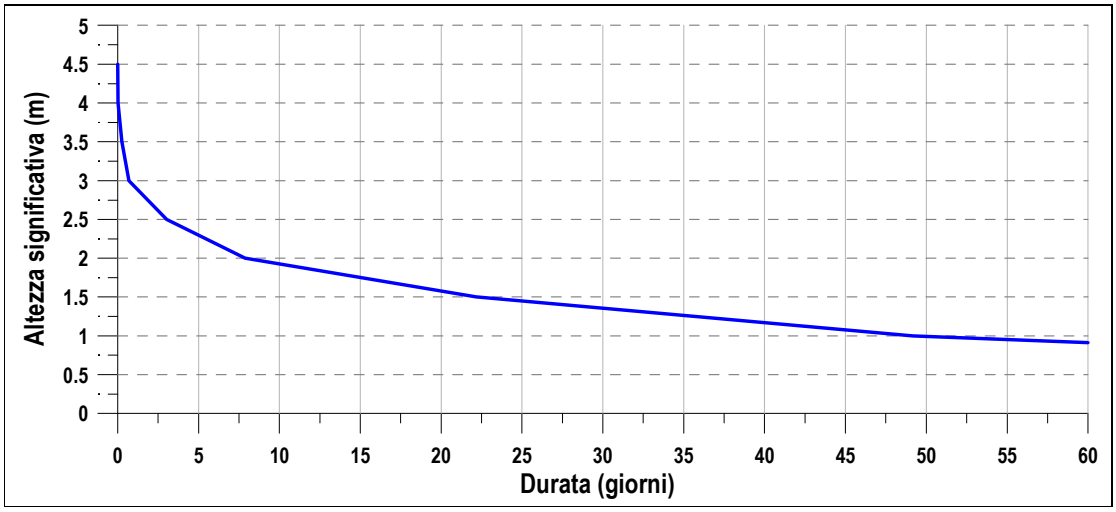


Fig. 4.7 – Curva di durata nel punto P1

4.1.3 Risultati propagazione Foce Verde (Punto P2)

Nella successiva Tab. 4.3 sono riportate le registrazioni del moto ondoso nel punto P2, ordinate per classi di altezza significativa e direzione di provenienza; i dati sono stati ottenuti per mezzo delle simulazioni condotte con il codice di calcolo SWAN.

Di seguito (Fig. 4.8, Fig. 4.9 e Fig. 4.10) sono riportate rispettivamente le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze significative massime nel punto P2, posto di fronte al litorale di Foce Verde.

Dall'analisi delle rose delle energie e delle altezze massime, si osserva una rotazione del clima rispetto al punto P1 (posto di fronte al capo di Torre Astura), dovuta alla conformazione geografica del paraggio di Foce Verde, che risulta parzialmente schermato dai promontori posti più a Nord (Torre Astura e Capo d'Anzio). Ne consegue che il paraggio di Foce Verde risulta meno esposto, rispetto a quello di Torre Astura, alle mareggiate provenienti da Ponente, caratterizzate dai massimi valori di altezza significativa (nel punto al largo).

L'energia del moto ondoso risulta concentrata nel settore 150°-250°N. La rosa delle energie presenta due picchi principali, entrambi in corrispondenza delle direzioni di Libeccio (210°N e 240°N).
Le mareggiate caratterizzate dai massimi valori di altezza significativa (pari a 3.7-3.8 m) provengono dal settore di Mezzogiorno-Libeccio e, vista la conformazione geografica del paraggio, risultano normali al tratto di litorale di Foce Verde.

Nella successiva Fig. 4.11 si riporta la curva di durata relativa al punto P2. Si osserva come i 2.00 m di altezza significativa vengano superati mediamente per 3 giorni all'anno.

DIR	**H_{m0} (m)**										
(°N)	**Calme (<0.25)**	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.0**	**2.5**	**3.0**	**3.5**	**4.0**	**4.5**	**5.0**
135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	560	1685	562	87	40	***21***	0	0	0	0	0
165	0	531	280	244	138	41	6	***1***	0	0	0
180	0	680	364	189	82	41	10	***2***	0	0	0
195	0	948	546	261	213	16	12	***2***	0	0	0
210	0	1266	474	357	251	91	19	9	***1***	0	0
225	0	1395	1377	464	102	59	***9***	0	0	0	0
240	0	2931	3013	973	284	***42***	0	0	0	0	0
255	3786	5274	***8***	0	0	0	0	0	0	0	0
270	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
285	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.3 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P2)

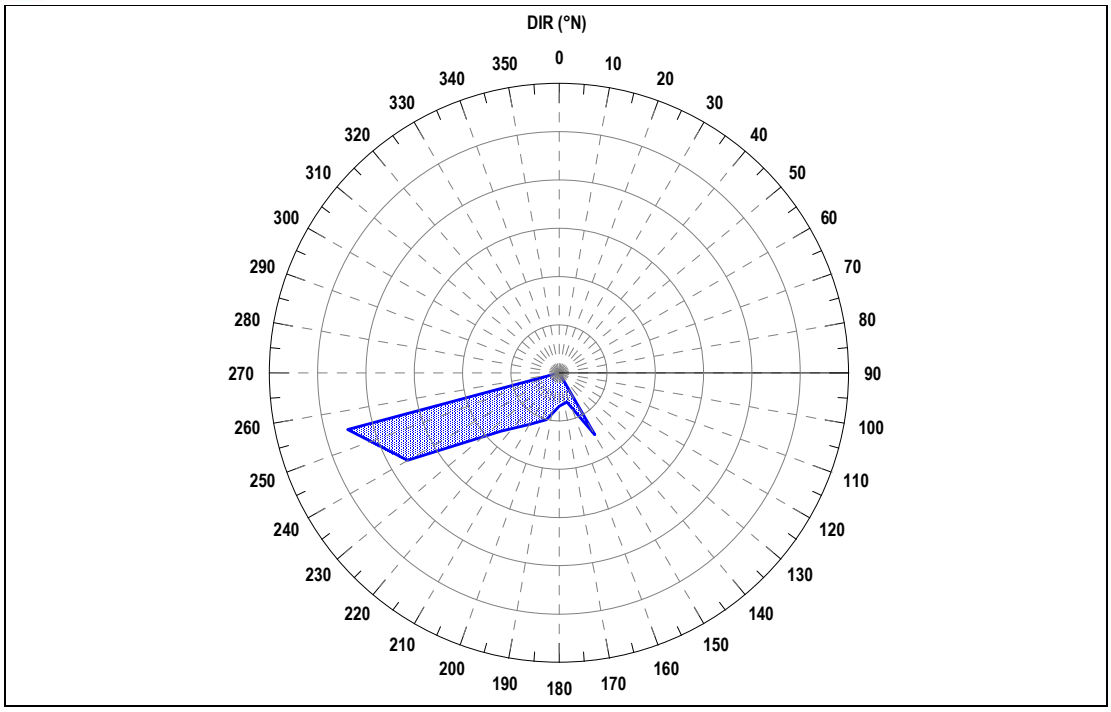


Fig. 4.8 – Rose delle registrazioni nel punto P2

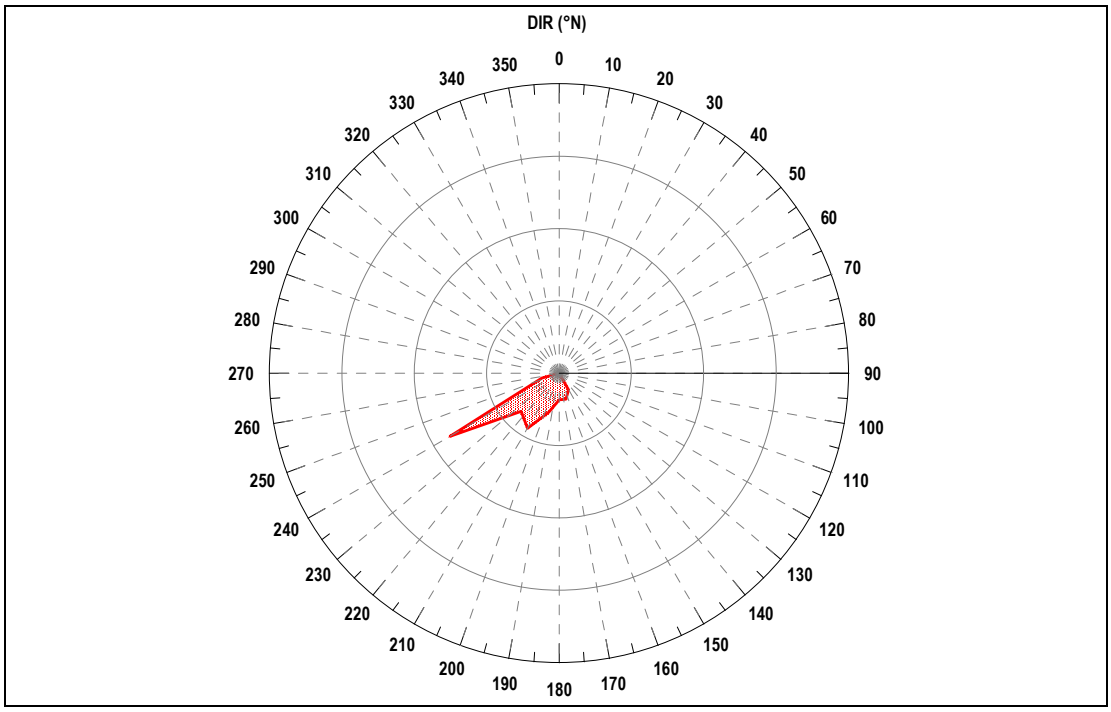


Fig. 4.9 – Rosa delle energie nel punto P2

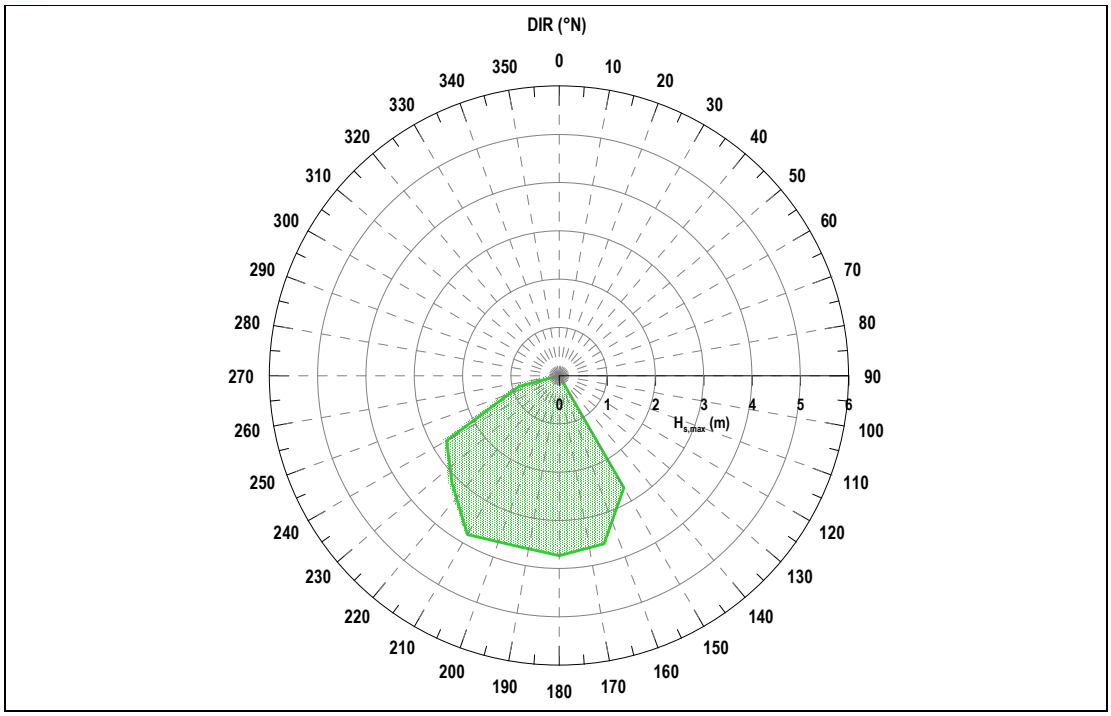


Fig. 4.10 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P2

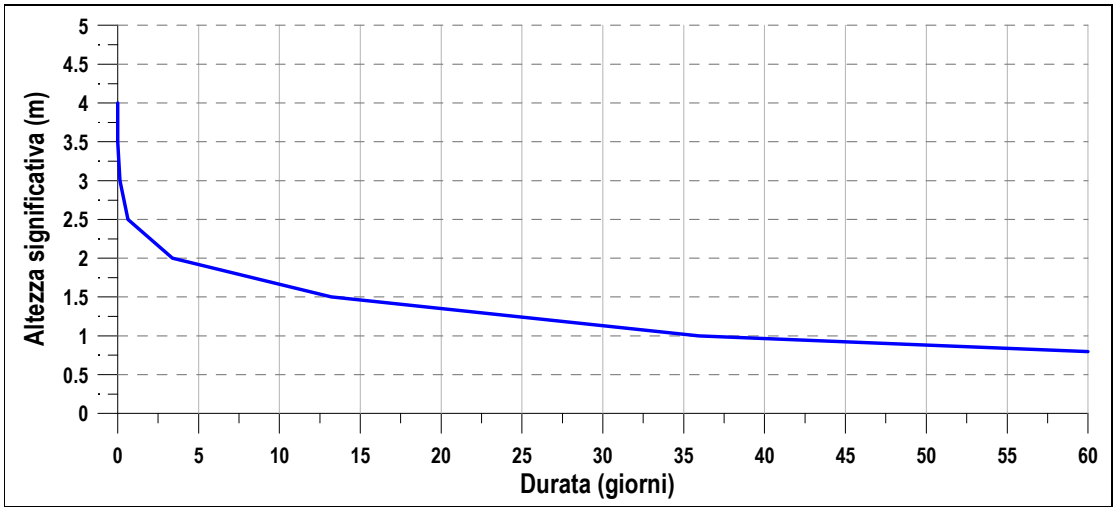


Fig. 4.11 – Curva di durata nel punto P2

4.1.4 Risultati propagazione Capo Portiere (Punto P3)

Nella successiva Tab. 4.4 sono riportate le registrazioni del moto ondoso nel punto P3, ordinate per classi di altezza significativa e direzione di provenienza; i dati sono stati ottenuti per mezzo delle simulazioni condotte con il codice di calcolo SWAN.

Di seguito (Fig. 4.12, Fig. 4.13 e Fig. 4.14) sono riportate rispettivamente le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze significative massime nel punto P3, posto di fronte al litorale di Capo Portiere.

Come per i paraggi di Torre Astura e Foce Verde, anche in questo caso l'energia del moto ondoso risulta concentrata nel settore 150°-250°N.
Si osserva un unico picco principale nella rosa delle energie in corrispondenza della direzione di Libeccio (240°N).

Le mareggiate caratterizzate dai massimi valori di altezza significativa (di poco superiori ai 4 m) provengono da Libeccio (210°N).

Nella successiva Fig. 4.15 si riporta la curva di durata relativa al punto P3. Si osserva come i 2.00 m di altezza significativa vengano superati mediamente per 5 giorni all'anno.

DIR	**H_{m0} (m)**										
(°N)	**Calme (<0.25)**	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.0**	**2.5**	**3.0**	**3.5**	**4.0**	**4.5**	**5.0**
135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	560	1793	219	***19***	0	0	0	0	0	0	0
165	0	531	640	303	95	13	***1***	0	0	0	0
180	0	680	364	189	82	71	2	***2***	0	0	0
195	0	948	546	261	213	16	12	***2***	0	0	0
210	0	1266	474	205	121	102	55	13	***8***	0	0
225	0	1395	547	464	224	102	31	3	***1***	0	0
240	0	1374	1734	1461	543	123	36	13	***3***	0	0
255	2515	6536	1219	***51***	0	0	0	0	0	0	0
270	1271	***295***	0	0	0	0	0	0	0	0	0
285	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.4 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P3)

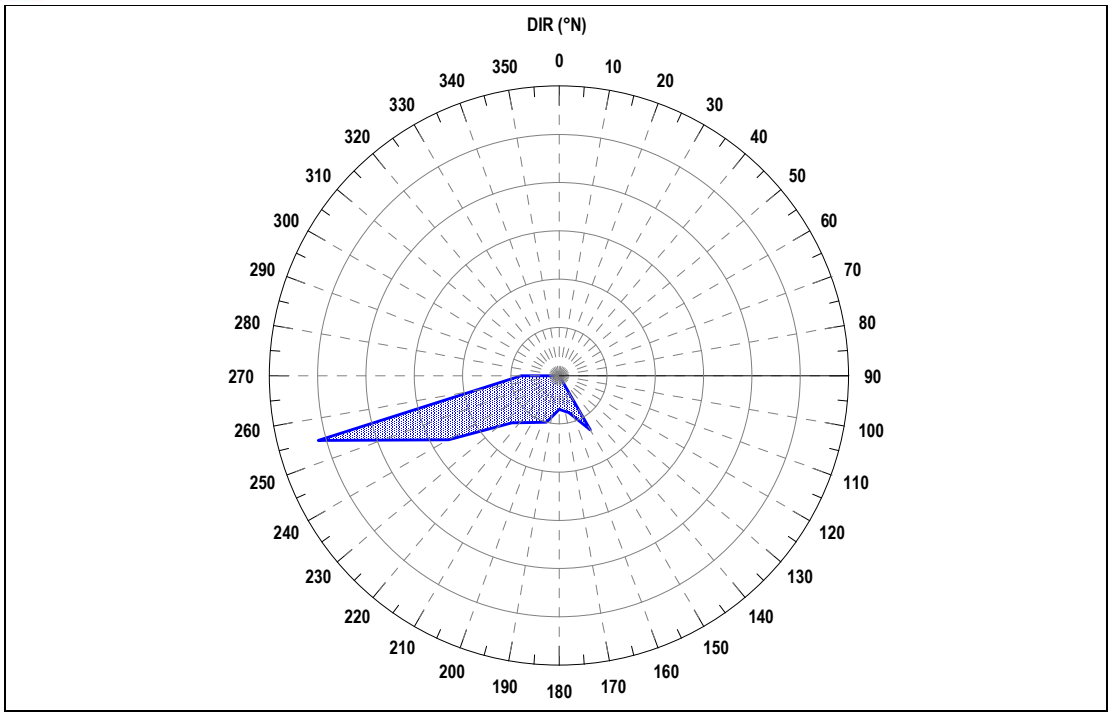


Fig. 4.12 – Rose delle registrazioni nel punto P3

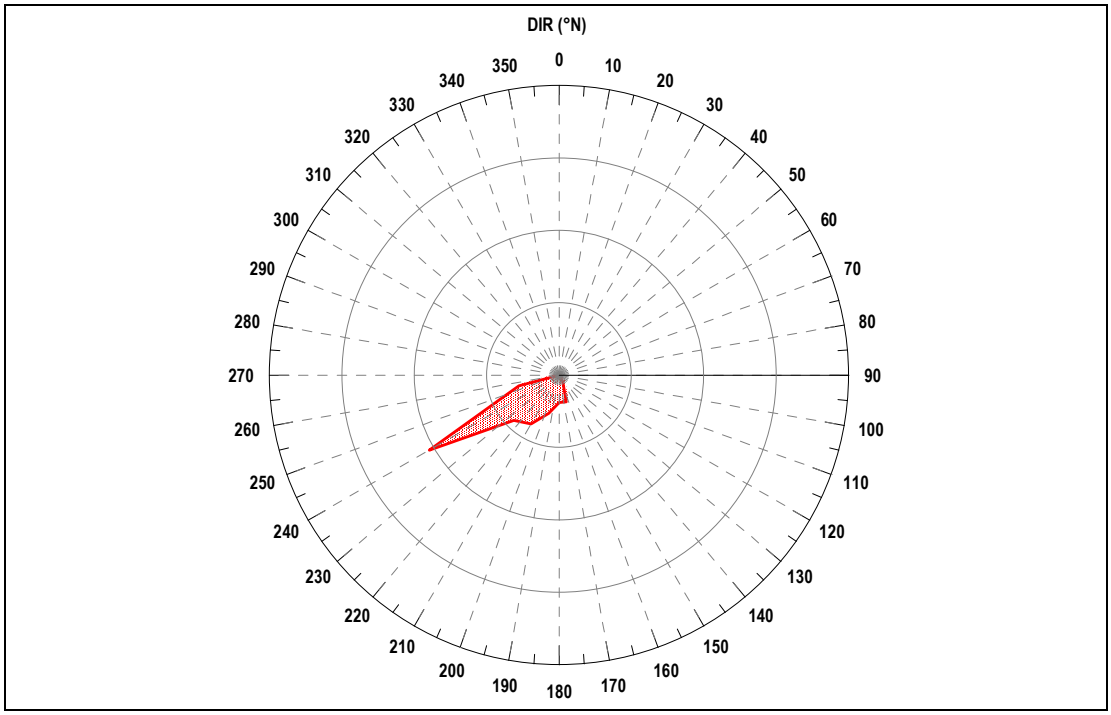


Fig. 4.13 – Rosa delle energie nel punto P3

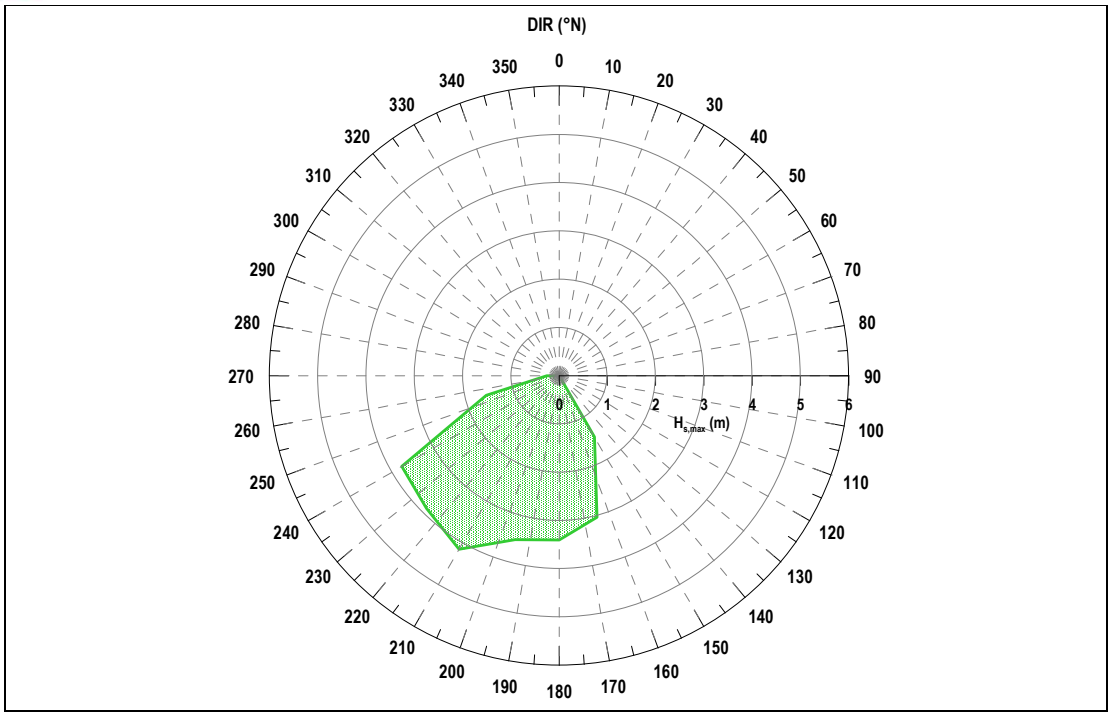


Fig. 4.14 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P3

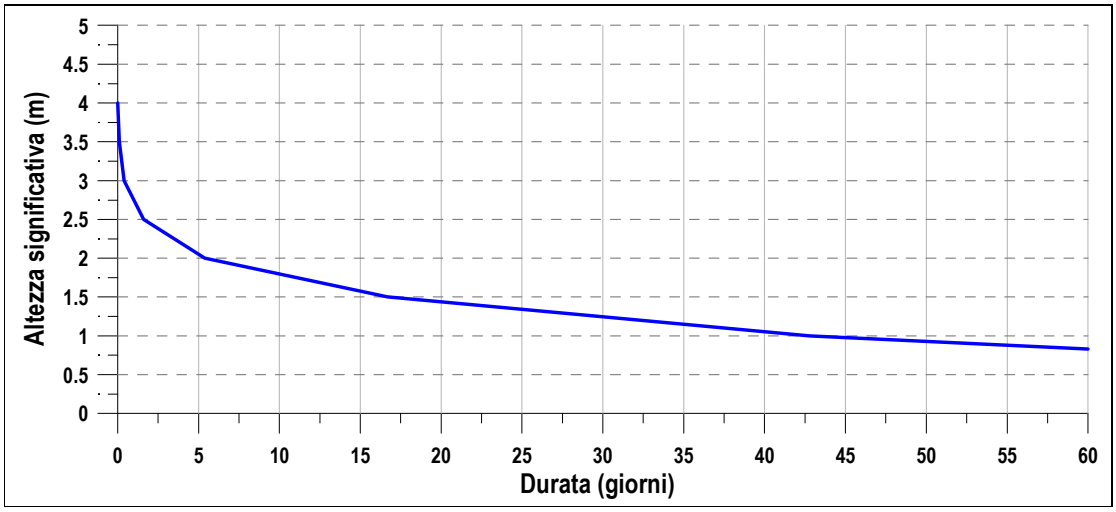


Fig. 4.15 – Curva di durata nel punto P3

4.1.5 Risultati propagazione lago dei Monaci (Punto P4)

Nella successiva Tab. 4.5 sono riportate le registrazioni del moto ondoso nel punto P4, ordinate per classi di altezza significativa e direzione di provenienza; i dati sono stati ottenuti per mezzo delle simulazioni condotte con il codice di calcolo SWAN.

