



REGIONE AUTONOMA  
FRIULI VENEZIA GIULIA



Autorità di Sistema Portuale  
del Mare Adriatico Orientale

---

# Piano Regolatore Portuale del Porto di Monfalcone Variante Localizzata

---

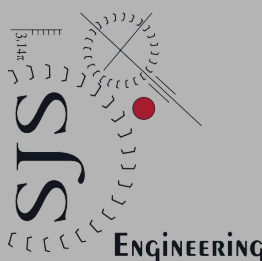
Il Responsabile del  
procedimento

Dott. Marco Padrini

Il Presidente dell'Autorità di  
Sistema Portuale

Dott. Zeno D'Agostino

Progettisti



Archest

Titolo Elaborato

**STUDIO METEOMARINO**

Codice Elaborato

Elaborato

P.5.1.1

Revisione	Data	Descrizione
1	Novembre 2019	Emissione per Adozione
0	Settembre 2019	Prima emissione

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>OBIETTIVI, METODOLOGIA E SINTESI DEL LAVORO .....</b>	<b>4</b>
2.1	Vento.....	4
2.2	Moto ondoso.....	5
2.3	Variazioni del livello del mare.....	6
2.4	Circolazione generale del Golfo di Trieste .....	7
<b>3</b>	<b>ESPOSIZIONE DEL PARAGGIO AL MOTO ONDOSO.....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>IMPOSTAZIONE METODOLOGICA PER LA DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO.....</b>	<b>13</b>
4.1	Ricostruzione del clima ondometrico.....	16
4.2	Ricostruzione degli eventi estremi di moto ondoso .....	16
<b>5</b>	<b>DATI ANEMOMETRICI.....</b>	<b>18</b>
5.1	Regime dei venti in corrispondenza della stazione mareografica di trieste.....	18
5.2	Regime dei venti nel nord adriatico .....	26
<b>6</b>	<b>CLIMA DI MOTO ONDOSO .....</b>	<b>33</b>
6.1	Clima di moto ondoso ricostruito sulla base dei dati DI VENTO della RMN di Trieste.....	33
6.2	Clima di moto ondoso ricostruito sulla base dei dati NOAA.....	34
6.3	Clima di moto ondoso misurato dagli ondometri dell'OGS .....	39
6.3.1	Dati registrati dall'ondametro OGS-DWRG1.....	40
6.3.2	Dati registrati dall'ondametro OGS-DWRG3.....	42
<b>7</b>	<b>EVENTI ESTREMI DI MOTO ONDOSO.....</b>	<b>44</b>
7.1	Metodologia .....	44
7.2	Analisi statistica degli eventi estremi di vento.....	45
7.3	Settore di traversia A.....	47
7.4	Settore di traversia B .....	47
7.5	Risultati .....	49
7.6	Campi di moto ondoso calcolati con il modello SWAN.....	53

<b>8</b>	<b>VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE .....</b>	<b>69</b>
8.1	Marea astronomica .....	70
8.2	Marea meteorologica (analisi del residuo).....	73
8.3	Variazioni a lungo termine del livello del mare.....	74
<b>9</b>	<b>LA CIRCOLAZIONE GENERALE NEL GOLFO DI TRIESTE.....</b>	<b>76</b>
<b>10</b>	<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....</b>	<b>78</b>
<b>11</b>	<b>APPENDICE: DESCRIZIONE DEI CODICI ENIF, ALTAIR E SWAN .....</b>	<b>79</b>

## 1 PREMESSA

Lo scrivente raggruppamento temporaneo (RT) costituito da MODIMAR s.r.l. (mandatario), SJS Engineering s.r.l. (mandante) e Archest s.r.l. (mandante) è risultato aggiudicatario del servizio tecnico di pianificazione, progettazione e coordinamento tecnico scientifico del Piano Regolatore Portuale (PRP di seguito) del porto di Monfalcone, a seguito di gara indetta dalla Regione Friuli Venezia Giulia – Direzione Centrale Infrastrutture e Territorio (RFVG).

Per i cogenti motivi indicati nella Premessa del documento “*P.2 Relazione generale*”, la RFVG, di concerto con *tutti* i portatori di interesse del Porto, ha scelto di perseguire lo strumento di “Variante Localizzata al PRP” del porto di Monfalcone, quale unico ed efficace strumento per attuare rapidamente un intervento decisivo, fondamentale ed indifferibile per lo sviluppo del porto di Monfalcone.

Il presente Studio Specialistico “*P.5.1.1 Studio Meteomarino*” accompagna il progetto di “Piano Regolatore Portuale di Monfalcone - Variante Localizzata”.

Nella presente relazione sono trattati i risultati dello studio meteomarino eseguito tramite opportuna modellazione matematica, necessario per definire i parametri meteomarini di riferimento per le attività di progettazione degli interventi del porto di Monfalcone.

## 2 OBIETTIVI, METODOLOGIA E SINTESI DEL LAVORO

La presente relazione descrive lo studio meteomarino che è stato eseguito per caratterizzare il sito relativo al Porto di Monfalcone.

In particolare sono stati analizzati i seguenti parametri meteomarini:

- il vento;
- il moto ondoso;
- le variazioni del livello del mare a breve termine indotte dalla componente astronomica e dalla componente meteorologica;
- le variazioni del livello del mare a lungo termine;
- la circolazione generale del Golfo di Trieste.

La conoscenza di questi parametri risulta di fondamentale importanza per gli studi inerenti il Porto di Monfalcone in relazione agli aspetti navigazionali, di operatività portuale e al dimensionamento delle opere.

Il porto di Monfalcone è localizzato in una sorta di cul-de-sac: è infatti situato nella porzione più settentrionale del Mare Adriatico, a Nord del Golfo di Trieste e a Nord della foce del Fiume Isonzo la cui cuspide fociale forma la "flesh" sabbiosa di Punta Sdobba. L'accesso al porto è garantito da un canale dragato orientato lungo la direzione Nord Ovest – Sud Est. I fondali ricadenti nel Golfo di Trieste sono modesti, mediamente inferiori a circa 25 m. La costa dell'Istria e quella veneta proteggono completamente l'imboccatura portuale dal moto ondoso generato in mare aperto.

Questa favorevole esposizione geografica che protegge il porto dal moto ondoso incidente, rende allo stesso tempo particolarmente complessa la definizione del clima ondometrico locale poiché esso risulta fortemente influenzato dalla presenza della costa e dai fondali limitati, rendendo praticamente impossibile definire, come di consueto, condizioni di moto ondoso in acqua profonda dove eseguire le analisi statistiche di interesse. Sostanzialmente per Monfalcone non è possibile separare la fase di generazione delle onde ad opera del vento da quella relativa alla loro propagazione in costa rendendo necessario studiare i due fenomeni contemporaneamente.

Per la redazione dello studio si sono in primo luogo reperiti i dati disponibili facendo riferimento alle principali fonti di dati esistenti per il sito in esame. I dati raccolti, dopo essere stati analizzati al fine di valutarne l'attendibilità e la loro significatività, sono stati sottoposti ad elaborazioni statistiche. Si riporta di seguito la sintesi del lavoro svolto.

### 2.1 VENTO

Il vento ha una diretta conseguenza sulla manovrabilità delle navi e quindi sul dimensionamento planimetrico dei canali di accesso e delle aree di evoluzione delle navi, specialmente per le navi che sono caratterizzate da un elevato bordo libero come ad esempio le navi da crociera, le Ro-Pax e le navi contenitori. Anche le azioni delle navi all'ormeggio e i loro movimenti sono fortemente influenzati dall'azione del vento che può costituire uno dei parametri in grado di condizionare,

insieme al moto ondoso, l'operatività dei terminali marittimi e la sicurezza delle navi ormeggiate. Inoltre il vento insieme alla propagazione dell'onda di marea determina l'idrodinamica delle aree costiere e il ricambio idrico dei bacini. Si evidenzia che le correnti costiere sono indotte essenzialmente dall'azione del vento, dalle maree e dal moto ondoso frangente che determinano anche il trasporto solido dei sedimenti. Il vento risulta importante anche per lo studio dei fenomeni di dispersione e diffusione di sostanze inquinanti i quali dipendono dal campo idrodinamico.

Nel caso in esame inoltre il vento ha una importanza particolare per definire le condizioni ondometriche locali.

Poiché il vento è influenzato dall'orografia locale, si è fatto riferimento sia a dati misurati a terra che in mare aperto. In particolare si sono utilizzate le due fonti di dati: (i) le misure anemometriche dirette eseguite in corrispondenza della stazione mareografica di Trieste dell'ISPRA e (ii) le misure di vento ricostruite in reanalisi dalla NOAA per un punto rappresentativo dell'Adriatico settentrionale. Le analisi condotte hanno consentito di definire il clima anemometrico in costa e a largo.

Il clima medio annuale nel Golfo di Trieste presenta una prevalenza dei venti provenienti dal primo e secondo quadrante i quali determinano il moto ondoso generato localmente nel Golfo di Trieste che risulta di interesse per il Porto di Monfalcone. La frequenza media annuale per questi venti risulta superiore a circa il 50 % del tempo.

Le massime intensità del vento, uguali o superiori a circa 28 nodi (14 m/s – 52 km/h), si verificano per il settore di provenienza compreso tra 50° N e 90° N. La velocità massima del vento registrata risulta superiore a 56 nodi (26 m/s – 104 km/h) ed è relativa alla direzione 50° N.

## 2.2 MOTO ONDOSO

Il moto ondoso costituisce il parametro principale per un'opera marittima.

Nel caso di un porto il moto ondoso, insieme al vento e alle correnti, influenza la navigabilità delle navi e quindi l'orientamento planimetrico delle opere foranee e di conseguenza l'operatività dell'imboccatura portuale e delle banchine poste a servizio dei terminali. Inoltre il moto ondoso costituisce la "forzante" principale delle azioni che agiscono sulle opere marittime e, in presenza di fondali incoerenti come nel caso in esame, è il principale responsabile del trasporto solido costiero, quindi dei fenomeni di interrimento a cui possono essere soggetti i canali di navigazione e le imboccature portuali.

Recentemente nel Golfo di Trieste si sono iniziate ad eseguire misure dirette di moto ondoso a cura dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale di Trieste (OGS) il quale ha installato in tempi diversi tre ondometri in tre punti significativi per il Golfo di Trieste, nessuno dei quali è però localizzato nei pressi dell'imboccatura portuale del porto di Monfalcone vista anche la posizione ridossata. I dati ondometrici dell'OGS sono stati acquisiti e analizzati per il presente studio. Le analisi condotte hanno mostrato che le serie storiche sono caratterizzate da un modesto rendimento (inferiore al 40%) dovuto ad interruzioni e a mancate registrazioni, pertanto esse non risultano quantitativamente adatte ai fini delle analisi statistiche di frequenza di accadimento e dei valori estremi. Comunque per l'ondometro posto nella posizione più prossima al Porto di Monfalcone, ovvero a Sud di Punta Sdobba, è stato analizzato il clima ondometrico locale che ha confermato

qualitativamente i valori ottenuti mediante il processo di ricostruzione del moto ondoso di seguito descritto.

Allo scopo di disporre di serie storiche di moto ondoso sufficientemente lunghe dal punto di vista statistico per le applicazioni progettuali di interesse, è risultato necessario implementare uno studio specifico che si è basato sull'applicazione di codici di calcolo in grado di ricostruire le caratteristiche ondometriche a partire dai dati di vento in precedenza acquisiti ed analizzati.

La metodologia utilizzata ha richiesto di definire i due settori di traversia di interesse:

- il settore di traversia A, compreso tra le direzioni 45 e 200° N, al quale è associato il moto ondoso che viene generato all'interno del Golfo di Trieste;
- il settore di traversia B, compreso tra le direzioni 200 e 230° N, al quale è associato il moto ondoso generato nell'alto Adriatico che, in presenza di vento, si propaga nel Golfo di Trieste subendo contemporaneamente i processi di rigenerazione ad opera del vento e di dissipazione indotti dai fondali limitati.

Le applicazioni eseguite hanno consentito di definire in prossimità dell'imboccatura del canale dragato per l'accesso al Porto di Monfalcone, sia il clima ondometrico medio annuale e stagionale, sia le condizioni di moto ondoso estreme associate a prefissati tempi di ritorno.

I risultati ottenuti confermano che l'imboccatura del canale di accesso e di conseguenza quella portuale risulta caratterizzata da condizioni di moto ondoso modeste; a titolo indicativo si evidenzia con riferimento al clima medio annuale, che circa il 96 % del tempo è caratterizzato da altezze d'onda significative inferiori a 0,5 m (calme) e che l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno annuale non supera i 2,5 m.

## 2.3 VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE

Le variazioni del livello del mare hanno una diretta conseguenza sulle applicazioni di ingegneria marittima: influenzano le profondità di dragaggio dei canali marittimi, delle aree di evoluzione delle navi e dei fronti di accosto delle stesse navi. Inoltre influenzano le quote da assegnare alle banchine per evitare che queste possano essere soggette ad allagamenti durante le mareggiate e le azioni esercitate dal moto ondoso sulle strutture.

Le variazioni del livello del mare possono essere classificate in *variazioni a breve termine*, ovvero che si verificano su scale temporali nell'ordine del singolo evento meteorologico (ore-giorni), e in *variazioni a lungo termine* che si verificano su scale temporali degli anni o delle decine di anni.

Le prime sono costituite dalla marea astronomica e dalla marea meteorologica. Il modo migliore per definire per una data località le due componenti consiste nell'effettuare misure dirette di tipo mareografico e di desumere, mediante opportune analisi, le due componenti.

Per quanto riguarda il paragone in questione si è fatto riferimento alla serie storica mareografica registrata nel porto di Monfalcone dal Servizio Gestione Risorse Idriche – Unità Operativa Idrografica della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia gestito dalla Protezione Civile Regionale operativo da giugno 2010.

A completamento di questa analisi, si sono studiati anche i dati della stazione mareografica della U.O.S. di Trieste dell'Istituto di Scienze Marine del CNR, che è situata sul Molo Sartorio del porto di

Trieste. Questa stazione mareografica è la più antica dell'Adriatico; le sue prime osservazioni mareografiche, che risalgono al 1859, vennero eseguite a cura della Regia Accademia Imperiale di Commercio e Nautica.

Le serie storiche relative a queste stazioni sono state analizzate al fine di definire la componente astronomica della marea e i relativi valori caratteristici del livello di marea. La componente astronomica è stata quindi sottratta al segnale registrato ed è stata definita la serie storica stocastica della componente meteorologica della marea. Quest'ultima è stata analizzata statisticamente per definire la correlazione tra i massimi valori del sovrizzo meteorologico ed i relativi tempi di ritorno.

Per quanto riguarda le variazioni a lungo termine del livello medio marino si è fatto riferimento all'analisi eseguita dal CNR-ISMAR sull'intera serie storica registrata a Trieste dalla fine dell'800 ad oggi.

La marea astronomica si presenta prevalentemente con due alte e due basse maree giornaliere (maree di tipo semidiurno). Come noto, in coincidenza dei noviluni e pleniluni (sizigie) si raggiungono le massime escursioni. In vicinanza del primo e dell'ultimo quarto delle fasi lunari (quadrature) la marea si presenta con escursioni poco pronunciate, manifestando una sola alta ed una sola bassa nell'arco del giorno (maree di tipo diurno).

Per quanto riguarda la marea meteorologica, nei mesi invernali si registra mediamente un minimo di livello, legato alla prevalenza di alte pressioni che accompagnano i venti continentali. I massimi valori di livello si registrano nel mese di novembre, corrispondente alla maggiore frequenza di venti meridionali e di bassa pressione atmosferica. Il picco autunnale è correlato al fenomeno dell'acqua alta che si manifesta prevalentemente in ottobre, novembre e dicembre. Si osserva infine che non è raro che a Trieste si verifichino acque alte che danno luogo alla tracimazione delle banchine portuali.

## 2.4 CIRCOLAZIONE GENERALE DEL GOLFO DI TRIESTE

La circolazione generale del Golfo di Trieste è stata ampiamente studiata nel passato sia mediante misure di campo di tipo oceanografico, sia mediante applicazioni numeriche e in letteratura sono riportati i principali risultati ottenuti dalle varie campagne oceanografiche eseguite alle quali si è fatto riferimento per l'elaborazione del presente documento.

Da un punto di vista oceanografico il Golfo di Trieste è un bacino di piccola scala (circa 25 Km x 25 Km) di bassa profondità (massima profondità 38 m, media 20 m) all'interno del quale però la dinamica circolatoria è ricca e peculiare. Può essere classificato come una regione *influenzata dalle acque dolci*, in letteratura anglosassone ROFI (Region Of Freshwater Influence), presenta una varietà stagionale ed è caratterizzato dalle portate fluviali dell'Isonzo, dal vento (Bora e Scirocco) e dalla marea. Una minore influenza sulla circolazione ciclonica termalina è dovuta al fiume Po, in estate ed autunno.

Comunque le velocità in gioco sono estremamente contenute e si può affermare che sono di scarso interesse sia in relazione agli aspetti navigazionali che rispetto ai possibili fenomeni di interrimento del canale di accesso al porto.



### 3 ESPOSIZIONE DEL PARAGGIO AL MOTO ONDOSO

Il porto di Monfalcone (vedi Figura 1 pannelli a, b, c e d) è localizzato nella porzione più settentrionale del Mare Adriatico, a Nord del Golfo di Trieste e a Nord della foce del Fiume Isonzo la cui cuspidè fociale forma la "flesh" sabbiosa di Punta Sdobba (vedi Figura 1 pannello c). Come mostrato nella Figura 1 pannello d, l'accesso al porto è garantito da un canale dragato orientato lungo la direzione Nord Ovest – Sud Est.

I fondali ricadenti nel Golfo di Trieste sono modesti, mediamente inferiori a circa 25 m.

Come si evince dalla Figura 1, la costa dell'Istria e quella veneta proteggono completamente l'imboccatura portuale dal moto ondoso generato in mare aperto.

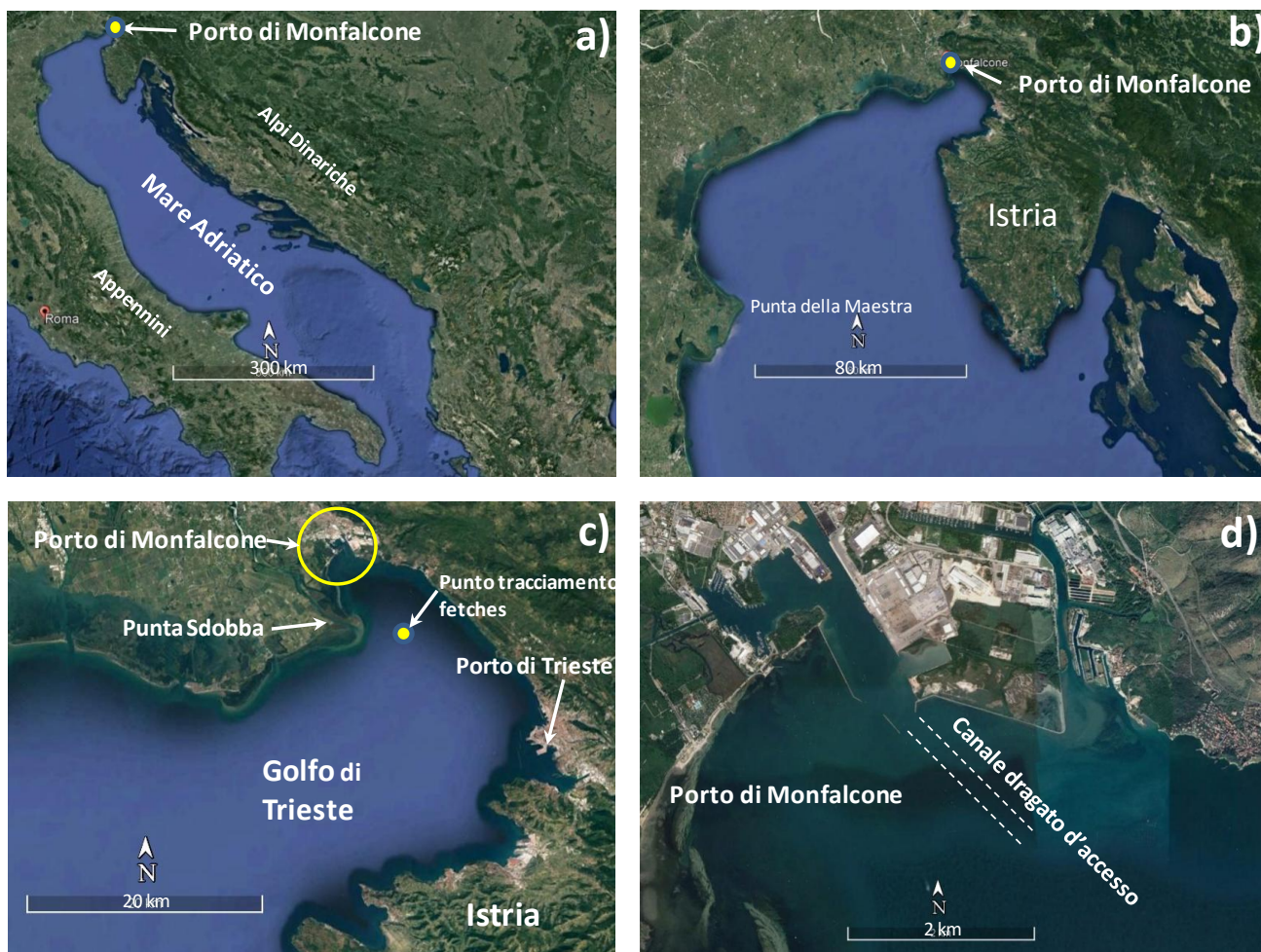


Figura 1 Inquadramento geografico del Porto di Monfalcone.

Con riferimento alla Figura 1 pannello c, ponendosi nel punto di tracciamento dei "fetches", che è stato posto poco al largo del porto di Monfalcone (circa a 3,4 km ad Est di Punta Sdobba), il paraggio risulta esposto al mare aperto per un settore di traversia molto ristretto delimitato dalla stessa Punta

Sdobba e dall'Istria, mentre per un ampio settore risulta esposto al moto ondoso generato localmente nel Golfo di Trieste.

La traversia geografica rappresentata in Figura 2, che è stata tracciata rispetto al "punto tracciamento fetches" riportato nella Figura 1 pannello c, è indicativa dell'estensione (lunghezza) della superficie marina sulla quale può potenzialmente avvenire la generazione del moto ondoso ("fetch"). Come già accennato, essa risulta limitata:

- per un ampio settore angolare sia dalla costa del Golfo di Trieste sia da quella dell'Istria;
- per un ristretto settore angolare orientato verso Sud-Sud-Ovest dalla costa adriatica compresa tra il delta del Po e la costa romagnola.

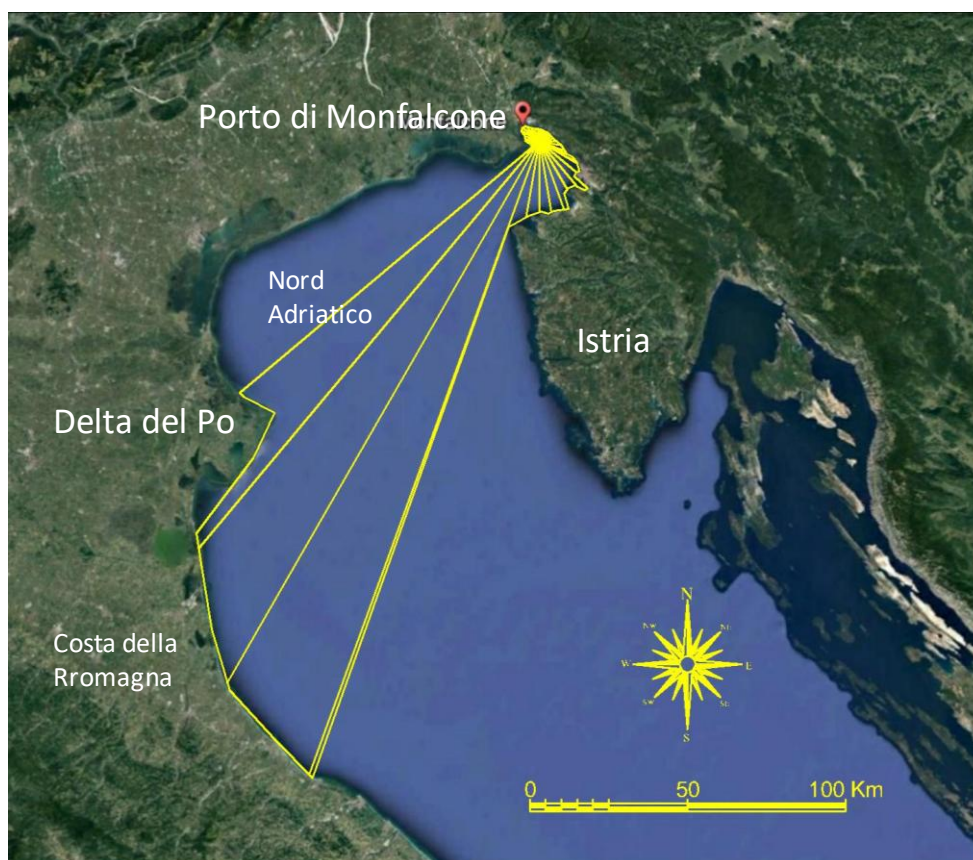


Figura 2 - Fetch geografici al largo di Monfalcone

Per un'analisi del settore di traversia più propriamente mirata alla valutazione delle possibili condizioni di esposizione agli stati di mare, è ormai prassi consolidata, specialmente per bacini chiusi o semi-chiusi come quello in esame, fare riferimento, in luogo dei settori di traversia geografica, al "fetch efficace".

Il *fetch efficace*, a differenza di quello geografico, tiene conto del fatto che durante il processo di trasferimento di energia dal vento alle onde e quindi durante la generazione del moto ondoso, gli stati di mare generati presentano energia dispersa in direzione. La dispersione direzionale dell'energia avviene in un settore angolare di ampiezza pari a  $\pm\theta$  rispetto alla direzione  $\phi_w$  lungo la quale agisce il vento. Tale fenomeno modifica l'estensione del fetch geografico e in generale lo riduce in assenza di coste.

In condizioni di mare aperto dove non sono presenti coste in grado di influire sul processo di generazione delle onde, la direzione media delle onde generate coincide con quella di azione del vento.

In presenza di bacini chiusi o semichiusi, le coste non solo modificano le lunghezze delle aree di generazione relative alle direzioni poste a cavallo della direzione di azione del vento  $\phi_w$  determinando una ulteriore modifica della lunghezza del fetch, ma causano anche la rotazione tra la direzione di azione del vento e la direzione media di propagazione delle onde generate. Questo secondo effetto tende progressivamente ad aumentare al diminuire dell'angolo formato tra la direzione di azione del vento e la linea di costa, determinando valori massimi di deviazione tra la direzione del vento e quella delle onde quando il vento spira parallelamente alla costa.

Pertanto il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione sulla quale può spirare il vento,  $\phi_w$ , risulta funzione anche dei valori dei fetch geografici associati alle direzioni contigue rispetto a quella di riferimento ( $\phi_w$ ) poste nel settore direzionale  $\pm\theta$  rispetto a  $\phi_w$ .

Il calcolo dei fetch efficaci può essere eseguito in base alla seguente relazione:

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

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

$F_{e,w}$ : lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione  $\phi_w$ ;

$F_i$ : lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima  $\phi_i$ ;

$\phi_w$ : direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;

$\phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \phi_w + \theta$ : direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di  $2\theta$  considerato nell'intorno della direzione  $\phi_w$ ;

$\theta$ : ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso (il metodo di Saville prevede un valore di  $\theta = \pm 45^\circ$  mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di  $\theta = \pm 90^\circ$ );

$n$ : termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume  $n = 4$ ).

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

Per il calcolo dei fetch efficaci è stato utilizzato il modello matematico ENIF (software per ambiente Windows per il calcolo dei fetch efficaci sviluppato dalla società MODIMAR s.r.l.) che, a partire dal tracciamento del fetch geografico, consente di ottenere il valore del fetch efficace associato ad ogni direzione e di definire la legge di deviazione tra la direzione del vento e quella del moto ondoso.

I risultati dell'elaborazione eseguita per i fetch efficaci sono riportati graficamente nel diagramma polare di Figura 3 e numericamente nella Tabella 1.

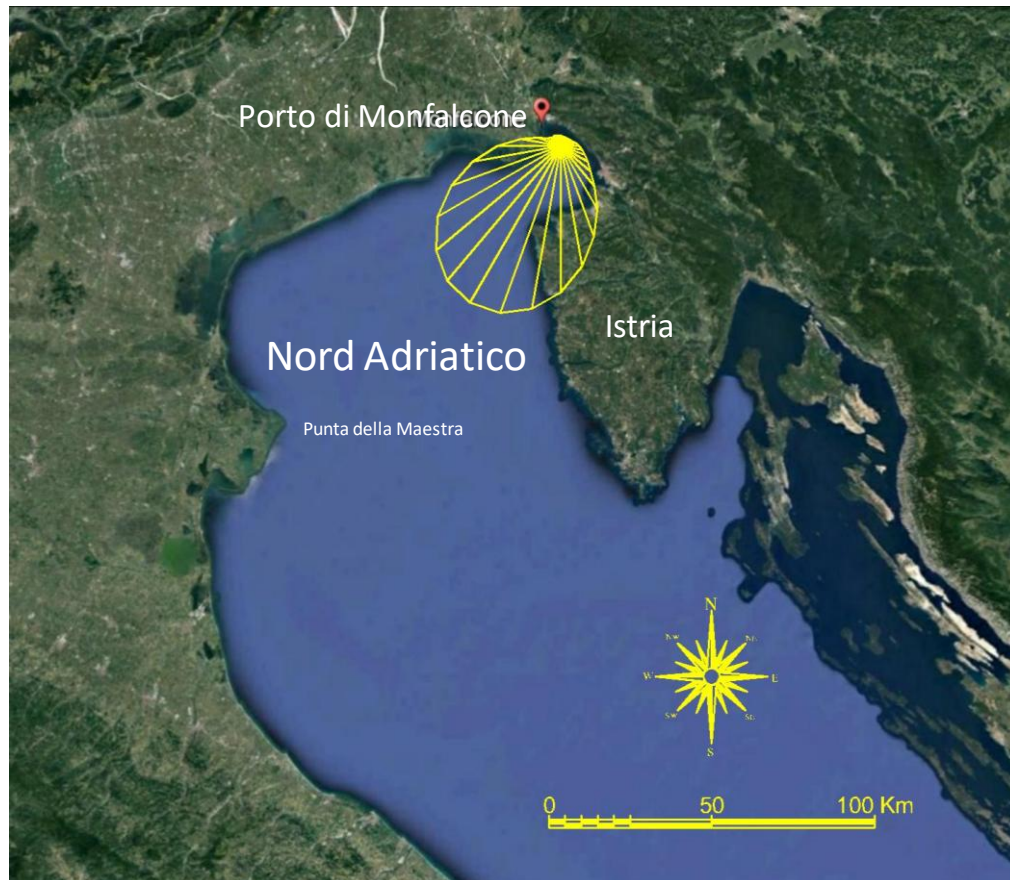


Figura 3 - Fetch efficaci al largo di Monfalcone

Direzione provenienza (°Nord)	Fetch geografico (Km)	Fetch efficace (Km)	Deviazione vento-mare (°)	Direzione provenienza (°Nord)	Fetch geografico (Km)	Fetch efficace (Km)	Deviazione vento-mare (°)
0	3.8	3.2	10	180	23.3	44.9	-15
10	3.8	3.0	9	190	22.4	50.8	-10
20	3.8	3.0	6	200	28.7	54.5	-5
30	3.8	2.9	-6	210	213.0	55.7	0
40	3.8	3.0	-26	220	197.6	54.1	6
50	3.7	3.2	-31	230	120.1	49.9	11
60	3.8	3.5	-33	240	3.4	43.5	16
70	3.8	4.0	-33	250	2.9	35.8	21
80	3.8	4.7	-31	260	2.9	27.4	26
90	4.6	5.6	-49	270	3.4	19.4	31
100	4.6	6.7	-49	280	4.2	12.5	35
110	7.1	7.9	-46	290	4.6	7.6	40
120	13.6	9.5	-42	300	4.9	4.9	45
130	13.6	12.0	-38	310	6.5	3.9	49
140	15.3	16.2	-34	320	6.6	3.7	53
150	18.9	22.3	-29	330	6.1	3.6	57
160	23.3	29.7	-25	340	4.8	3.5	60
170	23.3	37.6	-20	350	4.2	3.3	9

Tabella 1 - Fetch geografici, efficaci e deviazione direzione vento/mare al largo di Monfalcone

L'analisi della Figura 3 e della Tabella 1 mostra che i valori che si ottengono per i fetch efficaci per un punto posto a largo di Monfalcone risultano estremamente limitati per tutte le direzioni di possibile azione del vento.