Di seguito (Fig. 4.16, Fig. 4.17 e Fig. 4.18) sono riportate rispettivamente le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze significative massime nel punto P4, posto di fronte al lago dei Monaci.

L'energia del moto ondoso risulta, come per gli altri paraggi analizzati finora, concentrata nel settore 150°-260°N. La rosa delle energie presenta due picchi principali, in corrispondenza delle direzioni di Libeccio (240°N) e Mezzogiorno-Libeccio (195°N).

Le mareggiate caratterizzate dai massimi valori di altezza significativa (con valori compresi tra 4.2 e 4.4 m) provengono dal settore di Libeccio (210°-240°N) e, vista la conformazione geografica del paraggio, risultano pressoché normali al tratto di litorale di posto di fronte al lago dei Monaci.

Nella successiva Fig. 4.19 si riporta la curva di durata relativa al punto P4. Si osserva come i 2.00 m di altezza significativa vengano superati mediamente per 7-8 giorni all'anno.

DIR	**H_{m0} (m)**										
(°N)	**Calme (<0.25)**	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.0**	**2.5**	**3.0**	**3.5**	**4.0**	**4.5**	**5.0**
135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	263	168	***15***	0	0	0	0	0	0	0	0
165	1119	1788	197	157	***1***	0	0	0	0	0	0
180	0	680	763	251	103	***47***	0	0	0	0	0
195	0	948	546	261	149	88	14	***4***	0	0	0
210	0	1266	474	205	121	58	27	8	3	***6***	0
225	0	1395	547	308	152	102	67	39	***4***	0	0
240	0	1374	555	987	286	251	139	28	***7***	0	0
255	0	1557	3176	753	524	6	***1***	0	0	0	0
270	1271	5988	497	***3***	0	0	0	0	0	0	0
285	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.5 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P4)

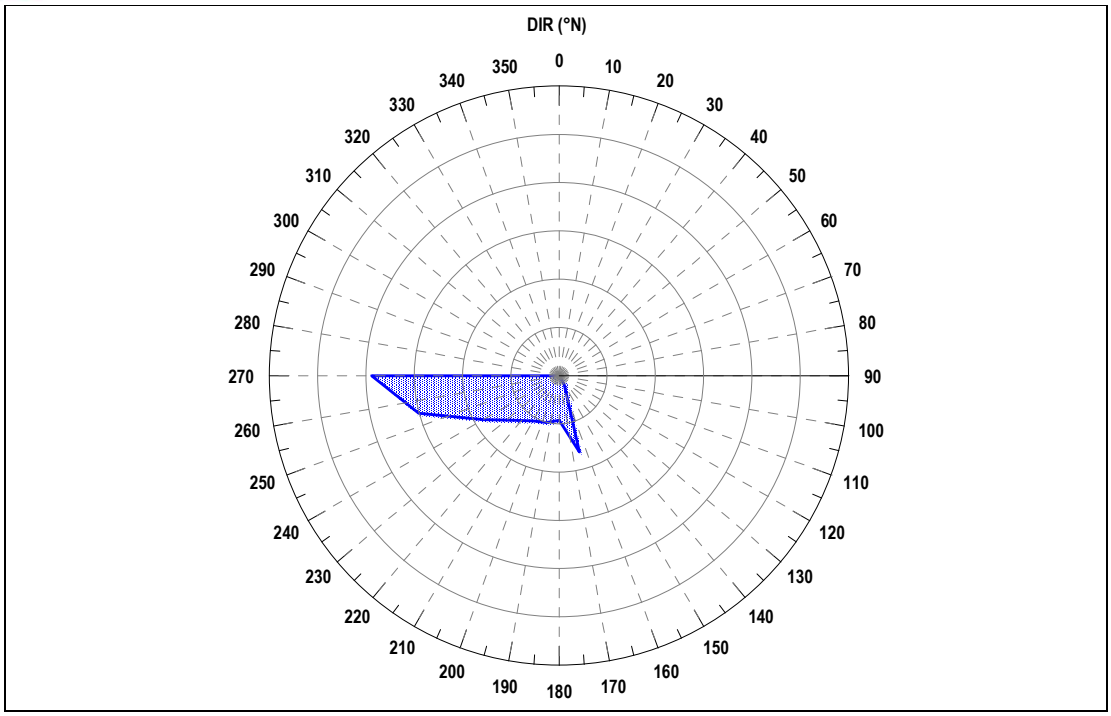


Fig. 4.16 – Rose delle registrazioni nel punto P4

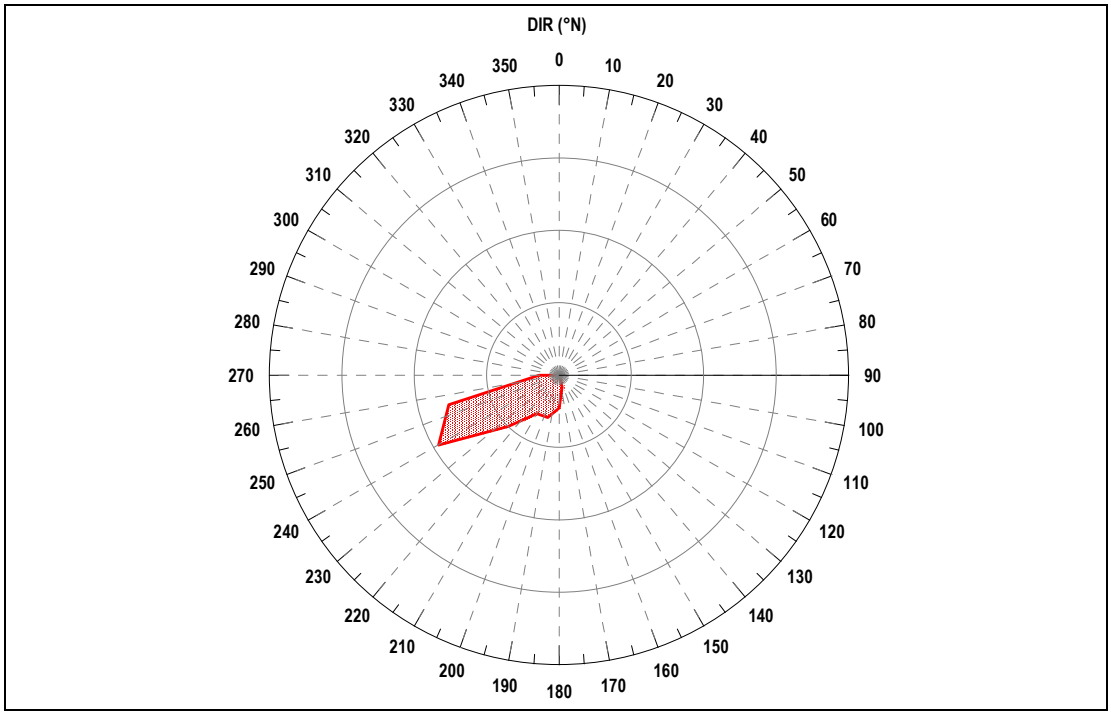


Fig. 4.17 – Rosa delle energie nel punto P4

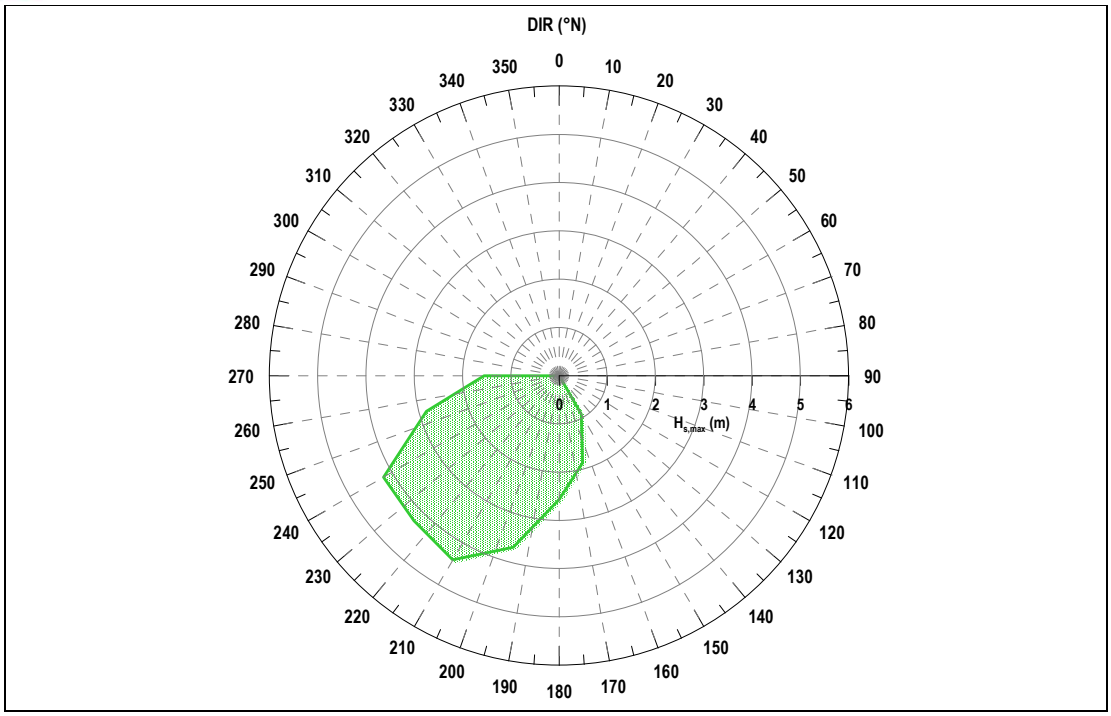


Fig. 4.18 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P4

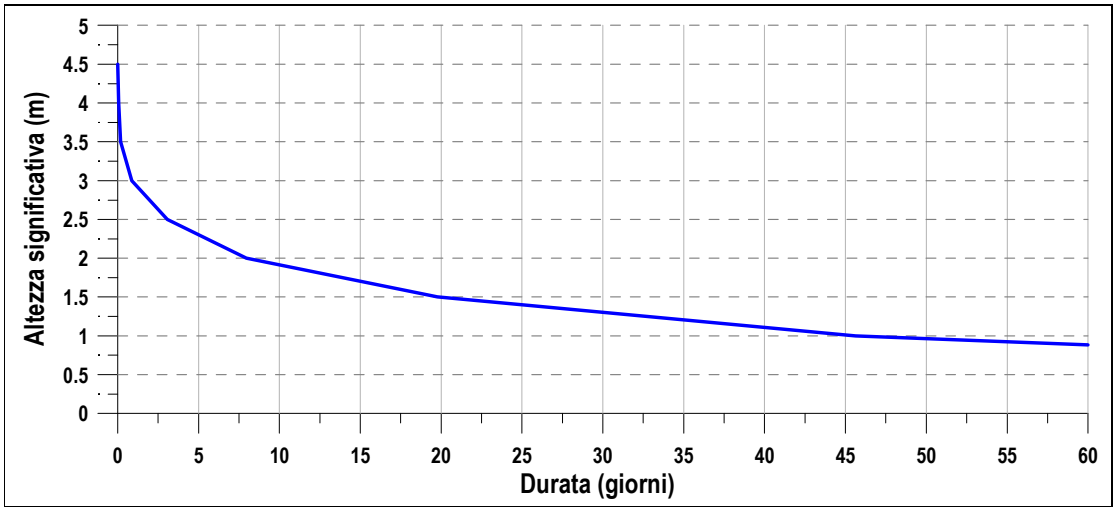


Fig. 4.19 – Curva di durata nel punto P4

4.1.6 Risultati propagazione lago di Caprolace (Punto P5)

Nella successiva Tab. 4.6 sono riportate le registrazioni del moto ondoso nel punto P5, ordinate per classi di altezza significativa e direzione di provenienza; i dati sono stati ottenuti per mezzo delle simulazioni condotte con il codice di calcolo SWAN.

Di seguito (Fig. 4.20, Fig. 4.21 e Fig. 4.22) sono riportate rispettivamente le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze significative massime nel punto P5, posto di fronte al lago di Caprolace.

Data l'esposizione del paraggio, che risulta maggiormente esposto alle mareggiate di Ponente rispetto ai siti posti più a Nord, l'energia del moto ondoso risulta concentrata nel settore 180°-270°N. La rosa delle energie presenta un unico picco in corrispondenza della direzione di Libeccio-Ponente (255°N).

Le mareggiate caratterizzate dai massimi valori di altezza significativa (di poco inferiori ai 5 m) provengono da Libeccio (240°N).

Nella successiva Fig. 4.23 si riporta la curva di durata relativa al punto P5. Si osserva come i 2.00 m di altezza significativa vengano superati mediamente per 10 giorni all'anno.

DIR	**H_{m0} (m)**										
(°N)	**Calme (<0.25)**	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.0**	**2.5**	**3.0**	**3.5**	**4.0**	**4.5**	**5.0**
135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
165	1382	1971	***125***	0	0	0	0	0	0	0	0
180	0	680	964	94	***24***	0	0	0	0	0	0
195	0	948	546	450	272	8	***4***	0	0	0	0
210	0	1266	474	205	185	74	39	10	2	***1***	0
225	0	1395	547	308	152	72	44	20	11	***7***	0
240	0	1374	555	275	156	72	64	41	19	4	***4***
255	0	1557	1637	1066	579	411	182	23	18	***1***	0
270	0	5609	1809	313	***48***	0	0	0	0	0	0
285	1271	***379***	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.6 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P5)

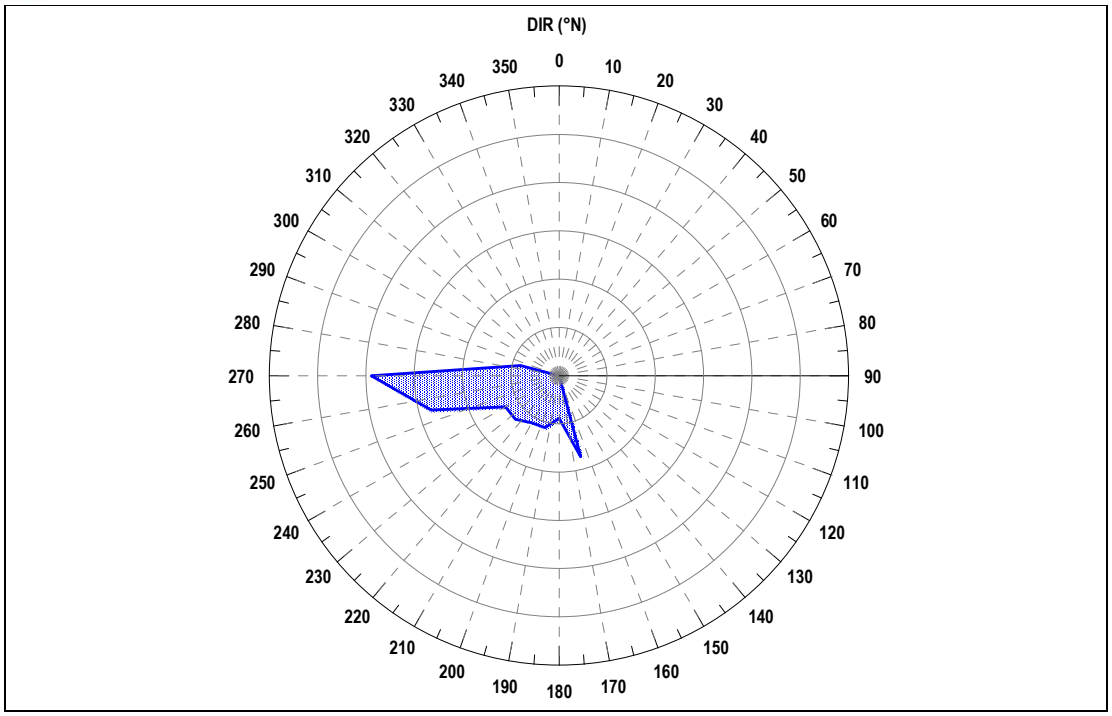


Fig. 4.20 – Rose delle registrazioni nel punto P5

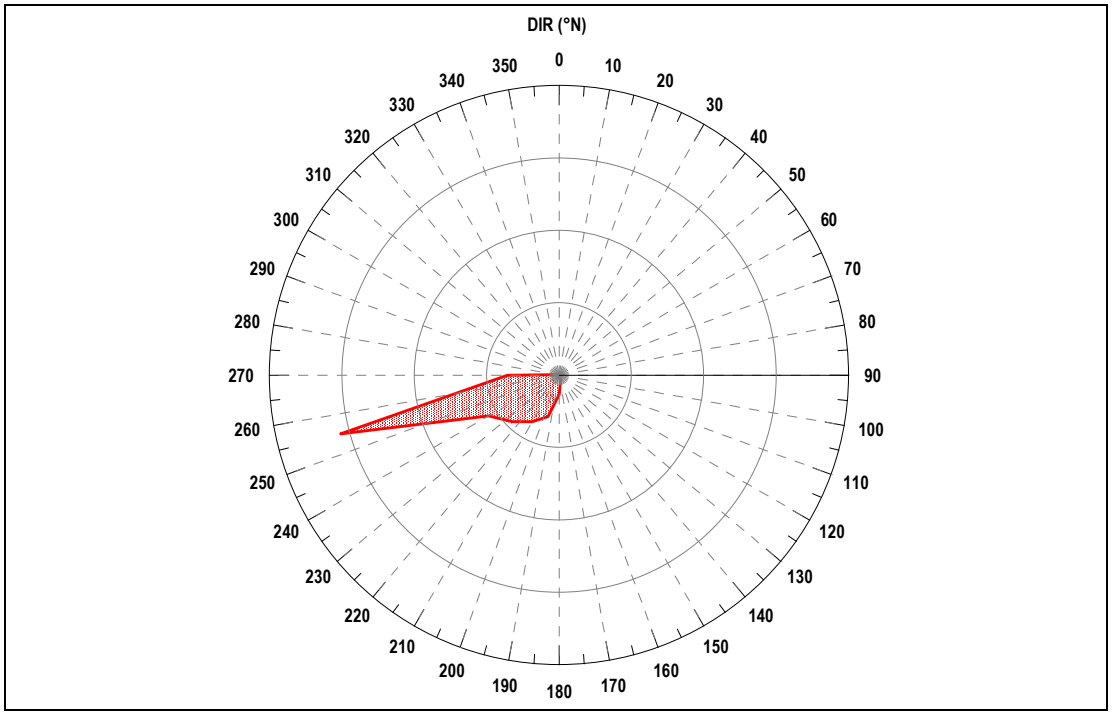


Fig. 4.21 – Rosa delle energie nel punto P5

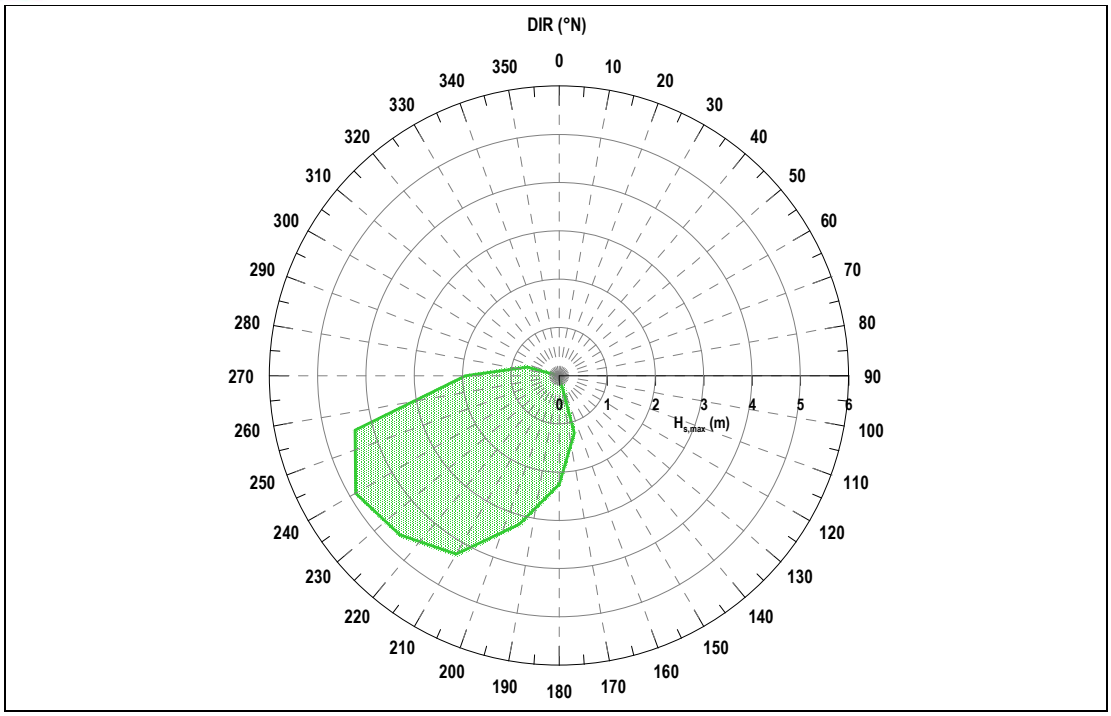


Fig. 4.22 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P5

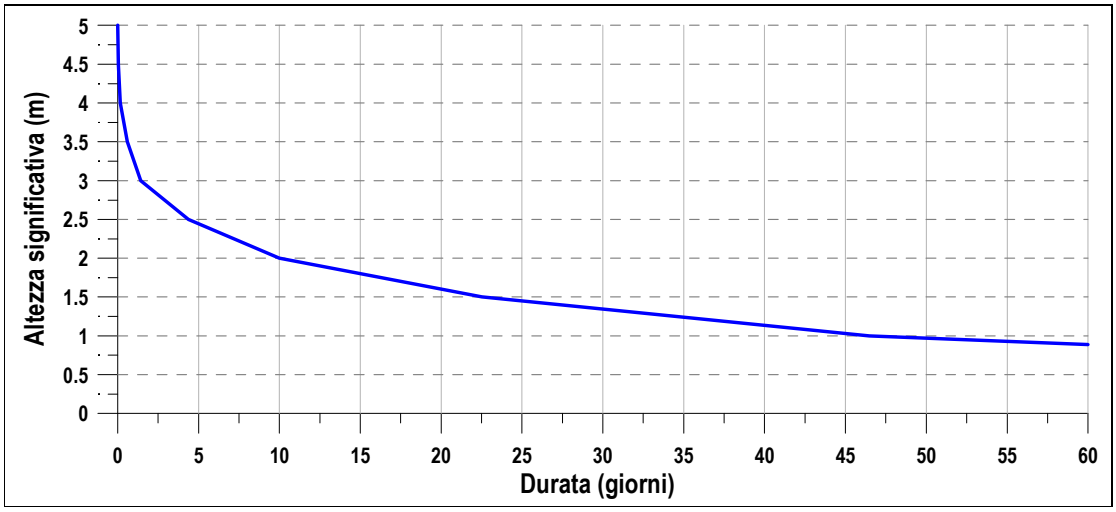


Fig. 4.23 – Curva di durata nel punto P5

4.1.7 Risultati propagazione Foce Caterattino (Punto P6)

Nella successiva Tab. 4.7 sono riportate le registrazioni del moto ondoso nel punto P6, ordinate per classi di altezza significativa e direzione di provenienza; i dati sono stati ottenuti per mezzo delle simulazioni condotte con il codice di calcolo SWAN.

Di seguito (Fig. 4.24, Fig. 4.25 e Fig. 4.26) sono riportate rispettivamente le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze significative massime nel punto P6, posto di fronte al litorale di Sabaudia, in corrispondenza della foce del canale Caterattino.

Anche in questo caso, come per il punto P5 posto di fronte al lago di Caprolace, l'energia del moto ondoso risulta concentrata nel settore 180°-270°N. La rosa delle energie presenta, invece, due picchi principali, in corrispondenza delle direzioni di Libeccio (225°N) e Libeccio-Ponente (255°N).

Le mareggiate caratterizzate dai massimi valori di altezza significativa (di poco superiori ai 5 m) provengono da Libeccio-Ponente (255°N).

Nella successiva Fig. 4.27 si riporta la curva di durata relativa al punto P6. Si osserva come i 2.00 m di altezza significativa vengano superati mediamente per 10 giorni all'anno.

DIR	**H_{m0} (m)**										
(°N)	**Calme (<0.25)**	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.0**	**2.5**	**3.0**	**3.5**	**4.0**	**4.5**	**5.0**
135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
165	1918	976	***40***	0	0	0	0	0	0	0	0
180	0	1616	237	***66***	0	0	0	0	0	0	0
195	0	948	1099	362	45	***8***	0	0	0	0	0
210	0	1266	474	205	334	76	14	***2***	0	0	0
225	0	1395	547	308	152	72	79	22	12	***7***	0
240	0	1374	555	275	156	72	30	23	8	2	***1***
255	0	1557	736	443	269	343	179	116	41	12	***5***
270	0	2202	2663	1118	1050	17	5	***2***	0	0	0
285	0	4081	114	***18***	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.7 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P6)

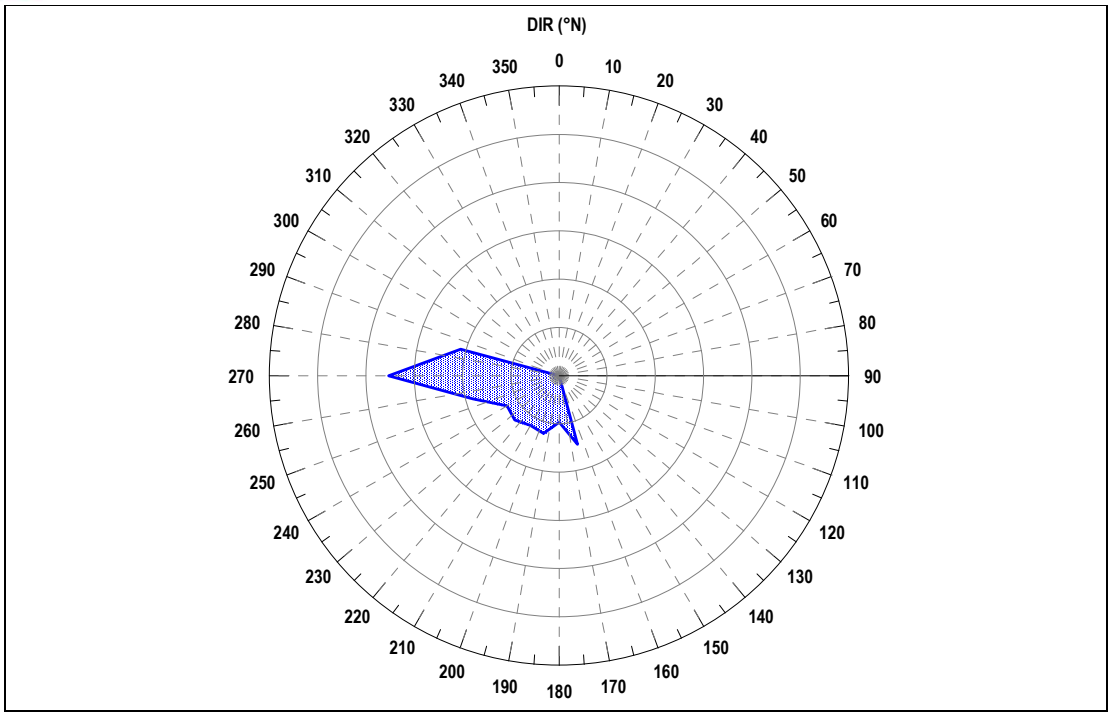


Fig. 4.24 – Rose delle registrazioni nel punto P6

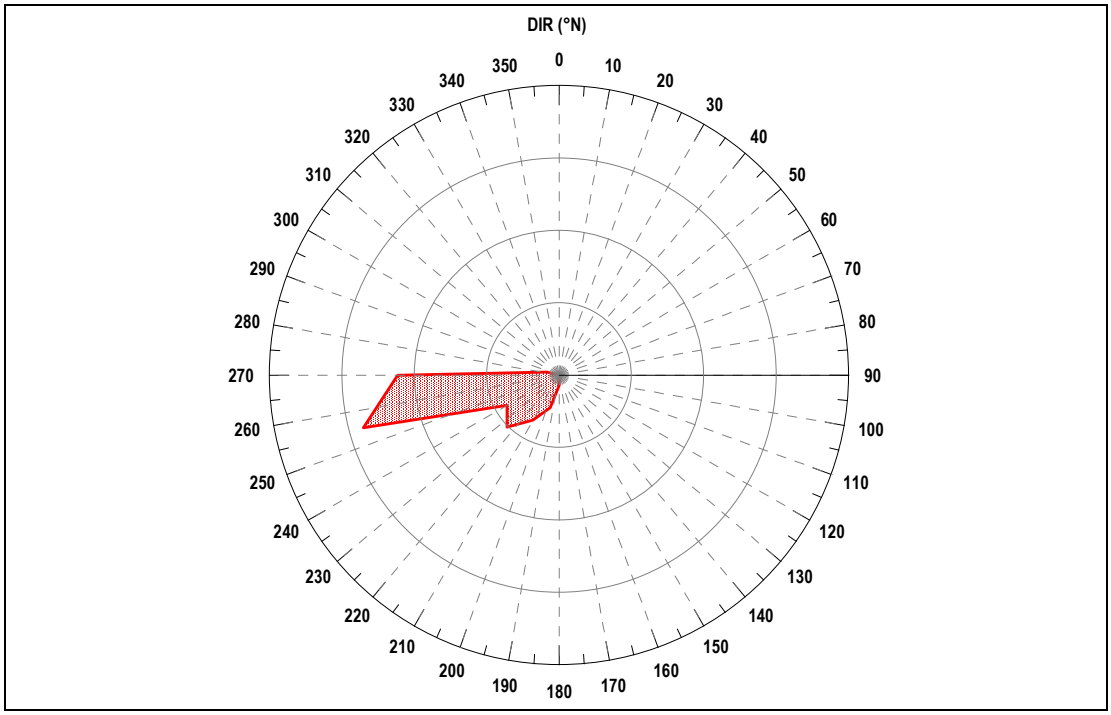


Fig. 4.25 – Rosa delle energie nel punto P6

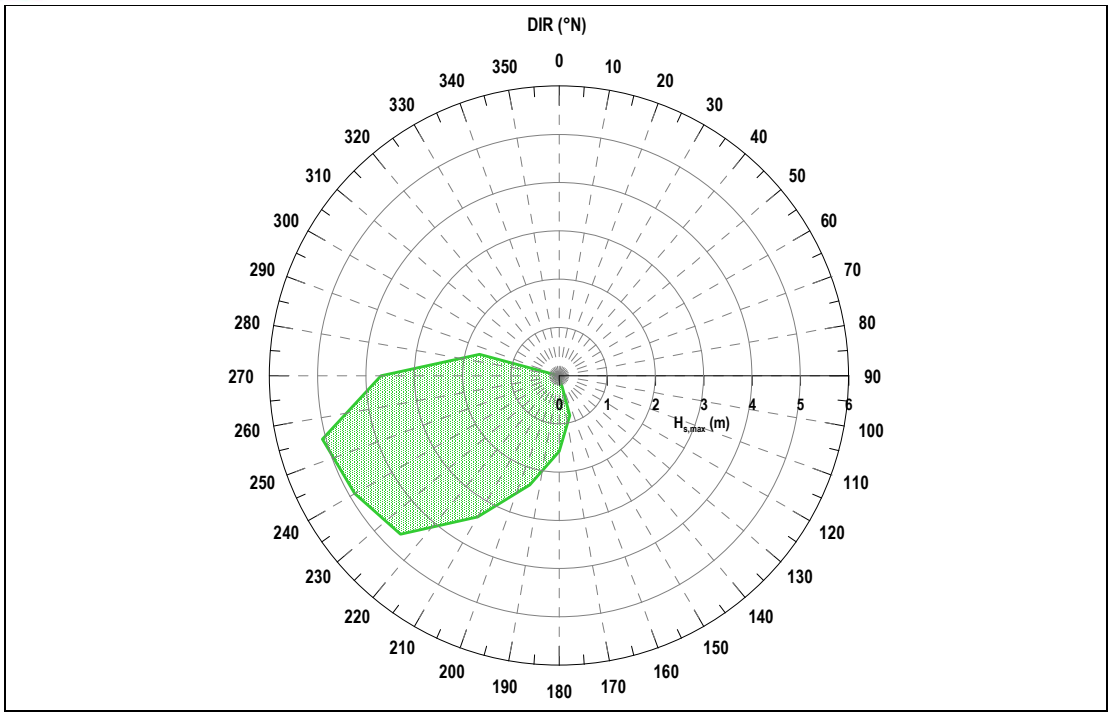


Fig. 4.26 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P6

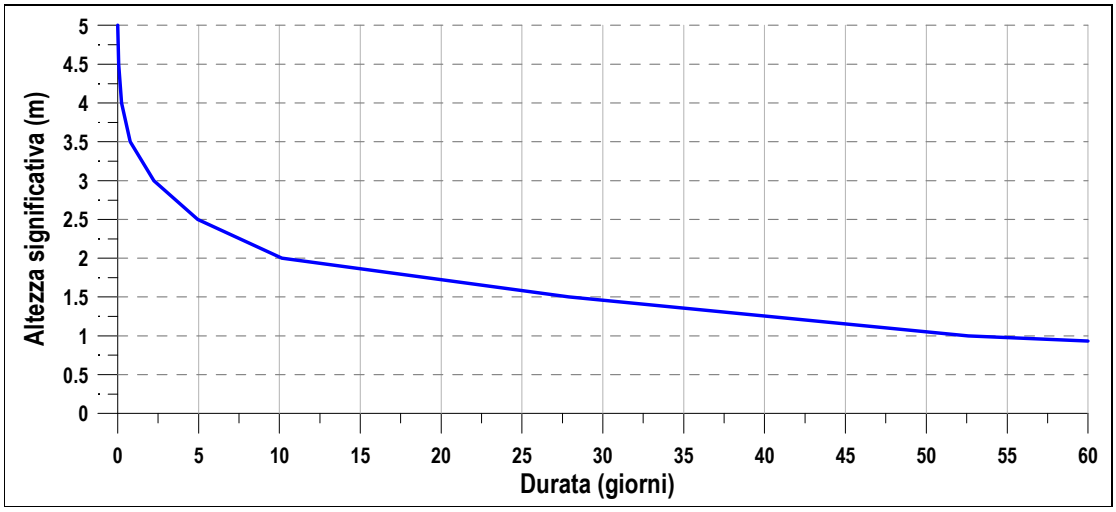


Fig. 4.27 – Curva di durata nel punto P6

4.1.8 Risultati propagazione Torre Paola (Punto P7)

Nella successiva Tab. 4.8 sono riportate le registrazioni del moto ondoso nel punto P7, ordinate per classi di altezza significativa e direzione di provenienza; i dati sono stati ottenuti per mezzo delle simulazioni condotte con il codice di calcolo SWAN.

Di seguito (Fig. 4.28, Fig. 4.29 e Fig. 4.30) sono riportate rispettivamente le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze significative massime nel punto P7, posto di fronte a Torre Paola.

Il punto P7, posto all'estremità Sud del tratto di litorale oggetto di studio, in ragione della sua posizione geografica, risulta quello maggiormente esposto alle mareggiate di Ponente. Infatti, l'energia del moto ondoso risulta concentrata nel settore 200°-290°N. La rosa delle energie presenta un unico picco principale in corrispondenza della direzione di Ponente (270°N).

Le mareggiate caratterizzate dai massimi valori di altezza significativa (di poco superiori ai 5 m) provengono da Ponente (270°N).

Nella successiva Fig. 4.31 si riporta la curva di durata relativa al punto P7. Si osserva come i 2.00 m di altezza significativa vengano superati mediamente per 12-13 giorni all'anno.

DIR	**H_{m0} (m)**										
(°N)	**Calme (<0.25)**	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.0**	**2.5**	**3.0**	**3.5**	**4.0**	**4.5**	**5.0**
135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
165	1382	***1031***	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	0	1900	445	***8***	0	0	0	0	0	0	0
195	0	948	1099	186	***47***	0	0	0	0	0	0
210	0	1266	474	615	64	26	***14***	0	0	0	0
225	0	1395	547	308	273	157	10	2	***1***	0	0
240	0	1374	555	275	156	72	74	54	11	6	***1***
255	0	1557	736	443	269	130	63	34	27	1	***1***
270	0	2202	1322	901	706	341	229	186	24	18	***6***
285	0	4081	976	696	18	3	***1***	0	0	0	0

Tab. 4.8 - Registrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione di provenienza (punto P7)

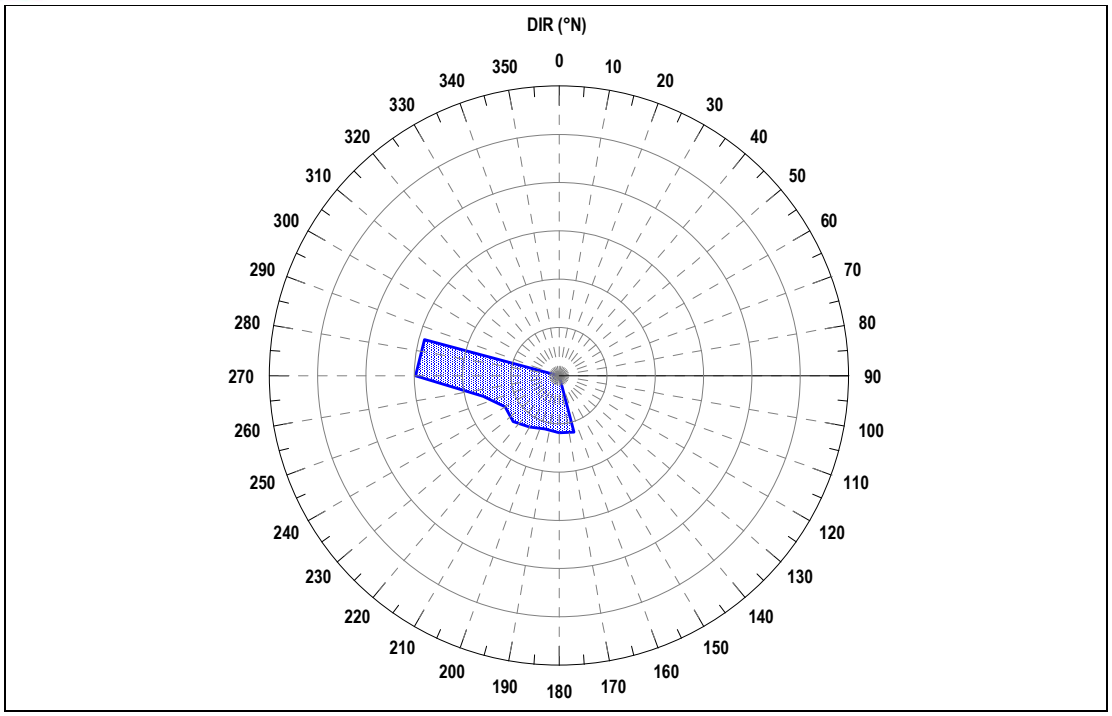


Fig. 4.28 – Rose delle registrazioni nel punto P7

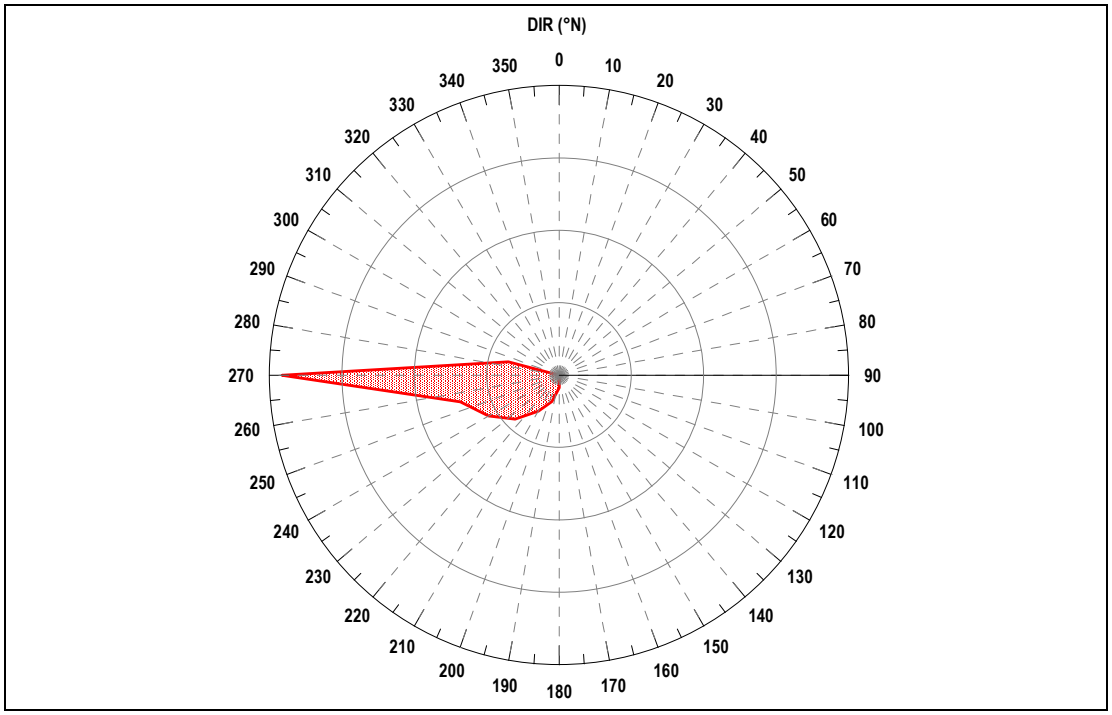


Fig. 4.29 – Rosa delle energie nel punto P7

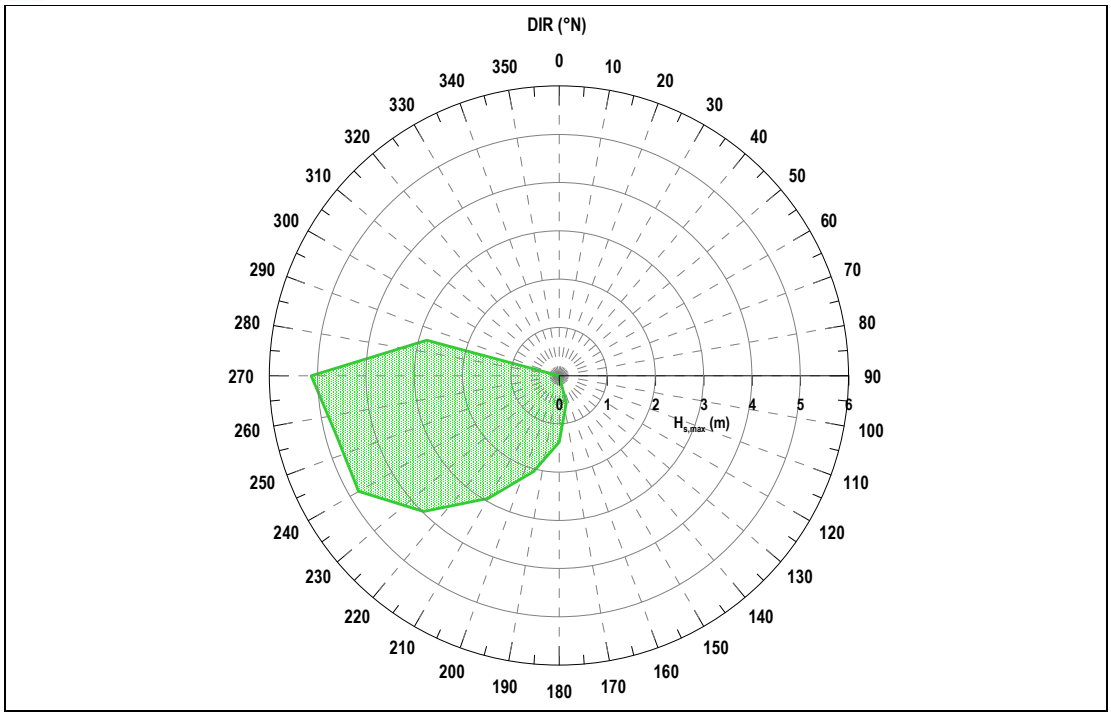


Fig. 4.30 – Rosa delle altezze significative massime nel punto P7

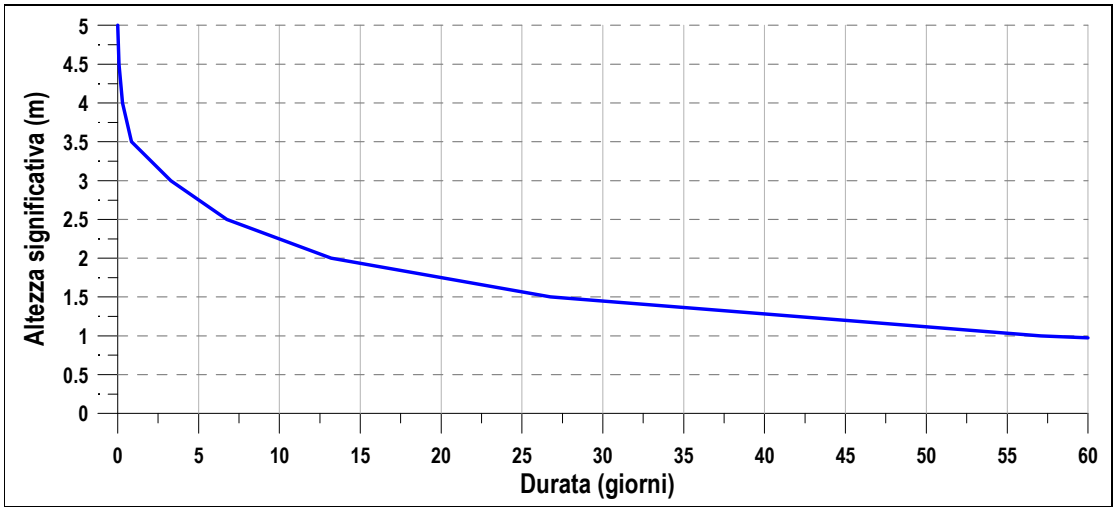


Fig. 4.31 – Curva di durata nel punto P7

4.2 Propagazione locale di mareggiate significative (durata di 1 e 7 gg/anno)

La propagazione locale di alcune mareggiate significative, caratterizzate da durata media annuale di 1 e 7 giorni/anno, è stata condotta mediante il modello numerico STWAVE (STeady-state Spectral Wave Model), descritto in dettaglio nell'allegato "A".
Le simulazioni sono state eseguite utilizzando come base la batimetria aggiornata del sito, ricavata dalle carte nautiche e dai recenti rilievi locali forniti dal Committente (settembre 2003 e maggio 2007). Si tratta degli stessi dati di base utilizzati per la costruzione della grigia di calcolo utilizzata per la propagazione del clima sottocosta (cfr. paragrafo 4.1.1).

I risultati della propagazione delle mareggiate di durata 1 e 7 giorni/anni sono stati utilizzati, nel presente studio, per analizzare la dinamica litoranea del tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Torre Paola.

4.2.1 Settaggio del modello

Per lo studio della propagazione locale di tali mareggiate è stata utilizzata la stessa griglia di calcolo (BIG GRID), impiegata per la propagazione del clima ondoso sottocosta. Pertanto per le caratteristiche geometriche della griglia si rimanda a quanto riportato al precedente paragrafo 4.1.1.
In ragione del maggior dettaglio richiesto per una corretta rappresentazione dei piani d'onda in corrispondenza delle aree di interesse, la griglia è stata discretizzata con un passo più fitto rispetto alla precedente. Il modello basato sul codice di calcolo STWAVE è stato pertanto costruito utilizzando una griglia con maglia quadrata di passo 50 m (Fig. 4.32).

In questo caso, come per la propagazione del clima sottocosta, viste le profondità in corrispondenza del bordo offshore della griglia di calcolo (100-200 m), sono state assegnate in input al modello le caratteristiche delle mareggiate estreme ricavate in corrispondenza della boa di Ponza.

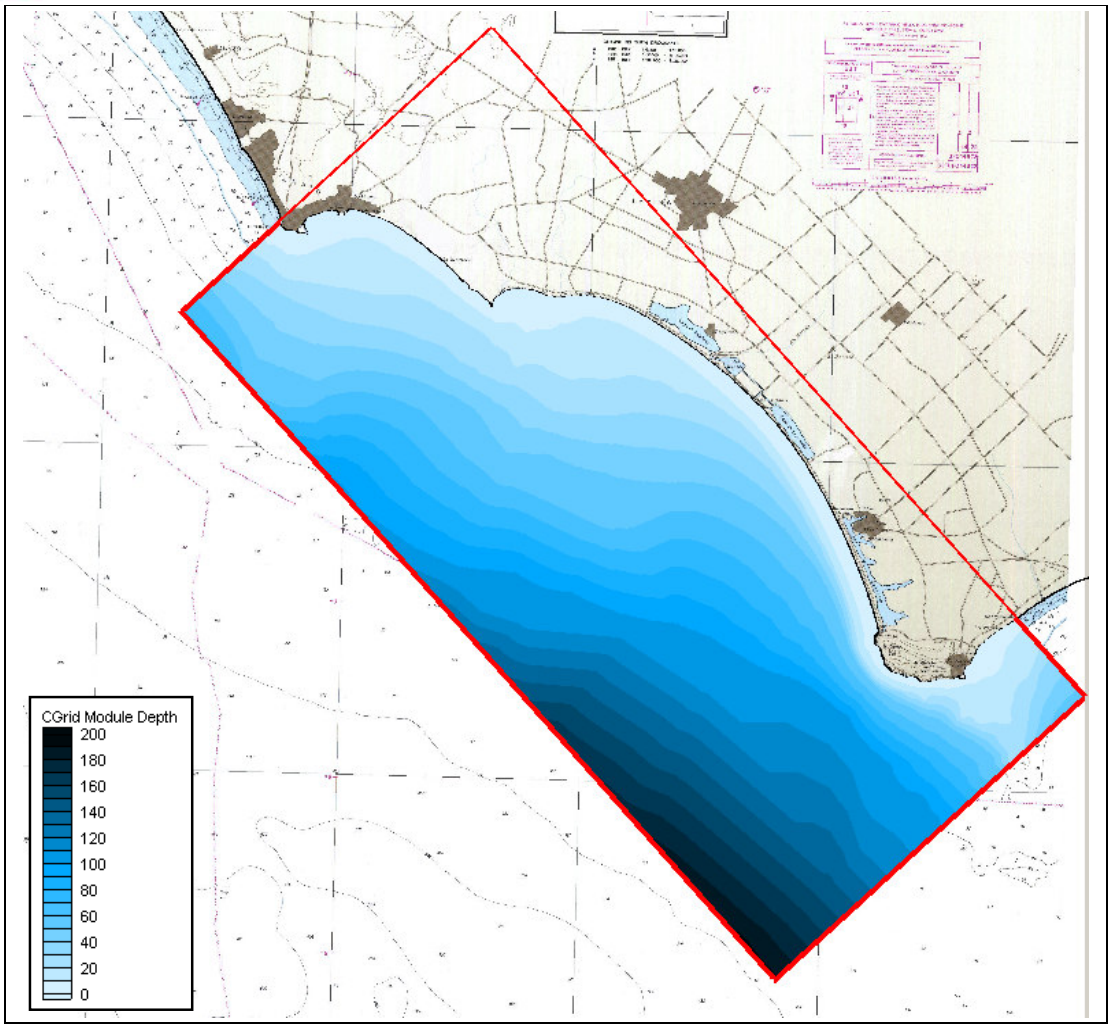


Fig. 4.32 – Griglia di calcolo STWAVE (passo 50 m)

4.2.2 Caratteristiche delle mareggiate significative

Le caratteristiche delle mareggiate sono state ricavate con riferimento al clima ondoso al largo, le cui caratteristiche sono state fornite in input al codice di calcolo STWAVE.