In particolare il valore massimo del fetch efficace risulta pari a soli 55,7 km e corrisponde alla direzione 210°N. A tale direzione, insieme a quelle ad essa prossime, risulta associato anche il valore massimo del fetch geografico pari a 213 km.

Nella Tabella 1 e nella Figura 4 sono riportati gli angoli di deviazione tra la direzione media del moto ondoso e la direzione di azione del vento. I massimi valori della deviazione tra la direzione del vento e quella del moto ondoso si verificano quando il vento agisce con direzione parallela alla costa, ovvero per le direzioni poste nell'intorno del settore 70° N - 140° N e quelle opposte comprese nell'intorno del settore 250°N - 340° N. Si osserva inoltre, come era lecito aspettarsi, che la deviazione tra la direzione di provenienza del vento e la direzione di provenienza delle onde risulta nulla o molto piccola per le direzioni poste a cavallo della direzione 210° N in corrispondenza della quale si verificano i massimi fetch.

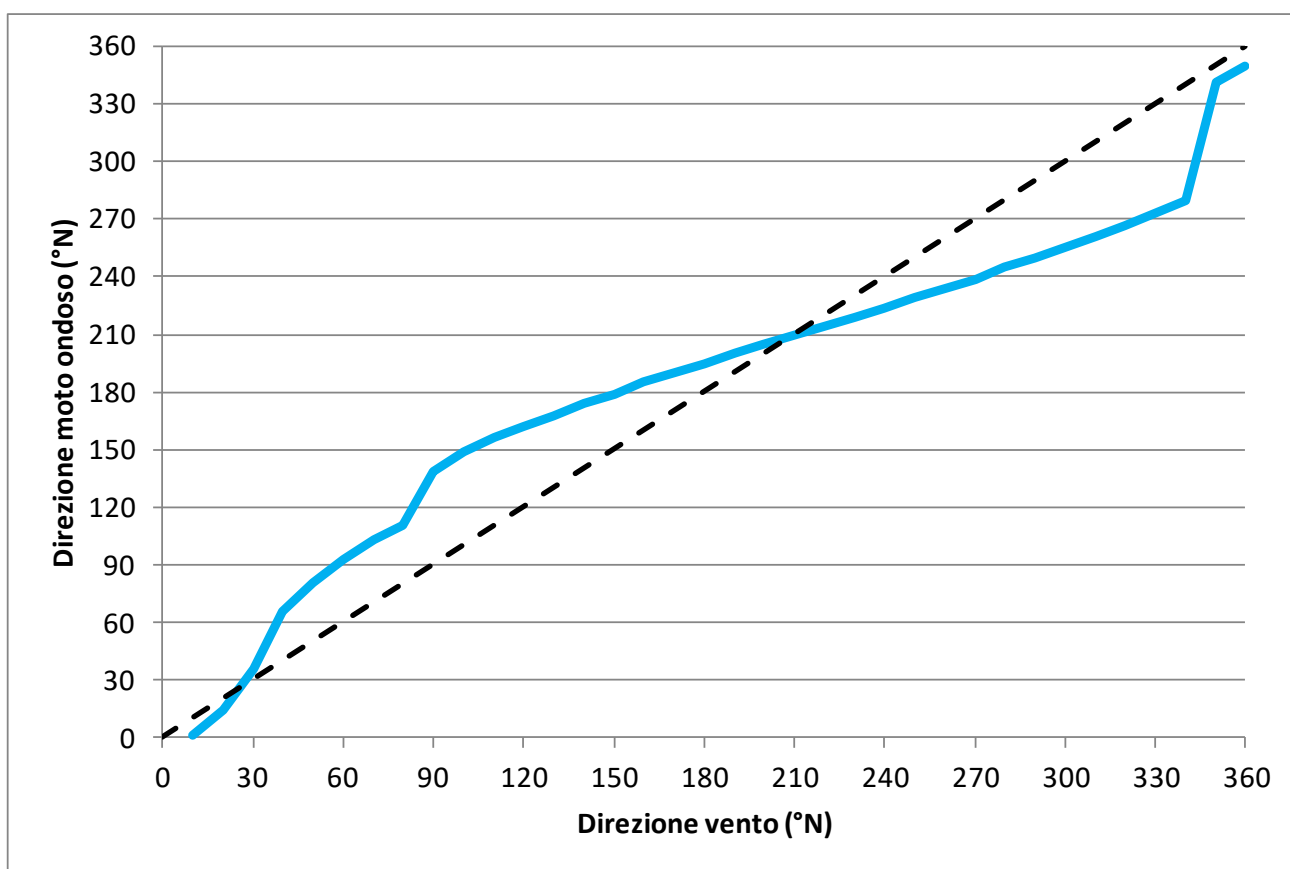


Figura 4 - Legge di deviazione vento-mare

## 4 IMPOSTAZIONE METODOLOGICA PER LA DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO ONDOSI

L'analisi descritta nel paragrafo precedente sulla esposizione del Porto di Monfalcone al moto ondoso, ha evidenziato i seguenti aspetti:

1. le opere foranee del Porto di Monfalcone sono completamente schermate ad opera della costa dal moto ondoso generato nel Nord Adriatico per cui le onde che raggiungono il porto sono in prevalenza generate localmente nel Golfo di Trieste in un settore direzionale che in via cautelativa può essere assunto compreso tra circa  $45^{\circ}\text{N}$  e  $200^{\circ}\text{N}$ ;
2. spostandosi verso il largo rispetto al porto in modo tale da superare lo schermo operato da Punta Sdobba, il settore di traversia si apre al moto ondoso generato in Nord Adriatico per un settore direzionale estremamente limitato che può essere posto sempre in via cautelativa compreso tra le direzioni  $200^{\circ}\text{N}$  e  $230^{\circ}\text{N}$ . Tuttavia rispetto a questo settore direzionale le lunghezze dei fetch risultano estremamente limitate nell'ordine di soli 50 km e quindi di gran lunga inferiori ai relativi fetch geografici nell'ordine di circa 200 km.

Una ulteriore considerazione riguarda il fatto che le misure dirette di moto ondoso disponibili per l'area in esame, descritte nel seguito, sono scarsamente rappresentative dal punto di vista statistico e che i dati di moto ondoso ricostruiti in re-analisi su grande scala dai centri meteorologici non possono essere utilizzati in questa area dove le onde risentono fortemente della presenza delle coste.

Sostanzialmente per le onde che raggiungono il Porto di Monfalcone i processi di generazione e di propagazione avvengono contemporaneamente e pertanto non può essere utilizzato l'approccio consueto che separa la fase di generazione delle onde da quella relativa alla loro propagazione in costa.

In conclusione si ritiene che in questa situazione il migliore approccio per definire a fini progettuali le condizioni di esposizione ondometrica del Porto di Monfalcone sia quello di ricostruire in modo opportuno e su base locale le condizioni di moto ondoso a partire dai dati di vento.

Gli aspetti sopra evidenziati ai punti 1 e 2, consentono di definire i due settori di ricostruzione del moto ondoso riportati in Figura 5, e in particolare:

- il settore A compreso tra  $45$  e  $200^{\circ}\text{N}$  al quale è associato il moto ondoso che viene generato all'interno del golfo di Trieste. Tenendo conto della deviazione tra la direzione delle onde e quella del vento, il vento che genera le onde che rientrano in questo settore risulta compreso tra le direzioni  $30$  e  $190^{\circ}\text{N}$ ;
- il settore B compreso tra  $200$  e  $230^{\circ}\text{N}$  al quale è associato il moto ondoso che viene generato nell'alto Adriatico. Tenendo conto anche in questo caso della deviazione tra la direzione delle onde e quella del vento, il vento che genera le onde che rientrano in questo settore risulta compreso tra le direzioni  $190$  e  $250^{\circ}\text{N}$ .

Nella Figura 5 sono rappresentati i due settori A e B riferiti sia al moto ondoso sia ai settori direzionali del vento che possono generare le stesse onde.

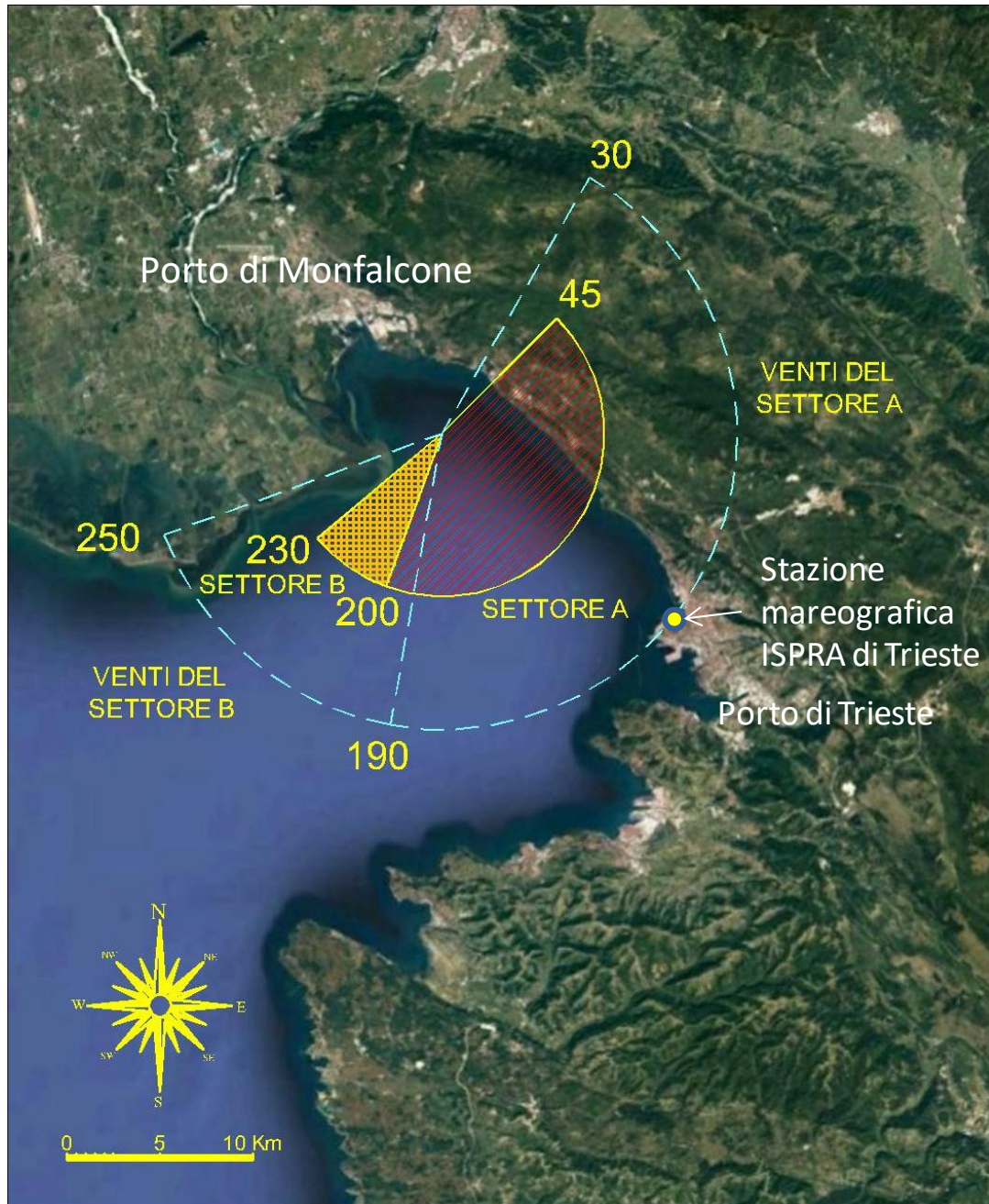


Figura 5 - Settori di traversia ondametria al largo del Porto di Monfalcone. Con linea tratteggiata bianca sono indicati i due settori di provenienza del vento. I settori interni campiti riportano i relativi settori di provenienza del moto ondoso.

Per la definizione dei dati anemometrici da utilizzare per la generazione delle onde è stata eseguita una ricerca specifica sulle migliori fonti di informazione di dati disponibili per il paraggio tenendo conto sia delle condizioni meteorologiche locali sia dell'esposizione geografica del paraggio. A conclusione di tale analisi si sono assunte come riferimento le seguenti fonti di dati.

Per quanto riguarda il vento che genera le onde che rientrano nel Settore A, ovvero quelle generate all'interno del Golfo di Trieste, la stazione anemometrica maggiormente rappresentativa per questo settore è costituita da quella localizzata nel Porto di Trieste in corrispondenza della stazione

Mareografica gestita dall'ISPRA. Tale stazione, la cui posizione è indicata in Figura 6, presenta i seguenti vantaggi:

- è posizionata a monte dell'area di generazione e quindi può essere utilizzata per definire le onde relative al Settore A;
- come mostrato nel seguito non risulta schermata dall'orografia locale rispetto ai venti provenienti dal settore orientale i quali sono i maggiori responsabili delle onde che raggiungono il Porto di Monfalcone.

Per quanto riguarda i venti che generano le onde nel Nord Adriatico di interesse per il Settore B, risulta necessario fare riferimento a dati ricostruiti in mare aperto e pertanto si è fatto riferimento ai dati di vento ricostruiti in re-analisi dalla NOAA (United States National Oceanic & Atmospheric Administration) per il punto indicato nella Figura 6 (punto NOAA). Il punto scelto offre il vantaggio di trovarsi in una posizione baricentrica del Nord Adriatico e ad una distanza sufficientemente elevata dalle coste da poter assumere che le condizioni di vento ricostruite non siano sostanzialmente influenzate dall'orografia locale.

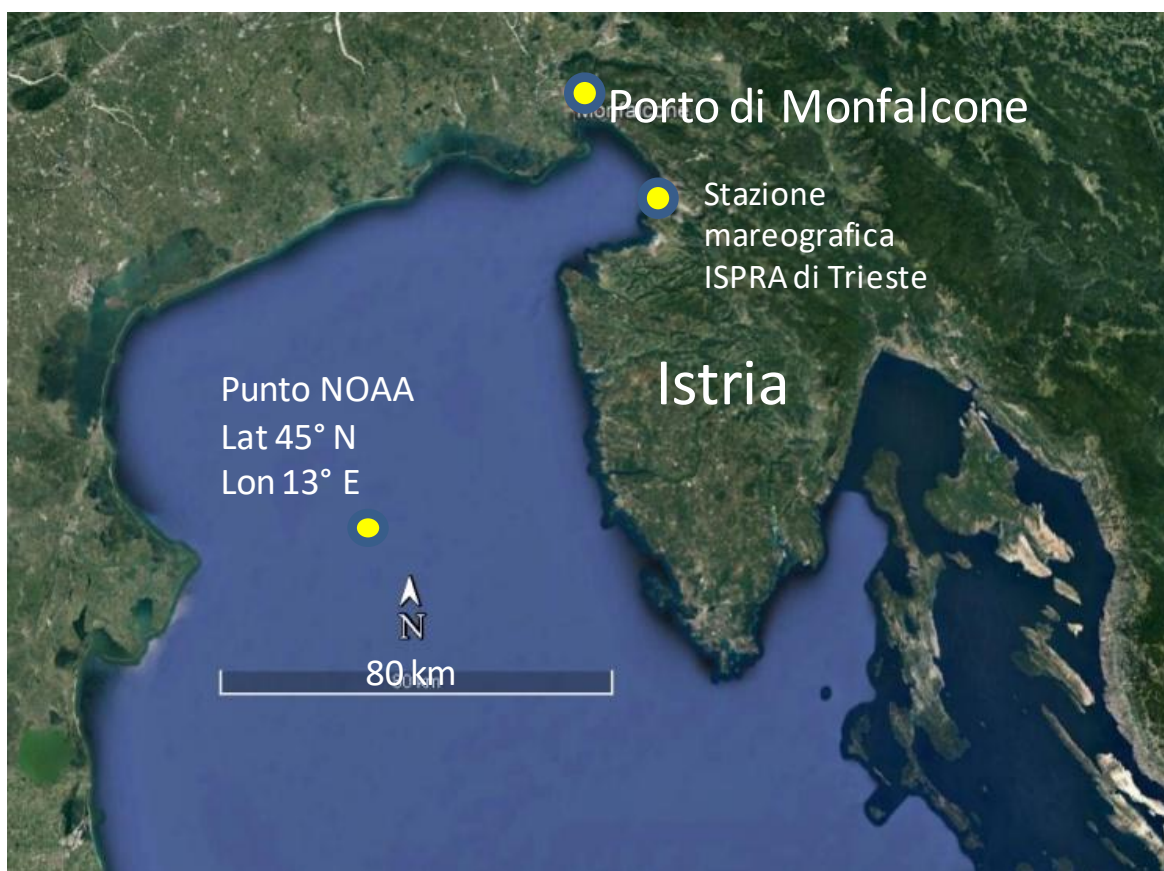


Figura 6 – Localizzazione delle stazioni di misura e di ricostruzione dei dati di vento utilizzati nel presente studio.

Nei prossimi paragrafi si espone il metodo seguito per ricostruire sia il regime ondometrico medio annuale, di interesse per gli aspetti connessi all'operatività del Porto di Monfalcone, sia le condizioni di moto ondoso estreme, di interesse per il dimensionamento strutturale delle opere.



## 4.1 RICOSTRUZIONE DEL CLIMA ONDAMETRICO

Il clima ondometrico nei pressi dell'imboccatura portuale del Porto di Monfalcone è dovuto essenzialmente alle onde generate nel Golfo di Trieste.

La ricostruzione del clima ondometrico medio annuale è stata effettuata per un punto localizzato nei pressi dell'imboccatura del canale dragato che consente l'accesso al porto. Con riferimento a tale punto è stato applicato il modello ALTAIR sviluppato dalla MODIMAR s.r.l. Il modello, descritto in appendice, si basa sul famoso metodo SMB e richiede la conoscenza del campo di vento che agisce sull'area di generazione.

Per la ricostruzione del clima sono stati utilizzati i dati di vento registrati dalla Stazione Mareografica di Trieste facente parte della Rete Mareografica Italiana (RMN) gestita dall'ISPRA. La serie storica oraria dei dati di vento disponibili, che copre l'arco di tempo compreso tra l'1/1/2010 e il 28/02/2019 e che è descritta e analizzata in dettaglio nel seguito, è stata utilizzata come dato di ingresso per il modello di ricostruzione (hindcast) ALTAIR il quale, come detto, è basato sul metodo S.M.B.

Sostanzialmente il modello applica sulla superficie del mare le equazioni di bilancio energetico tra il vento e il moto ondoso al fine di determinare le caratteristiche del moto ondoso generate dal vento. Le condizioni di moto ondoso vengono espresse in termini di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ), periodo di picco spettrale ( $T_p$ ) e direzione media dello stato di mare, sulla base delle condizioni anemometriche che agiscono sul fetch introducendo le seguenti assunzioni:

- la velocità del vento (espressa alla quota convenzionale + 10 m sul l.m.m.) e la sua direzione si ipotizzano costanti sul fetch;
- la durata di azione del vento si assume coincidente con l'intervallo temporale della serie storica di vento utilizzata;
- la lunghezza del fetch è assunta pari a quella del fetch efficace relativo alla direzione di azione del vento.

## 4.2 RICOSTRUZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI DI MOTO ONDOSO

La ricostruzione degli eventi estremi di moto ondoso è stata eseguita in relazione ai due settori direzionali A e B individuati in precedenza i quali tengono conto sia delle onde direttamente generate nel Golfo di Trieste (settore A) sia delle onde generate in Nord Adriatico (Settore B) che si propagano nel Golfo di Trieste.

Si descrive di seguito l'approccio seguito per ciascuno dei due settori.

- **SETTORE A (moto ondoso generato nel golfo di Trieste).**

La ricostruzione delle onde estreme è stata eseguita mediante l'applicazione del codice SWAN in condizioni stazionarie, coprendo con la griglia di calcolo l'intera area di generazione compresa tra Monfalcone, Trieste e la costa dell'Istria. Le condizioni di vento imposte al codice di calcolo sono state desunte dalle misure anemometriche della stazione ISPRA di Trieste le quali sono state preventivamente analizzate al fine di trovare la correlazione statistica tra le velocità del vento estreme

al culmine di ciascun evento meteorologico osservato e il corrispondente tempo di ritorno. La correlazione statistica velocità del vento – tempo di ritorno è stata eseguita per i 4 settori di possibile provenienza del vento incentrati sulle direzioni 45°N, 90°N, 135°N e 180°N. Per ciascun settore sono state determinate le velocità del vento relative ai tempi di ritorno di 1 anno, 10 anni e 100 anni. In totale quindi sono state eseguite 12 simulazioni con il modello SWAN.

- **SETTORE B (moto ondoso generato all'esterno del Golfo di Trieste).**

La ricostruzione delle onde estreme è stata eseguita mediante l'applicazione del codice SWAN in condizioni stazionarie coprendo con la griglia di calcolo l'intero Golfo di Trieste. Il confine SW "aperto" della griglia di calcolo, è stato posto in corrispondenza della retta congiungente Punta Salvore (Salvudrija) in Croazia con Grado.

Per ogni stato di mare simulato, caratterizzato da uno specifico tempo di ritorno (1, 10 e 100 anni) si sono imposte due condizioni al contorno al modello SWAN:

- moto ondoso in ingresso lungo il confine SW della griglia di calcolo;
- velocità del vento uniforme sull'intera griglia di calcolo.

Per definire le condizioni di moto ondoso e di vento da utilizzare per ogni stato di mare simulato si è seguita la seguente procedura.

Il moto ondoso in ingresso lungo il confine Sud-Ovest della griglia SWAN è stato definito applicando per il punto posto in posizione centrale del confine Sud-Ovest il codice ALTAIR, utilizzando come dati in ingresso la serie storica di vento della NOAA relativa al punto indicato in Figura 6 che copre un arco di tempo di 30 anni. In questo modo si è ricostruita la serie storica di moto ondoso la quale è stata poi analizzata statisticamente per definire la correlazione Hs-tempo di ritorno.

Per quanto riguarda la velocità del vento è stata eseguita sulla stessa serie storica di vento della NOAA la statistica dei valori estremi trovando in questo caso la correlazione velocità del vento – tempo di ritorno.

Quindi l'applicazione del codice SWAN è stata eseguita imponendo lungo il confine Sud-Ovest il moto ondoso in ingresso caratterizzato dai tempi di ritorno 1, 10 e 100 anni. A tali condizioni si è attribuita la direzione mediana del settore B, ovvero la direzione di provenienza 215°N.

A ciascuna condizione di moto ondoso si è associata la velocità del vento caratterizzata dallo stesso tempo di ritorno. Per quanto riguarda la direzione di azione del vento, assunto di intensità e direzione costante sull'intera area di generazione, si è tenuto conto della deviazione tra le direzioni del vento e del moto ondoso analizzate in precedenza.

In conclusione le analisi eseguite per ciascuno dei due settori hanno consentito di definire le onde estreme in corrispondenza di 3 punti ubicati al largo del porto di Monfalcone e in prossimità dell'imboccatura del canale di accesso al Porto di progetto.

## 5 DATI ANEMOMETRICI

I dati anemometrici utilizzati per il presente studio sono i seguenti:

- serie storica oraria registrata dall'1/1/2010 al 28/02/2019 in corrispondenza della stazione mareografica dell'ISPRA localizzata nel porto di Trieste (coordinate: Lat: 45° 38' 57.81 N; Lon: 13° 45' 28.58 E) appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (RMN);
- serie storica trioraria della NOAA ricostruita in reanalisi dall' 1/1/1979 al 31/12/2009 (in corrispondenza del punto di coordinate: Lat: 45° 00'.00 N; Lon: 13° 00',00 E) posto nel Nord Adriatico tra la Foce del Po e l'Istria.

La posizione dei punti di misura/ricostruzione dei dati di vento è indicata in Figura 6.

### 5.1 REGIME DEI VENTI IN CORRISPONDENZA DELLA STAZIONE MAREOGRAFICA DI TRIESTE

La stazione mareografica di Trieste, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (RMN), è ubicata nel porto commerciale. La stazione mareografica è dotata di un anemometro che misura la velocità del vento alla quota + 10 m dal suolo. Le registrazioni sono relative ad una media su 10 minuti delle misure effettuate con frequenza di acquisizione di 30 Hz.

La serie storica dei dati anemometrici, che ha una durata di circa 9 anni, è stata analizzata al fine di definire il clima anemometrico, ovvero la frequenza di accadimento campionaria degli stati di vento suddivisi per classi di direzione di provenienza e intensità come riportato in forma grafica nella Figura 7 e in forma numerica nella Tabella 2.

Il clima medio stagionale è invece rappresentato in forma grafica dalle rose anemometriche di Figura 8 e in forma numerica dalla Tabella 3 (inverno), dalla Tabella 4 (primavera), Tabella 5 (estate) e dalla Tabella 6 (autunno).

Il clima medio annuale presenta una prevalenza dei venti provenienti dal settore di levante e di scirocco i quali determinano il moto ondoso generato localmente nel Golfo di Trieste che risulta di interesse per il Porto di Monfalcone. La frequenza media annuale per questi venti risulta superiore a circa il 50 % del tempo.

Le massime intensità del vento, uguali o superiori a circa 28 nodi (14 m/s – 52 km/h) si verificano per il settore di provenienza compreso tra 50° N e 90° N. La velocità massima del vento registrata risulta superiore a 56 nodi (26 m/s – 104 km/h) ed è relativa alla direzione 50° N.

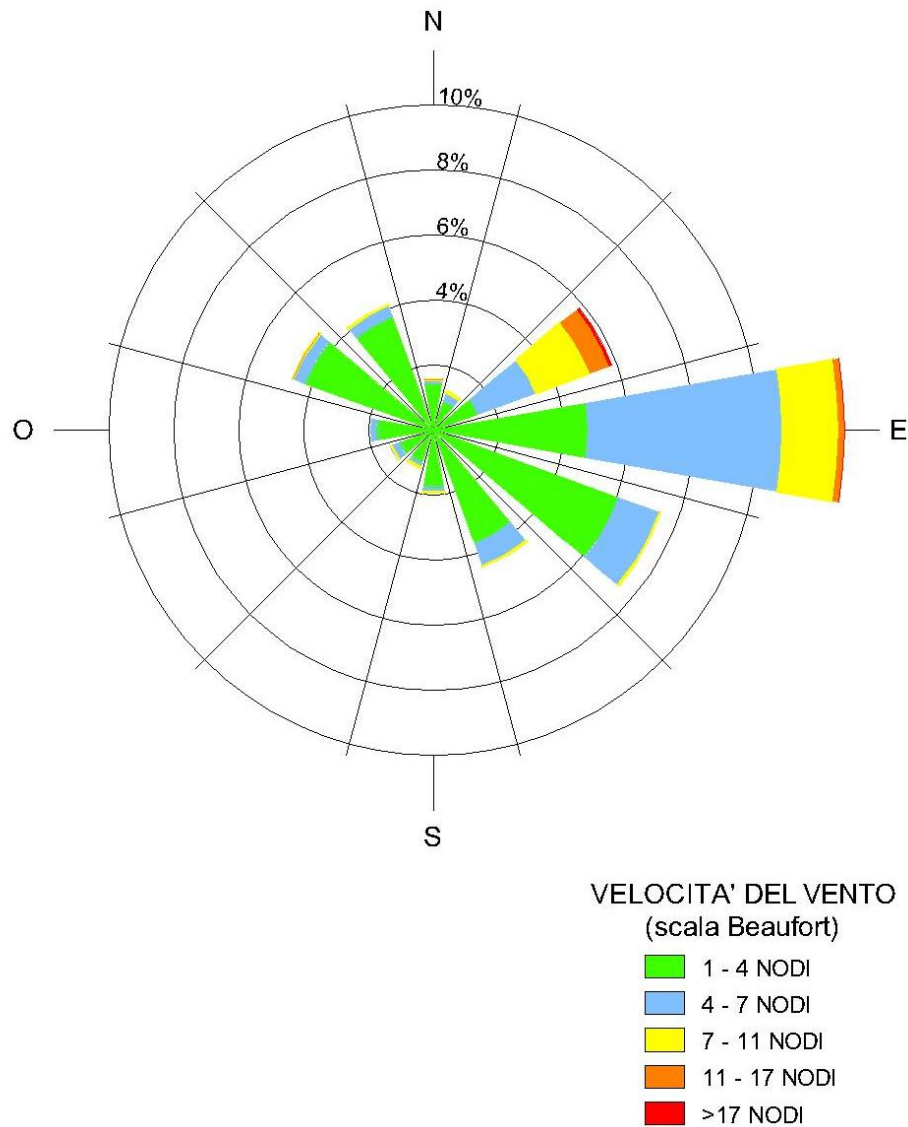


Figura 7 - Stazione RMN di Trieste. Clima anemometrico medio annuale espresso in forma grafica (diagramma polare).

dir. (°N)	Velocità del vento (nodi)													TOT.
	0	1	4	7	11	17	22	28	34	41	48	56	>63	
10		0.506	0.138	0.044	0.020	//	//	//	//	//	//	//	//	0.7
20		0.462	0.093	0.062	0.027	0.002	0.002	//	//	//	//	//	//	0.6
30		0.560	0.113	0.093	0.067	0.016	0.009	//	//	//	//	//	//	0.9
40		0.471	0.147	0.160	0.113	0.042	0.011	//	//	//	//	//	//	0.9
50		0.542	0.204	0.247	0.240	0.076	0.047	0.013	0.009	//	//	0.002	//	1.4
60		0.629	0.209	0.418	0.553	0.360	0.418	0.229	0.138	0.022	0.013	//	//	3.0
70		0.889	0.360	0.720	1.564	1.268	1.224	0.611	0.258	0.089	0.022	//	//	7.0
80		1.537	0.542	1.188	2.808	1.637	0.824	0.275	0.058	0.007	//	//	//	8.9
90		2.153	1.051	1.846	2.444	0.582	0.158	0.031	0.004	//	//	//	//	8.3
100		2.484	1.506	1.864	1.499	0.175	0.009	//	//	//	//	//	//	7.5
110		2.581	1.453	1.053	0.271	0.002	//	//	//	//	//	//	//	5.4
120		2.337	1.764	0.604	0.049	//	//	//	//	//	//	//	//	4.8
130		1.839	1.855	0.626	0.042	//	//	//	//	//	//	//	//	4.4
140		1.586	1.524	0.551	0.149	0.013	//	//	//	//	//	//	//	3.8
150		1.366	0.884	0.433	0.111	//	//	//	//	//	//	//	//	2.8
160		1.268	0.573	0.195	0.033	//	//	//	//	//	//	//	//	2.1
170		1.162	0.400	0.142	0.018	//	//	//	//	//	//	//	//	1.7
180		0.873	0.213	0.076	0.013	0.004	//	//	//	//	//	//	//	1.2
190		0.642	0.156	0.076	0.009	//	//	//	//	//	//	//	//	0.9
200		0.593	0.118	0.056	0.016	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
210		0.491	0.184	0.100	0.024	0.004	//	//	//	//	//	//	//	0.8
220		0.473	0.191	0.100	0.033	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
230		0.535	0.164	0.100	0.024	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
240		0.471	0.247	0.218	0.033	0.002	//	//	//	//	//	//	//	1.0
250		0.435	0.313	0.187	0.022	//	//	//	//	//	//	//	//	1.0
260		0.486	0.238	0.076	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
270		0.593	0.387	0.102	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	1.1
280		1.026	0.651	0.195	0.011	//	//	//	//	//	//	//	//	1.9
290		1.286	0.824	0.235	0.004	//	0.004	//	//	//	//	//	//	2.4
300		1.870	1.031	0.273	0.047	0.002	//	0.002	//	//	//	//	//	3.2
310		2.097	1.062	0.195	0.038	0.002	0.002	//	//	//	//	//	//	3.4
320		2.041	0.951	0.255	0.024	0.004	0.002	//	//	//	//	//	//	3.3
330		1.648	0.809	0.233	0.038	0.002	0.002	//	//	//	//	//	//	2.7
340		1.273	0.486	0.195	0.033	0.002	//	//	//	//	//	//	//	2.0
350		1.004	0.313	0.098	0.024	0.002	//	0.002	//	//	//	//	//	1.4
360		0.735	0.144	0.038	0.024	0.002	//	//	//	//	//	//	//	0.9
Calme		5.569												5.6
TOT.		5.569	40.948	21.297	13.055	10.430	4.203	2.712	1.164	0.467	0.118	0.036	0.002	100.0
TOT. CUM.		5.569	46.517	67.814	80.869	91.299	95.502	98.214	99.378	99.844	99.962	99.998	100.00	100.00

Tabella 2 – Stazione RMN di Trieste. Clima anemometrico medio annuale espresso in forma numerica. Distribuzione percentuale media annuale per classi di velocità e direzione di provenienza dei venti.

Le rose anemometriche stagionali risultano simili a quella annuale anche se ad esempio i venti di scirocco raggiungono la loro frequenza massima in autunno. I venti da maestrale invece raggiungono la frequenza massima in primavera e estate.

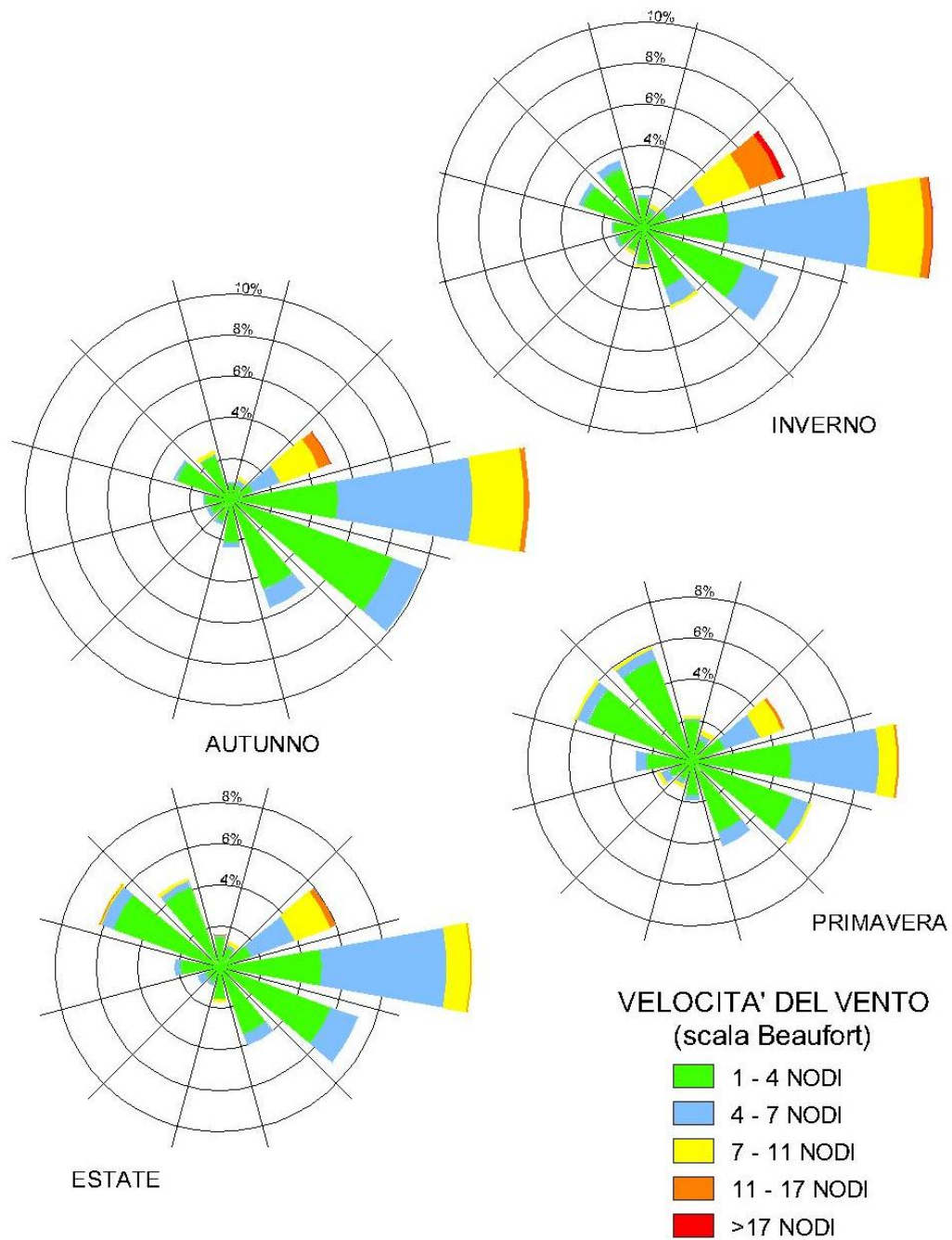


Figura 8 - Stazione RMN di Trieste. Clima anemometrico medio stagionale espresso in forma grafica (diagramma polare).

dir. (°N)	Velocità del vento (nodi)													TOT.
	0	1	4	7	11	17	22	28	34	41	48	56	>63	
10	1	0.493	0.141	0.039	0.031	//	//	//	//	//	//	//	//	0.7
20	4	0.446	0.063	0.063	0.031	//	//	//	//	//	//	//	//	0.6
30	7	0.477	0.117	0.070	0.102	0.016	0.008	//	//	//	//	//	//	0.8
40	11	0.454	0.102	0.117	0.094	0.023	0.008	//	//	//	//	//	//	0.8
50	17	0.501	0.203	0.188	0.250	0.086	0.063	0.016	//	//	//	0.008	//	1.3
60	22	0.516	0.203	0.360	0.595	0.430	0.462	0.485	0.329	0.070	0.047	//	//	3.5
70	28	0.767	0.305	0.728	1.760	1.573	1.635	1.369	0.767	0.297	0.078	//	//	9.3
80	34	1.291	0.516	1.205	2.957	1.995	1.494	0.571	0.133	0.023	//	//	//	10.2
90	41	1.917	0.900	1.979	2.652	0.829	0.250	0.039	0.008	//	//	//	//	8.6
100	48	2.097	1.314	2.222	2.363	0.313	0.031	//	//	//	//	//	//	8.3
110	56	2.253	1.314	1.220	0.430	//	//	//	//	//	//	//	//	5.2
120	63	2.206	1.424	0.712	0.063	//	//	//	//	//	//	//	//	4.4
130	>63	1.526	1.471	0.775	0.055	//	//	//	//	//	//	//	//	3.8
140	TOT.	1.174	1.197	0.626	0.164	0.047	//	//	//	//	//	//	//	3.2
150		1.408	0.649	0.587	0.164	//	//	//	//	//	//	//	//	2.8
160		1.103	0.485	0.235	0.039	//	//	//	//	//	//	//	//	1.9
170		1.236	0.243	0.172	0.016	//	//	//	//	//	//	//	//	1.7
180		0.986	0.156	0.078	0.039	0.008	//	//	//	//	//	//	//	1.3
190		0.602	0.133	0.070	0.008	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
200		0.618	0.117	0.008	0.016	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
210		0.540	0.188	0.078	0.008	0.008	//	//	//	//	//	//	//	0.8
220		0.759	0.172	0.078	0.031	//	//	//	//	//	//	//	//	1.0
230		0.759	0.180	0.039	0.016	//	//	//	//	//	//	//	//	1.0
240		0.649	0.227	0.110	0.016	//	//	//	//	//	//	//	//	1.0
250		0.571	0.188	0.078	0.008	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
260		0.688	0.110	0.023	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
270		0.626	0.156	0.031	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
280		1.048	0.227	0.047	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.3
290		1.236	0.274	0.102	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.6
300		1.831	0.524	0.156	0.008	//	//	//	//	//	//	//	//	2.5
310		1.729	0.462	0.094	0.023	//	//	//	//	//	//	//	//	2.3
320		1.776	0.555	0.203	0.031	//	//	//	//	//	//	//	//	2.6
330		1.400	0.610	0.227	0.016	//	//	//	//	//	//	//	//	2.3
340		1.197	0.376	0.258	0.039	//	//	//	//	//	//	//	//	1.9
350		1.056	0.313	0.110	0.023	//	//	//	//	//	//	//	//	1.5
360		0.696	0.133	0.023	0.008	//	//	//	//	//	//	//	//	0.9
Calme		6.932												6.9
TOT.		6.932	38.632	15.749	13.112	12.056	5.328	3.951	2.480	1.236	0.391	0.125	0.008	100.0
TOT. CUM.		6.932	45.564	61.313	74.425	86.481	91.809	95.760	98.240	99.476	99.867	99.992	100.00	100.00

Tabella 3 – Stazione RMN di Trieste. Clima anemometrico medio stagionale (INVERNO) espresso in forma numerica. Distribuzione percentuale media annuale per classi di velocità e direzione di provenienza dei venti.

dir. (°N)	Velocità del vento (nodi)													TOT.
	0 1	1 4	4 7	7 11	11 17	17 22	22 28	28 34	34 41	41 48	48 56	56 63	>63	
10		0.594	0.213	0.071	0.027	//	//	//	//	//	//	//	//	0.9
20		0.514	0.133	0.089	0.044	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
30		0.647	0.133	0.124	0.080	0.018	0.009	//	//	//	//	//	//	1.0
40		0.523	0.186	0.177	0.177	0.071	0.018	//	//	//	//	//	//	1.2
50		0.656	0.257	0.284	0.399	0.080	0.018	0.018	0.009	//	//	//	//	1.7
60		0.745	0.204	0.399	0.567	0.364	0.301	0.080	0.009	//	//	//	//	2.7
70		1.170	0.355	0.612	1.286	0.780	0.523	0.098	0.009	//	//	//	//	4.8
80		1.791	0.585	1.241	1.951	0.860	0.319	0.080	0.027	//	//	//	//	6.9
90		2.110	1.099	1.569	1.640	0.266	0.062	0.018	0.009	//	//	//	//	6.8
100		2.518	1.339	1.179	0.754	0.089	//	//	//	//	//	//	//	5.9
110		2.075	1.277	0.603	0.098	0.009	//	//	//	//	//	//	//	4.1
120		1.747	1.507	0.337	0.027	//	//	//	//	//	//	//	//	3.6
130		1.401	2.128	0.638	//	//	//	//	//	//	//	//	//	4.2
140		1.445	1.685	0.497	0.071	//	//	//	//	//	//	//	//	3.7
150		1.011	1.135	0.434	0.035	//	//	//	//	//	//	//	//	2.6
160		1.259	0.674	0.222	0.009	//	//	//	//	//	//	//	//	2.2
170		0.949	0.514	0.133	0.009	//	//	//	//	//	//	//	//	1.6
180		0.842	0.301	0.080	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.2
190		0.514	0.213	0.133	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.9
200		0.532	0.142	0.133	0.035	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
210		0.541	0.177	0.142	0.053	0.009	//	//	//	//	//	//	//	0.9
220		0.346	0.195	0.204	0.053	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
230		0.532	0.213	0.204	0.018	//	//	//	//	//	//	//	//	1.0
240		0.408	0.346	0.434	0.044	0.009	//	//	//	//	//	//	//	1.2
250		0.399	0.434	0.319	0.044	//	//	//	//	//	//	//	//	1.2
260		0.576	0.372	0.186	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.1
270		0.638	0.683	0.275	0.009	//	//	//	//	//	//	//	//	1.6
280		1.055	1.037	0.461	0.027	//	//	//	//	//	//	//	//	2.6
290		1.224	1.259	0.381	0.009	//	//	//	//	//	//	//	//	2.9
300		2.039	1.525	0.452	0.098	//	//	//	//	//	//	//	//	4.1
310		2.704	1.764	0.266	0.044	0.009	//	//	//	//	//	//	//	4.8
320		2.563	1.605	0.390	0.035	//	//	//	//	//	//	//	//	4.6
330		2.190	1.436	0.390	0.062	0.009	0.009	//	//	//	//	//	//	4.1
340		1.631	0.807	0.257	0.062	//	//	//	//	//	//	//	//	2.8
350		1.268	0.559	0.142	0.044	0.009	//	//	//	//	//	//	//	2.0
360		1.126	0.168	0.044	0.035	0.009	//	//	//	//	//	//	//	1.4
Calme	5.497													5.5
TOT.	5.497	42.286	26.663	13.504	7.847	2.589	1.259	0.293	0.062	0.000	0.000	0.000	0.000	100.0
TOT. CUM.	5.497	47.783	74.446	87.950	95.797	98.386	99.645	99.938	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	

Tabella 4 – Stazione RMN di Trieste. Clima anemometrico medio stagionale (PRIMAVERA) espresso in forma numerica. Distribuzione percentuale media annuale per classi di velocità e direzione di provenienza dei venti.



dir. (°N)	Velocità del vento (nodi)													TOT.
	0 1	1 4	4 7	7 11	11 17	17 22	22 28	28 34	34 41	41 48	48 56	56 63	>63	
10		0.614	0.149	0.047	0.009	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
20		0.568	0.093	0.056	0.009	//	0.009	//	//	//	//	//	//	0.7
30		0.605	0.112	0.084	0.028	0.009	0.009	//	//	//	//	//	//	0.8
40		0.521	0.158	0.140	0.056	0.047	//	//	//	//	//	//	//	0.9
50		0.558	0.261	0.288	0.177	0.056	0.019	//	//	//	//	//	//	1.4
60		0.717	0.233	0.661	0.530	0.251	0.447	0.130	//	//	//	//	//	3.0
70		0.875	0.596	1.070	1.824	1.489	1.163	0.298	0.028	//	//	//	//	7.3
80		1.694	0.661	1.452	2.782	1.266	0.363	0.056	//	//	//	//	//	8.3
90		2.364	1.219	2.150	2.271	0.344	0.065	0.009	//	//	//	//	//	8.4
100		2.150	1.647	2.038	1.266	0.112	//	//	//	//	//	//	//	7.2
110		2.364	1.470	1.228	0.261	//	//	//	//	//	//	//	//	5.3
120		2.131	1.889	0.679	0.028	//	//	//	//	//	//	//	//	4.7
130		1.740	1.666	0.475	0.028	//	//	//	//	//	//	//	//	3.9
140		1.535	1.619	0.437	0.065	//	//	//	//	//	//	//	//	3.7
150		1.135	0.856	0.288	0.028	//	//	//	//	//	//	//	//	2.3
160		1.191	0.493	0.158	0.037	//	//	//	//	//	//	//	//	1.9
170		0.968	0.456	0.074	0.019	//	//	//	//	//	//	//	//	1.5
180		0.698	0.186	0.047	//	0.009	//	//	//	//	//	//	//	0.9
190		0.614	0.140	0.074	0.009	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
200		0.549	0.084	0.047	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.7
210		0.307	0.186	0.074	0.028	//	//	//	//	//	//	//	//	0.6
220		0.242	0.195	0.056	0.028	//	//	//	//	//	//	//	//	0.5
230		0.242	0.130	0.065	0.056	//	//	//	//	//	//	//	//	0.5
240		0.233	0.177	0.261	0.047	//	//	//	//	//	//	//	//	0.7
250		0.288	0.493	0.261	0.019	//	//	//	//	//	//	//	//	1.1
260		0.223	0.409	0.084	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.7
270		0.521	0.586	0.102	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.2
280		0.949	1.107	0.242	0.009	//	//	//	//	//	//	//	//	2.3
290		1.517	1.470	0.447	0.009	//	0.019	//	//	//	//	//	//	3.5
300		2.010	1.647	0.419	0.065	0.009	//	0.009	//	//	//	//	//	4.2
310		2.624	1.517	0.335	0.047	//	0.009	//	//	//	//	//	//	4.5
320		2.382	1.173	0.298	0.009	0.009	0.009	//	//	//	//	//	//	3.9
330		1.796	0.847	0.214	0.047	//	//	//	//	//	//	//	//	2.9
340		1.377	0.596	0.177	0.009	0.009	//	//	//	//	//	//	//	2.2
350		1.033	0.261	0.084	0.028	//	//	0.009	//	//	//	//	//	1.4
360		0.670	0.186	0.056	0.047	//	//	//	//	//	//	//	//	1.0
Calme	4.225													4.2
TOT.	4.225	40.006	24.967	14.666	9.873	3.611	2.112	0.512	0.028	0.000	0.000	0.000	0.000	100.0
TOT. CUM.	4.225	44.230	69.198	83.864	93.737	97.348	99.460	99.972	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	

Tabella 5 – Stazione RMN di Trieste. Clima anemometrico medio stagionale (ESTATE) espresso in forma numerica. Distribuzione percentuale media annuale per classi di velocità e direzione di provenienza dei venti.

dir. (°N)	Velocità del vento (nodi)													TOT.
	0 1	1 4	4 7	7 11	11 17	17 22	22 28	28 34	34 41	41 48	48 56	56 63	>63	
10		0.313	0.039	0.020	0.010	//	//	//	//	//	//	//	//	0.4
20		0.313	0.088	0.039	0.020	0.010	//	//	//	//	//	//	//	0.5
30		0.519	0.088	0.098	0.049	0.020	0.010	//	//	//	//	//	//	0.8
40		0.382	0.147	0.215	0.127	0.029	0.020	//	//	//	//	//	//	0.9
50		0.451	0.088	0.235	0.118	0.078	0.088	0.020	0.029	//	//	//	//	1.1
60		0.548	0.196	0.255	0.509	0.382	0.460	0.176	0.186	0.010	//	//	//	2.7
70		0.744	0.186	0.460	1.352	1.195	1.548	0.558	0.137	0.020	//	//	//	6.2
80		1.401	0.402	0.833	3.595	2.439	1.028	0.353	0.059	//	//	//	//	10.1
90		2.272	1.009	1.665	3.252	0.872	0.245	0.059	//	//	//	//	//	9.4
100		3.281	1.783	1.988	1.489	0.167	//	//	//	//	//	//	//	8.7
110		3.781	1.802	1.156	0.274	//	//	//	//	//	//	//	//	7.0
120		3.369	2.341	0.686	0.078	//	//	//	//	//	//	//	//	6.5
130		2.821	2.233	0.588	0.088	//	//	//	//	//	//	//	//	5.7
140		2.311	1.655	0.637	0.304	//	//	//	//	//	//	//	//	4.9
150		1.949	0.930	0.392	0.215	//	//	//	//	//	//	//	//	3.5
160		1.567	0.656	0.157	0.049	//	//	//	//	//	//	//	//	2.4
170		1.508	0.411	0.186	0.029	//	//	//	//	//	//	//	//	2.1
180		0.950	0.215	0.098	0.010	//	//	//	//	//	//	//	//	1.3
190		0.862	0.137	0.020	0.020	//	//	//	//	//	//	//	//	1.0
200		0.676	0.127	0.039	0.010	//	//	//	//	//	//	//	//	0.9
210		0.568	0.186	0.108	0.010	//	//	//	//	//	//	//	//	0.9
220		0.500	0.206	0.059	0.020	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
230		0.568	0.127	0.098	0.010	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
240		0.568	0.235	0.069	0.029	//	//	//	//	//	//	//	//	0.9
250		0.460	0.147	0.098	0.020	//	//	//	//	//	//	//	//	0.7
260		0.411	0.069	0.010	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.5
270		0.578	0.137	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.7
280		1.048	0.274	0.039	0.010	//	//	//	//	//	//	//	//	1.4
290		1.175	0.353	0.020	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.5
300		1.587	0.470	0.069	0.020	//	//	//	//	//	//	//	//	2.1
310		1.332	0.558	0.098	0.039	//	//	//	//	//	//	//	//	2.0
320		1.440	0.490	0.127	0.020	0.010	//	//	//	//	//	//	//	2.1
330		1.205	0.323	0.088	0.029	//	//	//	//	//	//	//	//	1.6
340		0.862	0.157	0.069	0.020	//	//	//	//	//	//	//	//	1.1
350		0.617	0.098	0.049	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
360		0.421	0.088	0.029	0.010	//	//	//	//	//	//	//	//	0.5
Calme	5.357													5.4
TOT.	5.357	43.359	18.452	10.793	11.832	5.201	3.399	1.166	0.411	0.029	0.000	0.000	0.000	100.0
TOT. CUM.	5.357	48.717	67.169	77.963	89.794	94.995	98.394	99.559	99.971	100.000	100.000	100.000	100.000	

Tabella 6 – Stazione RMN di Trieste. Clima anemometrico medio stagionale (AUTUNNO) espresso in forma numerica. Distribuzione percentuale media annuale per classi di velocità e direzione di provenienza dei venti.

## 5.2 REGIME DEI VENTI NEL NORD ADRIATICO

Il clima anemometrico medio annuale del Nord Adriatico desunto dalla serie storica oraria trentennale della NOAA per il punto indicato in Figura 6, è rappresentato in forma grafica polare nella Figura 9 e in forma numerica nella Tabella 7. Analogamente, il clima medio stagionale è rappresentato in forma grafica dalle rose anemometriche di Figura 10 e in forma numerica dalla Tabella 8 (inverno), dalla Tabella 9 (primavera), Tabella 10 (estate) e dalla Tabella 11 (autunno).

Il clima medio annuale mostra, come noto, che il regime anemometrico in Nord Adriatico è di tipo bimodale, con venti prevalenti provenienti dal I e dal II quadrante. Il vento proveniente dal I quadrante è sostanzialmente la bora che proviene in Nord Adriatico proprio dal Golfo di Trieste. Tuttavia questo vento non è di interesse per le onde che provenendo dal Nord Adriatico si propagano nel Golfo di Trieste. I venti che possono generare moto ondoso di interesse per il Golfo di Trieste sono quelli provenienti dal III quadrante (libeccio) che presentano una frequenza di accadimento pari a circa il 15 %.

Si evidenzia in questa sede che i fenomeni di "acqua alta" in Nord Adriatico e in particolare nel Golfo di Trieste sono influenzati come noto dallo scirocco.

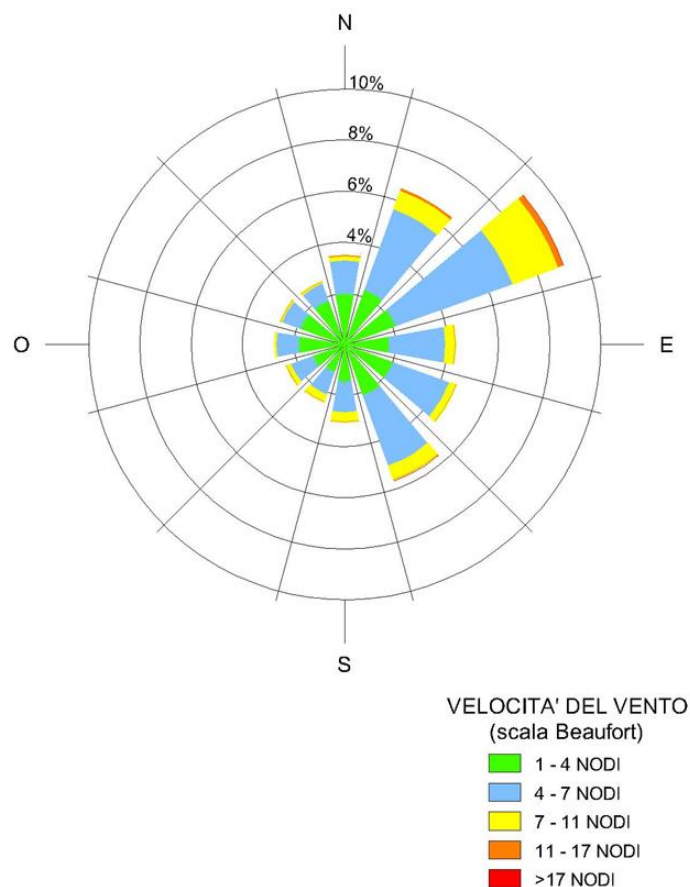


Figura 9 – Dati ricostruiti in reanalisi dalla NOAA nel Nord Adriatico. Clima anemometrico medio annuale espresso in forma grafica (diagramma polare).

dir. (°N)	Velocità del vento (nodi)													TOT.
	0	1	4	7	11	17	22	28	34	41	48	56	>63	
10	0.561	0.840	0.781	0.385	0.104	0.041	0.011	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	2.7
20	0.576	0.914	1.017	0.682	0.147	0.066	0.015	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	3.4
30	0.574	0.952	1.206	0.960	0.299	0.147	0.034	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	4.2
40	0.554	0.994	1.451	1.353	0.546	0.290	0.100	0.022	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	5.3
50	0.530	0.977	1.579	1.790	0.920	0.556	0.156	0.045	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	6.6
60	0.490	0.909	1.557	1.890	0.855	0.571	0.174	0.027	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	6.5
70	0.478	0.840	1.293	1.562	0.530	0.284	0.059	0.006	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	5.1
80	0.467	0.734	0.955	0.962	0.282	0.084	0.020	0.001	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	3.5
90	0.447	0.668	0.756	0.608	0.147	0.048	0.007	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	2.7
100	0.494	0.671	0.696	0.408	0.107	0.032	0.006	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	2.4
110	0.505	0.742	0.651	0.326	0.072	0.022	0.007	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	2.3
120	0.537	0.793	0.865	0.494	0.090	0.023	0.007	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	2.8
130	0.529	0.913	1.273	1.074	0.201	0.054	0.002	0.001	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	4.0
140	0.497	0.967	1.347	1.247	0.302	0.104	0.016	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	4.5
150	0.516	0.961	1.159	0.847	0.253	0.116	0.028	0.011	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	3.9
160	0.469	0.784	0.766	0.539	0.196	0.104	0.033	0.001	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	2.9
170	0.481	0.602	0.595	0.408	0.190	0.072	0.006	0.006	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	2.4
180	0.417	0.516	0.432	0.354	0.141	0.060	0.011	0.001	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.9
190	0.426	0.434	0.351	0.348	0.141	0.065	0.007	0.001	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.8
200	0.373	0.397	0.316	0.332	0.133	0.060	0.007	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.6
210	0.390	0.378	0.331	0.326	0.145	0.048	0.005	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.6
220	0.357	0.404	0.289	0.298	0.120	0.046	0.002	0.001	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.5
230	0.432	0.398	0.348	0.282	0.104	0.028	0.002	0.001	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.6
240	0.402	0.460	0.351	0.275	0.080	0.019	0.005	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.6
250	0.433	0.516	0.409	0.230	0.039	0.006	0.001	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.6
260	0.489	0.591	0.431	0.192	0.019	0.011	0.004	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.7
270	0.510	0.717	0.465	0.156	0.023	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.9
280	0.513	0.763	0.426	0.149	0.011	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.9
290	0.521	0.758	0.417	0.136	0.018	0.002	0.001	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.9
300	0.506	0.717	0.413	0.104	0.012	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.8
310	0.521	0.673	0.399	0.096	0.018	0.008	0.004	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.7
320	0.503	0.695	0.339	0.094	0.007	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.6
330	0.542	0.699	0.367	0.119	0.018	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.7
340	0.510	0.711	0.390	0.153	0.021	0.012	0.004	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	1.8
350	0.549	0.718	0.427	0.218	0.039	0.011	0.004	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	2.0
360	0.542	0.761	0.567	0.278	0.080	0.014	0.002	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	2.2
Calme	1.409													1.4
TOT.	1.409	17.641	25.566	25.413	19.675	6.406	3.024	0.727	0.136	0.002	0.000	0.000	0.000	100.0
TOT. CUM.	1.409	19.051	44.616	70.030	89.704	96.111	99.134	99.862	99.998	100.000	100.000	100.000	100.000	

Tabella 7 – Dati ricostruiti in reanalisi dalla NOAA nel Nord Adriatico. Clima anemometrico medio annuale. Distribuzione percentuale per classi di velocità e direzione di provenienza dei venti.

Con riferimento alle rose stagionali, si evidenzia che la bora prevale in autunno e inverno mentre lo scirocco in primavera e in estate. I venti provenienti da libeccio, meno frequenti e meno intensi degli altri, sono meno frequenti in estate.