In particolare, in modo analogo a quanto operato per l'analisi dei periodi medi (cfr. paragrafo 3.3), sono state ricostruite le curve di durata relative ai due settori principali di provenienza delle mareggiate (120°-225°N e 240°-300°N), individuati sulla base della distribuzione dei picchi della rosa delle energie nel punto al largo (Fig. 4.33).
Anche in questo caso si è fatto riferimento, nella suddivisione dei due settori, agli intervalli di direzione rappresentati nell'Atlante delle Coste. Pertanto, il settore 120°-225°N diventa 112.5°-232.5°N, mentre il settore 240°-300°N diventa 232.5°-307.5°N.

Le curve di durata per i due settori sono state ricostruite sulla base delle caratteristiche del clima ondoso al largo (cfr. Tab. 3.1). L'analisi delle curve di durata ha permesso di individuare, per ciascuno dei due settori considerati, l'altezza significativa delle mareggiate caratterizzate da una durata di 1 e 7 gg/anno (Fig. 4.34).
Le direzioni di provenienza da associare alle mareggiate sono state ricavate con riferimento alla rosa delle energie della boa di Ponza; per ciascun settore (120°-225°N e 240°-300°N) è stata scelta la direzione corrispondente al picco di frequenza delle energie.

Il periodo medio è stato determinato, in funzione delle caratteristiche della mareggiata (H_S e DIR), utilizzando le relazioni ricavate dall'analisi condotta al precedente paragrafo 3.3. Il periodo di picco (T_p), fornito in input al codice di calcolo STWAVE, è stato ricavato sulla base del valore del corrispondente periodo medio (T_{01}) e dello spreading direzionale γ, utilizzando formule proposte in letteratura ("Technical note" of the EUROWAVES project: www.oceanor.no /projects/eurowaves/)

Le caratteristiche dei TEST sono riassunte nella successiva Tab. 4.9.

TEST	Caratteristiche mareggiata	Settore di provenienza	H_S (m)	DIR (°)	T_{01} (s)	T_p (s)
1	Durata = 1 g/anno	120°-225°N	**2.85**	225	6.3	7.5
2	Durata = 1 g/anno	240°-300°N	**3.74**	270	7.3	8.7
3	Durata = 7 gg/anno	120°-225°N	**1.83**	225	5.3	6.3
4	Durata = 7 gg/anno	240°-300°N	**2.43**	270	6.3	7.4

Tab. 4.9 – Caratteristiche mareggiate significative propagate con il codice di calcolo STWAVE

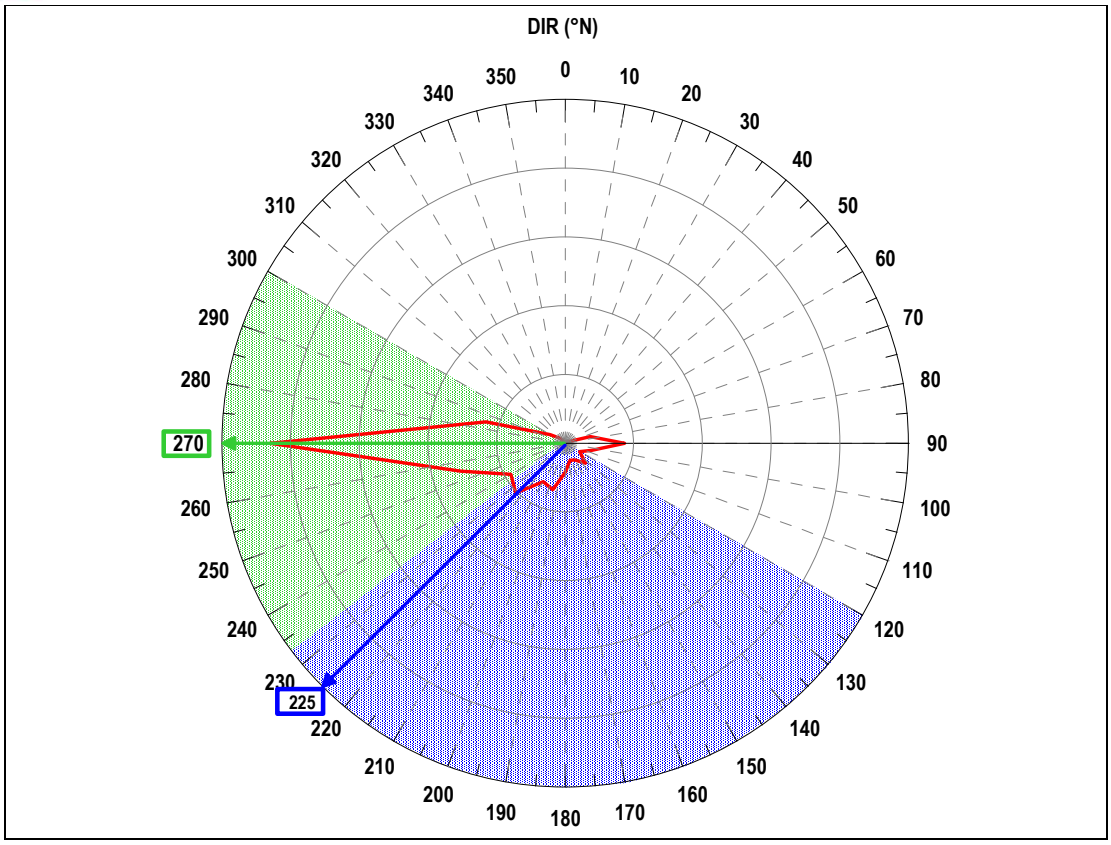


Fig. 4.33 – Settori e direzioni di provenienza mareggiate significative

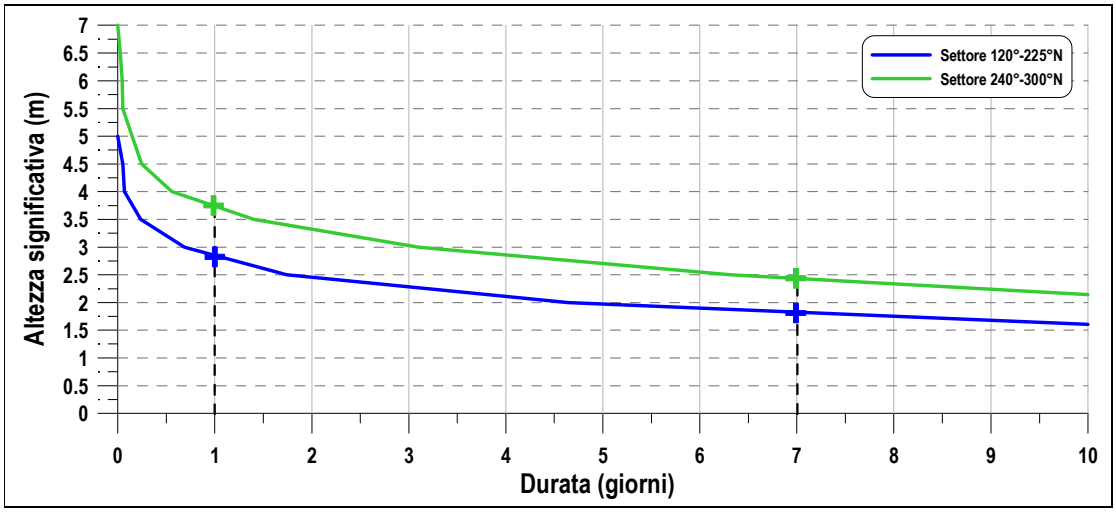


Fig. 4.34 – Curve di durata suddivise per settori – Boa di Ponza

4.2.3 Considerazioni sui risultati dei piani d'onda delle mareggiate significative

Nel presente paragrafo si riportano alcune considerazioni in merito ai risultati delle simulazioni di propagazione locale delle mareggiate di durata 1 e 7 gg/anno, condotte per mezzo del codice di calcolo STWAVE.

La rappresentazione grafica dei risultati è riportata in dettaglio nelle tavole allegate alla presente relazione (Allegato B - Figure da 1 a 4). Le altezze d'onda significativa sono rappresentate in termini di contour colorati mentre le direzioni locali dell'onda sono indicate mediante vettori il cui modulo è proporzionale all'altezza d'onda significativa. Per ciascun TEST, vista la notevole estensione del dominio di calcolo, sono stati rappresentati due dettagli, relativi rispettivamente al tratto di litorale compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione (particolare "a") e al tratto di litorale compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola (particolare "b").
Al fine di poter meglio cogliere gli effetti locali (sottocosta) delle mareggiate propagate, per ciascun TEST è stata utilizzata la stessa scala cromatica, variando di volta in volta l'intervallo di H_s da rappresentare in funzione del valore dell'altezza d'onda al largo.

In generale, le mareggiate provenienti da Libeccio (225°N) si presentano sottocosta con altezze significative più basse rispetto a quelle provenienti da Ponente (270°N)

Per quanto riguarda il tratto di litorale più a Nord (particolare "a"), compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione, risulta evidente come il capo di Torre Astura protegga parzialmente il tratto di costa tra Torre Astura e Foce Verde dall'attacco diretto del moto ondoso.
Va comunque sottolineato che, a causa della conformazione del fondale in corrispondenza di foce Verde, la zona a ridosso della foce risulta caratterizzata da un aumento dell'altezza d'onda significativa sottocosta. Tale aspetto risulta strettamente correlato alla naturale tendenza all'erosione del tratto di costa analizzato, testimoniato anche dagli interventi mirati di ripascimento eseguiti nel corso degli ultimi anni.
Nel tratto di litorale compreso tra Capo Portiere e Idrovora Lavorazione, invece, il campo di moto ondoso si presenta abbastanza regolare; sia le mareggiate di Libeccio che quelle di Ponente arrivano sottocosta con incidenza pressoché normale alla linea di riva. Le uniche anomalie nel campo di moto si riscontrano all'interno della fascia attiva, tra la batimetrica -5.00 m s.m.m. e la linea di costa. Infatti, in questa zona sono presenti una serie di barre (almeno due), la cui formazione ed evoluzione è da ritenersi strettamente correlata all'erosione del cordone dunale retrostante. La presenza delle barre, modificando la conformazione del fondale, genera un'alternanza di aree in cui si riscontra un abbattimento dell'altezza d'onda ad aree in cui si presenta una concentrazione di energia (e, quindi, un incremento locale dell'altezza significativa).

Il tratto di costa compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola (particolare "b") risulta caratterizzato da una sostanziale regolarità nella distribuzione del campo di moto ondoso. Le uniche anomalie sono dovute, come osservato per il tratto di costa più a Nord (tra Capo portiere e Idrovora Lavorazione), alla presenza delle barre all'interno della fascia attiva.

In questo caso, il tratto di costa risulta esposto all'attacco diretto del moto ondoso proveniente sia da Libeccio che da Ponente. Il campo di moto ondoso si mantiene pressoché invariato fino alla batimetrica -5.00 m s.m.m., subendo una leggera rotazione della direzione di propagazione solamente in prossimità della costa, per effetto della rifrazione.

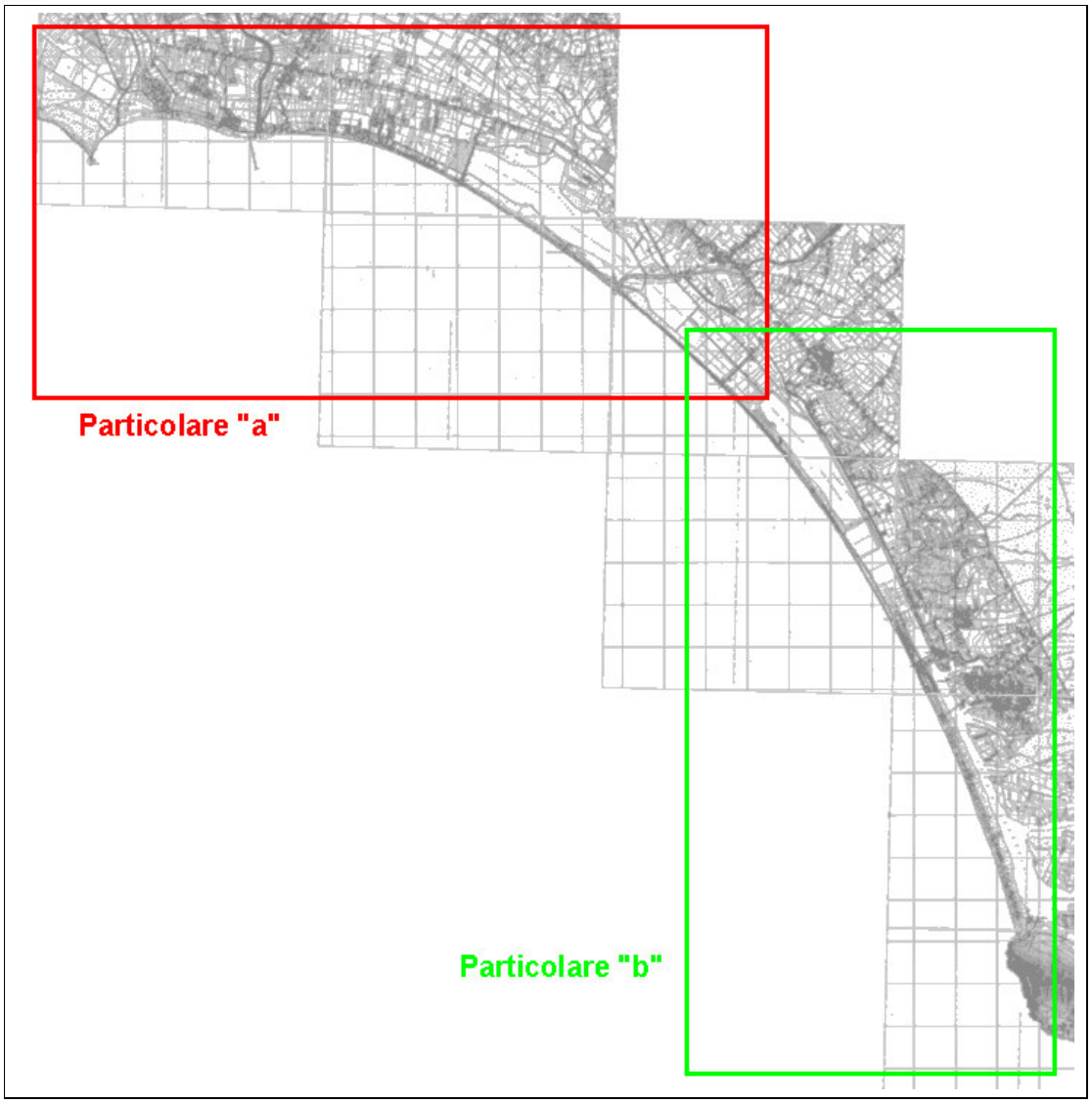


Fig. 4.35 – Particolari “a” e “b” rappresentati nelle tavole dei piani d’onda

4.3 Propagazione di mareggiate estreme

La propagazione locale delle mareggiate estreme con tempo di ritorno di 25 e 50 anni è stata condotta mediante il modello numerico STWAVE (Steady-state Spectral Wave Model), descritto in dettaglio nell'allegato "A".
Le simulazioni sono state eseguite utilizzando la stessa griglia di calcolo impiegata per la propagazione delle mareggiate significative, descritta nel precedente paragrafo 4.2.

I risultati della propagazione delle mareggiate estreme potranno essere utilizzati, nella seconda fase di studio, per il dimensionamento di massima degli eventuali interventi previsti sul tratto di litorale analizzato.

4.3.1 Caratteristiche delle mareggiate estreme

Nelle simulazioni sono state propagate le mareggiate con tempo di ritorno 25 e 50 anni, le cui direzioni sono comprese all'interno del settore di traversia locale caratteristico del tratto di litorale analizzato (120°-300°N).
L'analisi statistica, descritta in dettaglio nel precedente paragrafo 3.2, è stata condotta con riferimento ai tre settori di Scirocco-Mezzogiorno (120°-190°N), Libeccio (190°-250°N) e Ponente (250°-300°N), individuati sulla base della distribuzione direzionale delle altezze massime in corrispondenza del punto al largo (Fig. 4.36).

Le direzioni da associare agli eventi estremi sono state scelte sempre sulla base dell'analisi della rosa delle altezze massime, rappresentata in Fig. 4.36.
In particolare, per ciascuno dei tre settori precedentemente individuati, è stata scelta come rappresentativa la direzione di provenienza corrispondente al picco principale di H_s della rosa. Pertanto, al settore di Scirocco-Mezzogiorno è stata associata la direzione di 180°N, a quello di Libeccio la direzione 240°N e a quello di Ponente il picco corrispondente a 270°N.

Il periodo medio (T_{01}) associato, come per le mareggiate significative (durata 1 e 7 giorni/anno), utilizzando le relazioni ricavate dall'analisi condotta al precedente paragrafo 3.3 Il periodo di picco (T_p), fornito in input al codice di calcolo STWAVE, è stato ricavato sulla base del valore del corrispondente periodo medio (T_{01}) e dello spreading direzionale □, utilizzando formule proposte in letteratura ("Technical note" of the EUROWAVES project: www.oceanor.no /projects/eurowaves/)

Complessivamente, sono state propagate 6 mareggiate estreme, due per ciascun settore di provenienza considerato.

Nella successiva Tab. 4.10 sono riportate, con riferimento al numero di TEST, le caratteristiche delle mareggiate estreme nel punto al largo (boa di Ponza).

TEST	Caratteristiche mareggiata	Settore di provenienza	H_S (m)	T_{01} (s)	T_p (s)	DIR (°N)
5	T_R = 25 anni	120°-190°N	**4.41**	7.8	9.2	180
6	T_R = 25 anni	190°-250°N	**6.57**	9.0	10.6	240
7	T_R = 25 anni	250°-300°N	**8.37**	9.8	11.7	270
8	T_R = 50 anni	120°-190°N	**4.72**	8.0	9.5	180
9	T_R = 50 anni	190°-250°N	**7.18**	9.3	11.0	240
10	T_R = 50 anni	250°-300°N	**9.15**	10.2	12.1	270

Tab. 4.10 – Caratteristiche delle mareggiate estreme propagate con il codice di calcolo STWAVE

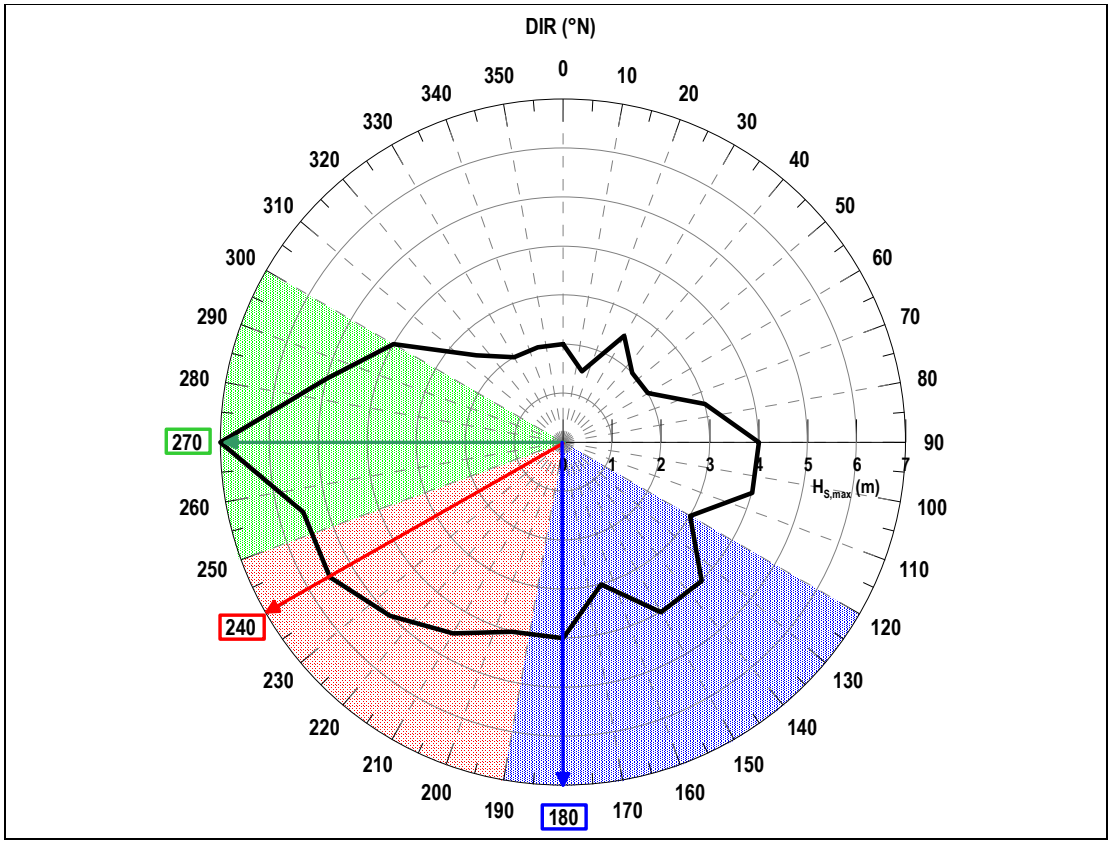


Fig. 4.36 – Settori e direzioni di provenienza degli eventi estremi

4.3.2 Considerazioni sui risultati dei piani d'onda delle mareggiate estreme

Nel presente paragrafo si riportano alcune considerazioni in merito ai risultati delle simulazioni di propagazione locale delle mareggiate estreme, condotte per mezzo del codice di calcolo STWAVE.

La rappresentazione grafica dei risultati è riportata in dettaglio nelle tavole allegate alla presente relazione (Allegato B - Figure da 5 a 10). Anche in questo caso, come per le mareggiate di durata, le altezze d'onda significativa sono rappresentate in termini di contour colorati mentre le direzioni locali dell'onda sono indicate mediante vettori il cui modulo è proporzionale all'altezza d'onda significativa. Per ciascun TEST, vista la notevole estensione del dominio di calcolo, i risultati sono stati rappresentati con riferimento a due tratti di litorale, compresi rispettivamente tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione (particolare "a") e tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola (particolare "b").

Al fine di poter meglio cogliere gli effetti locali (sottocosta) delle mareggiate propagate, per ciascun TEST è stata utilizzata la stessa scala cromatica, variando di volta in volta l'intervallo di H_s da rappresentare in funzione del valore dell'altezza d'onda al largo.

Anche in questo caso, le mareggiate caratterizzate dai massimi valori di altezza significativa sono quelle provenienti da Ponente (270°N)

Per quanto riguarda il tratto di litorale più a Nord (particolare "a"), compreso tra Torre Astura e Idrovora Lavorazione, risulta evidente come il promontorio di Torre Astura protegga parzialmente il tratto di costa tra Torre Astura e Foce Verde dall'attacco diretto del moto ondoso. Infatti,il campo di moto delle mareggiate più intense (quelle provenienti da Libeccio e da Ponente), subisce una rotazione dovuta alla conformazione del fondale.
Ne consegue che, sia le mareggiate di Ponente e Libeccio che quelle di Mezzogiorno, si presentano sottocosta con incidenza pressoché normale alla linea di riva e valori di altezza significativa tra loro confrontabile e modulata dal frangimento.

Nel tratto di litorale compreso tra Capo Portiere e Idrovora Lavorazione, il campo di moto ondoso si presenta più regolare. Le uniche anomalie nel campo di moto, come nel caso delle mareggiate di durata, si riscontrano all'interno della fascia attiva e sono legate alla presenza delle barre.

Il tratto di costa compreso tra Idrovora Lavorazione e Torre Paola (particolare "b") risulta caratterizzato da una sostanziale regolarità nella distribuzione del campo di moto ondoso. Le uniche anomalie sono dovute, come già osservato per il tratto di costa più a Nord, alla presenza delle barre all'interno della fascia attiva.
In questo caso, rispetto alle mareggiate di Mezzogiorno, il tratto di costa risulta maggiormente esposto all'attacco diretto del moto ondoso proveniente da Libeccio e da Ponente. Il campo di moto ondoso si mantiene pressoché invariato fino alla batimetrica -5.00 m s.m.m., subendo una leggera rotazione della direzione di propagazione, per effetto della rifrazione, solamente in prossimità della costa.

5 EVOLUZIONE MORFOLOGICA

Lo studio dell'evoluzione morfologica del litorale è stato condotto valutando, in prima analisi, la tendenza evolutiva del litorale sulla base dei dati disponibili.
Innanzitutto, si è proceduto al confronto delle linee di riva storiche (paragrafo 5.1.1), all'analisi del trasporto solido potenziale, attraverso i flussi di energia del moto ondoso in direzione parallela alla costa (ricavati sulla base dell'elaborazione del clima ondoso sottocosta, cfr. paragrafo 5.1.2), e all'analisi dei dati morfologici e sedimentologici (paragrafi 5.1.3 e 5.1.4).

Una volta individuata la tendenza evolutiva del litorale, è stato possibile procedere alla definizione del modello di evoluzione morfologica, fissando gli estremi del dominio di calcolo in corrispondenza di punti notevoli del litorale. Il modello è stato, quindi, tarato sulla base delle linee di riva storiche fornite dal Committente.

5.1 Tendenza evolutiva del litorale

5.1.1 Analisi delle linee di riva storiche

L'analisi delle linee di riva storiche è stato condotto considerando le stesse linee di costa utilizzate per la taratura del modello di evoluzione morfologica (1992 e 2005). La scelta di utilizzare le linee di riva 1992 e 2005, come specificato al successivo paragrafo 5.2, è stata effettuata ponendosi l'obiettivo di riprodurre, nel modello, l'evoluzione recente del tratto di litorale esaminato, compatibilmente con le informazioni disponibili riguardo agli interventi eseguiti sul litorale.

Il confronto tra le linee di riva della foto aerea 1992 e 2005 è stato condotto suddividendo il tratto di litorale compreso tra Capo Portiere e Torre Paola in 6 sottounità distinte, utilizzando come elementi di separazione tra le varie unità le foci di bonifica.
Procedendo da Nord verso Sud, si incontrano quindi le seguenti unità:

- unità 1: tra Capo Portiere e la foce nuova di Fogliano;
- unità 2: tra la foce nuova di Fogliano e rio Martino;
- unità 3: tra rio Martino (foce vecchia di Fogliano) e Idrovora Lavorazione;
- unità 4: tra Idrovora Lavorazione e la foce di Caprolace;
- unità 5: tra la foce di Caprolace e la foce del canale Caterattino;
- unità 6: tra la foce del canale Caterattino e Torre Paola.

Considerando valida l'ipotesi di invariabilità della forma del profilo trasversale, la variazione di volume di sedimenti dovuta ad arretramento/avanzamento della linea di riva può essere calcolata utilizzando la seguente espressione:

$$V = (h_C + D_B)A,$$

dove:
- h_C rappresenta la profondità di chiusura (pari a 6.7 m; cfr. paragrafo 5.2.3);
- D_B rappresenta l'altezza della spiaggia emersa (assunta pari a 1.5 m);
- A è l'area compresa tra le due linee di riva (negativa rappresenta arretramento e positiva

avanzamento).

Il confronto tra le linee di riva ha permesso di valutare eventuali perdite/accumuli di materiale lungo il tratto di litorale oggetto di studio. I risultati, in termini di variazioni volumetriche medie e arretramento/avanzamento medio della linea di riva, sono riassunti in Tab. 5.1.
Complessivamente, il bilancio per il tratto di litorale compreso tra Capo portiere e Torre Paola risulta negativo, con una perdita di sedimenti pari a circa 42000 m^3/anno. Il tratto più in crisi risulta essere quello compreso tra la foce nuova di Fogliano e rio Martino (unità 2), caratterizzato da un arretramento medio della linea di riva pari a circa 1 m/anno.

Gli arretramenti e le perdite, contenute in relazione al notevole sviluppo planimetrico del tratto di costa considerato, sono indice di una sostanziale stabilità del litorale. Le variazioni riscontrate sono in parte da imputare ai fenomeni erosivi che interessano il cordone dunale retrostante, in parte ad una perdita di sedimenti per trasporto trasversale, ma anche alla riduzione degli apporti dalle spiagge sopraflutto (a Nord), il cui contributo è probabilmente destinato a ridursi nel prossimo futuro, sia per l'effettiva riduzione dell'estensione di tali spiagge che per la presenza di nuove e più efficienti opere di difesa tra Foce Verde e Capo Portiere; queste ultime, da un lato limitano l'erosione della spiaggia e, dall'altro, intercettano il trasporto solido proveniente da Nord. Un ulteriore contributo alla crisi potrebbe essere legato alla riduzione del trasporto solido fluviale, anche se sembra poco probabile che il fiume Astura possa dare un contributo significativo in termini di sedimenti.
Un altro fattore potenziale, sul quale tuttavia il livello di indagine ed analisi scientifica è ancora molto basso, è la variazione del moto ondoso locale legata alla riduzione dell'areale della posidonia.

UNITÀ	Lunghezza tratto (m)	Variazione volumi (m^3/anno)	Variazioni medie linea riva (m/anno)
1	2850	-2878	-0.12
2	1500	-11428	-0.93
3	3400	-8447	-0.30
4	1950	+2808	+0.18
5	6050	-19329	-0.39
6	6450	-2856	-0.05

Tab. 5.1 – Risultati del confronto tra le linee di riva 1992 e 2005

5.1.2 Analisi dei dati meteomarini (trasporto solido potenziale)

Sulla base dei risultati delle propagazioni locali del clima ondoso (cfr. paragrafo 4.1), è stato possibile condurre un'analisi "quantitativa" della tendenza evolutiva dei vari tratti di litorale.

In particolare, con riferimento al clima ondoso in corrispondenza dei punti di output locali (Torre Astura, Foce Verde, Capo Portiere, lago dei Monaci, lago di Caprolace, Foce canale Caterattino e Torre Paola), per ciascun sito sono state calcolate le componenti del flusso di energia dirette verso Nord e verso Sud.

Il flusso di energia, a meno di una costante moltiplicativa, può essere espresso come:

$$Q_S \propto H_s^{\,2} \cdot T_m \cdot N \cdot sen(2\alpha_0),$$

dove H_S rappresenta l'altezza significativa di ciascun evento, T_m il periodo medio, N il numero di registrazioni attribuite a ciascun evento e α_0 la direzione dell'onda rispetto alla normale al litorale.
Per ciascun sito la normale al litorale è stata assunta coincidente con la normale al tratto di spiaggia antistante al punto di output.

I valori del flusso di energia (espressi, a meno di una costante non adimensionale, in m^3s per numero di registrazioni) sono riportati (in modulo) nella successiva Tab. 5.2. Il flusso risulta globalmente diretto verso Sud, da Torre Astura a Torre Paola.
Si osserva che, procedendo da Nord verso Sud, aumenta la componente del flusso diretta verso Nord e si riduce l'entità del flusso globale, diretto comunque sempre verso Sud.
La zona più attiva, in termini di movimentazione dei sedimenti, risulta quindi essere quella compresa tra Torre Astura e Capo Portiere, che è anche il tratto dove si sono riscontrati, nel corso degli ultimi anni, i maggiori problemi di erosione della fascia costiera. L'esposizione della spiaggia vicino a Torre Paola sembra essere la più "equilibrata" rispetto al trasporto solido dovuto al moto ondoso, anche se, nella realtà, è assai probabile che la corrente litoranea che si sviluppa durante le mareggiate di Ponente sia in grado di movimentare significative quantità di sedimenti verso i fondali antistanti il promontorio del Circeo, realizzando così un più importante trasporto "netto" verso Sud.

PUNTO	SITO	Normale al litorale (°N)	Flusso energia globale	Contributo Verso Sud	Contributo Verso Nord
P1	**Torre Astura**	180	75'664	82'614	6'950
P2	**Foce Verde**	180	59'703	67'978	8'275
P3	**Capo Portiere**	208	39'270	59'676	20'406
P4	**Lago dei Monaci**	223	29'207	56'699	27'492
P5	**Lago di Caprolace**	234	26'148	60'482	34'334
P6	**Foce Caterattino**	243	23'770	62'251	38'481
P7	**Torre Paola**	254	9'319	54'315	44996

Tab. 5.2 – Valori del flusso di energia calcolati sulla base dei risultati della propagazione del clima ondoso

5.1.3 Analisi dei dati morfologici

La descrizione della morfologia del sito è tratta dall'articolo "Morfologia e sedimentologia della spiaggia e della piattaforma continentale interna" di La Monica e Raffi, pubblicato sul volume "Il Mare del Lazio", edito a cura dell'Università La Sapienza e della Regione Lazio, nell'ambito di un progetto finanziato da quest'ultima.

Relativamente alla morfologia della spiaggia, si evidenzia come il litorale da Capo d'Anzio al Circeo sia suddiviso da Torre Astura in due falcate con caratteristiche morfologiche diverse.
A Nord di Torre Astura il litorale è caratterizzato dalla presenza di una scarpata rocciosa con sommità variabile da una quota di circa 15-20 m s.m.m., a Nord di Nettuno, ad una quota di circa 6 m s.m.m. in corrispondenza di Torre Astura. Alla base della scarpata è presente una spiaggia che va allargandosi da Nettuno verso Torre Astura, con locale presenza di cordoni dunali.

Da Torre Astura al Circeo è presente una spiaggia sabbiosa limitata da cordoni dunali di altezza via via crescente, fino a superare i 20 m s.m.m. a Torre Paola. Alle spalle dei cordoni dunali sono presenti una serie di laghi costieri.

Relativamente ai fondali, si evidenzia come il settore da Capo d'Anzio a Torre Astura mostri un graduale aumento delle profondità e sia caratterizzato, a partire dalle opere di difesa del litorale di Nettuno, dalla presenza di barre attorno ai 4-5 m di profondità.
Il fondale verso Torre Astura, privo di opere di difesa, denota la presenza anche di una barra più interna con forti ondulazioni; per circa 4 km al traverso di Torre Astura, il fondale verso il largo si presenta accidentato.
Da Foce Verde a Torre Paola il fondale è sabbioso e caratterizzato dalla presenza di barre, prevalentemente entro la batimetrica dei -5 m s.m.m. e con andamento via via più sinuoso verso SE; l'ampiezza della fascia di piattaforma (dalla battigia alla -10 m s.m.m.) va restringendosi verso Torre Paola.

5.1.4 Analisi dei dati sedimentologici

Per quanto riguarda la sedimentologia del tratto di costa compreso tra Torre Astura e Torre Paola, sono stati considerati nell'analisi i dati forniti dal Committente: profili trasversali di spiaggia rilevati nel corso degli interventi di monitoraggio eseguiti sul litorale pontino e analisi granulometriche condotte sui campioni prelevati in sito, sempre durante le attività di monitoraggio.

5.1.4.1 Analisi dei profili di spiaggia

L'analisi dei profili di spiaggia è stata condotta con riferimento al tratto di costa compreso tra Foce Verde e Torre Paola.
Per il tratto più a Nord (tra foce Verde e il lago di Caprolace) sono stati elaborati i profili di spiaggia rilevati da SO.PRO.MAR S.p.A. nel settembre 2003, mentre per il tratto più a Sud (tra il lago di Caprolace e Torre Paola) sono stati elaborati i profili rilevati da SO.PRO.MAR S.p.A. nel maggio 2007.
Per ciascun area di rilievo sono stati scelti alcuni profili, tra quelli rilevati, ritenuti rappresentativi del tratto di litorale analizzato. Ove disponibili, sono stati elaborati i profili di spiaggia in corrispondenza dei quali si è provveduto anche al prelievo dei campioni di sedimenti, sottoposti ad indagini granulometriche.
Le planimetrie con l'ubicazione dei profili rilevati sono riportate nelle successive Fig. 5.1 (area "Foce Verde": tra Foce Verde e capo Portiere), Fig. 5.3 (area "Foce del Duca": tra capo Portiere e la foce vecchia di Fogliano), Fig. 5.5 (area "rio Martino": tra la foce vecchia di Fogliano e Idrovora Lavorazione), Fig. 5.7 (area "Foce Cavani": tra Idrovora Lavorazione e il lago di Caprolace) e Fig. 5.10 (area "Sabaudia": tra il lago di Caprolace e Torre Paola).

La granulometria caratteristica della spiaggia attiva è stata ricavata ipotizzando, per il profilo di equilibrio, la validità della nota equazione di Dean (1977; $y = Ax^{2/3}$, dove y è la profondità locale alla distanza x da riva).
Dal confronto tra i profili rilevati e quello di equilibrio di Dean, è stato ricavato, attraverso il best-fit delle curve, il valore corrispondente del parametro A, che risulta variabile tra 0.077 e 0.111 $m^{1/3}$.
I risultati del best-fit dei profili sono rappresentati graficamente nelle successive Fig. 5.2 (area "Foce Verde"), Fig. 5.4 (area "Foce del Duca"), Fig. 5.6 (area "rio Martino"), Fig. 5.8 e Fig. 5.9 (area "Foce Cavani"), da Fig. 5.11 a Fig. 5.14 (area "Sabaudia").

Attraverso le formule di Larson e Kraus, si ricava, quindi, un valore del diametro mediano dei grani compreso tra 0.13 e 0.24 mm.

Fig. 5.1 – Ubicazione profili nell'area di Foce Verde (rilievo settembre 2003)

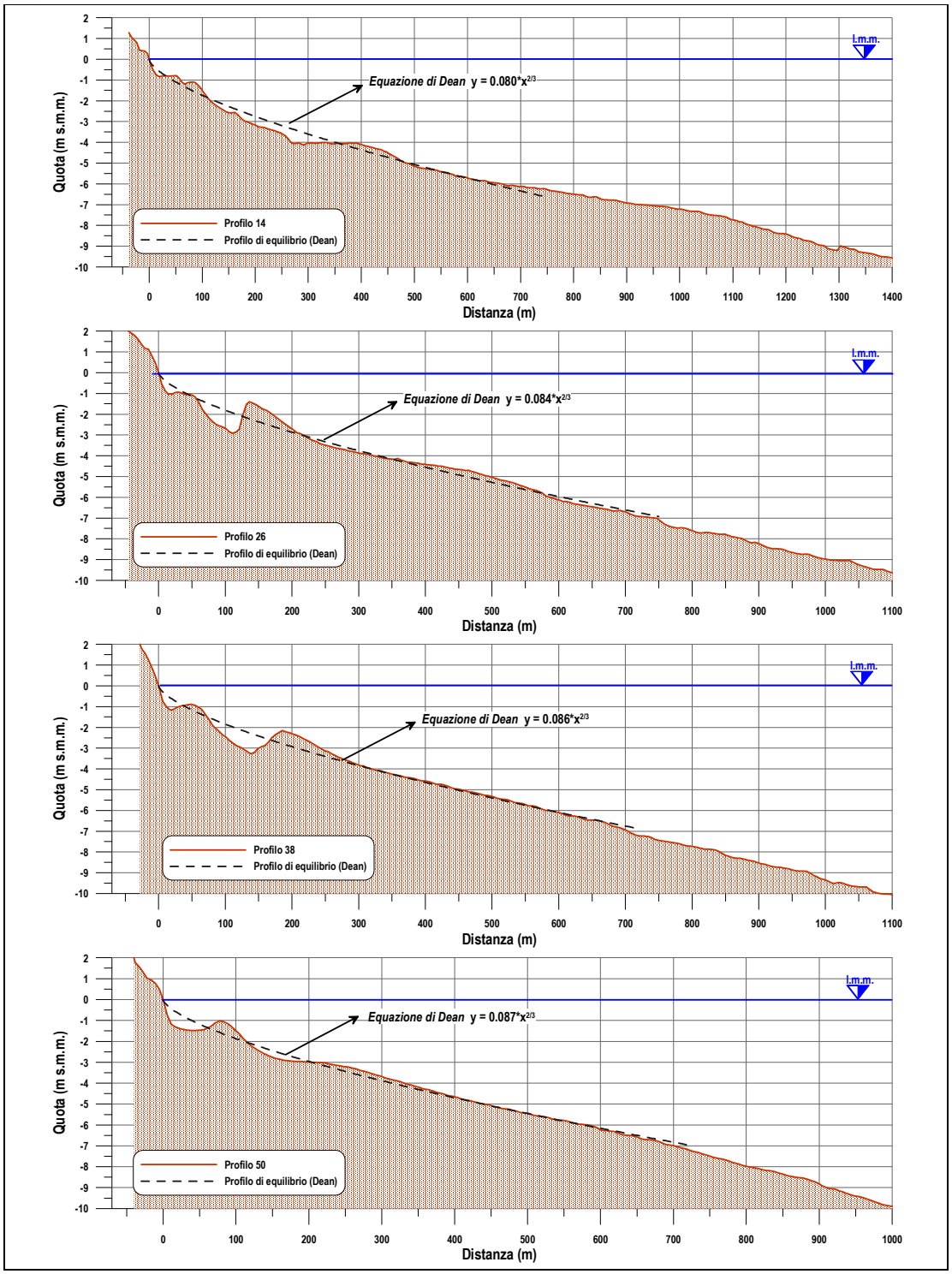


Fig. 5.2 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Foce Verde (rilievo settembre 2003)

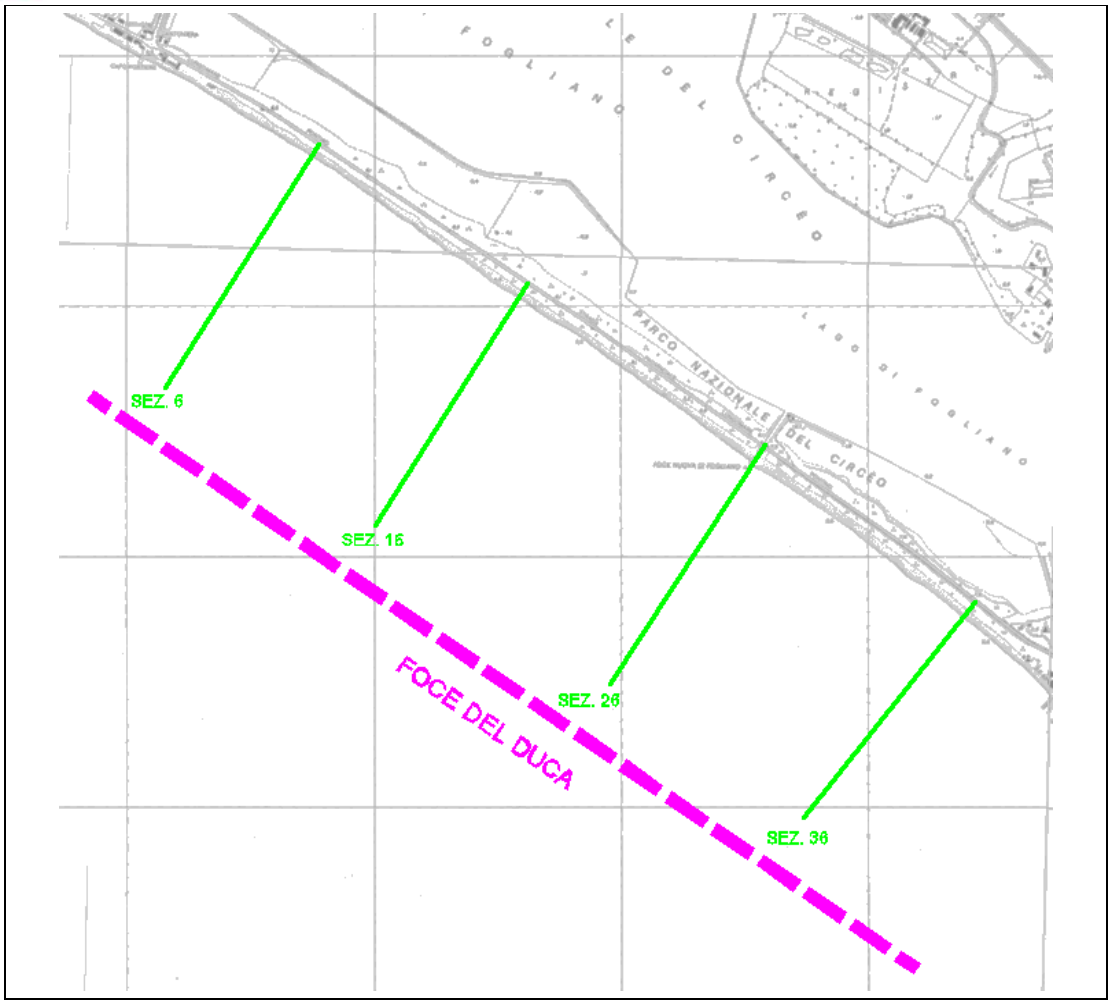


Fig. 5.3 – Ubicazione profili nell'area di Foce del Duca (rilievo settembre 2003)

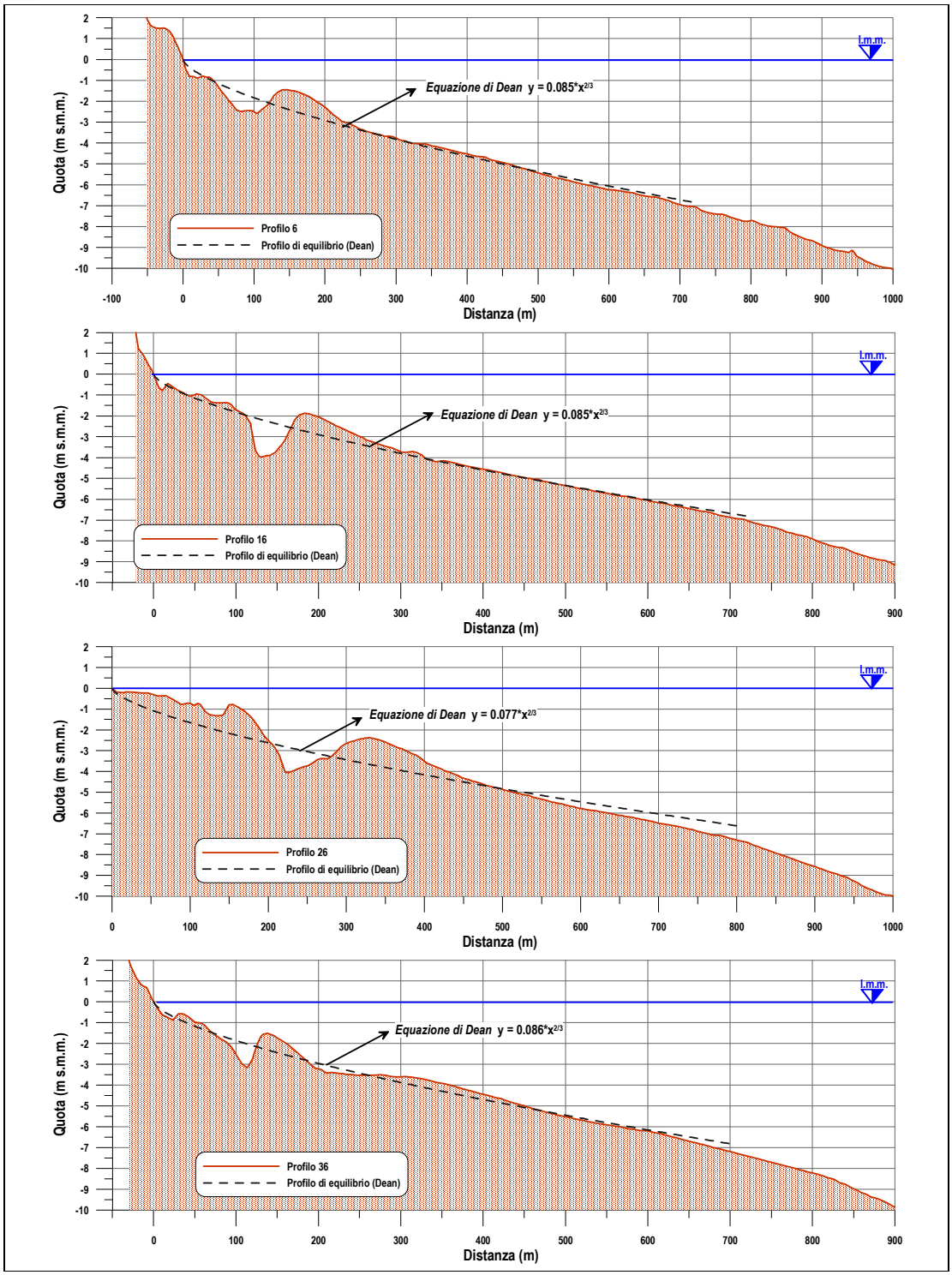


Fig. 5.4 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Foce del Duca (rilievo settembre 2003)