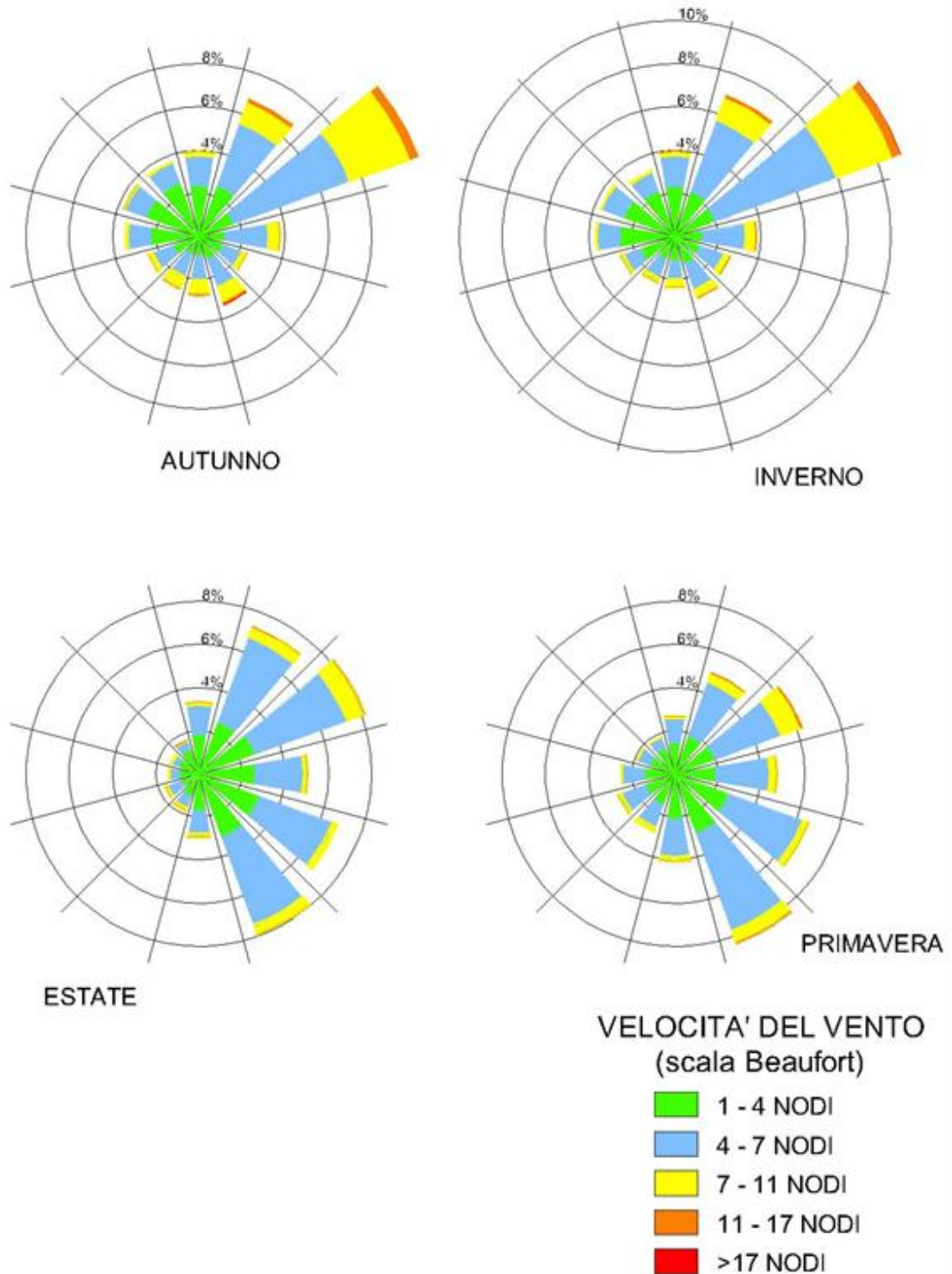


Figura 10 – Dati ricostruiti in reanalisi dalla NOAA nel Nord Adriatico. Clima anemometrico medio stagionale espresso in forma grafica (diagramma polare).

dir. (°N)	Velocità del vento (nodi)													TOT.
	0	1	4	7	11	17	22	28	34	41	48	56	>63	
10	1	0.672	0.840	0.779	0.406	0.107	0.056	0.014	0.009	//	//	//	//	2.9
20		0.481	0.873	1.022	0.733	0.159	0.140	0.028	//	//	//	//	//	3.4
30		0.639	0.905	1.148	1.027	0.383	0.247	0.051	//	//	//	//	//	4.4
40		0.490	0.957	1.479	1.656	0.756	0.476	0.187	0.005	//	//	//	//	6.0
50		0.467	0.947	1.862	2.300	1.423	0.835	0.313	0.042	0.005	//	//	//	8.2
60		0.425	0.873	1.712	2.501	1.213	0.859	0.275	0.037	//	//	//	//	7.9
70		0.457	0.798	1.619	1.866	0.691	0.439	0.112	0.005	//	//	//	//	6.0
80		0.322	0.639	0.896	1.120	0.317	0.093	0.051	//	//	//	//	//	3.4
90		0.247	0.471	0.621	0.560	0.145	0.075	0.019	//	//	//	//	//	2.1
100		0.369	0.429	0.527	0.364	0.173	0.065	0.005	//	//	//	//	//	1.9
110		0.383	0.425	0.499	0.219	0.075	0.037	0.014	//	//	//	//	//	1.7
120		0.364	0.499	0.513	0.271	0.089	0.033	0.019	//	//	//	//	//	1.8
130		0.383	0.467	0.574	0.350	0.135	0.065	0.005	//	//	//	//	//	2.0
140		0.355	0.518	0.583	0.406	0.177	0.112	0.019	//	//	//	//	//	2.2
150		0.392	0.597	0.509	0.425	0.187	0.093	0.005	0.005	//	//	//	//	2.2
160		0.331	0.457	0.359	0.369	0.103	0.089	0.023	//	//	//	//	//	1.7
170		0.397	0.397	0.392	0.289	0.173	0.089	0.005	0.005	//	//	//	//	1.7
180		0.350	0.383	0.313	0.280	0.177	0.061	0.009	//	//	//	//	//	1.6
190		0.341	0.401	0.247	0.257	0.149	0.065	//	0.005	//	//	//	//	1.5
200		0.313	0.341	0.322	0.350	0.140	0.056	0.005	//	//	//	//	//	1.5
210		0.383	0.345	0.317	0.369	0.121	0.028	//	//	//	//	//	//	1.6
220		0.425	0.415	0.308	0.275	0.070	0.009	//	0.005	//	//	//	//	1.5
230		0.490	0.448	0.341	0.229	0.117	0.014	//	//	//	//	//	//	1.6
240		0.565	0.602	0.359	0.201	0.084	0.014	//	//	//	//	//	//	1.8
250		0.495	0.789	0.439	0.117	0.009	//	0.005	//	//	//	//	//	1.9
260		0.742	0.868	0.560	0.089	//	0.014	//	//	//	//	//	//	2.3
270		0.733	1.064	0.546	0.168	0.014	0.009	//	//	//	//	//	//	2.5
280		0.625	1.087	0.611	0.140	0.009	0.005	//	//	//	//	//	//	2.5
290		0.649	1.125	0.593	0.168	0.023	0.005	//	//	//	//	//	//	2.6
300		0.607	1.069	0.537	0.149	0.019	0.005	//	//	//	//	//	//	2.4
310		0.677	0.901	0.565	0.187	0.019	0.019	//	//	//	//	//	//	2.4
320		0.635	0.849	0.504	0.126	0.014	0.009	//	//	//	//	//	//	2.1
330		0.723	0.835	0.387	0.154	0.014	0.009	//	//	//	//	//	//	2.1
340		0.546	0.859	0.499	0.201	0.028	0.019	//	//	//	//	//	//	2.2
350		0.616	0.924	0.532	0.280	0.070	0.023	0.009	//	//	//	//	//	2.5
360		0.588	0.971	0.569	0.317	0.098	0.023	0.009	//	//	//	//	//	2.6
Calme	1.433													1.4
TOT.	1.433	17.671	25.365	23.643	18.917	7.480	4.190	1.181	0.117	0.005	0.000	0.000	0.000	100.0
TOT. CUM.	1.433	19.103	44.468	68.112	87.028	94.508	98.698	99.879	99.995	100.000	100.000	100.000	100.000	

Tabella 8 - Dati ricostruiti in reanalisi dalla NOAA nel Nord Adriatico. Clima anemometrico medio stagionale (INVERNO). Distribuzione percentuale per classi di velocità e direzione di provenienza dei venti.

dir. (°N)	Velocità del vento (nodi)													TOT.
	0 1	1 4	4 7	7 11	11 17	17 22	22 28	28 34	34 41	41 48	48 56	56 63	>63	
10		0.398	0.630	0.710	0.275	0.052	0.014	0.005	//	//	//	//	//	2.1
20		0.502	0.810	0.819	0.635	0.085	0.019	0.005	//	//	//	//	//	2.9
30		0.426	0.767	0.999	0.753	0.275	0.062	0.009	0.009	//	//	//	//	3.3
40		0.497	0.777	0.971	1.028	0.289	0.161	0.019	0.005	//	//	//	//	3.7
50		0.464	0.810	1.085	1.137	0.379	0.246	0.038	0.028	//	//	//	//	4.2
60		0.450	0.815	1.085	1.118	0.455	0.246	0.066	0.033	//	//	//	//	4.3
70		0.531	0.900	0.980	1.052	0.369	0.175	0.033	//	//	//	//	//	4.0
80		0.445	0.748	0.995	0.867	0.227	0.062	0.005	//	//	//	//	//	3.3
90		0.512	0.715	0.957	0.692	0.152	0.038	//	//	//	//	//	//	3.1
100		0.507	0.886	0.957	0.521	0.099	//	0.005	//	//	//	//	//	3.0
110		0.559	0.995	0.990	0.531	0.128	0.009	//	//	//	//	//	//	3.2
120		0.668	1.137	1.407	0.677	0.114	0.014	//	//	//	//	//	//	4.0
130		0.644	1.312	1.985	1.672	0.199	0.038	0.005	//	//	//	//	//	5.9
140		0.531	1.397	2.075	2.060	0.393	0.090	0.005	//	//	//	//	//	6.6
150		0.621	1.326	1.975	1.407	0.327	0.109	0.014	0.009	//	//	//	//	5.8
160		0.658	1.222	1.250	0.810	0.232	0.057	0.009	//	//	//	//	//	4.2
170		0.625	0.895	0.914	0.568	0.118	0.009	0.005	//	//	//	//	//	3.1
180		0.554	0.758	0.625	0.549	0.090	0.043	0.005	//	//	//	//	//	2.6
190		0.597	0.673	0.540	0.407	0.104	0.033	//	//	//	//	//	//	2.4
200		0.459	0.587	0.469	0.351	0.104	0.028	//	//	//	//	//	//	2.0
210		0.455	0.493	0.488	0.303	0.109	0.019	//	//	//	//	//	//	1.9
220		0.431	0.597	0.298	0.336	0.099	0.028	//	//	//	//	//	//	1.8
230		0.497	0.526	0.441	0.327	0.071	0.024	0.005	//	//	//	//	//	1.9
240		0.341	0.540	0.483	0.355	0.114	0.014	//	//	//	//	//	//	1.8
250		0.469	0.521	0.483	0.332	0.028	0.014	//	//	//	//	//	//	1.8
260		0.360	0.578	0.559	0.313	0.019	//	//	//	//	//	//	//	1.8
270		0.379	0.549	0.568	0.185	0.024	//	//	//	//	//	//	//	1.7
280		0.431	0.559	0.308	0.171	//	//	//	//	//	//	//	//	1.5
290		0.403	0.478	0.346	0.066	//	0.005	//	//	//	//	//	//	1.3
300		0.384	0.436	0.341	0.090	0.014	//	//	//	//	//	//	//	1.3
310		0.351	0.417	0.355	0.057	0.005	//	//	//	//	//	//	//	1.2
320		0.308	0.512	0.275	0.066	//	//	//	//	//	//	//	//	1.2
330		0.379	0.483	0.275	0.071	//	//	//	//	//	//	//	//	1.2
340		0.403	0.445	0.327	0.095	0.009	0.005	//	//	//	//	//	//	1.3
350		0.417	0.464	0.365	0.199	0.024	0.009	//	//	//	//	//	//	1.5
360		0.441	0.545	0.502	0.261	0.057	0.005	//	//	//	//	//	//	1.8
Calme	1.407													1.4
TOT.	1.407	17.095	26.303	28.202	20.334	4.765	1.577	0.232	0.085	0.000	0.000	0.000	0.000	100.0
TOT. CUM.	1.407	18.501	44.804	73.006	93.340	98.105	99.683	99.915	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	

Tabella 9 – Dati ricostruiti in reanalisi dalla NOAA nel Nord Adriatico. Clima anemometrico medio stagionale (PRIMAVERA). Distribuzione percentuale per classi di velocità e direzione di provenienza dei venti.

dir. (°N)	Velocità del vento (nodi)													TOT.
	0	1	4	7	11	17	22	28	34	41	48	56	>63	
10	1	4	7	11	17	22	28	34	41	48	56	63		
10		0.576	0.876	0.918	0.469	0.075	0.033	0.005	0.005	//	//	//	//	3.0
20		0.618	0.923	1.246	0.871	0.155	0.037	0.005	//	//	//	//	//	3.9
30		0.647	1.031	1.537	1.256	0.201	0.052	0.009	0.005	//	//	//	//	4.7
40		0.698	1.228	1.926	1.401	0.379	0.117	0.037	0.009	//	//	//	//	5.8
50		0.726	1.293	1.649	1.663	0.534	0.183	0.037	0.014	//	//	//	//	6.1
60		0.698	1.153	1.630	1.504	0.464	0.150	0.033	//	//	//	//	//	5.6
70		0.618	1.049	1.284	1.176	0.281	0.075	0.009	//	//	//	//	//	4.5
80		0.731	1.035	0.989	0.801	0.131	0.061	0.005	//	//	//	//	//	3.8
90		0.707	0.993	0.853	0.553	0.089	0.019	//	//	//	//	//	//	3.2
100		0.754	0.975	0.871	0.408	0.033	0.019	//	//	//	//	//	//	3.1
110		0.628	1.167	0.829	0.300	0.019	0.005	//	//	//	//	//	//	2.9
120		0.731	1.157	1.232	0.768	0.070	0.009	//	//	//	//	//	//	4.0
130		0.740	1.481	2.118	1.930	0.347	0.033	//	//	//	//	//	//	6.6
140		0.773	1.481	2.221	2.094	0.436	0.061	//	//	//	//	//	//	7.1
150		0.745	1.466	1.626	1.153	0.206	0.047	0.014	//	//	//	//	//	5.3
160		0.590	1.068	1.049	0.529	0.131	0.037	0.005	//	//	//	//	//	3.4
170		0.572	0.834	0.698	0.351	0.098	0.033	//	//	//	//	//	//	2.6
180		0.487	0.572	0.483	0.183	0.061	//	//	//	//	//	//	//	1.8
190		0.469	0.417	0.319	0.239	0.052	0.014	0.005	//	//	//	//	//	1.5
200		0.426	0.375	0.220	0.169	0.047	0.023	//	//	//	//	//	//	1.3
210		0.422	0.351	0.211	0.141	0.070	0.028	0.005	//	//	//	//	//	1.2
220		0.290	0.328	0.192	0.211	0.089	0.023	//	//	//	//	//	//	1.1
230		0.351	0.305	0.258	0.230	0.066	0.019	0.005	//	//	//	//	//	1.2
240		0.319	0.244	0.220	0.211	0.033	0.009	0.009	//	//	//	//	//	1.0
250		0.295	0.253	0.286	0.216	0.047	//	//	//	//	//	//	//	1.1
260		0.337	0.211	0.183	0.131	0.019	0.005	//	//	//	//	//	//	0.9
270		0.351	0.314	0.267	0.108	0.014	//	//	//	//	//	//	//	1.1
280		0.351	0.272	0.197	0.084	0.014	0.005	//	//	//	//	//	//	0.9
290		0.365	0.314	0.183	0.084	0.005	//	//	//	//	//	//	//	1.0
300		0.375	0.323	0.187	0.047	0.005	0.005	//	//	//	//	//	//	0.9
310		0.422	0.244	0.183	0.047	0.019	0.009	//	//	//	//	//	//	0.9
320		0.333	0.337	0.112	0.066	//	0.005	//	//	//	//	//	//	0.9
330		0.394	0.412	0.201	0.122	0.014	//	//	//	//	//	//	//	1.1
340		0.459	0.478	0.216	0.131	0.023	0.019	//	0.005	//	//	//	//	1.3
350		0.506	0.572	0.314	0.183	0.019	0.009	//	//	//	//	//	//	1.6
360		0.529	0.590	0.553	0.267	0.070	0.014	//	//	//	//	//	//	2.0
Calme	1.598													1.6
TOT.	1.598	19.036	26.120	27.460	20.095	4.315	1.157	0.183	0.037	0.000	0.000	0.000	0.000	100.0
TOT. CUM.	1.598	20.633	46.753	74.213	94.308	98.623	99.780	99.963	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	

Tabella 10 – Dati ricostruiti in reanalisi dalla NOAA nel Nord Adriatico. Clima anemometrico medio stagionale (ESTATE). Distribuzione percentuale per classi di velocità e direzione di provenienza dei venti.



dir. (°N)	Velocità del vento (nodi)													TOT.
	0	1	4	7	11	17	22	28	34	41	48	56	>63	
10		0.595	1.012	0.717	0.389	0.183	0.061	0.019	//	//	//	//	//	3.0
20		0.703	1.049	0.979	0.487	0.187	0.066	0.023	//	//	//	//	//	3.5
30		0.581	1.101	1.138	0.801	0.337	0.225	0.066	//	//	//	//	//	4.2
40		0.529	1.012	1.424	1.321	0.754	0.403	0.155	0.070	//	//	//	//	5.7
50		0.464	0.857	1.715	2.052	1.335	0.956	0.234	0.094	//	//	//	//	7.7
60		0.389	0.796	1.794	2.427	1.284	1.026	0.319	0.037	//	//	//	//	8.1
70		0.305	0.614	1.284	2.146	0.778	0.445	0.080	0.019	//	//	//	//	5.7
80		0.370	0.515	0.942	1.059	0.450	0.122	0.019	0.005	//	//	//	//	3.5
90		0.323	0.492	0.595	0.628	0.201	0.061	0.009	//	//	//	//	//	2.3
100		0.347	0.398	0.431	0.342	0.122	0.042	0.014	//	//	//	//	//	1.7
110		0.450	0.384	0.290	0.258	0.066	0.037	0.014	//	//	//	//	//	1.5
120		0.389	0.384	0.314	0.262	0.089	0.037	0.009	//	//	//	//	//	1.5
130		0.351	0.398	0.426	0.351	0.122	0.080	//	0.005	//	//	//	//	1.7
140		0.333	0.478	0.520	0.440	0.201	0.155	0.042	0.014	//	//	//	//	2.2
150		0.309	0.459	0.539	0.412	0.295	0.216	0.080	0.028	//	//	//	//	2.3
160		0.300	0.394	0.412	0.450	0.319	0.234	0.094	0.005	0.005	//	//	//	2.2
170		0.333	0.286	0.379	0.426	0.370	0.155	0.014	0.019	//	//	//	//	2.0
180		0.276	0.356	0.309	0.408	0.234	0.136	0.028	0.005	//	//	//	//	1.8
190		0.300	0.248	0.300	0.492	0.258	0.145	0.023	//	//	//	//	//	1.8
200		0.295	0.286	0.253	0.459	0.239	0.131	0.023	//	//	//	//	//	1.7
210		0.300	0.323	0.309	0.492	0.281	0.117	0.014	//	//	//	//	//	1.8
220		0.281	0.276	0.356	0.370	0.220	0.122	0.009	//	//	//	//	//	1.6
230		0.389	0.314	0.356	0.342	0.164	0.056	//	0.005	//	//	//	//	1.6
240		0.384	0.454	0.342	0.333	0.089	0.037	0.009	//	//	//	//	//	1.6
250		0.473	0.501	0.431	0.258	0.070	0.009	//	//	//	//	//	//	1.7
260		0.515	0.707	0.422	0.239	0.037	0.023	//	//	//	//	//	//	1.9
270		0.576	0.937	0.478	0.164	0.042	0.009	//	//	//	//	//	//	2.2
280		0.642	1.129	0.586	0.201	0.019	0.005	//	//	//	//	//	//	2.6
290		0.665	1.110	0.543	0.225	0.042	//	0.005	//	//	//	//	//	2.6
300		0.656	1.035	0.586	0.131	0.009	0.009	//	//	//	//	//	//	2.4
310		0.632	1.129	0.492	0.094	0.028	0.005	//	//	//	//	//	//	2.4
320		0.736	1.078	0.464	0.117	0.014	//	//	//	//	//	//	//	2.4
330		0.670	1.064	0.604	0.126	0.042	0.005	//	//	//	//	//	//	2.5
340		0.632	1.059	0.515	0.183	0.023	0.005	//	//	//	//	//	//	2.4
350		0.656	0.909	0.497	0.211	0.042	//	0.005	//	//	//	//	//	2.3
360		0.609	0.937	0.642	0.267	0.094	0.014	//	//	//	//	//	//	2.6
Calme	1.199													1.2
TOT.	1.199	16.759	24.485	22.386	19.364	9.042	5.149	1.307	0.305	0.005	0.000	0.000	0.000	100.0
TOT. CUM.	1.199	17.958	42.443	64.829	84.192	93.235	98.384	99.691	99.995	100.000	100.000	100.000	100.000	

Tabella 11 - Dati ricostruiti in reanalisi dalla NOAA nel Nord Adriatico. Clima anemometrico medio stagionale (AUTUNNO). Distribuzione percentuale per classi di velocità e direzione di provenienza dei venti.

## 6 CLIMA DI MOTO ONDOSONO

### 6.1 CLIMA DI MOTO ONDOSONO RICOSTRUITO SULLA BASE DEI DATI DI VENTO DELLA RMN DI TRIESTE

Come descritto nel capitolo 3, il clima di moto ondoso è stato calcolato per un punto posto in prossimità dell'imboccatura del canale dragato di accesso al Porto di Monfalcone, applicando il modello di ricostruzione del moto ondoso ALTAIR sviluppato dalla MODIMAR s.r.l. utilizzando come dati in ingresso la serie storica delle registrazioni anemometriche relativa alla stazione mareografica RMN di Trieste.

I risultati dell'applicazione del codice sono riportati in forma grafica nel diagramma polare di Figura 11 e in forma numerica nella Tabella 12.

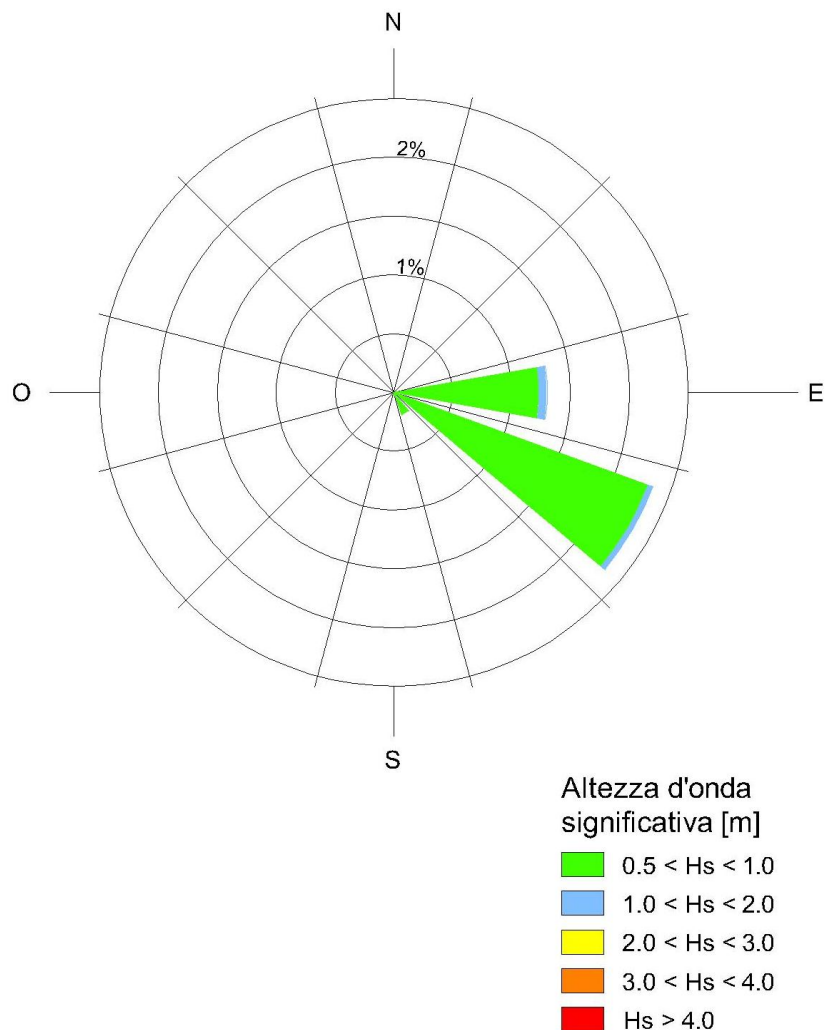


Figura 11 – Clima di moto ondoso medio annuale per il Porto di Monfalcone (diagramma polare). Distribuzione direzionale del moto ondoso ricostruito sulla base della serie storica dei dati di vento registrati dalla stazione RMN di Trieste

dir. (°N)	ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.
	0	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	
10	0.449	0.007	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.5
20	0.247	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.2
30	0.354	0.007	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.4
40	0.218	0.012	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.2
50	0.286	0.012	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.3
60	0.197	0.007	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.2
70	0.512	0.034	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.5
80	0.694	0.085	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.8
90	1.089	0.206	0.099	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.4
100	2.434	2.011	1.138	0.066	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	5.6
110	4.777	4.610	1.679	0.044	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	11.1
120	1.992	1.398	0.463	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	3.9
130	2.281	1.310	0.155	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	3.7
140	4.928	1.567	0.155	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	6.7
150	8.240	1.206	0.046	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	9.5
160	8.521	0.238	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	8.8
170	7.119	0.255	0.017	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	7.4
180	4.496	0.184	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	4.7
190	2.810	0.053	0.010	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	2.9
200	1.412	0.027	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.4
210	1.453	0.080	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.5
220	1.754	0.066	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.8
230	1.616	0.024	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.6
240	1.985	0.007	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	2.0
250	4.979	0.034	0.010	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	5.0
260	7.762	0.012	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	7.8
270	5.779	0.017	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	5.8
280	1.453	0.007	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.5
290	0.243	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.2
300	0.226	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.2
310	0.192	//	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.2
320	0.197	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.2
330	0.175	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.2
340	0.466	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.5
350	0.721	0.005	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.7
360	0.560	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.6
<b>TOT.</b>	82.6	13.5	3.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	100.0
<b>TOT. CUM.</b>	82.62	96.1	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

Tabella 12 - Clima di moto ondoso medio annuale per il Porto di Monfalcone (tabella climatica).  
Distribuzione direzionale del moto ondoso ricostruito sulla base della serie storica dei dati di vento registrati dalla stazione RMN di Trieste

## 6.2 CLIMA DI MOTO ONDOSI RICOSTRUITO SULLA BASE DEI DATI NOAA

Come descritto nel capitolo 3 paragrafo 3.2, il modello ALTAIR è stato applicato per un punto posto in prossimità del confine Sud-Ovest della griglia SWAN per ricostruire sulla base della serie anemometrica della NOAA la corrispondente serie storica di moto ondoso.

Per l'applicazione del modello ALTAIR sono stati calcolati preliminarmente: (i) i fetch geografici e i fetch efficaci riportati graficamente nella Figura 12 e numericamente nella Tabella 13; (ii) la deviazione tra la direzione del vento e del moto ondoso riportata numericamente nella Tabella 13 e graficamente nella Figura 13.

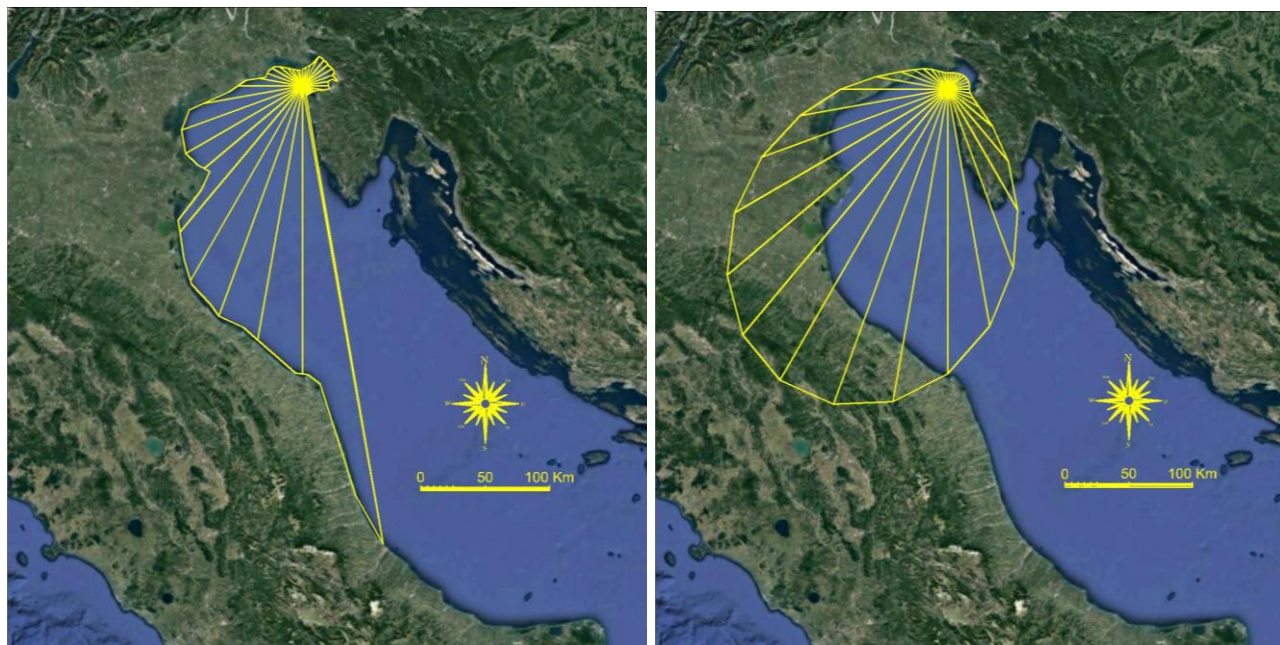


Figura 12 - Fetch geografici (pannello di sinistra) e fetch efficaci (pannello di destra) al largo del golfo di Trieste in corrispondenza del confine SW della griglia SWAN.

Direzione provenienza (°Nord)	Fetch geografico (Km)	Fetch efficace (Km)	Deviazione vento-mare (°)	Direzione provenienza (°Nord)	Fetch geografico (Km)	Fetch efficace (Km)	Deviazione vento-mare (°)
0	13.2	13.0	10	180	232.0	223.2	-13
10	13.2	13.2	-12	190	224.0	248.9	-8
20	13.2	13.9	-13	200	200.7	262.9	-3
30	19.1	14.7	-11	210	1907.0	263.6	2
40	26.3	15.6	-9	220	174.5	251.1	7
50	26.3	16.4	-6	230	98.2	226.8	13
60	26.3	17.0	-3	240	98.2	193.8	18
70	26.9	17.2	0	250	105.0	156.1	23
80	26.9	17.0	-59	260	90.3	118.2	28
90	20.5	16.7	-55	270	57.5	84.4	32
100	20.5	17.7	-51	280	44.2	57.6	37
110	16.5	20.9	-47	290	29.5	39.8	41
120	16.5	28.2	-42	300	29.1	30.9	45
130	16.5	45.7	-38	310	26.6	25.0	49
140	16.5	73.8	-33	320	23.1	20.4	52
150	16.5	109.7	-28	330	23.1	16.9	55
160	16.5	149.5	-23	340	23.1	14.6	38
170	7.9	188.8	-18	350	0.0	13.4	37

Tabella 13 - Fetch geografici, fetch efficaci e deviazione direzione vento/mare al largo del golfo di Trieste in corrispondenza del confine SW della griglia SWAN Fetch geografici, efficaci e deviazione direzione vento/mare al largo del golfo di Trieste in corrispondenza del confine SW della griglia SWAN.