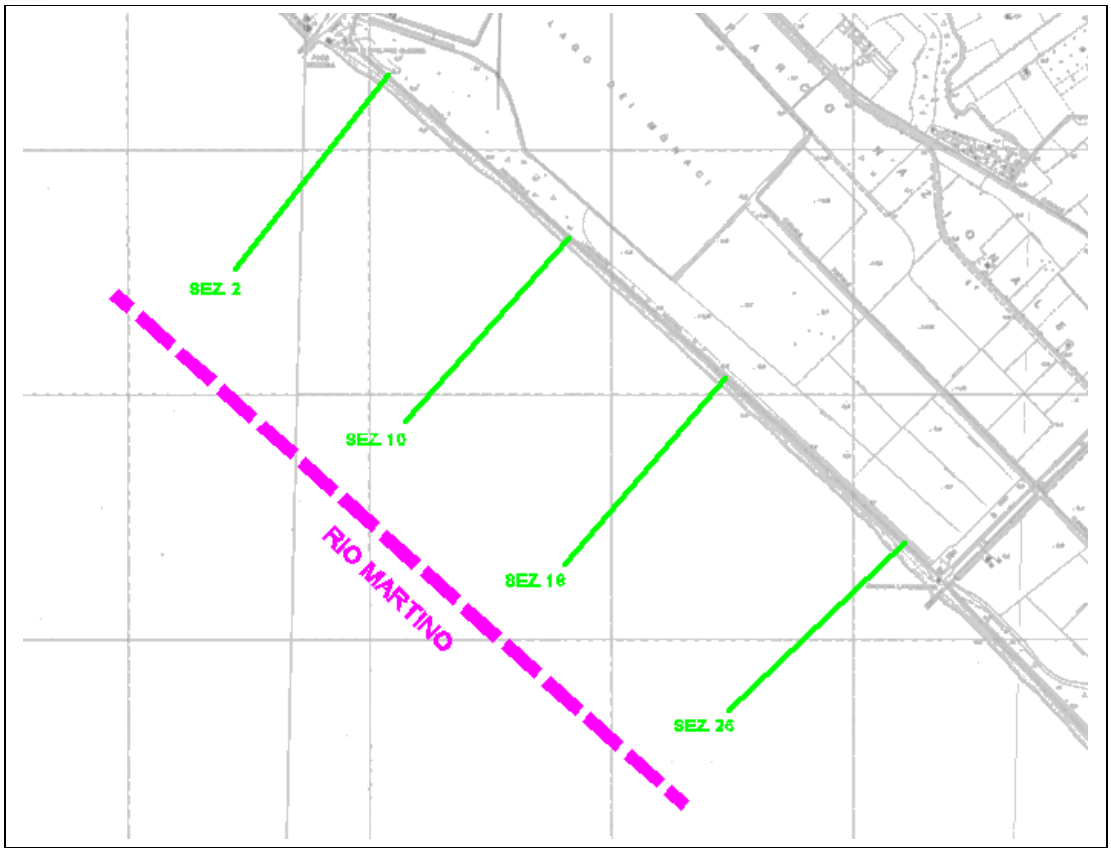


Fig. 5.5 – Ubicazione profili nell'area di rio Martino (rilievo settembre 2003)

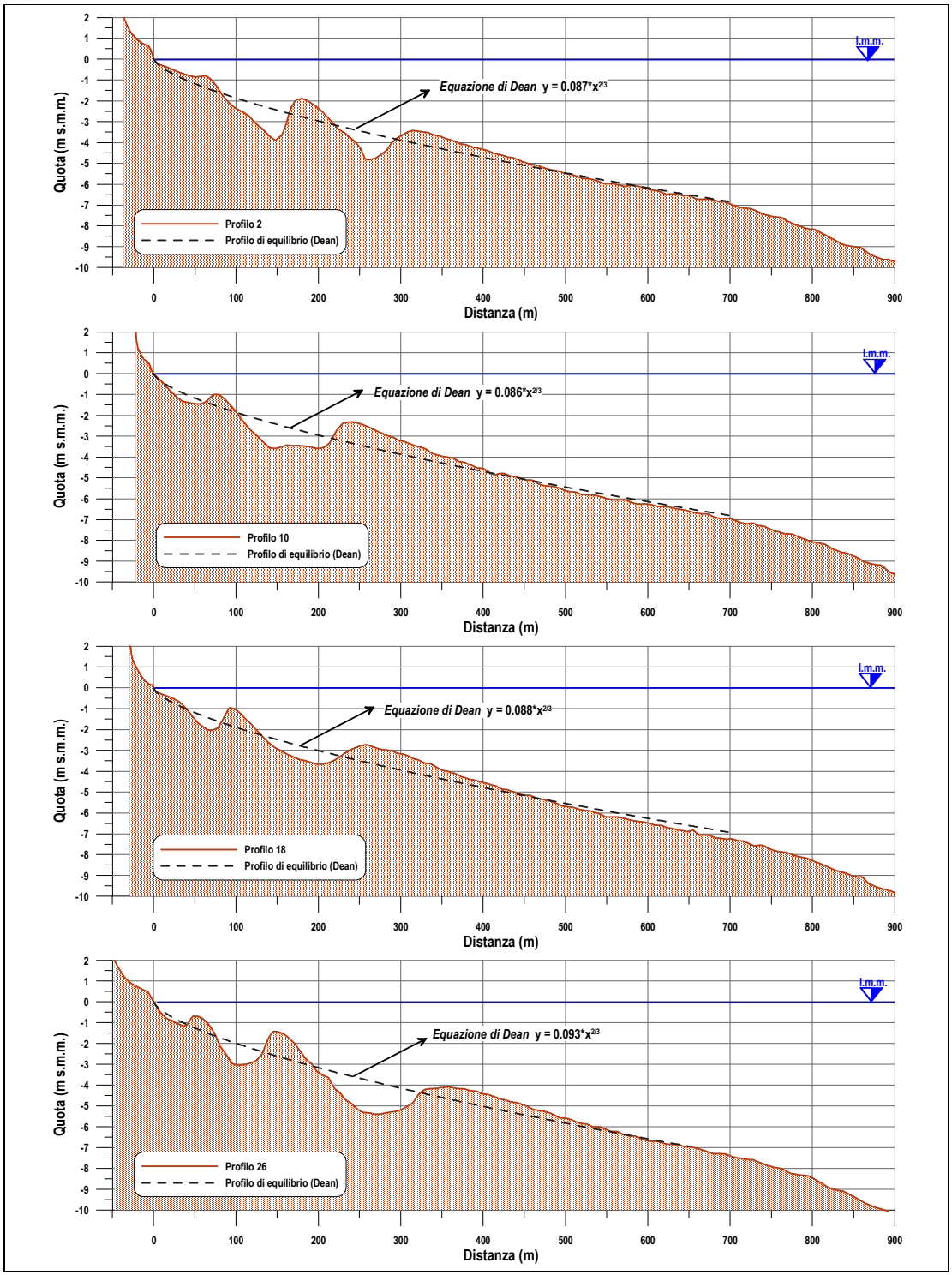


Fig. 5.6 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di rio Martino (rilievo settembre 2003)

Fig. 5.7 – Ubicazione profili nell'area di Foce Cavani (rilievo settembre 2003)

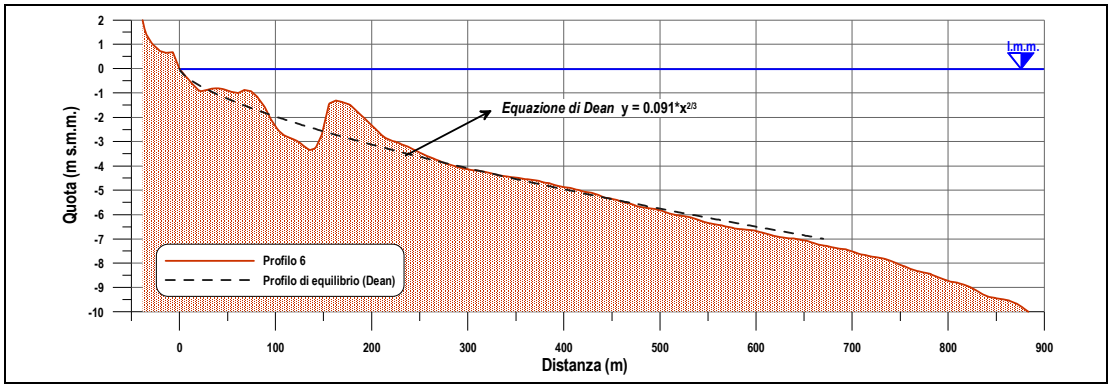


Fig. 5.8 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Foce Cavani (rilievo settembre 2003)

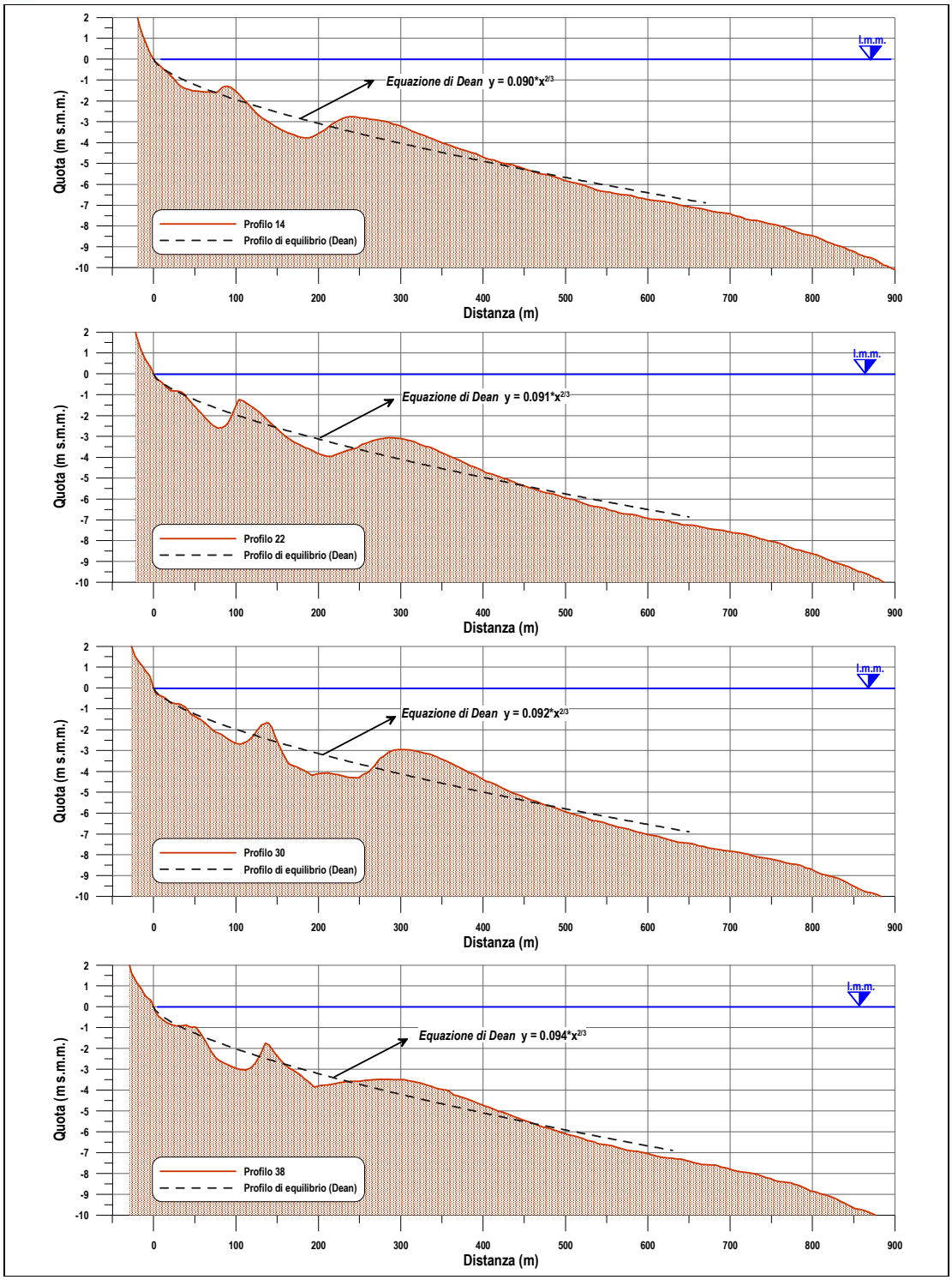


Fig. 5.9 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Foce Cavani (rilievo settembre 2003)

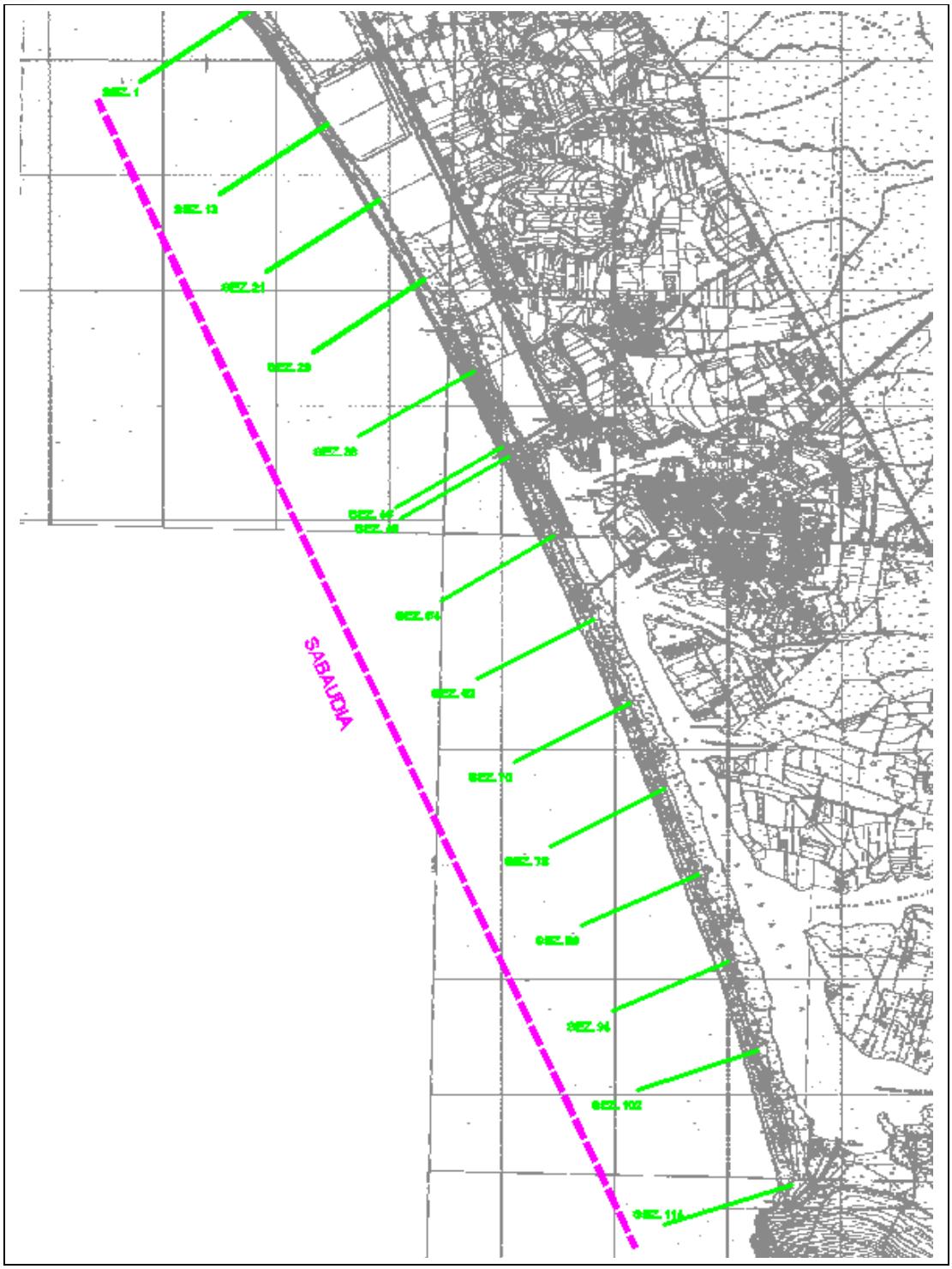


Fig. 5.10 – Ubicazione profili nell'area di Sabaudia (rilievo maggio 2007)

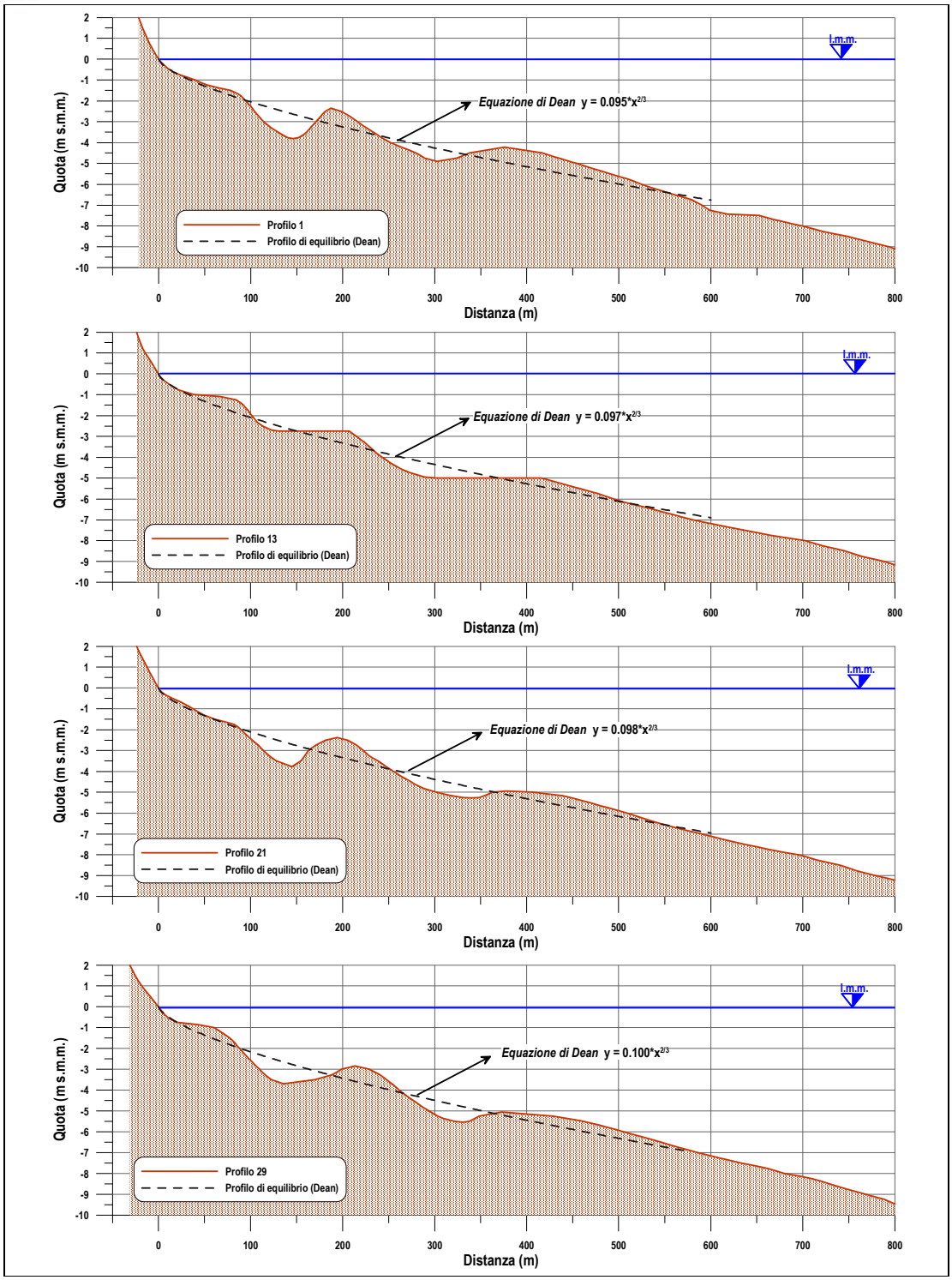


Fig. 5.11 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Sabaudia (rilievo maggio 2007)

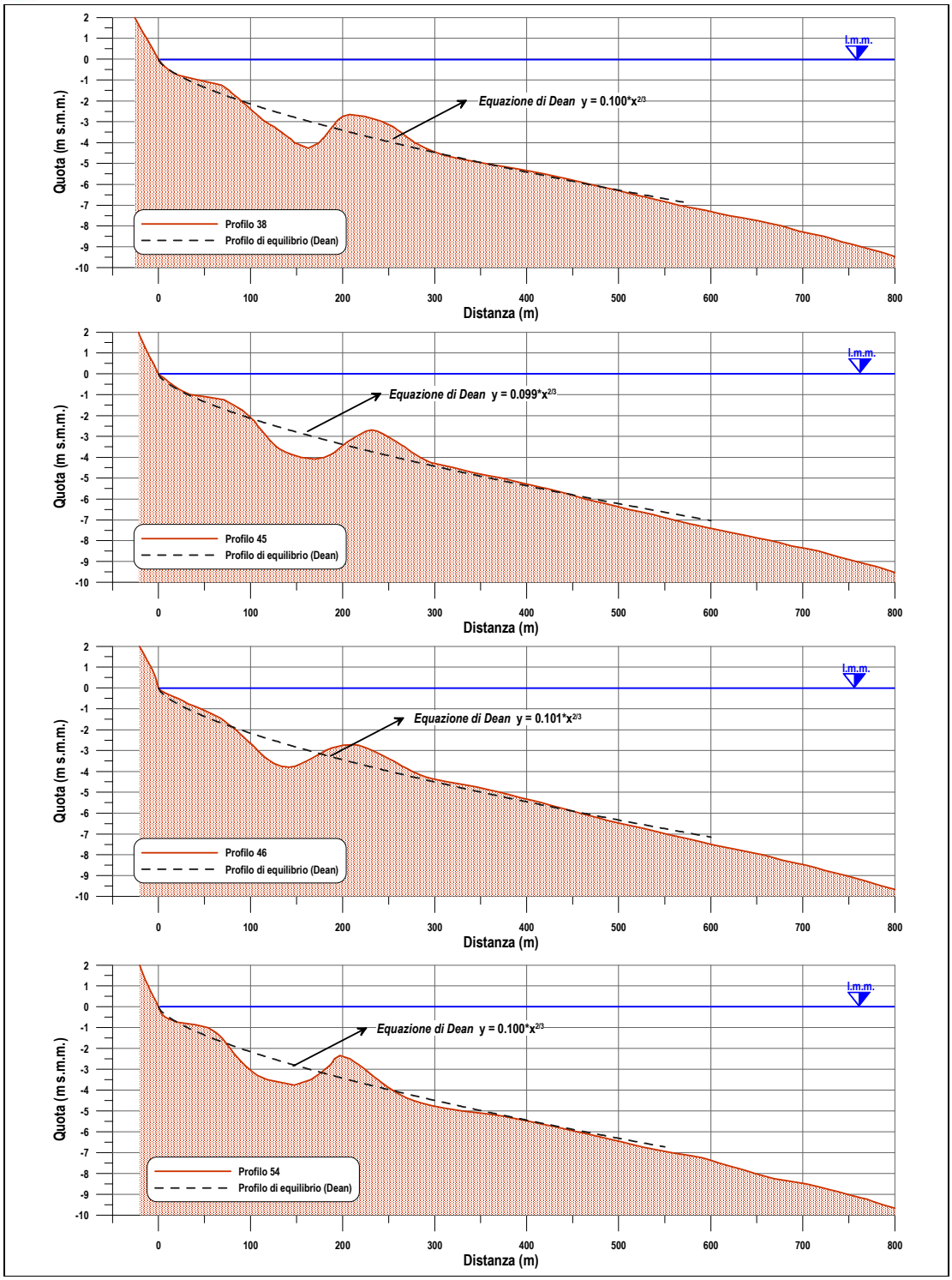


Fig. 5.12 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Sabaudia (rilievo maggio 2007)

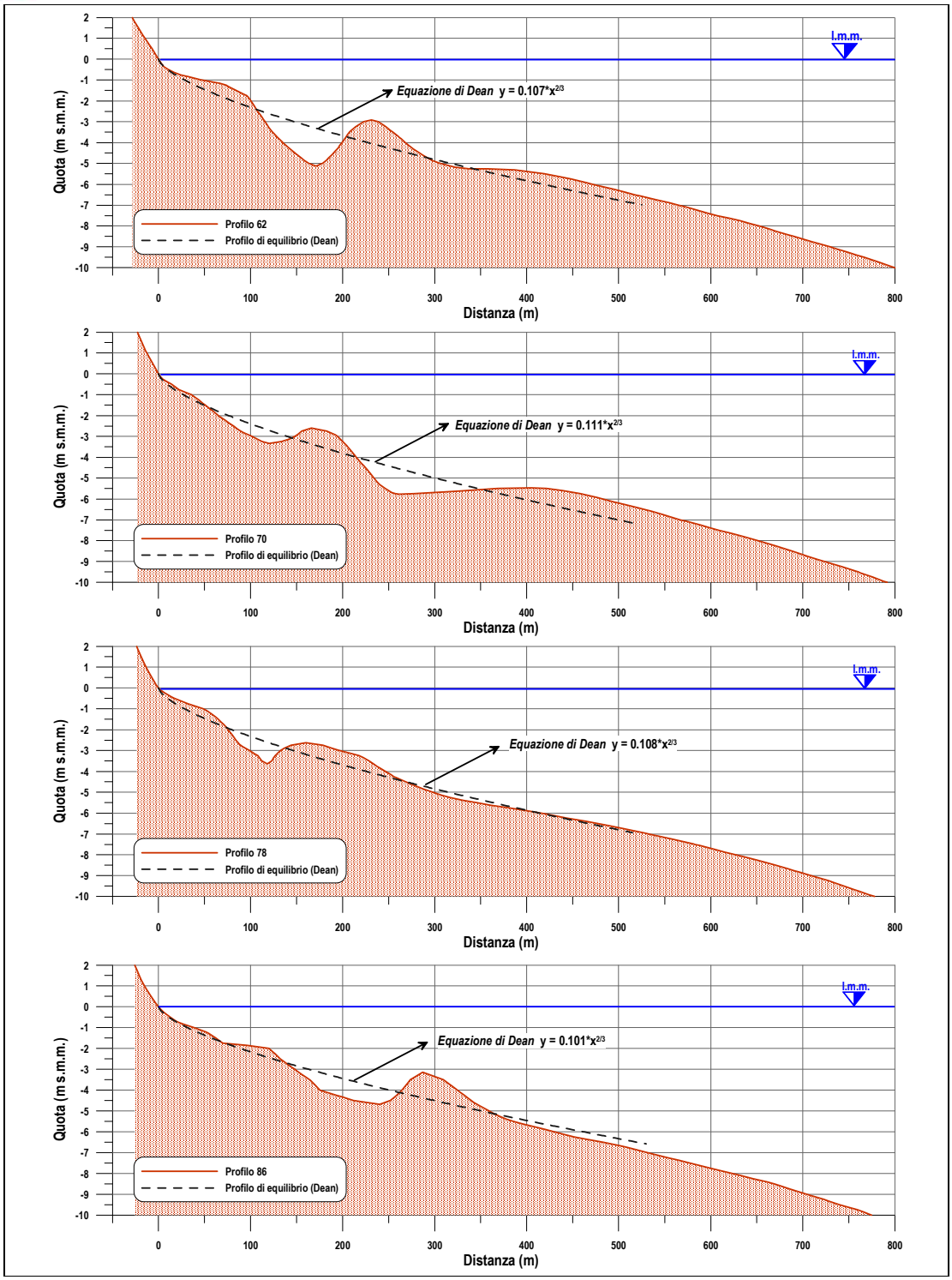


Fig. 5.13 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Sabaudia (rilievo maggio 2007)