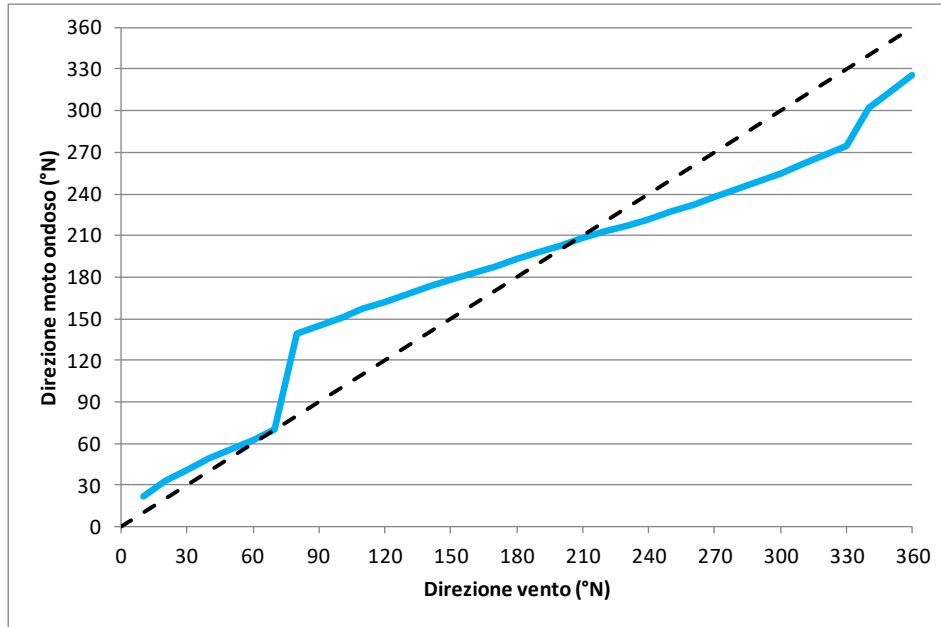


Figura 13 - Legge di deviazione direzione vento/mare al largo del golfo di Trieste in corrispondenza del confine SW della griglia SWAN.

Il clima del moto ondoso calcolato sulla base della serie storica ricostruita con il modello ALTAIR è riportato in forma grafica nella Figura 14 e in forma numerica nella Tabella 14.



dir. (°N)	ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.
	0	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	
10	1.864	0.200	0.016	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	2.1
20	1.260	0.196	0.008	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.5
30	1.357	0.232	0.011	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.6
40	1.163	0.215	0.016	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.4
50	1.266	0.259	0.020	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.5
60	1.190	0.313	0.038	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.5
70	2.856	0.780	0.091	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	3.7
80	3.715	1.268	0.135	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	5.1
90	4.417	2.133	0.286	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	6.8
100	4.295	1.825	0.245	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	6.4
110	2.562	0.933	0.079	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	3.6
120	0.758	0.250	0.033	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.0
130	0.709	0.174	0.038	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.9
140	1.300	0.317	0.047	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.7
150	2.056	0.599	0.069	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	2.7
160	3.000	1.017	0.152	0.001	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	4.2
170	4.396	2.990	0.851	0.029	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	8.3
180	3.594	2.204	1.403	0.249	0.035	0.001	//	//	//	//	//	//	//	//	7.5
190	2.167	0.771	0.857	0.384	0.059	0.001	0.002	//	//	//	//	//	//	//	4.2
200	1.521	0.520	0.616	0.290	0.078	0.008	//	//	//	//	//	//	//	//	3.0
210	1.829	0.656	0.692	0.290	0.093	0.008	//	//	//	//	//	//	//	//	3.6
220	1.654	0.716	0.567	0.194	0.045	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	3.2
230	1.947	0.687	0.366	0.030	0.004	//	//	//	//	//	//	//	//	//	3.0
240	2.647	0.546	0.090	0.004	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	3.3
250	3.477	0.292	0.027	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	3.8
260	3.007	0.104	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	3.1
270	2.871	0.091	0.005	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	3.0
280	1.292	0.065	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.4
290	0.281	0.010	0.001	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.3
300	0.278	0.012	0.001	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.3
310	0.323	0.011	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.3
320	0.295	0.020	0.001	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.3
330	0.295	0.020	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	0.3
340	0.987	0.055	0.002	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1.0
350	2.035	0.142	0.005	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	2.2
360	1.933	0.189	0.013	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	2.1
<b>TOT.</b>	70.6	20.8	6.8	1.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	100.0
<b>TOT. CUM.</b>	70.60	91.4	98.2	99.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

Tabella 14 - Distribuzione percentuale annuale per classi di velocità e direzione di provenienza del moto ondoso ricostruito sulla base della serie storica della NOAA

## 6.3 CLIMA DI MOTO ONDOSI MISURATO DAGLI ONDAMETRI DELL'OGS

In prossimità dell'area in esame sono presenti 3 ondometri direzionali gestiti dall'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale di Trieste (OGS). La posizione degli ondometri è riportata in Figura 15.

Il portale dell'OGS (<http://nodc.ogs.trieste.it/nodc>) consente di visualizzare e salvare tutti i parametri di moto ondoso ottenuti dall'analisi spettrale delle onde osservate dagli ondometri inclusi l'altezza significativa  $H_s$ , il periodo di picco  $T_p$  e la direzione media.

Sono stati acquisiti i dati registrati dagli ondometri DWRG1 e DWRG3 rispettivamente posizionati in alto Adriatico, all'esterno del Golfo di Trieste, e sottocosta, all'interno del golfo, al largo di Punta Sdobba. I dati osservati dall'ondometro DWRG2, prospiciente l'Isola di Sant'Andrea, non sono stati acquisiti perché non rappresentativi del clima ondometrico in prossimità di Monfalcone.

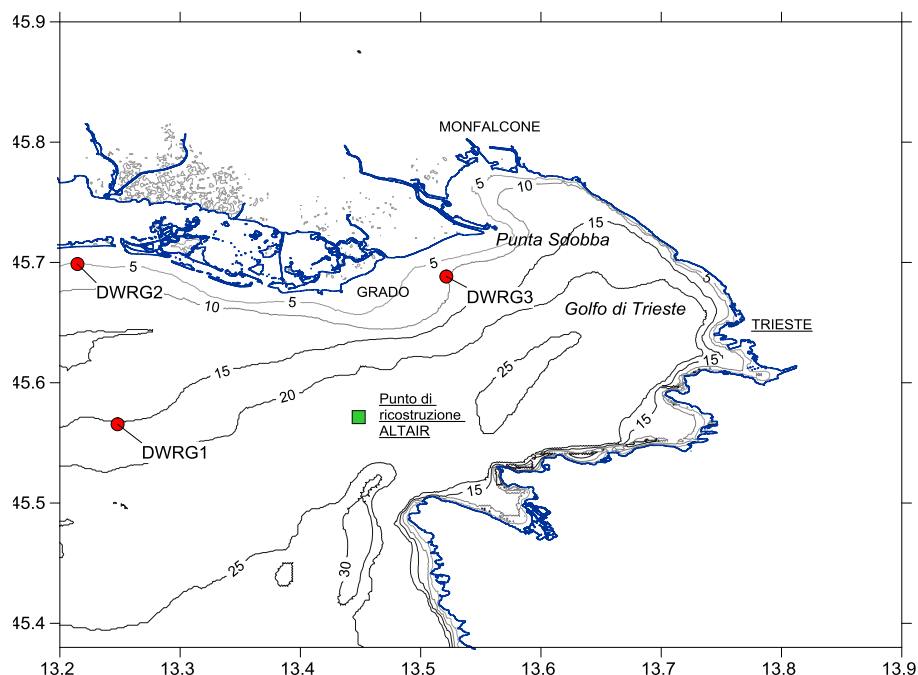


Figura 15 - Individuazione delle tre boe ondometriche gestite dall'OGS di Trieste

L'ondometro DWRG1 è posizionato al largo, nel punto di coordinate 13.24°E, 45.56°N, su fondali di 16 m e risulta esposto al mare aperto per i settori di traversia di Scirocco, Mezzogiorno e Libeccio. Gli stati di mare provenienti da largo si presentano in prevalenza da Scirocco.

L'ondometro DWRG3 è posizionato sottocosta, nel punto di coordinate 13.52°E, 45.68°N, su fondali di circa -10 m sul l.m.m. Gli stati di mare osservati dalla boa provenienti dal mare si presentano in prevalenza da libeccio e, rispetto a quanto osservato dall'ondometro DWRG1 al largo, presentano valori di altezza d'onda più attenuati.

I dati registrati da entrambi gli ondometri presentano una significativa presenza di stati di mare provenienti da terra generati localmente dai forti venti provenienti da Est-Nordest che contraddistinguono il clima di moto ondoso nel Golfo di Trieste.

Gli ondometri tuttavia presentano un bassissimo rendimento, dovuto ad interruzioni e a mancate registrazioni, pertanto le serie storiche non risultano quantitativamente adatte ai fini delle analisi statistiche di frequenza di accadimento e dei valori estremi.



### 6.3.1 Dati registrati dall'ondametro OGS-DWRG1

Dall'archivio dati dell'OGS di Trieste sono stati acquisiti i dati registrati con cadenza semioraria dall'ondametro DWRG1 da gennaio 2013 a giugno 2019. Come mostrato in Figura 16 il rendimento dell'ondametro presenta molte interruzioni e mancanze di dati (rendimento quasi sempre inferiore al 40%).

Il clima di moto ondoso osservato dalla boa presenta una frequenza di accadimento di stati di mare caratterizzati da altezza d'onda  $H_s > 0.50$  m pari a circa il 25%, il restante degli eventi osservati sono riconducibili a stati di calma.

Gli stati di mare più frequenti appartengono alle classi di altezza d'onda  $0.5 < H_s < 1.00$  m (17.5%) e  $1.00 < H_s < 1.50$  m (6.15%). Solo occasionalmente è stata superata la soglia di  $H_s = 2.0$  m e ancor più raramente quella di  $H_s = 3.0$  m (vedi Figura 17).

Dal punto di vista della distribuzione direzionale dell'altezza d'onda si riscontra una prevalenza di stati di mare provenienti dal settore di Mezzogiorno [ $165 - 195$  °N], che si presentano con una frequenza di accadimento pari al 10.7% e da Levante [ $75 - 105$  °N] con frequenza di accadimento 10.5.

Gli eventi di moto ondoso più intensi si presentano esclusivamente da S-SO: in occasione della mareggiata del 29-30 Ottobre 2018 è stata registrata la massima altezza d'onda pari ad  $H_s = 4.4$  m. Si evidenzia che questo evento meteomarino, che ha coinvolto l'intera penisola italiana, ha causato nel Tirreno ingenti danni ai porti liguri e nel Triveneto numerosi danni nell'area montana dove il forte vento da scirocco, soffiando tra i 100 e i 200 km/h per diverse ore, ha causato l'abbattimento di un numero enorme di alberi.

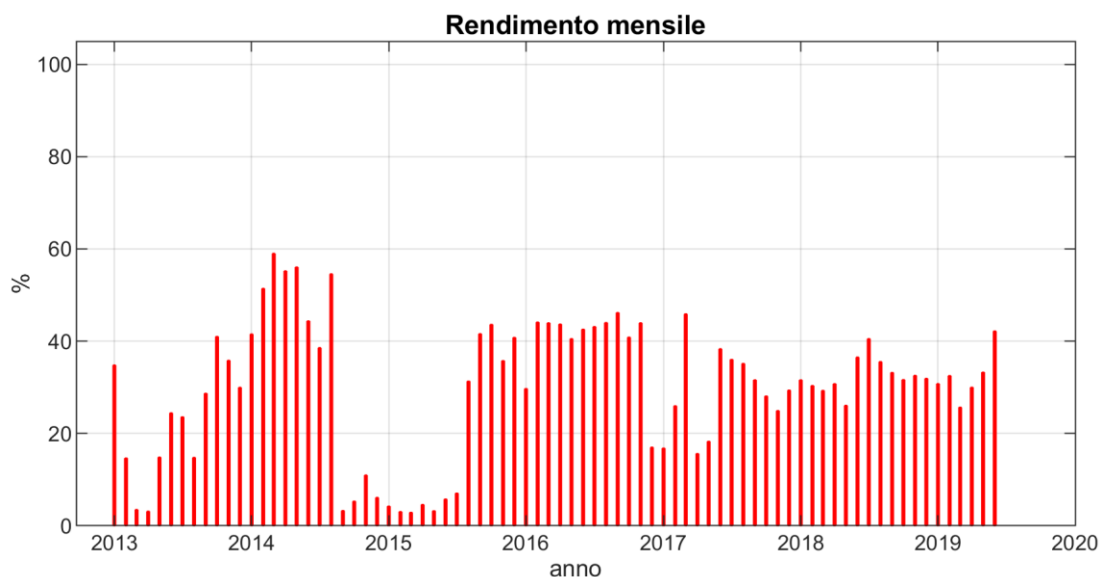


Figura 16 - Rendimento mensile dell'ondametro OGS-DWRG1 da Gennaio 2013 a Giugno 2019.

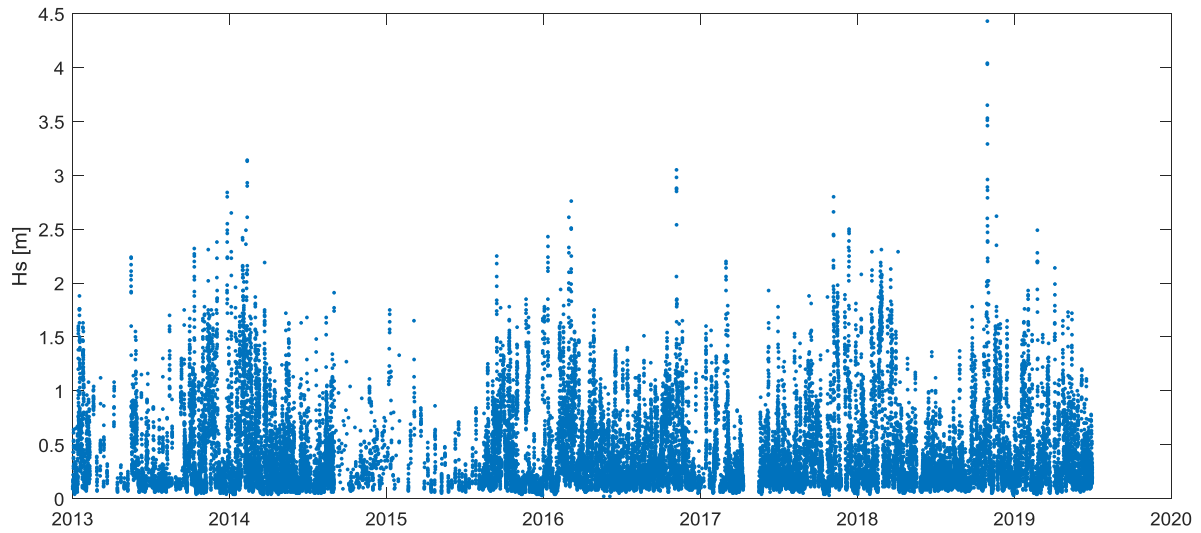


Figura 17 - Altezza d'onda significativa osservata dalla boa ondometrica OGS-DWRG1 periodo Gennaio 2013 - Giugno 2019

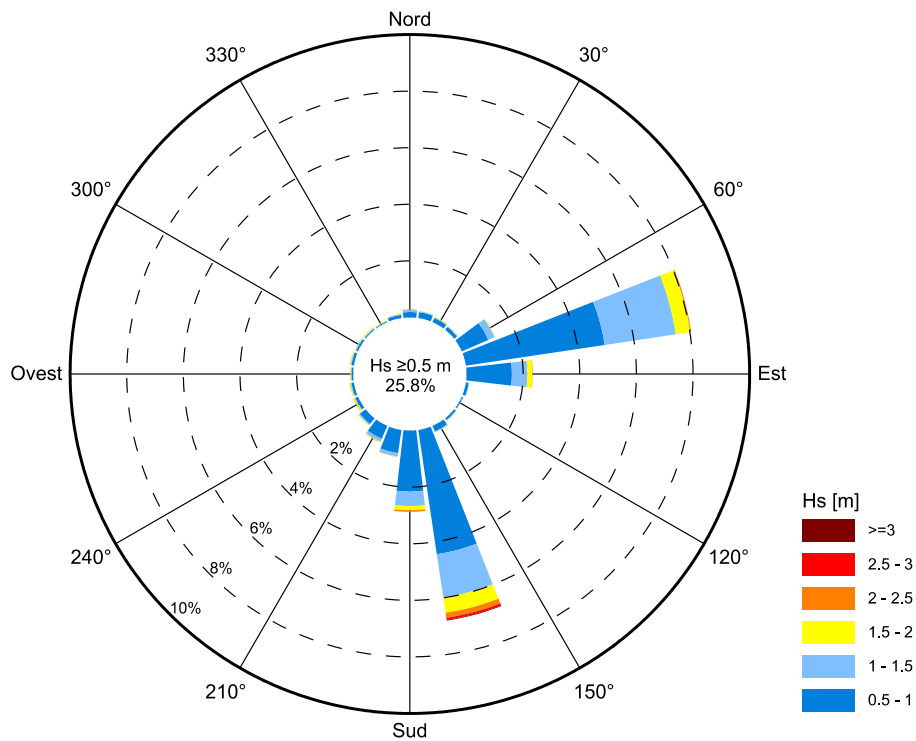


Figura 18 - Ondametro OGS-DWRG1. Distribuzione direzionale degli stati di mare con  $H_s > 0.5$  m.

### 6.3.2 Dati registrati dall'ondametro OGS-DWRG3

I dati registrati dall'ondametro DWRG3 con cadenza semioraria acquisiti dall'OGS di Trieste si estendono da aprile 2015 fino a giugno 2019. Come mostrato nel grafico del rendimento mensile di Figura 19 la serie storica presenta molte interruzioni e mancanze di dati (rendimento quasi sempre inferiore al 40%).

Il clima di moto ondoso osservato dalla boa è molto mite: degli eventi registrati solo il 20% è caratterizzato da altezza d'onda  $H_s > 0.25$  m, il restante degli eventi osservati sono riconducibili a stati di calma.

Gli stati di mare più frequenti hanno altezza d'onda significativa compresa tra  $0.25 < H_s < 0.5$  m (13.3%) e  $0.5 < H_s < 0.75$  m (6.5%). Solo occasionalmente viene superata la soglia di  $H_s = 1.0$  m e ancor più raramente quella di  $H_s = 1.5$  m (vedi Figura 20).

La rosa di distribuzione direzionale degli stati di mare con  $H_s > 0.25$  m rappresentata in Figura 21, mostra una prevalenza di stati di mare provenienti da Est (Levante) e da S-SO (Mezzogiorno-Libeccio).

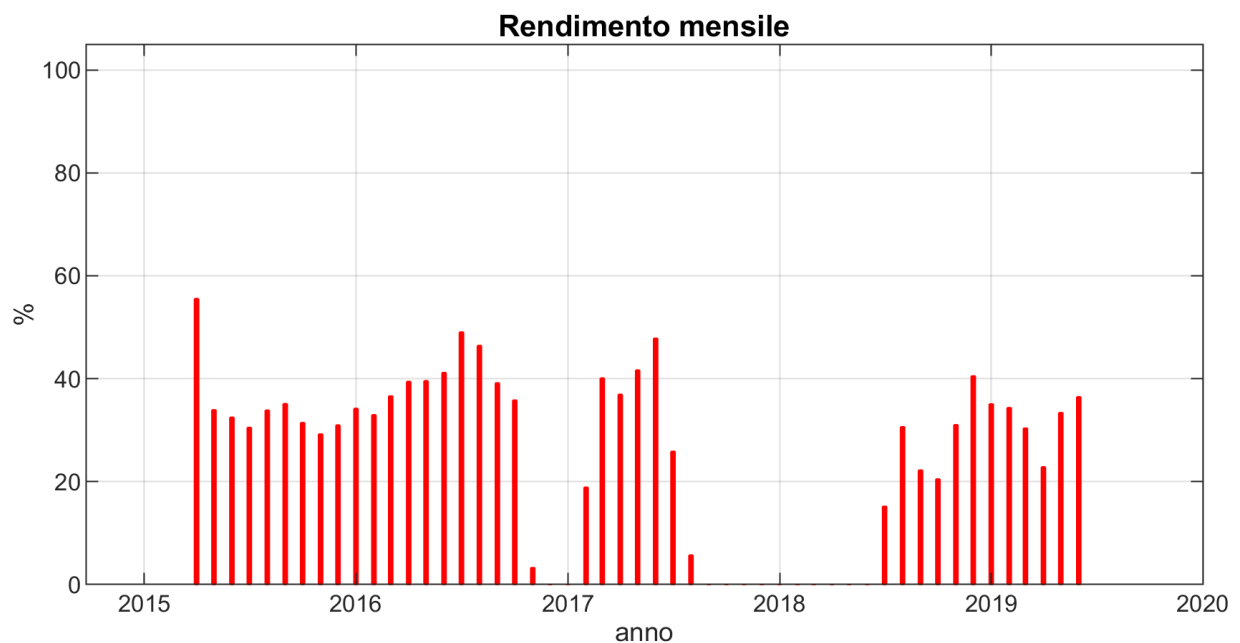


Figura 19 - Rendimento mensile dell'ondametro OGS-DWRG3 da Aprile 2015 a Giugno 2019.

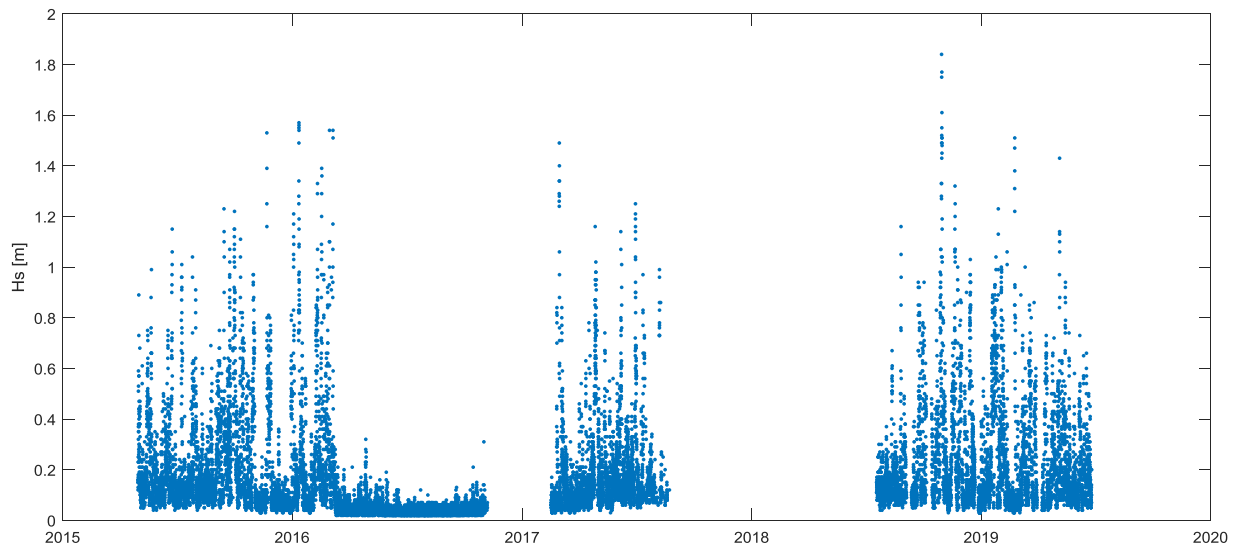


Figura 20 - Altezza d'onda significativa osservata dalla boa ondometrica OGS-DWRG3 periodo Aprile 2015 - Giugno 2019

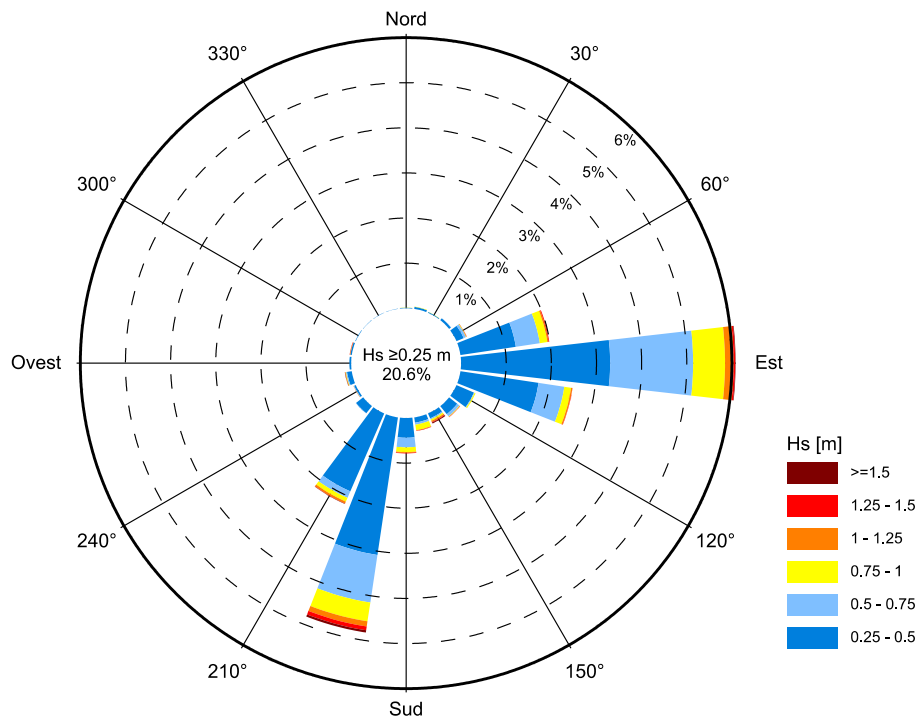


Figura 21 - Ondametro OGS-DWRG3. Distribuzione direzionale degli stati di mare con  $H_s > 0.25$  m.

## 7 EVENTI ESTREMI DI MOTO ONDOSI

### 7.1 METODOLOGIA

Come indicato nel capitolo 3 paragrafo 3.2 per ricostruire le condizioni di moto ondoso estreme a largo del Porto di Monfalcone si è applicato il codice SWAN per ognuno dei due settori di traversia selezionati (vedi Figura 5), ovvero per il Settore A (moto ondoso generato nel Golfo di Trieste) e per il Settore B (moto ondoso generato all'esterno del Golfo di Trieste).

Per definire le condizioni di moto ondoso per ambedue i settori il modello SWAN è stato "forzato" con velocità del vento estreme di prefissato tempo di ritorno. Per tale ragione è risultato necessario stabilire preventivamente per le due serie storiche di vento (vento NOAA e vento RMN di Trieste) la correlazione velocità del vento – tempo di ritorno.

L'analisi statistica dei valori estremi delle due serie storiche di vento è stata eseguita utilizzando l'approccio di seguito descritto.

Per quanto riguarda il modello probabilistico per i dati selezionati (estraendo il valore massimo di velocità del vento da ogni evento mediante il metodo POT), le leggi adottate di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento (funzione di ripartizione) sono quella di Weibull:

$$P(X \leq x) = 1 - e^{-\left[\frac{(x-B)}{A}\right]^\alpha}$$

in cui  $X$  è la variabile aleatoria,  $x$  il valore di non superamento mentre  $A$ ,  $B$  sono i parametri della distribuzione e  $\alpha$  è il parametro di forma della distribuzione scelto, e la legge di Gumbel (1988):

$$P(X \leq x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-b}{a}\right)\right]$$

dove  $a$  e  $b$  sono i parametri della distribuzione.

La valutazione dei parametri della distribuzione richiede la preliminare stima della frequenza campionaria dei dati. Per fare questo il campione dei dati viene ordinato in senso decrescente e per ogni  $m$ -esimo evento viene calcolata la frequenza campionaria di non superamento utilizzando la formula:

$$\hat{F}_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}, m = 1, 2, \dots, N$$

Una volta ottenuta la funzione di probabilità di non superamento è stato possibile valutare il corrispondente valore al colmo dell'evento estremo corrispondente ad un tempo di ritorno assegnato.

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

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

si possono stimare i valori delle velocità del vento o dell'altezza d'onda associati a diversi tempi di ritorno.

## 7.2 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DI VENTO

Applicando il metodo POT e utilizzando la soglia di 30 nodi, sono stati individuati gli eventi di riferimento con un valore massimo della velocità del vento pari a 57.8 nodi per i dati RMN di Trieste e pari a 44.2 nodi per i dati NOAA.

Il campione di eventi selezionato per le due serie storiche di dati è stato analizzato statisticamente e i risultati sono riportati in forma grafica nella Figura 22 e nella Figura 23 le quali riportano rispettivamente per il Settore A e per il Settore B la correlazione tra i valori della velocità del vento e il tempo di ritorno.

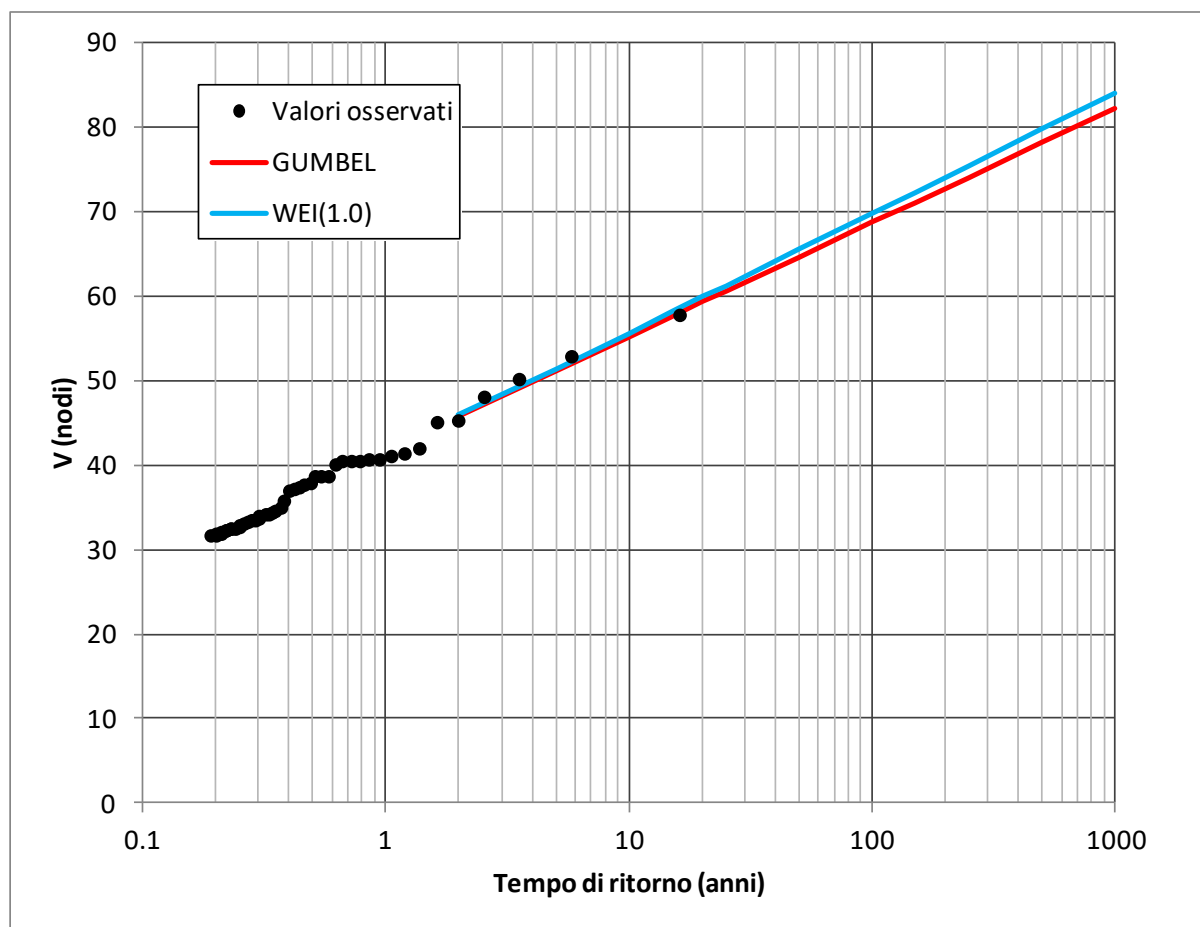


Figura 22 - Analisi statistica degli eventi estremi Settore A 30-190°N. (Dati stazione RMN Trieste).