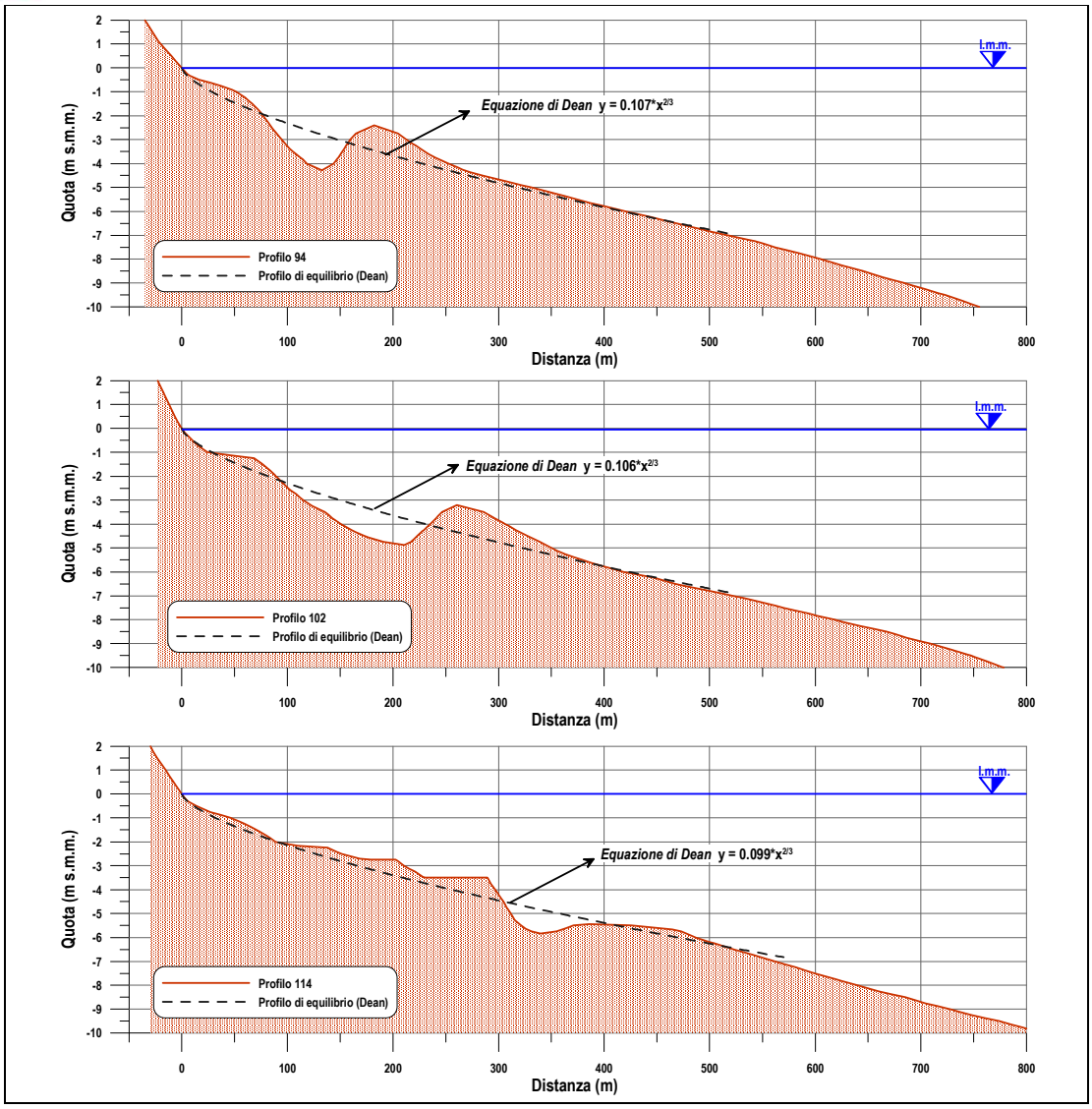


Fig. 5.14 – Best-fit dei profili rilevati nell'area di Sabaudia (rilievo maggio 2007)

5.1.4.2 Analisi delle curve granulometriche

Le analisi granulometriche, fornite dal Committente, riguardano i campioni prelevati nel corso dei rilievi eseguiti nel settembre 2003 da SO.PRO.MAR S.p.A..
I campioni sono stati prelevati nel tratto di litorale compreso tra rio Martino (foce vecchia di Fogliano) e l'estremità Sud del lago di Caprolace, lungo alcuni profili di spiaggia, sulla battigia e a profondità di -2.0, -5.0 e -7.5 m s.m.m.. L'ubicazione dei profili e dei punti di prelievo è riportata nelle successive Fig. 5.15 e Fig. 5.16.
Di seguito, in Fig. 5.17, si riportano le curve granulometriche dei campioni prelevati nei tratti di litorale denominati rispettivamente rio Martino e foce Cavani. Ad eccezione di un campione, chiaramente costituito da ghiaia, il materiale presente all'interno della fascia attiva è rappresentato da sabbie, caratterizzate da un diametro mediano (D_{50}) dei grani compreso tra 0.14 e 0.24 mm, in accordo con quanto ricavato dal best-fit dei profili di spiaggia (cfr. paragrafo 5.1.4.1).
I valori del diametro mediano dei grani, ricavati dalle analisi granulometriche condotte sui campioni prelevati, sono riassunti nelle successive Tab. 5.3 e Tab. 5.4.

Allo stato attuale, non è stato possibile reperire i risultati delle analisi granulometriche condotte sui campioni prelevati a Sabaudia durante le attività di monitoraggio del litorale condotte nel maggio 2007.

Per quanto riguarda, invece, il tratto di litorale a Nord di Rio Martino, sulla base delle informazioni fornite dal Committente e dalla Regione Lazio, non sembra siano stati prelevati campioni di sedimenti durante l'esecuzione dei rilievi eseguiti nel 2003 tra Foce Verde e rio Martino.

PROFILO	Profondità prelievo (m s.m.m.)	D_{50} (mm)
2	+0.0	0.170
	-2.5	0.162
	-5.0	0.141
	-7.5	0.145
10	+0.0	8.676
	-2.5	0.189
	-5.0	0.139
	-7.5	0.143
18	+0.0	0.223
	-2.5	0.172
	-5.0	0.137
	-7.5	0.140
26	+0.0	0.199
	-2.5	0.165
	-5.0	0.145
	-7.5	0.152

Tab. 5.3 – Valori di D_{50} (Campioni rio Martino)

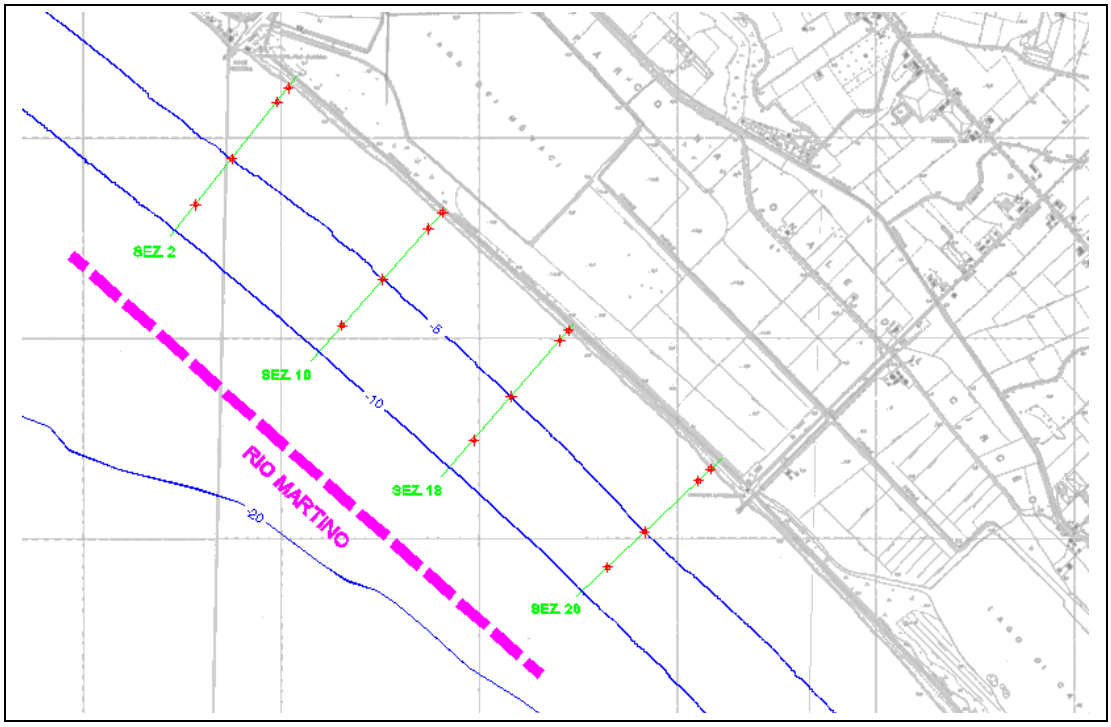


Fig. 5.15 – Ubicazione campioni prelevati nell'area di Rio Martino (punti in rosso)

PROFILO	Profondità prelievo (m s.m.m.)	D_{50} (mm)
6	+0.0	0.201
	-2.5	0.147
	-5.0	0.143
	-7.5	0.139
14	+0.0	0.214
	-2.5	0.164
	-5.0	0.142
	-7.5	0.142
22	+0.0	0.224
	-2.5	0.183
	-5.0	0.149
	-7.5	0.141
30	+0.0	0.244
	-2.5	0.231
	-5.0	0.144
	-7.5	0.144
38	+0.0	0.236
	-2.5	0.210
	-5.0	0.143
	-7.5	0.143

Tab. 5.4 – Valori di D_{50} (Campioni foce Cavani)

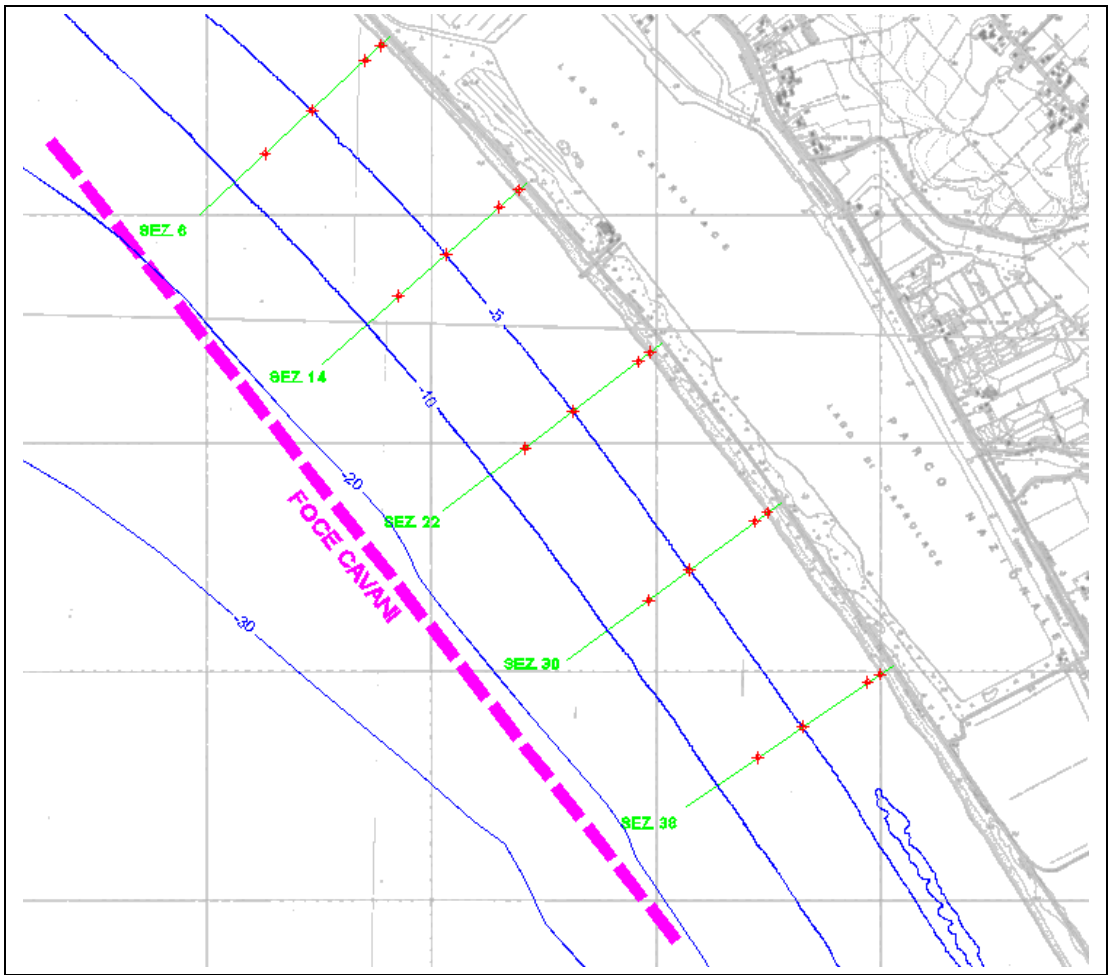


Fig. 5.16 – Ubicazione campioni prelevati nell'area di Foce Cavani (punti in rosso)

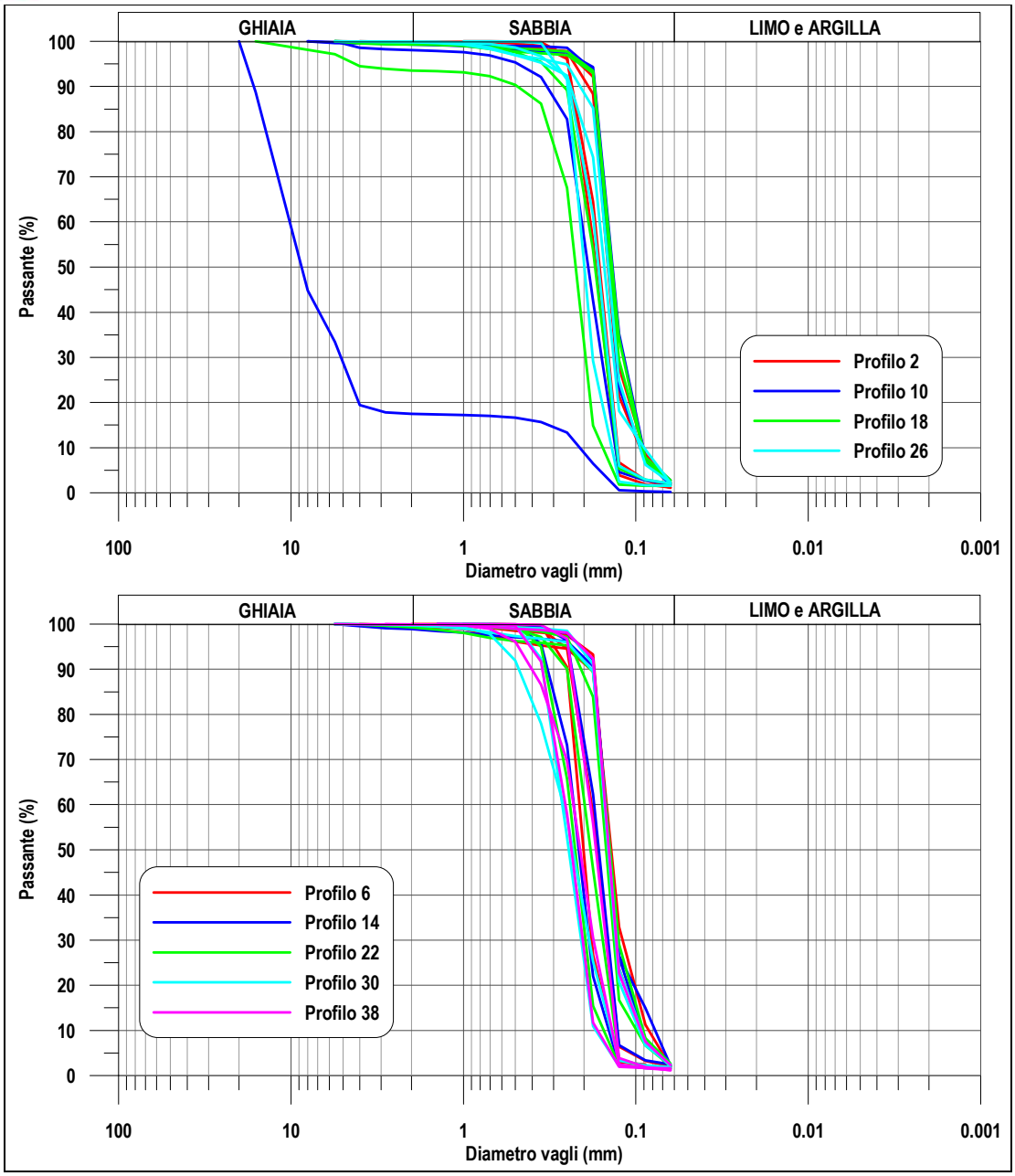


Fig. 5.17 – Curve granulometriche dei campioni prelevati a rio Martino (in alto) e a foce Cavani (in basso)

5.2 Taratura del modello di evoluzione morfologica

Lo studio morfologico dell'evoluzione del litorale tra Capo Portiere e Torre Paola è stato condotto mediante l'utilizzo del codice di calcolo GENESIS, sviluppato dal centro di ricerca americano CERC (Coastal Engineering Research Center), sulla base delle linee di riva storiche fornite dal Committente.

Nell'ambito delle attività relative alla prima fase di studi, si è proceduto alla costruzione della griglia di calcolo GENESIS e alla taratura del modello di evoluzione morfologica.
La taratura del modello è stata condotta con riferimento alle linee di riva 1992 e 2005, fornite dal Committente e ricavate digitalizzando la foto aerea del 1992 e la foto aerea Telespazio 2005.
La scelta di utilizzare le linee di riva 1992 e 2005 per la taratura del modello è stata effettuata ponendosi l'obiettivo di riprodurre, nel modello, l'evoluzione recente del tratto di litorale esaminato, compatibilmente con le informazioni disponibili riguardo agli interventi eseguiti sul litorale.
Pertanto, considerando che la maggior parte degli interventi di ripascimento eseguiti nel corso degli ultimi anni sono stati eseguiti tra il 1986 e il 1990 e che le modifiche sostanziali alla conformazione geografica del paraggio sono state introdotte con gli ultimi interventi (2003-2005), si è deciso di simulare l'evoluzione relativa al periodo 1992-2005.
Infatti, dal 1992 al 2005, l'unico intervento rilevante documentato riguarda la sistemazione del tratto di litorale a Sud di Foce Verde, ottenuta attraverso la realizzazione di un ripascimento protetto da opere rigide (barriera sommersa e pennelli) e delle armature di foce del fosso del Moscarello (Foce Verde). Va peraltro sottolineato che dalle foto aeree è possibile osservare che altre opere rigide (non è dato di sapere se accompagnate a ripascimenti) sono sicuramente state realizzate a Sud di Foce Verde; tra queste, alcuni pennelli apparentemente sommersi sul sedime dei quali sono poi stati realizzati alcuni dei pennelli del nuovo sistema di difesa (2003-2005).

La fase di taratura consente di adattare il modello matematico alla situazione del paraggio oggetto di studio: il modello, infatti, interpreta la realtà fisica in maniera semplificata, tenendo conto qualitativamente dei principali fenomeni che governano l'evoluzione morfologica della costa.
I fenomeni responsabili dell'evoluzione, tuttavia, sono molteplici e la loro influenza non può essere sempre valutata con metodi deterministici in termini quantitativi.

L'operazione di taratura consente, in maniera implicita, di tenere conto di tutti i fattori non direttamente esplicitabili sotto la forma di relazioni causa-effetto. Il principale obiettivo della taratura è la determinazione dei coefficienti K_1 e K_2, che correggono la formula del CERC (1984), esprimente la relazione tra trasporto solido e flusso di energia in direzione parallela alla riva.
La taratura, condotta con riferimento alle linee di riva del 1992 e del 2005, consiste nel variare i parametri di calibrazione del codice di calcolo fino ad ottenere dal modello stesso la ricostruzione più fedele possibile dell'evoluzione misurata nell'intervallo temporale prescelto.

Ai fini della modellazione matematica, è stato individuato un dominio di calcolo idoneo per il sito in esame, schematizzando opportunamente (come in seguito specificato) le singolarità presenti.

5.2.1 Propagazione del moto ondoso sottocosta

La fase iniziale, propedeutica alla taratura del modello di evoluzione morfologica, è consistita nel trasferimento sottocosta, al limite esterno della fascia attiva, delle caratteristiche del clima ondoso precedentemente determinate nel punto al largo (boa di Ponza). Il trasferimento è stato effettuato mediante il codice di calcolo STWAVE, descritto in dettaglio nell'allegato A.
Sono state, quindi, scelte una serie di stazioni (in pratica una serie di boe virtuali), poste lungo la costa in corrispondenza della batimetrica –10 m s.m.m. e posizionate ad una distanza di 200 m tra loro; tali stazioni sono state ritenute significative per rappresentare le differenti condizioni di moto ondoso lungo il tratto di litorale (Fig. 5.18).

La griglia di calcolo STWAVE è la stessa griglia utilizzata per la propagazione locale del clima e per i piani d'onda delle mareggiate estreme e significative. Si tratta, infatti, di una griglia ruotata di 42° rispetto all'orizzontale, con origine nel punto di coordinate (329605 m EST; 4548500 m NORD), dimensioni 24000 x 51000 m (Fig. 5.21). A differenza delle altre due, questa griglia, finalizzata alla sola propagazione del clima in corrispondenza delle stazioni, è stata discretizzata con passo più rado (200 m). Le coordinate dell'origine della griglia di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento UTM33 ED50.

Il file di input che descrive il moto ondoso nelle simulazioni condotte con il modello GENESIS è stato ricavato creando una sequenza di eventi casualmente ordinata, sulla base del clima ondoso al largo, compreso all'interno del settore di traversia del paraggio 120°-300°N. Una volta fissato l'intervallo temporale di calcolo (pari a 3 ore, nel caso in esame), l'andamento del clima meteomarino dell'anno medio risulta descritto da un numero di eventi pari al numero di intervalli di calcolo compresi nell'anno.

Il codice di calcolo associa a ciascuno degli intervalli temporali una serie di valori di altezza significativa, periodo e direzione media di provenienza, tale per cui l'andamento globale del clima ottenibile dalla sequenza ricostruita rappresenta efficacemente il clima vero.
Gli eventi caratterizzati da altezza significativa inferiore a 0.25 m, nel punto al largo, sono stati considerati come "calme".

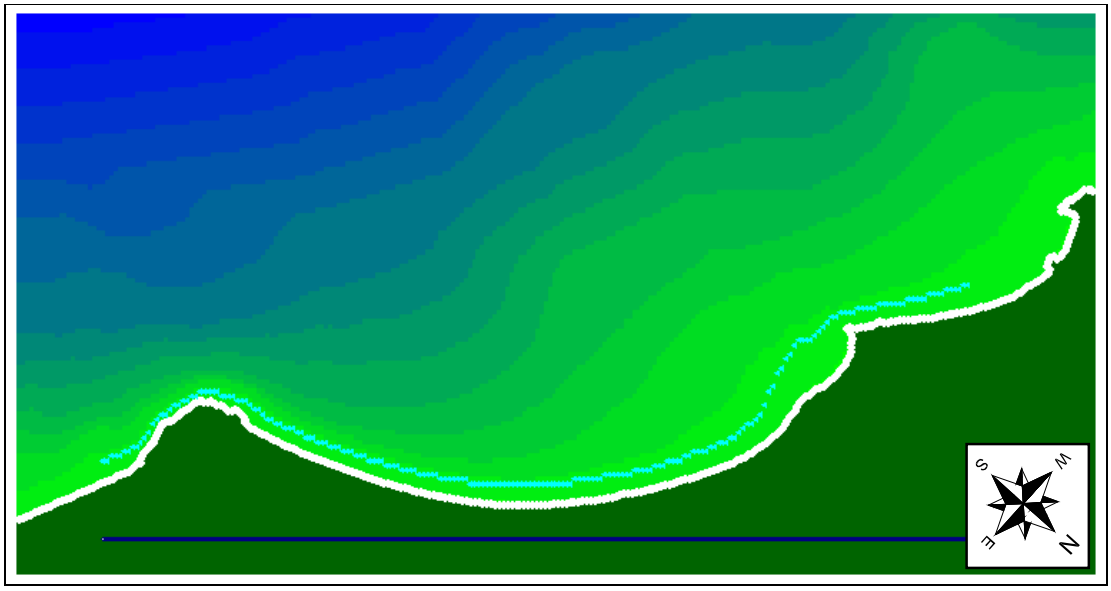


Fig. 5.18 – Ubicazione delle boe virtuali (stazioni) poste alla profondità di –10 m s.m.m.