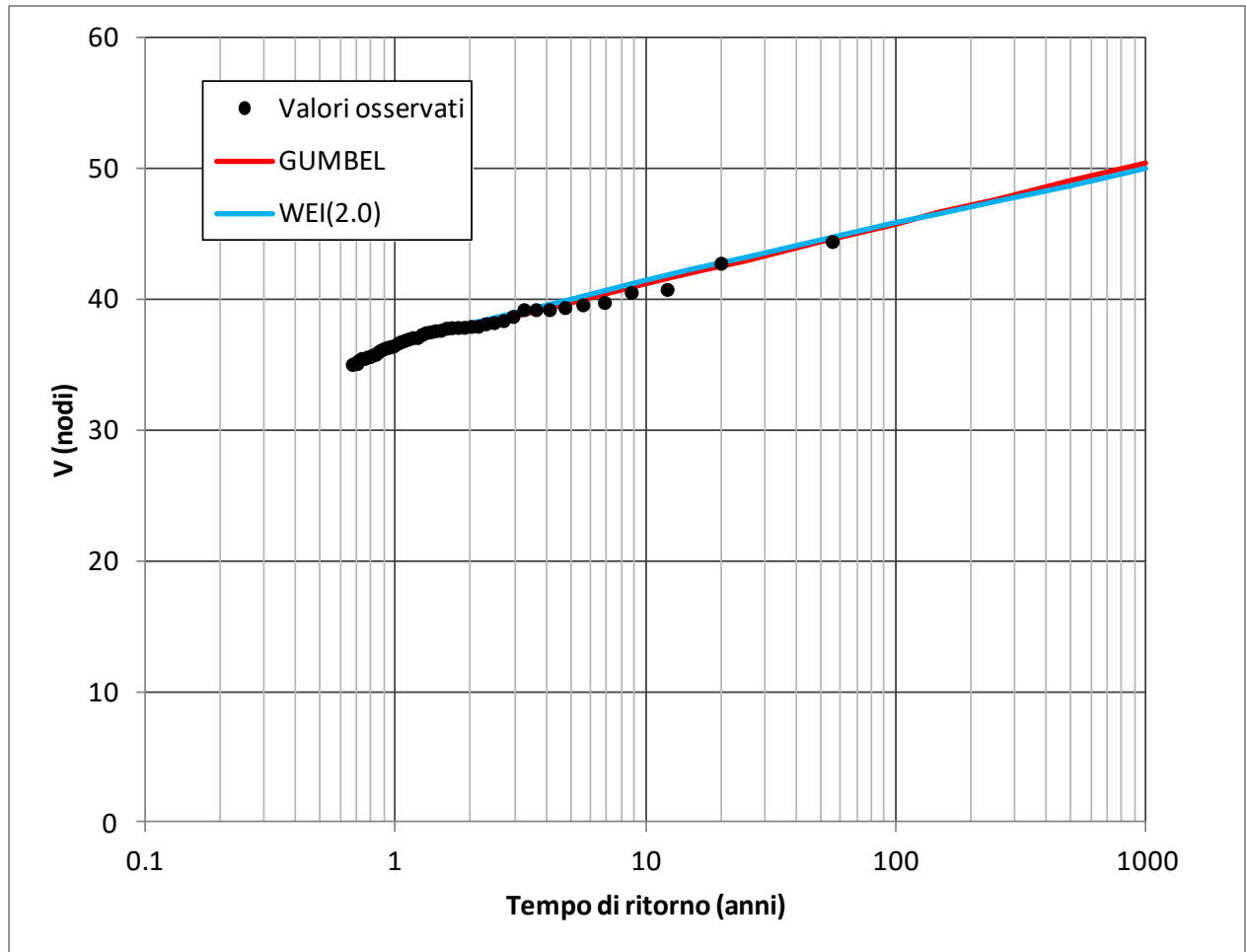


Figura 23 - Analisi statistica degli eventi estremi Settore B 190-250°N. (Dati NOAA).

### 7.3 SETTORE DI TRAVERSIA A

La ricostruzione delle onde estreme è stata eseguita mediante l'applicazione del codice SWAN in condizioni stazionarie, coprendo con la griglia di calcolo (vedi Figura 26) l'intera area di generazione compresa tra Monfalcone, Trieste e la costa dell'Istria.

Le condizioni di moto ondoso imposte come forzante al codice di calcolo relative ai tempi di ritorno pari a 1, 10 e 100 anni sono state derivate dal diagramma di Figura 22. Per ogni tempo di ritorno si sono esaminate 4 direzioni del vento incentrate sulle direzioni 45°N, 90°N, 135°N e 180°N.

In totale quindi sono state eseguite 12 simulazioni con il modello SWAN.

### 7.4 SETTORE DI TRAVERSIA B

La ricostruzione delle onde estreme è stata eseguita mediante l'applicazione del codice SWAN che è stato applicato in condizioni stazionarie coprendo con la griglia di calcolo l'intero Golfo di Trieste (vedi Figura 26). Il confine SW "aperto" della griglia di calcolo, è stato posto in corrispondenza della retta congiungente Punta Salvore (Salvudrija) in Croazia e Grado.

Per ogni stato di mare simulato, caratterizzato da uno specifico tempo di ritorno (1, 10 e 100 anni) si sono imposte due condizioni al contorno al modello SWAN:

- moto ondoso in ingresso lungo il confine SW della griglia di calcolo;
- velocità del vento uniforme sull'intera griglia di calcolo.

Per quanto riguarda il moto ondoso in ingresso nel modello, la serie storica di moto ondoso ricostruita mediante l'applicazione del codice ALTAIR come descritto in precedenza, è stata analizzata statisticamente applicando il metodo POT per selezionare le altezze d'onda  $H_s$  al culmine degli eventi di moto ondoso ricostruiti. Nel diagramma polare di Figura 24 sono riportati i valori al culmine degli eventi di moto ondoso relativi al settore B compreso tra 200 e 230°N. La correlazione statistica  $H_s$  – tempo di ritorno ottenuta è riportata nella Figura 25. Da tale figura sono stati estratti i valori di  $H_s$  corrispondenti ai tempi di ritorno pari a 1, 10 e 100 anni che hanno costituito le condizioni al contorno lungo il confine SW per l'applicazione del codice SWAN.

I corrispondenti valori di velocità del vento da utilizzare per le simulazioni sono stati ottenuti dal diagramma di Figura 23.

Il codice SWAN è stato quindi applicato attribuendo per ciascuno stato di mare imposto lungo il confine SW la direzione di provenienza 215°N.

Per quanto riguarda la direzione di azione del vento, assunto di intensità e direzione costante sull'intera area di generazione, si è tenuto conto della deviazione tra le direzioni del vento e del moto ondoso analizzate in precedenza.



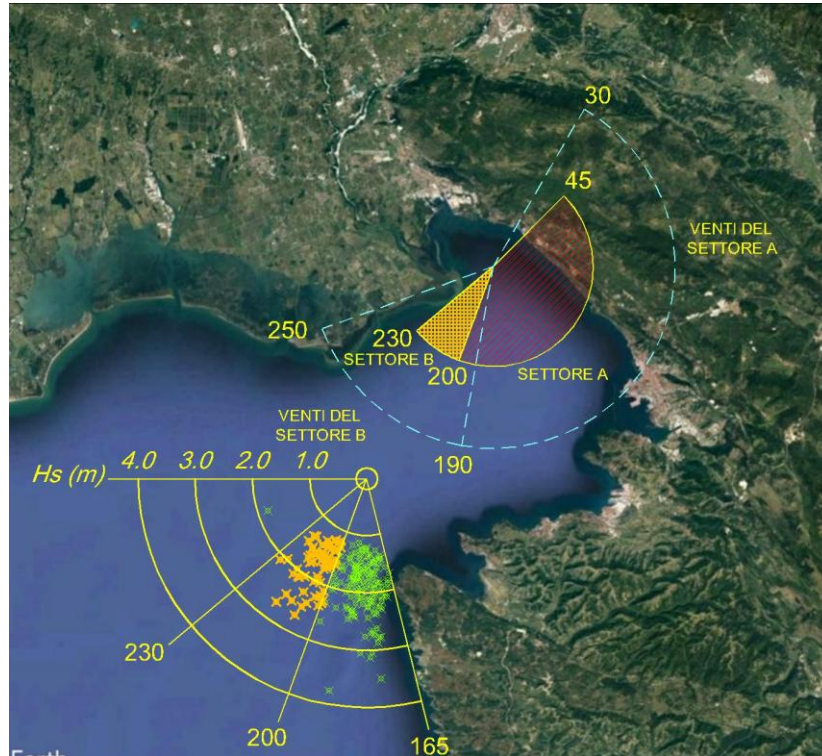


Figura 24 - Diagramma dei valori al colmo dell'altezza d'onda significativa degli eventi estremi del moto ondoso ricostruito al largo del golfo di Trieste (confine Sud-Ovest della griglia di calcolo del modello SWAN).

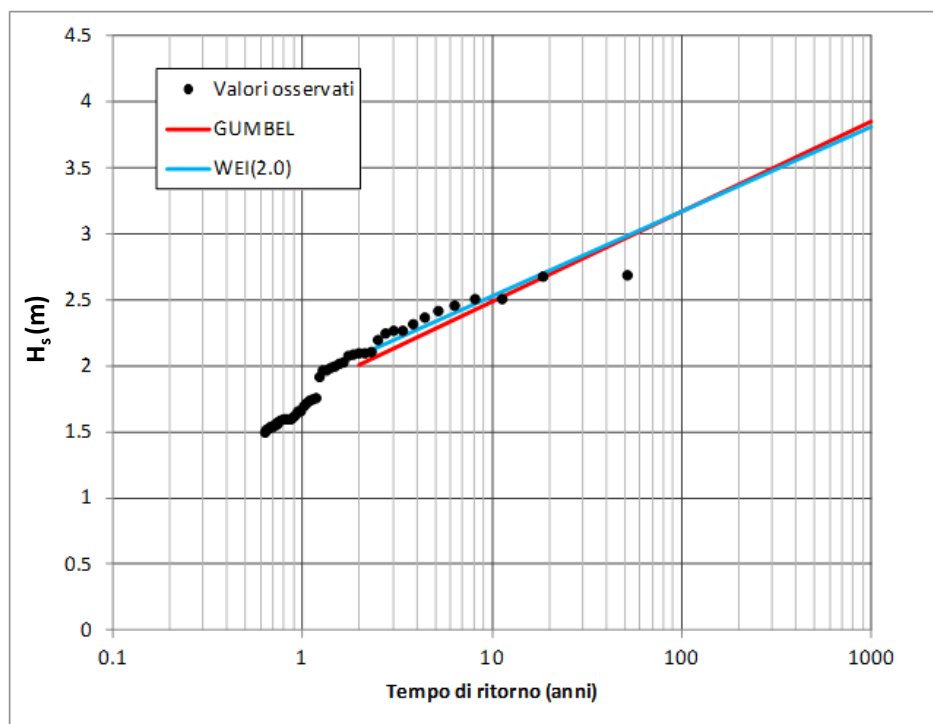


Figura 25 - Analisi statistica degli eventi estremi (settoe 200-230°N) del moto ondoso ricostruito al largo del golfo di Trieste (confine Sud-Ovest della griglia di calcolo del modello SWAN).

## 7.5 RISULTATI

La ricostruzione degli eventi estremi di moto ondoso è stata eseguita in relazione ai due settori direzionali A e B individuati in precedenza i quali tengono conto sia delle onde direttamente generate nel Golfo di Trieste (settore A) sia delle onde generate in Nord Adriatico (Settore B) che si propagano nel Golfo di Trieste.

La ricostruzione è stata eseguita facendo riferimento alle condizioni al contorno riportate nella Tabella 15 nell'area di calcolo rappresentata nella Figura 26. L'area di calcolo, dimensioni pari a 35.000x30.000 m, racchiude interamente il golfo di Trieste ed è orientata secondo l'asse NO-SE.

Nel prossimo paragrafo sono riportati i risultati delle simulazioni eseguite dalle quali si evince la distribuzione spaziale dell'altezza d'onda e della sua direzione in funzione delle varie condizioni al contorno.

Dalle simulazioni emergono i seguenti aspetti:

- gli stati di mare generati in Adriatico al di fuori del golfo sono schermati da Punta Sdobba;
- gli stati di mare generati dai venti di Grecale risultano modesti per effetto dei fetch limitati;
- i venti da Levante a Mezzogiorno sono quelli che determinano le maggiori altezze d'onda e investono l'area portuale.

I risultati ottenuti in termini di Hs al variare della direzione di provenienza del moto ondoso, sono rappresentati per i punti P1, P2, e P3 (vedi Figura 27) nella Figura 28, nella Figura 29 e nella Figura 30.

<b>SETTORE A</b>			
TR (anni)	V (nodi)	V (m/s)	Dir (°N)
1	41	21.1	45
1	41	21.1	90
1	41	21.1	135
1	41	21.1	180
10	55	28.3	45
10	55	28.3	90
10	55	28.3	135
10	55	28.3	180
100	69	35.5	45
100	69	35.5	90
100	69	35.5	135
100	69	35.5	180
<b>SETTORE B</b>			
TR (anni)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
1	1.75	4.72	215
10	2.5	5.60	215
100	3.25	6.36	215

Tabella 15 – Condizioni simulate con il modello SWAN

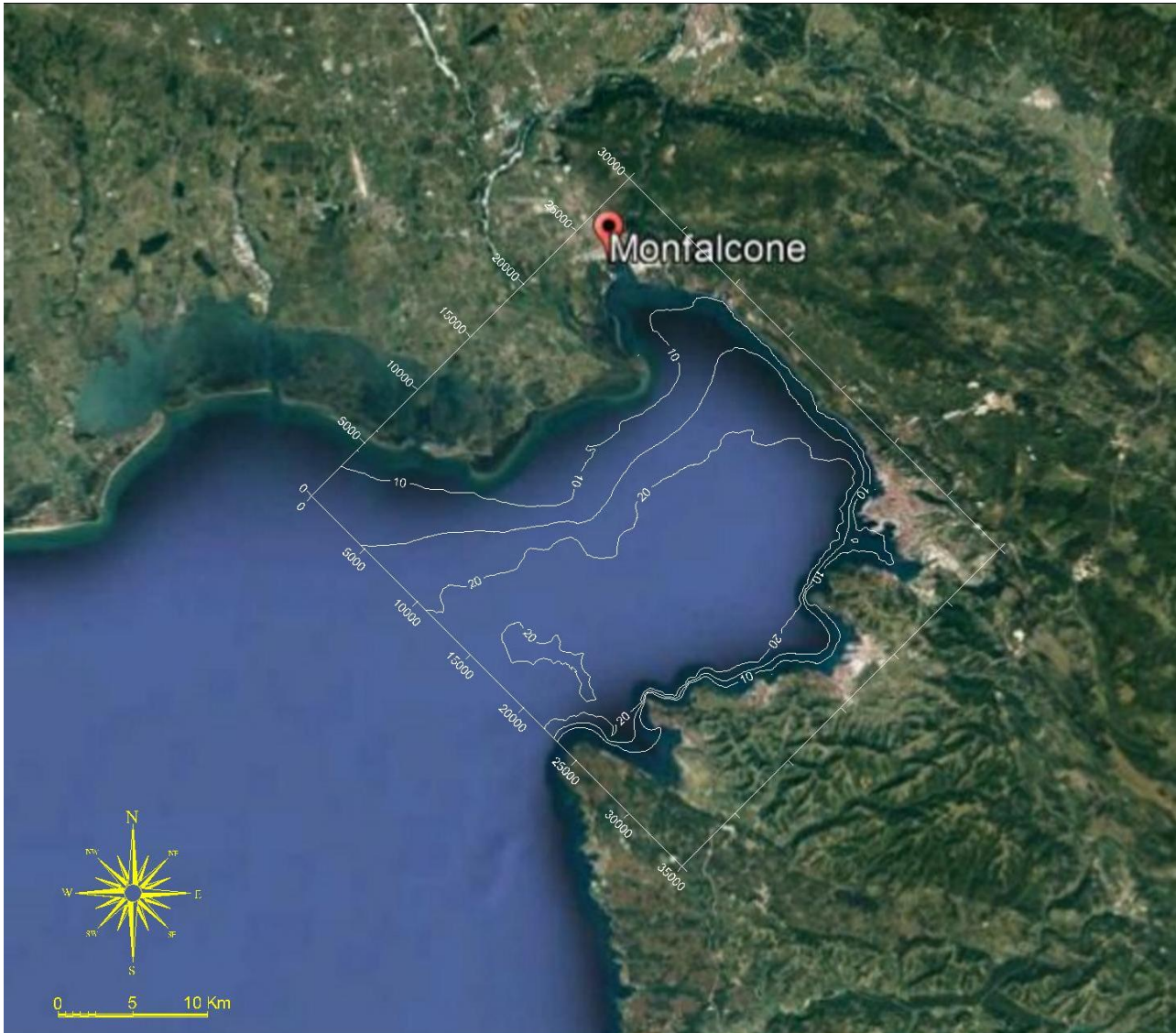


Figura 26 – Griglia di calcolo utilizzata per l'applicazione del modello numerico SWAN

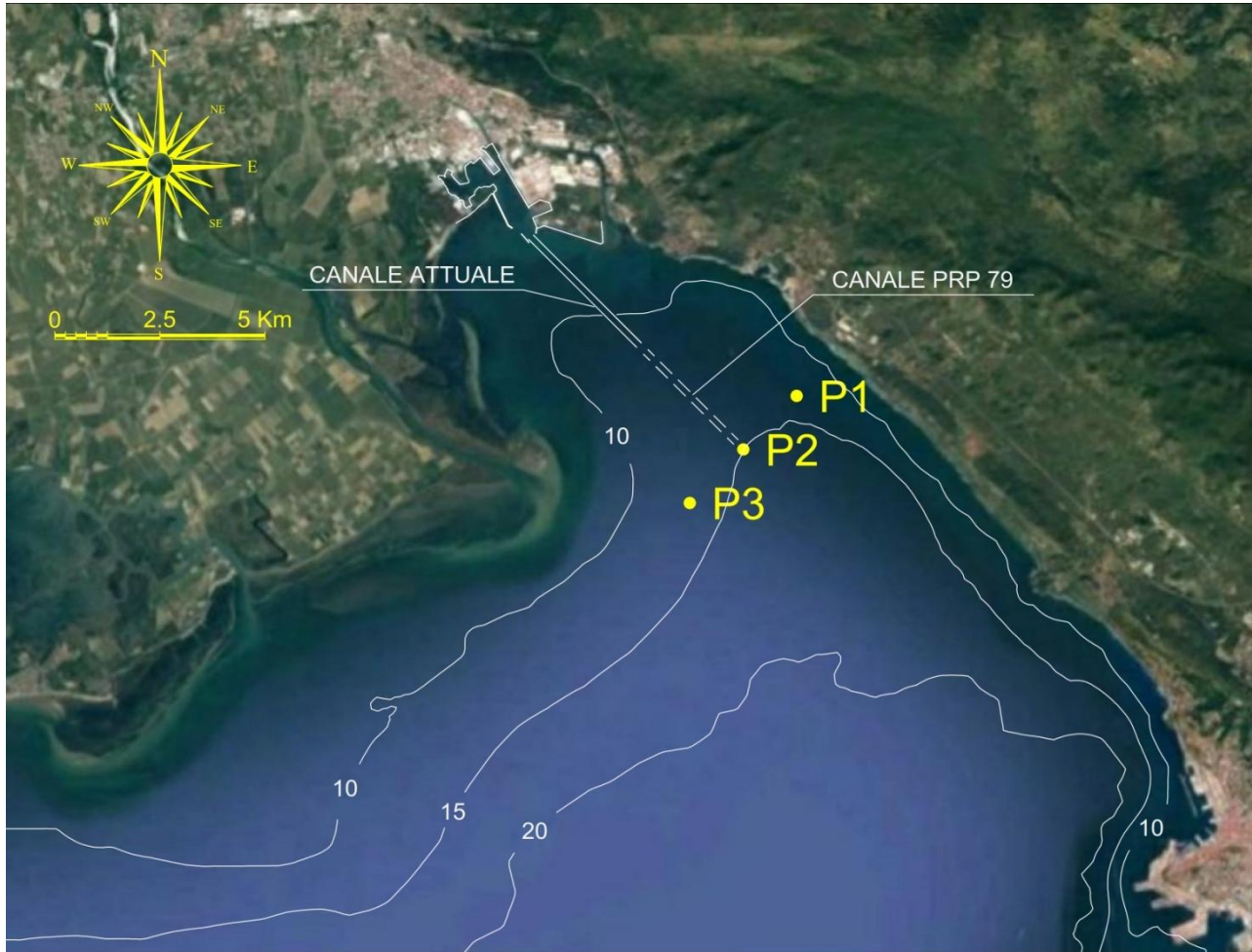


Figura 27 – Ubicazione dei tre punti al largo del porto per i quali sono state estratte le caratteristiche del moto ondoso

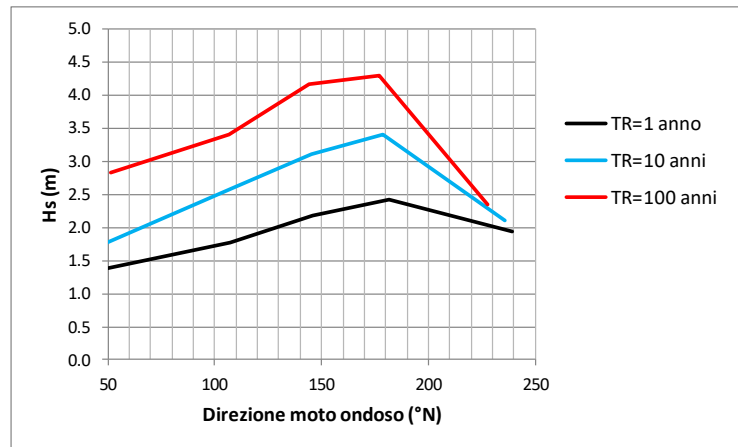


Figura 28 - Altezze d'onda significative in funzione della direzione di provenienza al variare del tempo di ritorno nel punto P1

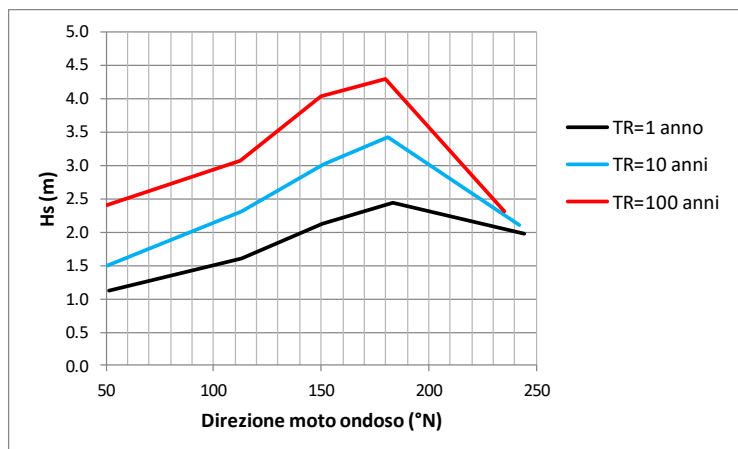


Figura 29 - Altezze d'onda significative in funzione della direzione di provenienza al variare del tempo di ritorno nel punto P2

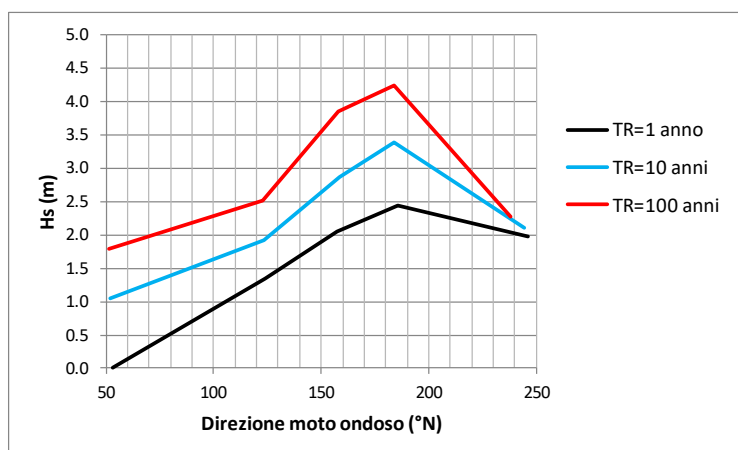


Figura 30 - Altezze d'onda significative in funzione della direzione di provenienza al variare del tempo di ritorno nel punto P3

## 7.6 CAMPI DI MOTO ONDO SO CALCOLATI CON IL MODELLO SWAN

Il modello matematico bidimensionale di rifrazione diretta spettrale di tipo euleriano SWAN (sviluppato dal Delft University of Technology) che consente di valutare gli effetti indotti sia dai fenomeni generativi delle onde dovute all'azione del vento, sia dai fenomeni dissipativi (attrito sul fondo e frangimento in acqua profonda ed in acqua bassa) nella propagazione da largo verso riva.

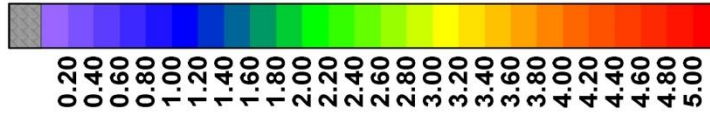
Il modello è in grado di simulare sia perdite di energia subite dalle onde in propagazione sia la generazione del moto ondo so ad opera del vento ed i relativi trasferimenti non lineari di energia indotti anche dal frangimento in acqua profonda.

Nei paragrafi precedenti sono indicate le condizioni al contorno (v. Tabella 15) e la griglia di calcolo (v. Figura 26) utilizzate per il calcolo dei campi di moto ondo so riportati nel seguito.