5.2.2 Premessa alla modellazione

I modelli matematici costituiscono un valido strumento per l'analisi e la previsione dell'evoluzione della morfologia costiera. Il principale vantaggio dei modelli matematici risiede nella possibilità, una volta implementati, di studiare in tempi ragionevolmente brevi diverse soluzioni progettuali ovvero l'effetto di forzanti di natura diversa (mareggiate eccezionali, variazioni del clima, ecc.).
La modellazione dell'evoluzione morfologica di un litorale coinvolge fenomeni di natura diversa quali il moto ondoso incidente il litorale stesso, la presenza di correnti costiere, il trasporto solido longitudinale (in direzione parallela alla linea di riva), il trasporto solido trasversale (perpendicolare alla linea di riva), l'influenza di strutture collocate all'interno della zona attiva della spiaggia (quella cioè interessata da fenomeni di migrazione dei sedimenti per azione del moto ondoso) e di eventuali interventi di dragaggio o ripascimento artificiale.
In primo luogo è fondamentale la determinazione delle forzanti del sistema, cioè del clima meteomarino locale. Sulla base di questi dati è possibile quindi valutare il trasporto solido nelle diverse direzioni nelle diverse celle che compongono il modello matematico. Una volta determinate le forzanti, si passa quindi alla valutazione del trasporto solido nelle diverse direzioni, valutazione che si basa su criteri semiempirici che legano le caratteristiche del moto ondoso alla geometria della spiaggia ed alle caratteristiche dei sedimenti che la costituiscono.
Va quindi analizzata l'influenza delle strutture collocate all'interno della zona attiva, sia in termini di modificazione della propagazione locale del moto ondoso che di interazione con il regime di trasporto solido, cioè di valutazione della variazione indotta localmente sulle forzanti del sistema dalla presenza di opere e della capacità di queste ultime di intercettare, totalmente o in una parte da quantificare, il trasporto solido. Alla stregua delle opere in zona attiva vanno considerati gli interventi di dragaggio e ripascimento, che modificano localmente il campo di moto delle onde incidenti e alterano in alcune zone il budget di sedimenti passibile di migrazione per effetto delle forzanti già determinate. Si rimanda all'allegato A per una descrizione del codice di calcolo GENESIS.

5.2.3 Profondità di chiusura e altezza di swash

La profondità di chiusura rappresenta la profondità limite al di sotto della quale il profilo trasversale non subisce cambiamenti significativi, nell'intervallo di tempo per cui si esegue la simulazione.
La valutazione corretta della profondità di chiusura per un dato sito è normalmente condotta sulla base dell'analisi di dati storici che documentino l'evoluzione del tempo del profilo trasversale in sezioni significative del sito in oggetto. Qualora tali dati non siano disponibili, è possibile valutare la profondità tramite la relazione di Hallermeier (1983):

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

dove $H_{0,12}$ rappresenta il valore dell'altezza significativa superata in media per 12 ore all'anno. Utilizzando la tabella del clima ondoso medio ricostruito in corrispondenza della boa di Ponza (descritto in dettaglio al precedente paragrafo 3) è stato possibile ricostruire la curva di durata e determinare il valore di $H_{0,12}$.

In Fig. 5.19 è rappresentata la curva di durata per il calcolo della $H_{0,12}$. Sulla base della frequenza annua è stata valutata un'altezza d'onda $H_{0,12}$ pari a 4.2 m. La profondità di chiusura h_c è risultata di conseguenza pari a circa 6.7 m; l'altezza di swash D_B è stata stimata in 1.5 m. Di conseguenza l'altezza complessiva della fascia attiva risulta di 8.2 m.

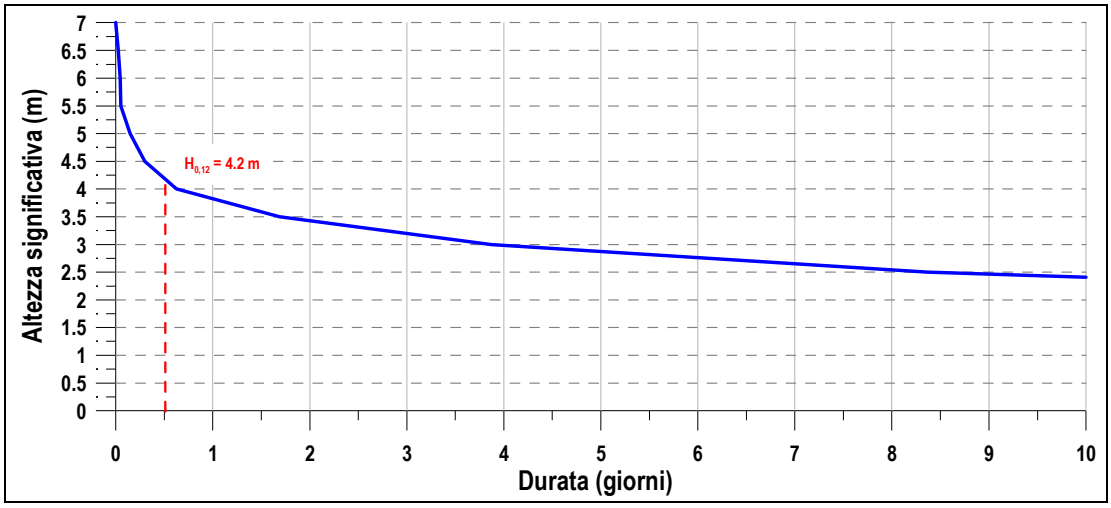


Fig. 5.19 – Individuazione $H_{0,12}$ – Curva di durata in corrispondenza della boa di Ponza

5.2.4 Dati sedimentologici

Le caratteristiche granulometriche del materiale che costituisce la fascia attiva del litorale sono state ricavate sulla base dell'analisi dei profili di spiaggia e delle granulometrie eseguite sui campioni prelevati nel corso delle attività di monitoraggio condotte sul tratto di litorale oggetto di studio. Per una descrizione dettagliata dei dati sedimentologici si rimanda a quanto riportato al precedente paragrafo 5.1.4.
Considerando che l'analisi dei profili di spiaggia e delle curve granulometriche dei campioni prelevati ha evidenziato come la spiaggia attiva sia costituita da sabbie con diametro mediano dei grani compreso tra 0.13 e 0.24 mm, si è deciso di utilizzare in GENESIS un valore di D_{50} pari a 0.2 mm. Tale diametro, non necessariamente coincidente punto per punto al diametro mediano del sedimento presente all'interno della fascia attiva, consente tuttavia di simulare nella maniera più corretta la dinamica litoranea.

5.2.5 Parametri utilizzati nel modello

La griglia di calcolo GENESIS, comprendente il tratto di costa compreso tra il promontorio di Torre Astura (a Nord) e il promontorio del Circeo (a Sud), è stata costruita suddividendo il litorale in 820 celle della lunghezza di 50 m ciascuna, per un totale di 41000 m (Fig. 5.20).
La griglia, il cui asse X è ruotato di -42° rispetto all'orizzontale, ha origine nel punto di coordinate (343656.6 m EST; 4566669.2 m NORD (Fig. 5.21). Le coordinate dell'origine della griglia di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento UTM33 ED50.

L'estensione del dominio di calcolo è stata determinata in base alla conformazione del litorale e delle opere presenti, che ha consentito di porre gli estremi in corrispondenza di punti notevoli dove fissare univocamente le condizioni al contorno. L'estremo destro del dominio di calcolo è stato fissato, oltre il promontorio di Torre Astura, mentre quello sinistro è stato posto oltre il promontorio del Circeo. In entrambi i casi, i promontori, la cui linea di riva è costituita da scogliere a picco sul mare, sono stati schematizzati come punti fissi per il trasporto ("pinned").

La taratura, come accennato al precedente paragrafo 5.2, è stata condotta con riferimento ad un periodo di 13 anni (1992-2005). La simulazione è stata a sua volta suddivisa in due fasi per permettere di inserire nel modello le opere rigide realizzate in corrispondenza di Foce Verde tra il 2003 e il 2005. Infatti, pur trattandosi di opere realizzate al di fuori del tratto di litorale oggetto del presente studio (Capo Portiere – Torre Paola), si ritiene che l'impatto di tali opere sul litorale a Sud di Capo Portiere non possa ritenersi trascurabile, soprattutto in relazione alla seconda fase di studio.
Di conseguenza è stata condotta una prima fase di simulazione, che ha permesso di riprodurre l'evoluzione del litorale nel periodo 1992-2003. Le opere rigide inserite nella simulazione 1992-2003 sono le armature delle foci di bonifica, che sono state schematizzate con pennelli di tipo "non diffracting", di lunghezza idonea e permeabilità nulla.
Oltre alle opere rigide è stato inserito anche l'intervento di ripascimento eseguito a Sud di Foce Verde tra il 1998 e il 1999 (circa 25'000 m^3).
La linea di riva finale , ricavata dalla prima fase di simulazione, è stata utilizzata come input per la seconda fase di simulazione (dal 2003 al 2005). In questo caso, oltre ai pennelli delle foci di bonifica, sono state schematizzate le armature di foce del fosso del Moscarello, la barriera sommersa a Sud di Foce Verde, radicata a terra con dei pennelli trasversali semisommersi, e il massiccio intervento di ripascimento eseguito nel tratto di litorale protetto.
Le opere rigide (armature di foce, barriera e pennelli trasversali), realizzate tra il 2003 e il 2005, sono state inserite all'inizio della seconda fase di simulazione (maggio 2003). Si sottolinea che tale scelta è stata dettata in parte dal tipo di modello impiegato ed in parte dalle incertezze riguardo ai periodi di esecuzione dei interventi.

Le armature di foce del fosso del Moscarello sono state schematizzate con dei pennelli impermeabili, la cui lunghezza è stata stimata sulla base della foto aerea telespazio 2005.
La barriera sommersa, le cui caratteristiche sono state fornite dal Committente, è stata schematizzata nel modello GENESIS secondo l'approccio di Seabrook&Hall, descritto in dettaglio nell'allegato A. I parametri utilizzati sono i seguenti:

- diametro medio dei massi 0.5 m,
- pendenza delle scarpate 1:5,
- lunghezza del coronamento 1400 m;
- larghezza del coronamento 10 m,
- quota di coronamento -1.0 m s.m.m.
- profondità al piede dell'opera -2.5 m s.m.m..

La barriera è radicata a terra da quattro pennelli ortogonali alla linea di riva debolmente emergenti, con quota di sommità pari a +0.5 m s.l.m. per i primi 50 m, oltre i quali proseguono con coronamento sommerso a –1.0 m s.m.m., sino ad intestarsi nella barriera sommersa. I pennelli trasversali sono stati schematizzati con strutture impermeabili di tipo "non diffracting" di idonea lunghezza.

L'intervento di ripascimento, eseguito tra il 2003 e il 2005 nel tratto di litorale protetto, è stato schematizzato nella seconda fase della simulazione di taratura con le seguenti caratteristiche:

- 1° intervento: 85000 m^3 di materiale versati nel mese di maggio del 2003 all'interno delle celle della barriera sommersa;
- 2° intervento: 55000 m^3 di materiale versati nel mese di maggio del 2005 all'interno delle prime due celle della barriera sommersa.

Il diametro mediano dei sedimenti che costituiscono la fascia attiva è stato assunto pari a 0.2 mm (cfr. paragrafo 5.2.4).
I parametri impiegati nel modello sono riassunti nella seguente Tab. 5.5. In particolare, si riportano i valori dei coefficienti di taratura-calibrazione K_1 e K_2, le caratteristiche della griglia di calcolo (dimensioni e spaziatura), il periodo individuato per la simulazione, lo step temporale di calcolo, le caratteristiche della climatologia fornita in input al modello (profondità della fascia attiva, ubicazione delle "stations") e le condizioni al contorno.
La linea di riva iniziale è quella del 1992, opportunamente integrata, ove mancante (tratto di litorale immediatamente a Nord di Foce Verde), con quella del 1990, ricavata dalla CTR.

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Coefficiente di calibrazione K_1	0.07	
Coefficiente di calibrazione K_2	0.035	
Numero di celle totali	820	
Dimensioni di ogni cella	50	m
Data inizio simulazione	01/05/1993	
Data di fine simulazione	01/06/2005	
Dimensione step temporale di calcolo	3	h
Profondità a cui sono ubicate le stations	-10.0	m
Profondità di chiusura	-6.7	m
Altezza di swash	+1.5	m
Estremo destro	Aperto (Pinned Beach)	
Estremo sinistro	Aperto (Pinned Beach)	

Tab. 5.5 - Parametri impiegati nel modello

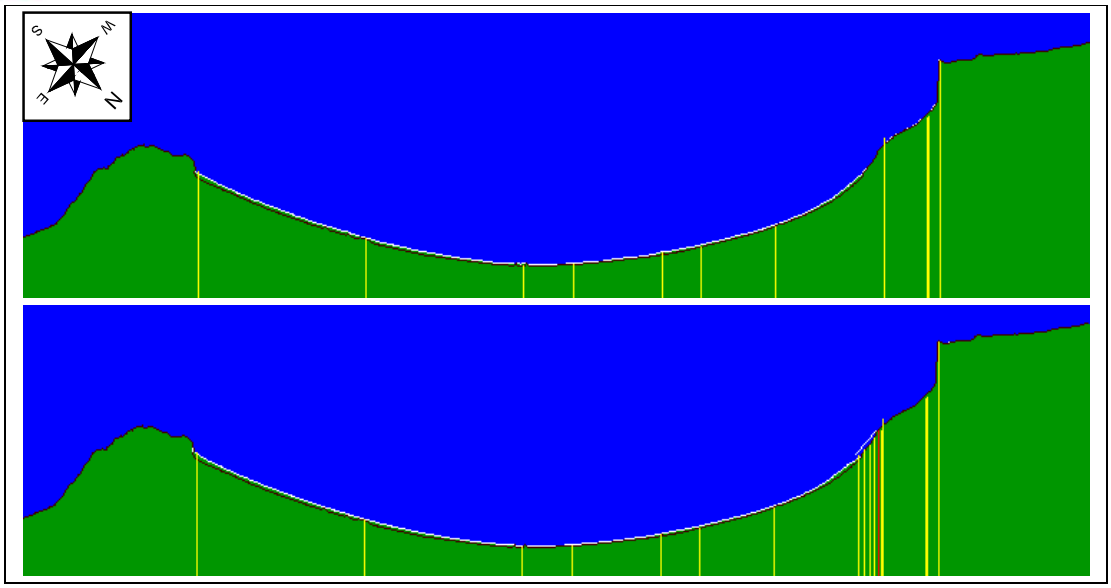


Fig. 5.20 – Griglia di calcolo GENESIS - Prima fase 1992-2003 (in alto) e seconda fase 2003-2005 (in basso)

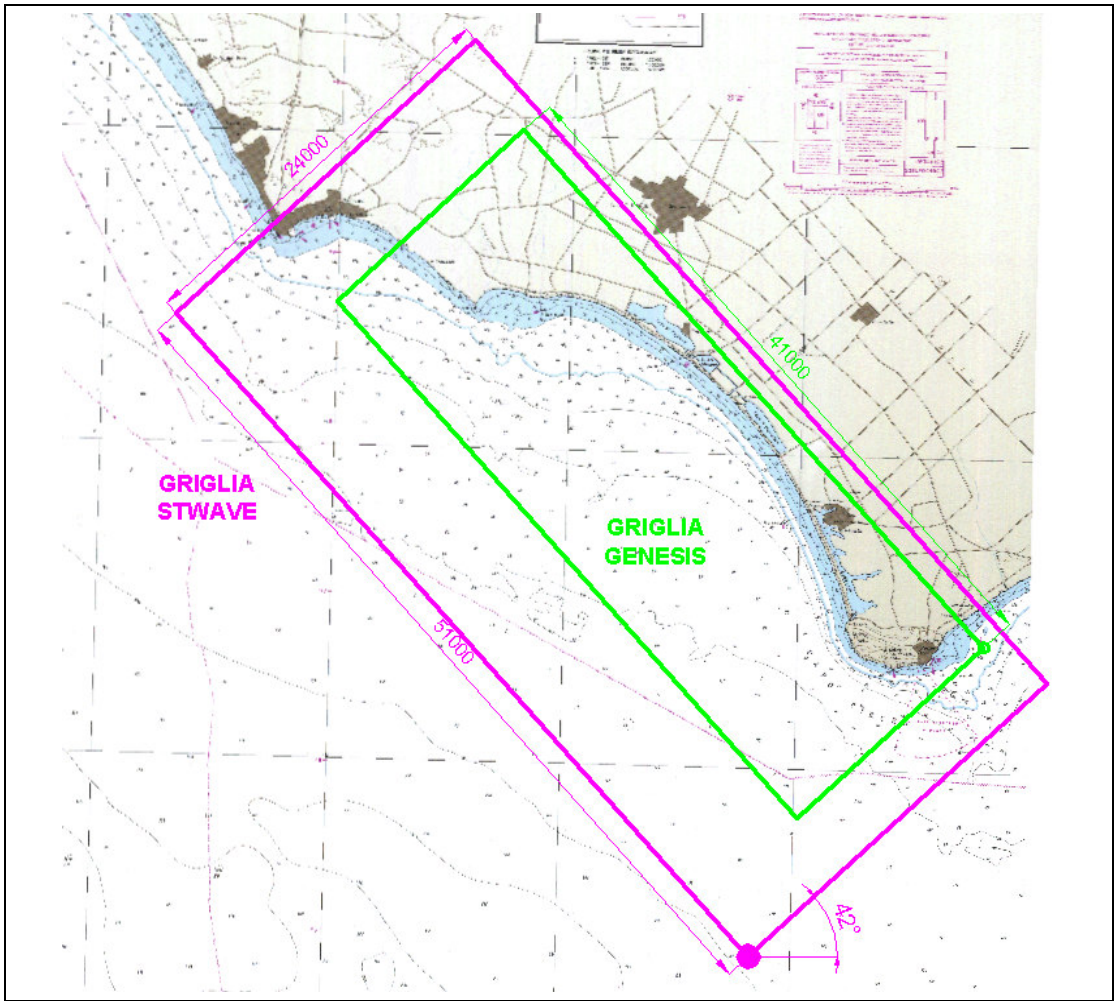


Fig. 5.21 – Planimetria con griglie di calcolo STWAVE e GENESIS

5.2.6 Risultati della taratura

Nel presente paragrafo si descrivono i risultati della simulazione di taratura relativa al periodo 1992-2005, condotta per mezzo del codice di calcolo GENESIS.
Vista la notevole estensione del tratto di litorale schematizzato nel modello, i risultati vengono rappresentati nel dettaglio negli elaborati grafici allegati alla presente relazione, sia in termini di andamento del trasporto solido (Tavola 1a) che di evoluzione della linea di riva (Tavola 1b).
I risultati sono stati rappresentati per il tratto di litorale compreso tra Capo Portiere e Torre Paola, tra la progressiva GENESIS 6500 e 29000 m.

La linea di riva ottenuta come risultato della simulazione di è stata riportata nella Tavola 1b a confronto con quella digitalizzata dalla foto aerea telespazio 2005. Si osserva come il modello, opportunamente tarato, sia in grado di riprodurre con buona approssimazione l'evoluzione recente del litorale.

Alcune discrepanze tra la linea di riva GENESIS e quella della foto aerea telespazio 2005 si riscontrano in alcuni tratti localizzati di litorale e, in particolare, in prossimità delle foci di bonifica. Tali discrepanze sono legate a fenomeni locali di riflessione-rifrazione, non riproducibili nel modello, dovuti sia alla presenza delle opere rigide che del sistema di barre. La presenza delle barre, non schematizzabili con il codice di calcolo, è, infatti, la causa principale dell'andamento "ondulato" della linea di riva reale, che non trova appunto riscontro nella forma regolare della linea di riva ricavata dalla simulazione GENESIS.

Il trasporto solido riportato nel grafico sottostante è quello relativo all'ultimo anno di simulazione, in cui si raggiunge una situazione di regime (Fig. 5.22).

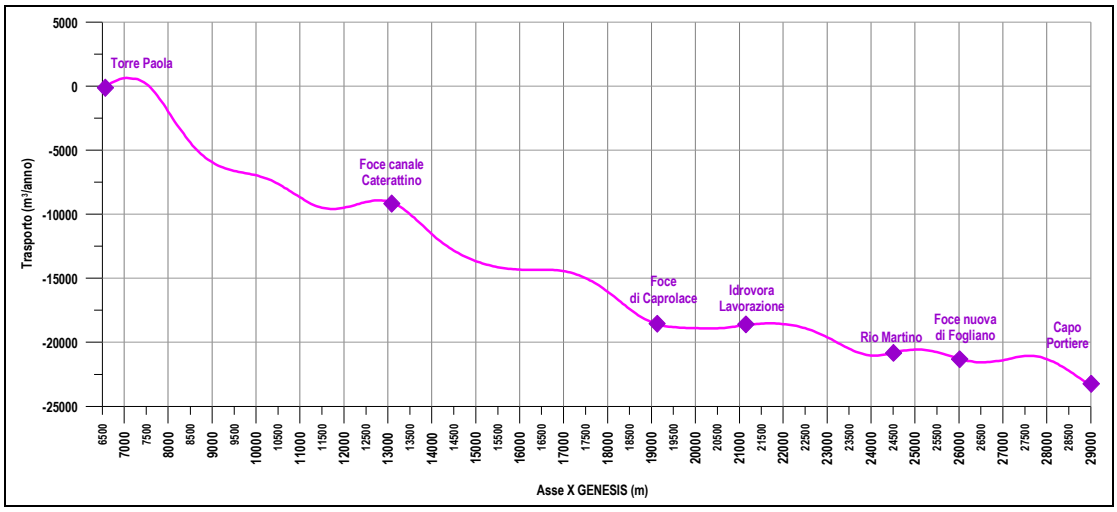


Fig. 5.22 – Andamento trasporto solido longitudinale (taratura 1992-2005)

5.2.7 Considerazioni sui risultati

Il trasporto solido risulta sempre diretto verso Sud, da Capo Portiere a Torre Paola, e tende ad annullarsi in corrispondenza di quest'ultima.

La corrispondenza tra l'andamento della linea di riva calcolato dal modello e quello reale, testimonia come il modello stesso, a meno dei fenomeni localizzati più o meno evidenti, sia in grado di interpretare correttamente la dinamica del trasporto solido litoraneo. Quest'ultimo, come conseguenza del diverso orientamento e della diversa esposizione al moto ondoso, sembra essere più attivo nella zona di Capo Portiere e via via più modesto verso Torre Paola, dove tuttavia potrebbe avere un ruolo non trascurabile la perdita di sedimenti verso i fondali antistanti il promontorio del Circeo per effetto della corrente generata dalle mareggiate di Ponente.
In ogni caso, è chiaro che l'evoluzione del litorale tra Capo Portiere e Torre Paola è legata al bilancio tra l'alimentazione da Nord e la perdita verso il largo.

Il confronto tra i trend evolutivi desumibili dalle variazioni dei volumi di spiaggia (Tab. 5.1) e l'andamento del trasporto solido litoraneo (Fig. 5.22) non consente di trarre facili conclusioni, anche perché i modesti spostamenti della linea di riva rilevati sono dello stesso ordine di grandezza, se non inferiori, ad un'eventuale modificazione della linea di riva legata al transitorio cambiamento del profilo trasversale.

Si ritiene sia anche importante rilevare come i risultati del modello e l'andamento della linea di riva, salvo alcune singolarità, testimonino una sostanziale assenza di impatto delle armature di foce sul trasporto solido; le lunghezze delle armature, infatti, sono sufficientemente ridotte da non raggiungere la prima barra e, di conseguenza, permettono un elevato bypass dei sedimenti.

Locali arretramenti della linea di riva (e corrispondenti avanzamenti), più o meno localizzati, sembrano essere fenomeni transitori e legati alla formazione e successivo spianamento di salienti generati dalle rip current associate alle asimmetrie delle barre sommerse. In base ai dati disponibili sembrerebbe che tali fenomeni fossero reversibili, e tanto meno dannosi, quanto più la retrostante duna è in grado di compensare arretramenti locali con la sua temporanea erosione.
A medio termine, infatti, non sono individuabili nel tratto di interesse potenziali cause per la persistenza di fenomeni erosivi in aree localizzate. In tale contesto, l'eventuale intervento con opere rigide per farvi fronte dovrebbe essere evitato, con l'eccezione di eventuali interventi di consolidamento e ricostituzione della duna.

La futura gestione, o salvaguardia, del litorale sabbioso tra Capo Portiere e Torre Paola, dovrebbe essere quindi attuata attraverso la costante manutenzione delle spiagge tra Foce Verde e Capo Portiere, garantendo che le stesse (cioè la loro progressiva erosione) siano in grado di fornire alle spiagge di sottoflutto un apporto di sedimenti di appropriata granulometria che, in base ai dati disponibili, è stimabile tra i 25000 e i 40000 m^3/anno. Diversamente, i fenomeni erosivi manifestatisi a Sud delle opere rigide recentemente realizzate andranno ad interessare progressivamente l'intera falcata di spiaggia.