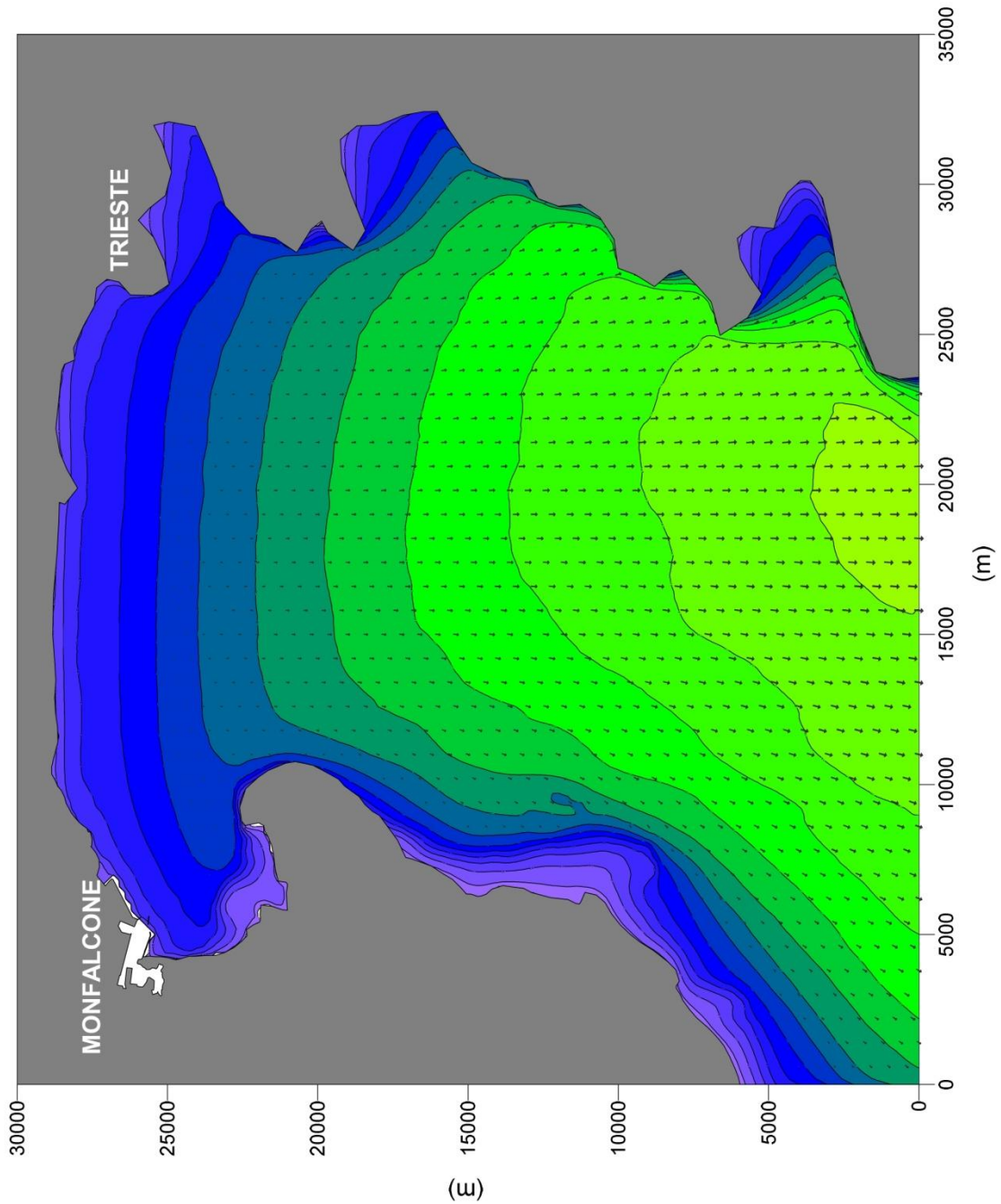
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



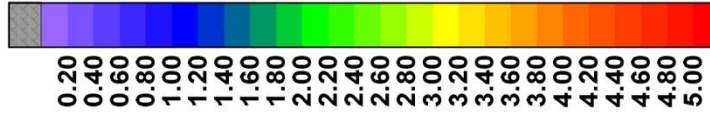
Evento simulato:  
 { Tempo di ritorno = 1 anni  
 Velocità del vento = 41 nodi  
 Dir = 45° N



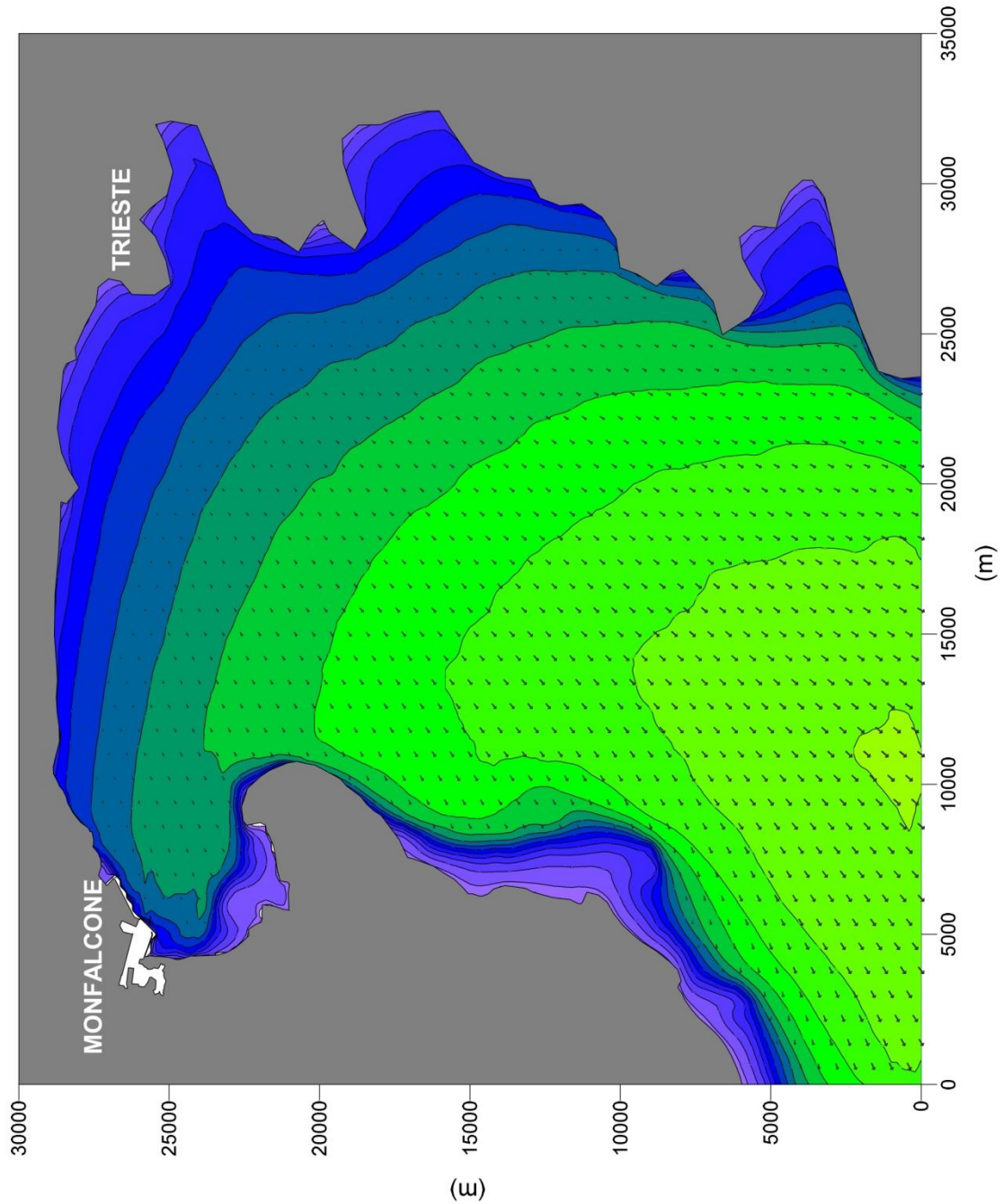
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



Evento simulato:  
{ Tempo di ritorno = 1 anni  
Velocità del vento = 41 nodi  
Dir = 90° N

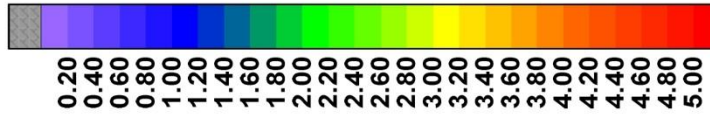




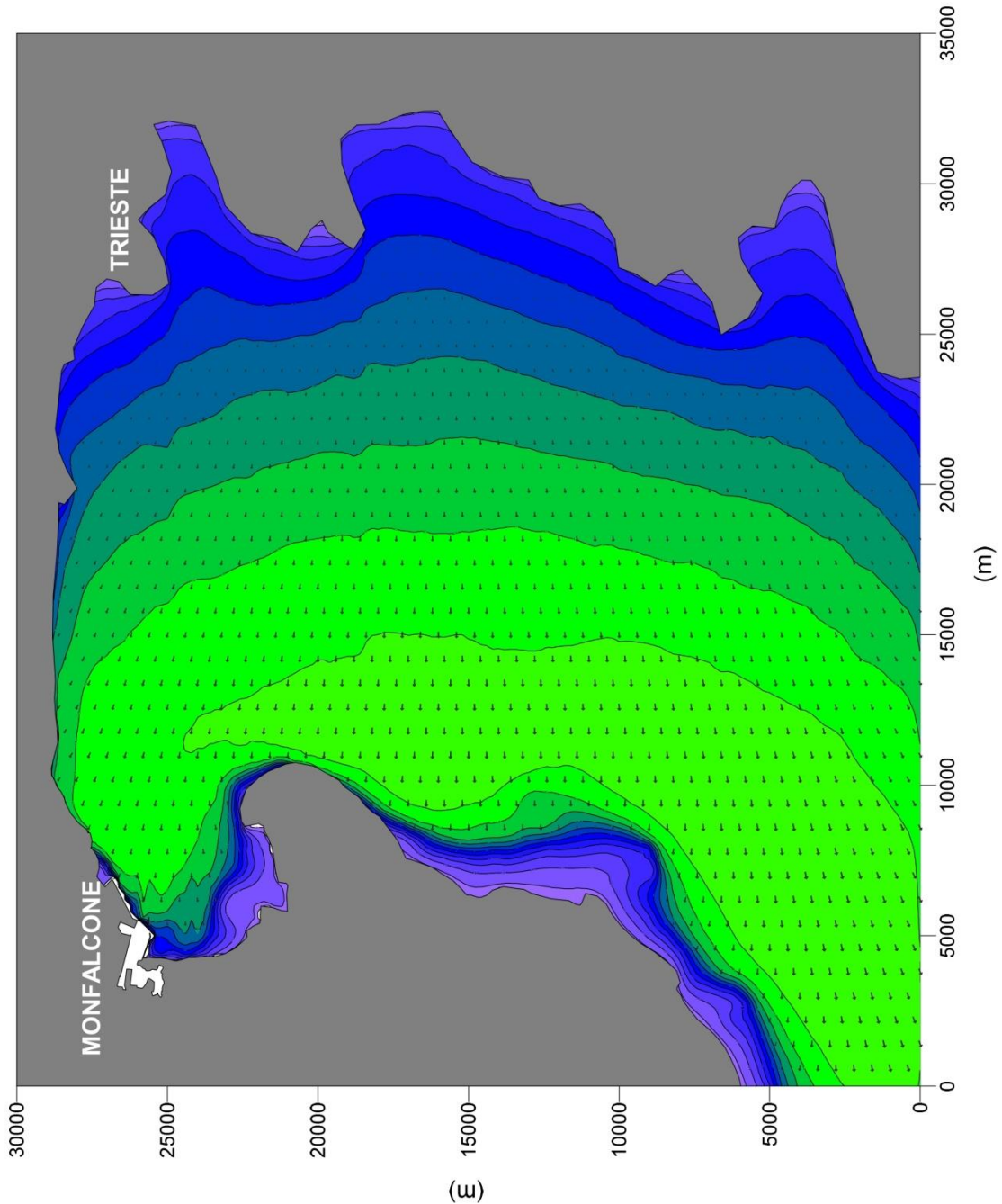
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



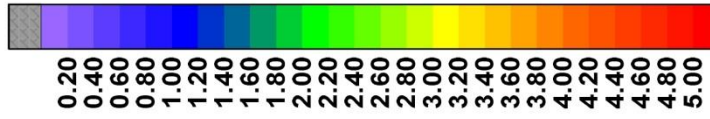
Evento simulato:  
 { Tempo di ritorno = 1 anni  
 { Velocità del vento = 41 nodi  
 { Dir = 135° N



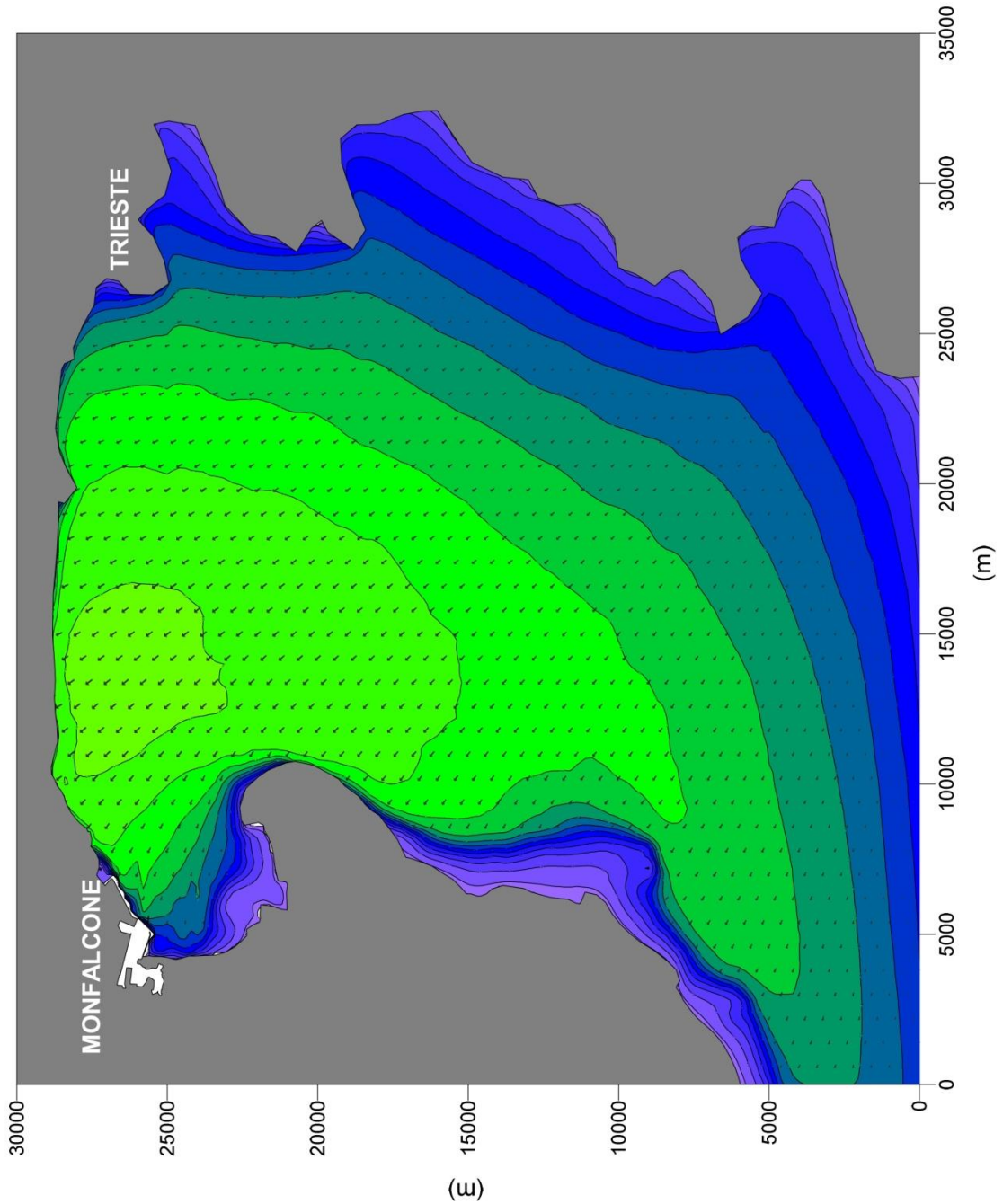
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



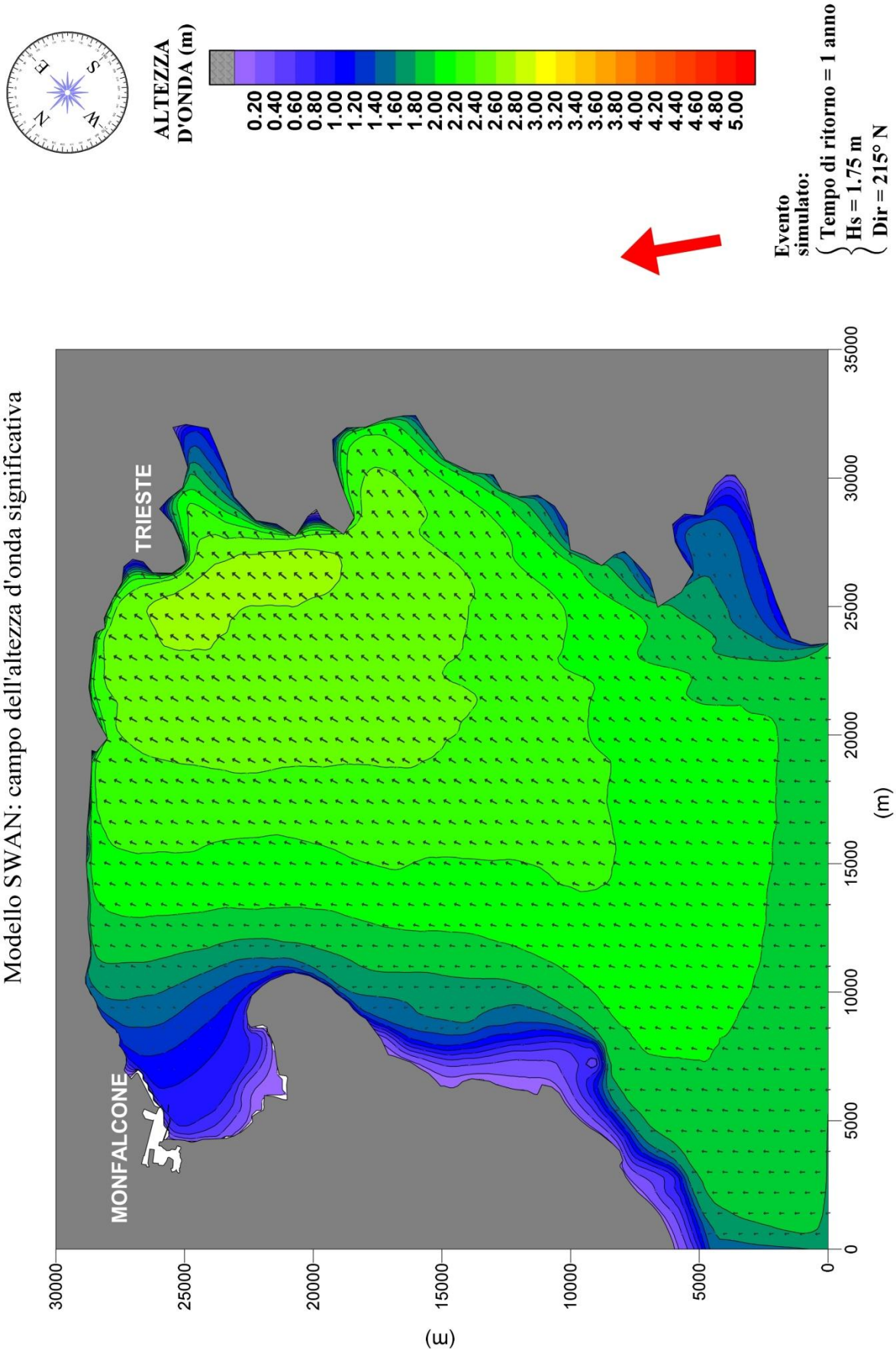
ALTEZZA  
D'ONDA (m)



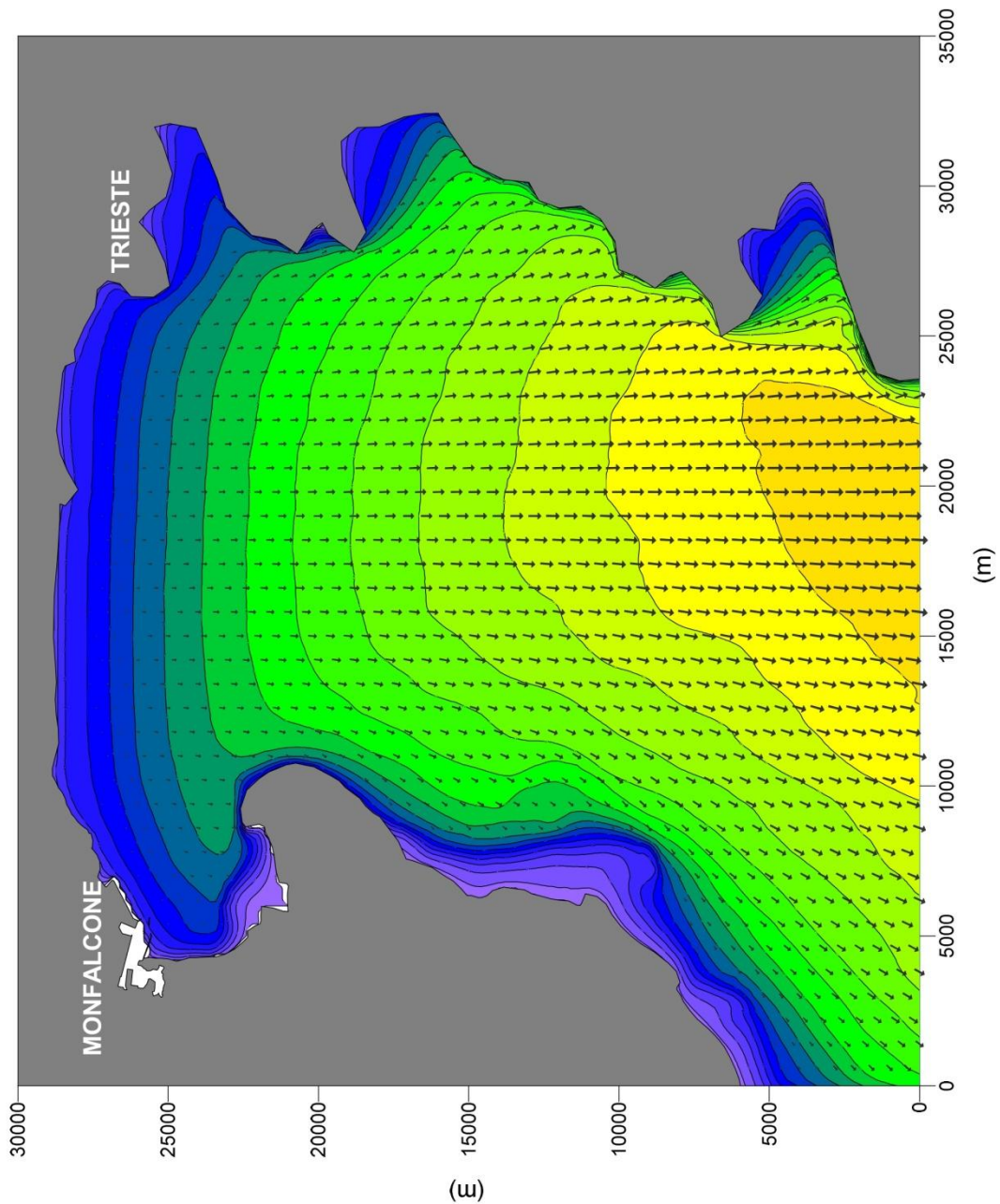
Evento simulato:  
 { Tempo di ritorno = 1 anni  
 { Velocità del vento = 41 nodi  
 { Dir = 180° N



**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



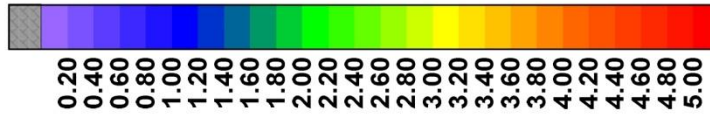
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



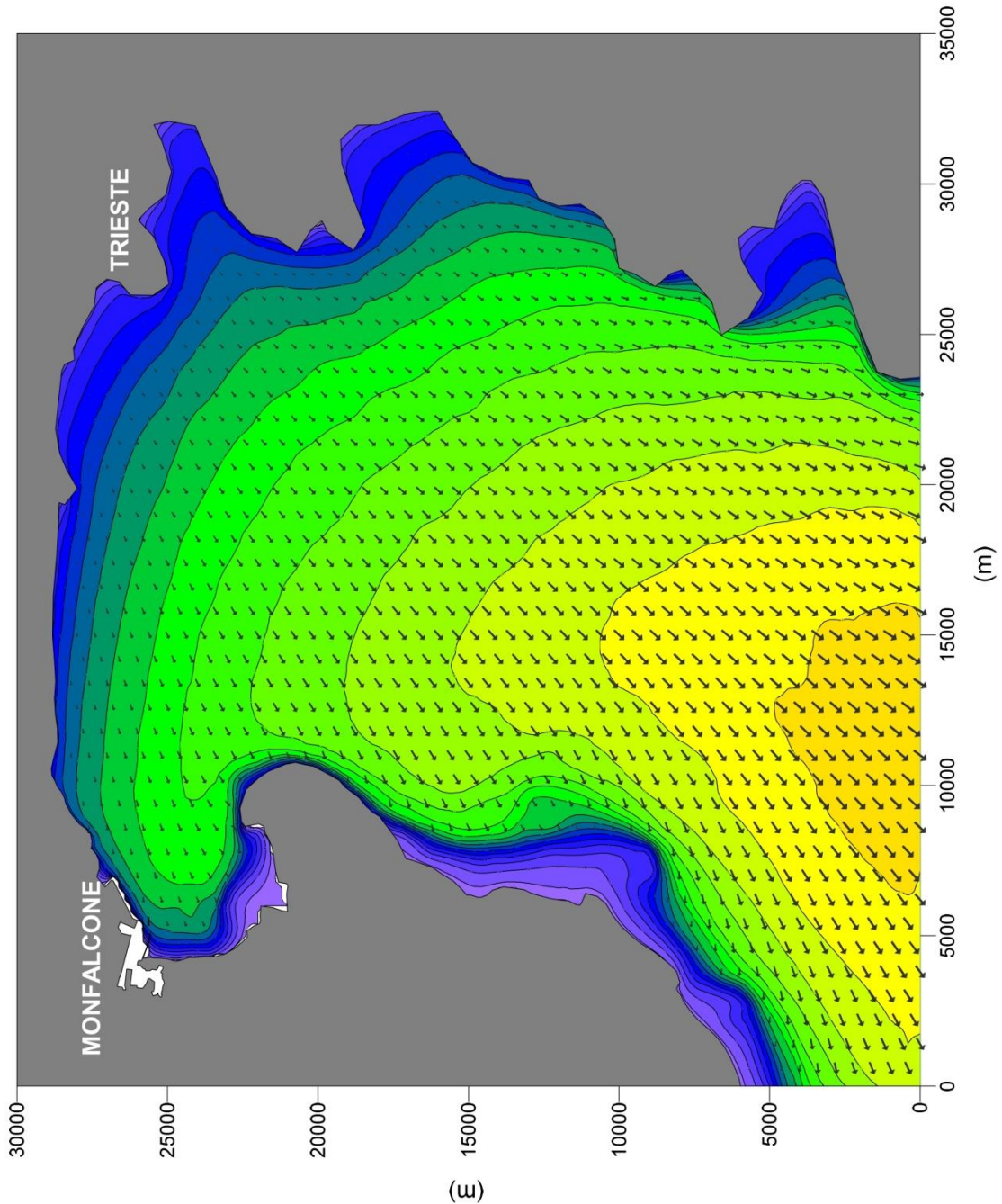
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



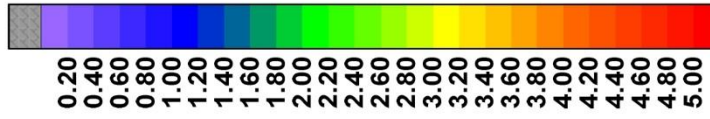
Evento simulato:  
{ Tempo di ritorno = 10 anni  
Velocità del vento = 55 nodi  
Dir = 90° N



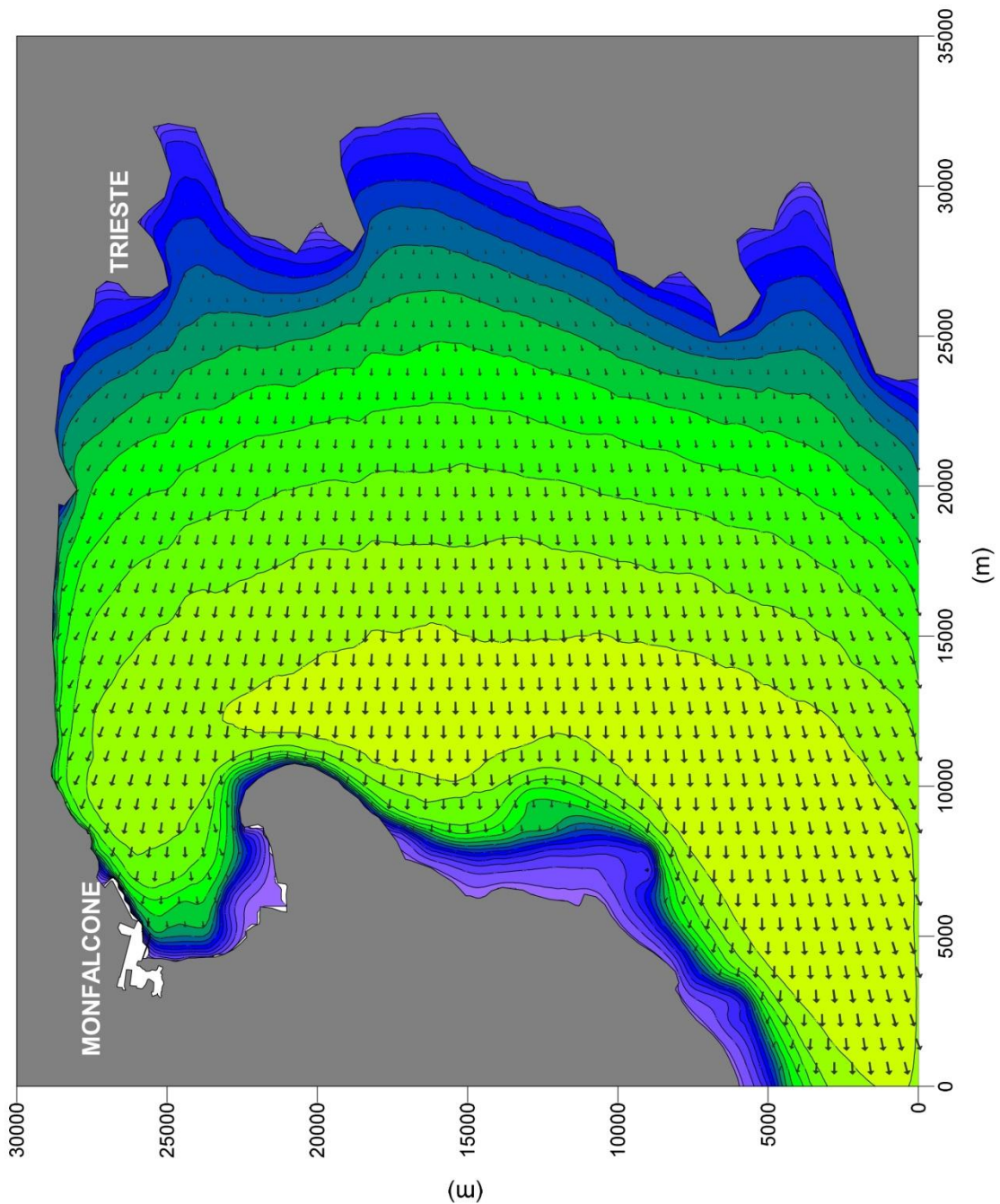
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



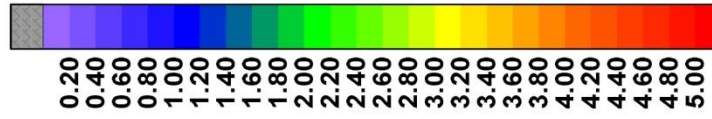
Evento simulato:  
{ Tempo di ritorno = 10 anni  
Velocità del vento = 55 nodi  
Dir = 135° N



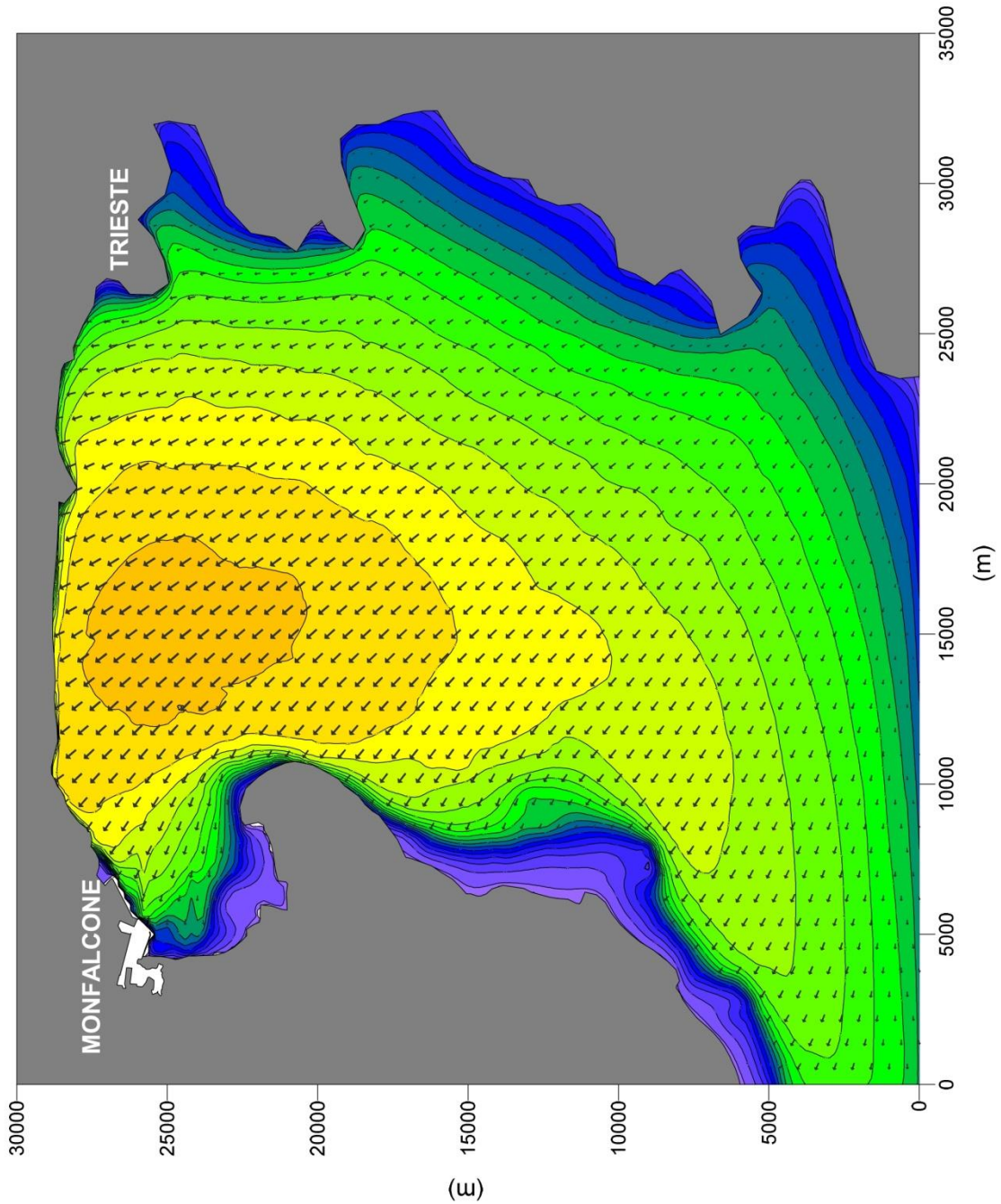
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



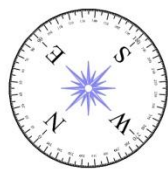
ALTEZZA  
D'ONDA (m)



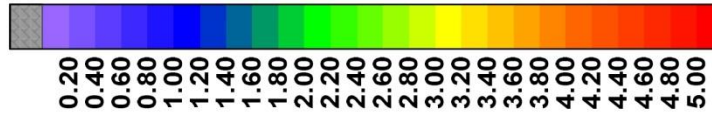
Evento simulato:  
{ Tempo di ritorno = 10 anni  
  Velocità del vento = 55 nodi  
  Dir = 180° N



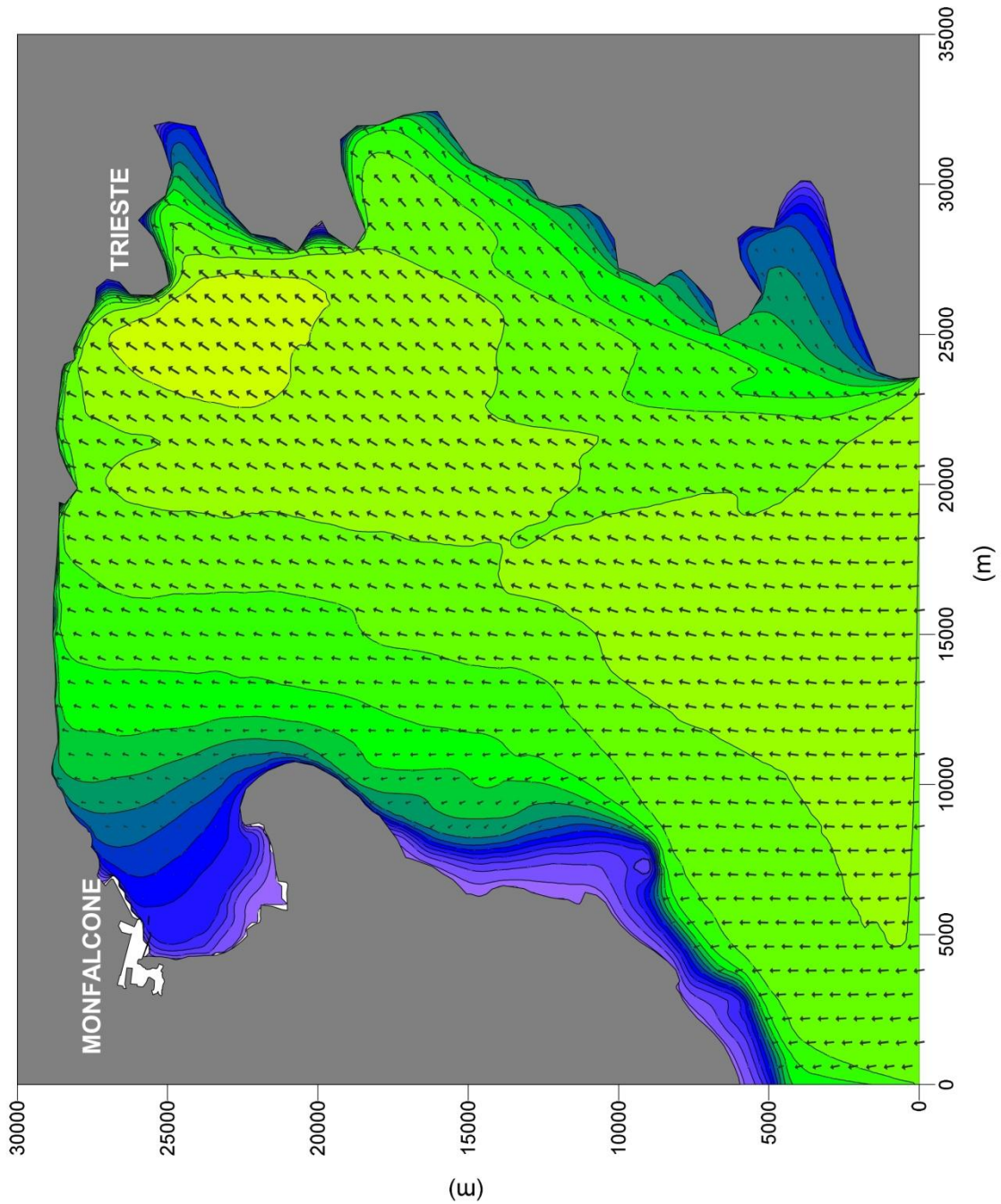
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)

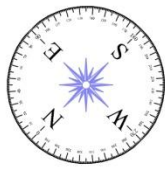


Evento simulato:  
 { Tempo di ritorno = 10 anni  
 Hs = 2.50 m  
 Dir = 215° N

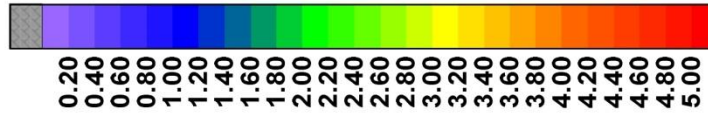




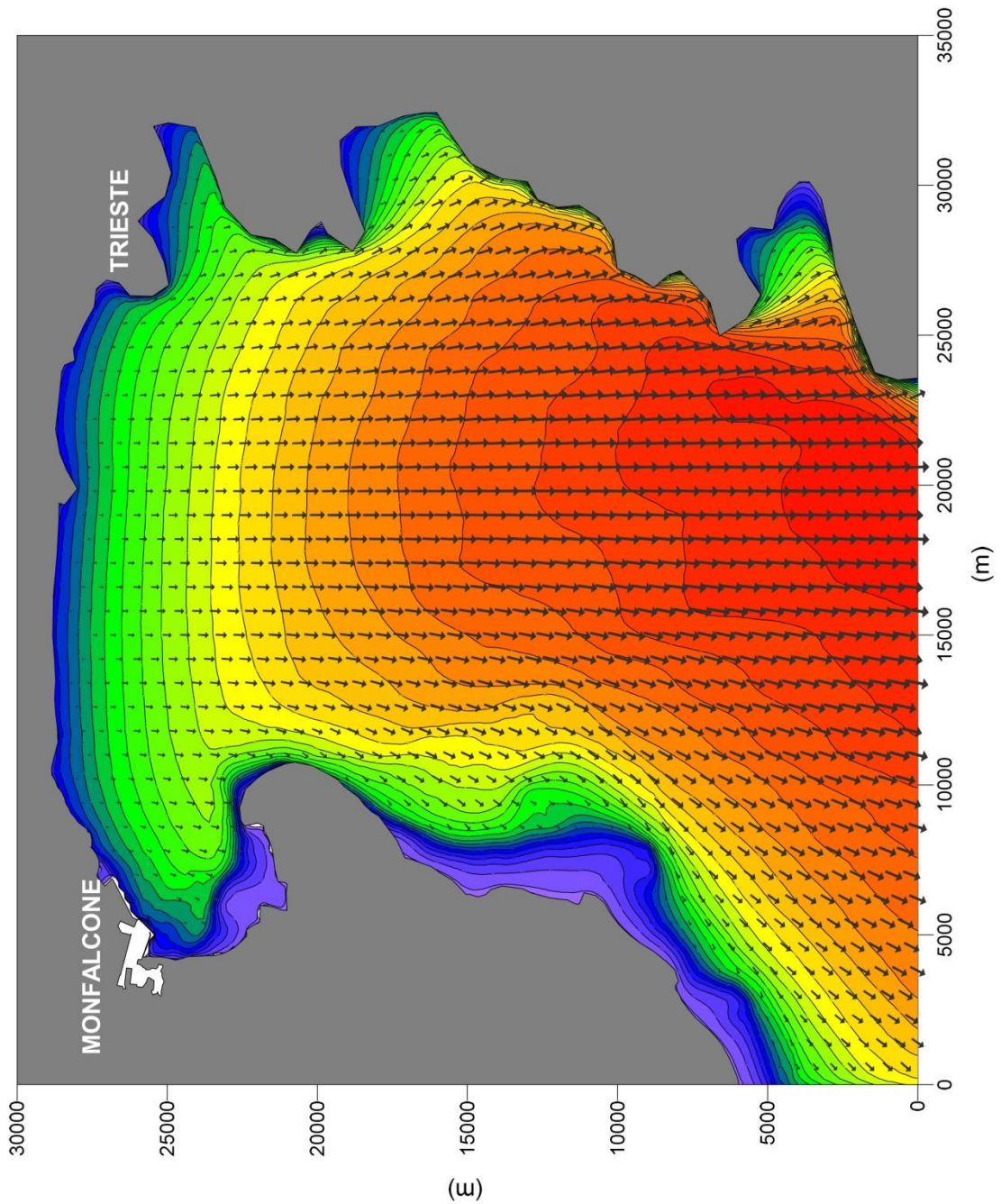
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



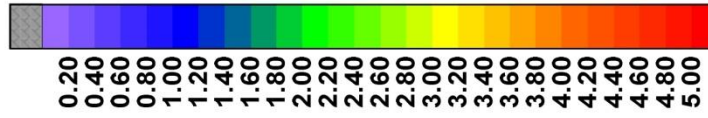
Evento simulato:  
(  
  Tempo di ritorno = 100 anni  
  Velocità del vento = 69 nodi  
  Dir = 45° N



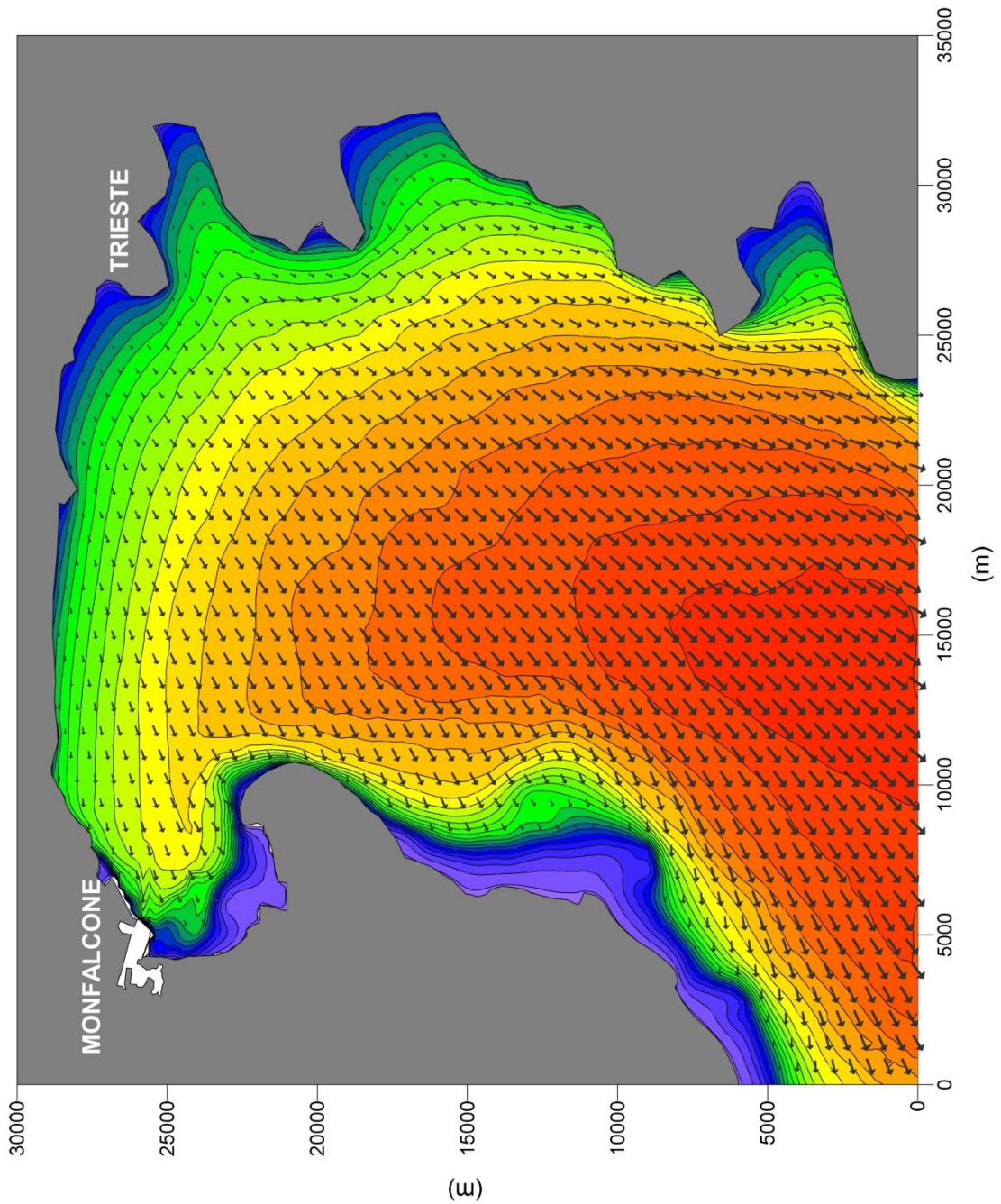
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



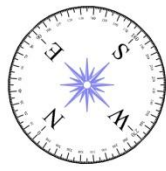
ALTEZZA  
D'ONDA (m)



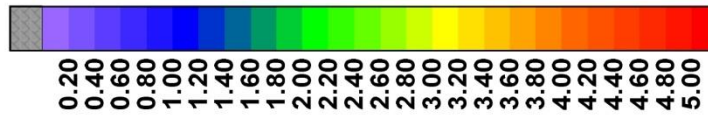
Evento simulato:  
{ Tempo di ritorno = 100 anni  
Velocità del vento = 69 nodi  
Dir = 90° N



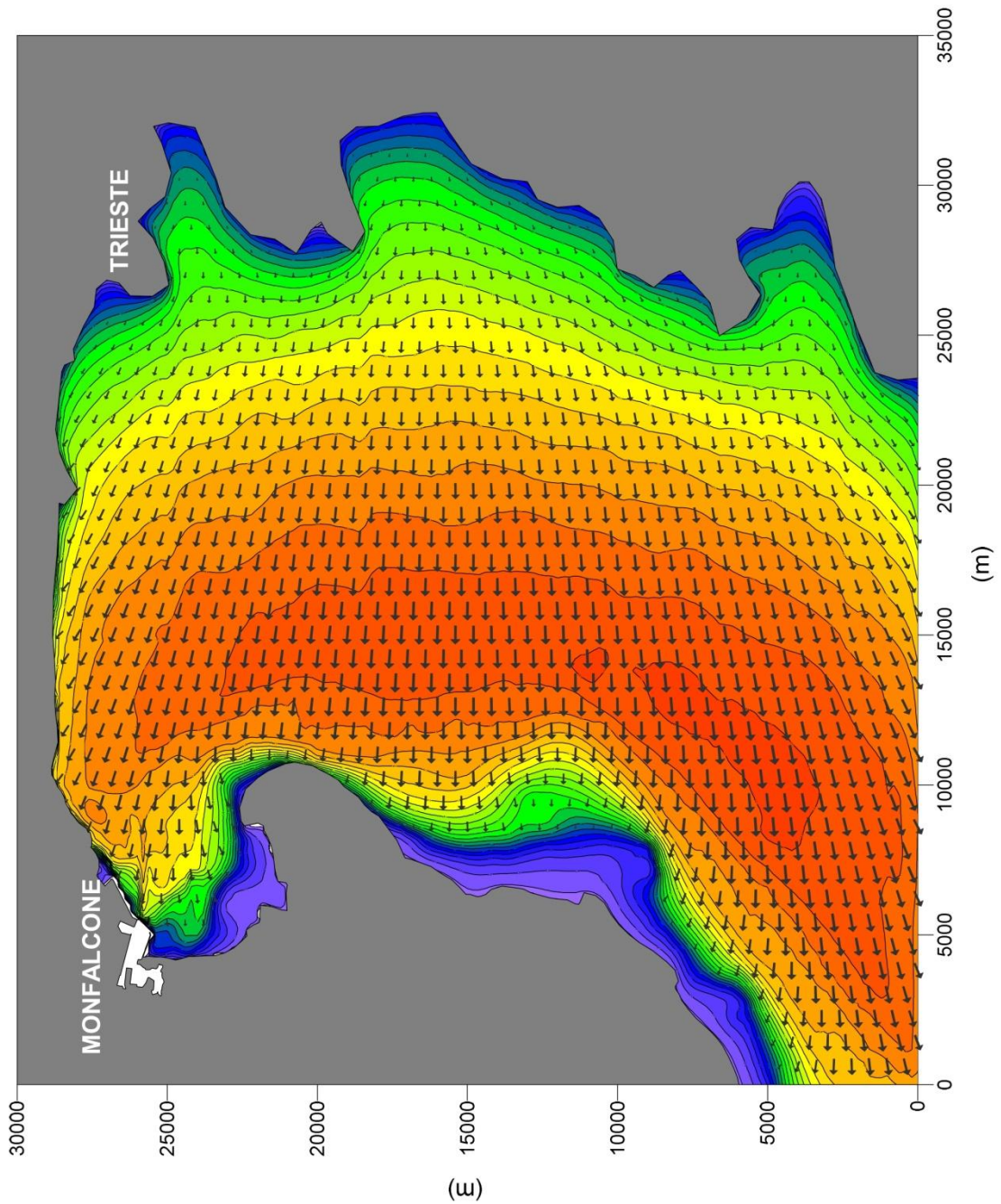
**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)

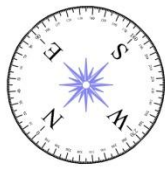


Evento simulato:  
(  
  Tempo di ritorno = 100 anni  
  Velocità del vento = 69 nodi  
  Dir = 135° N

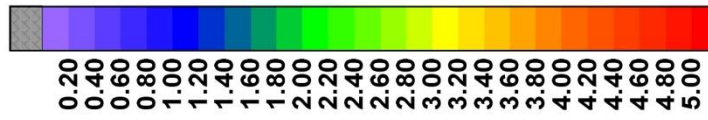


**GOLFO DI TRIESTE**

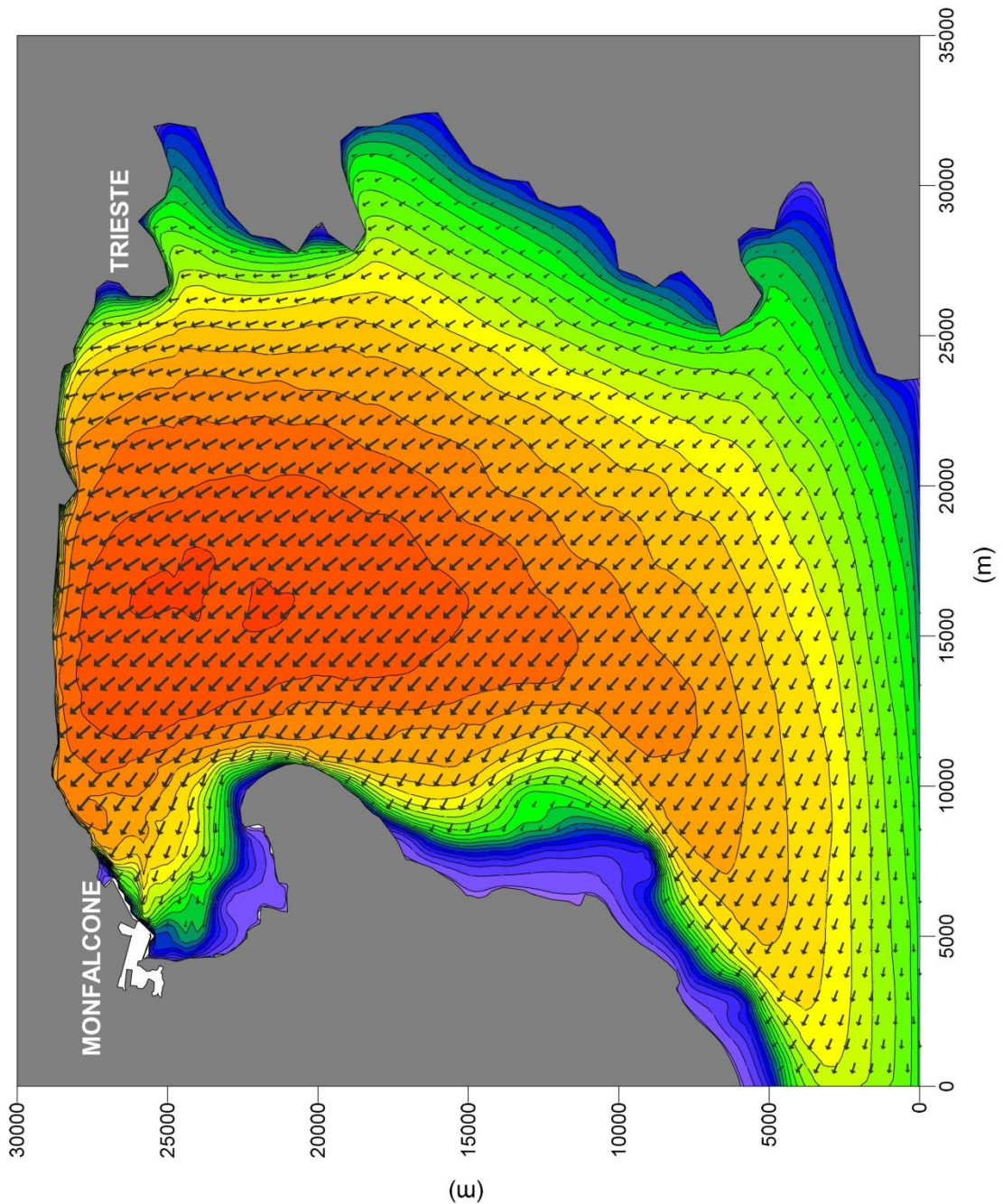
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



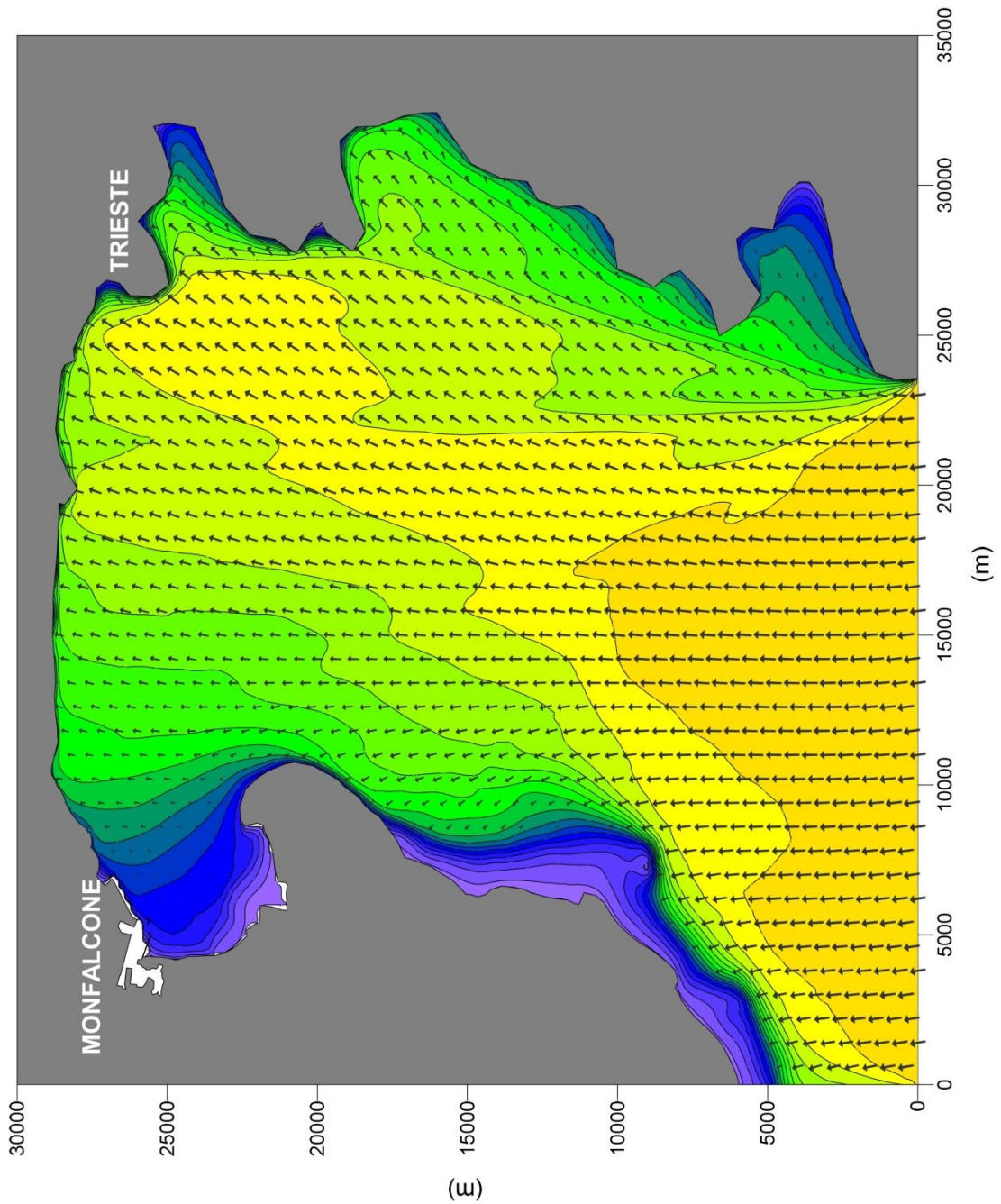
ALTEZZA  
D'ONDA (m)



Evento simulato:  
{ Tempo di ritorno = 100 anni  
{ Velocità del vento = 69 nodi  
{ Dir = 180° N



**GOLFO DI TRIESTE**  
Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



## 8 VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE

Le variazioni del livello del mare in prossimità della costa sono dovute a varie cause inquadrabili nei seguenti due fenomeni principali:

- **maree astronomiche:** variazioni del livello del mare dovute all'interazione tra le masse oceaniche e il campo gravitazionale degli astri posti in prossimità della terra tra i quali quelli della luna e del sole risultano i più importanti. Poiché si può assumere che i moti relativi degli astri e della terra e le loro periodicità siano note con ottima approssimazione, si può assumere che le maree astronomiche siano ricostruibili e prevedibili in senso deterministico;
- **maree meteorologiche:** variazioni del livello del mare dovute a perturbazioni atmosferiche. Poiché le variazioni atmosferiche non sono prevedibili in modo deterministico, queste variazioni si trattano in senso stocastico e quindi possono essere previste solo utilizzando approcci di tipo probabilistico. La componente meteorologica della marea è indotta essenzialmente da due fenomeni che si esplicano contemporaneamente: (i) l'effetto barometrico inverso e (ii) l'azione esercitata dal vento sulle masse oceaniche ("wind set-up"). In presenza di alte pressioni atmosferiche (aree anticicloniche) generalmente la velocità del vento è contenuta e prevale l'effetto barometrico inverso che dà luogo ad un abbassamento del livello del mare. Abbassamenti del livello del mare si possono verificare anche in presenza di venti sostenuti che spirano dalla terra verso il mare aperto. Invece, in presenza di aree cicloniche (perturbazioni atmosferiche), con vento che spira verso la costa, la componente meteorologica della marea dà luogo ad un aumento (sovrizzo) del livello del mare. Tale aumento è comunemente indicato con il termine sovrizzo di tempesta ("storm surge").

In generale il sovrizzo di tempesta che si verifica come detto per venti che spirano verso la costa, è fortemente influenzato dal quadrato della velocità del vento, dall'estensione della piattaforma continentale e dalla presenza di golfi e rade. Questo sovrizzo inoltre aumenta al diminuire della profondità.

All'interno della zona dei frangenti ai due fenomeni sopra descritti si aggiunge un terzo fenomeno che incrementa ulteriormente il sovrizzo di tempesta: il sovrizzo indotto dal moto ondoso frangente, denominato "wave set-up", che tende ad aumentare all'aumentare dell'altezza dell'onda frangente e al diminuire del fondale. Inoltre esso è fortemente influenzato dalla batimetria locale e dall'angolo formato tra la direzione delle onde e la costa, tendendo ad aumentare per attacchi di moto ondoso ortogonali alla linea di riva.

Il metodo migliore per valutare in una data località le maree (sia la componente astronomica che quella meteorologica) consiste nell'eseguire misure dirette del livello del mare, mediante opportune stazioni mareografiche le quali registrano le variazioni nel tempo del livello operando, di solito, un primo filtro sulle componenti in alta frequenza di variazione del livello indotte dal moto ondoso e/o dai natanti in transito mediante sistemi meccanici.

Acquisita la misura di livello sotto forma di serie storica, le maree astronomiche possono essere facilmente calcolate in quanto di esse sono note a priori i periodi e le fasi delle componenti armoniche nelle quali il segnale misurato può essere scomposto. Mediante opportune tecniche numeriche che operano sul segnale registrato, che include ambedue le componenti di marea, si ricostruisce dal segnale registrato l'ampiezza delle costanti armoniche determinando quindi per ogni componente armonica tutte le relative costanti, ovvero periodi, fasi e ampiezze, che vengono denominate costanti armoniche. Determinata la marea astronomica è quindi possibile ottenere per

sottrazione dal segnale di livello registrato il residuo dovuto alla marea meteorologica. Se la misura del livello di marea viene eseguita in una località dove le onde non frangono, il residuo determinato dalla misura risulta privo della componente dovuta alle onde frangenti.

Per quanto riguarda il paraggio in questione si è fatto riferimento alla serie storica mareografica registrata nel porto di Monfalcone dal Servizio Gestione Risorse Idriche – Unità Operativa Idrografica della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia gestito dalla Protezione Civile Regionale operativo da giugno 2010.

A completamento di questa analisi, si sono studiati anche i dati della stazione mareografica della U.O.S. di Trieste dell'Istituto di Scienze Marine del CNR, che è situata sul Molo Sartorio del porto di Trieste. Questa stazione mareografica è la più antica dell'Adriatico e le prime osservazioni mareografiche risalgono al 1859 a cura della Regia Accademia Imperiale di Commercio e Nautica. La stazione mareografica di Trieste, le cui coordinate geografiche sono: latitudine 45° 38' 50.0" N, longitudine 13° 45' 33.9" E, è la più antica dell'Adriatico e le prime osservazioni mareografiche risalgono al 1859 a cura della Regia Accademia Imperiale di Commercio e Nautica. Attualmente la stazione è dotata di quattro mareografi a galleggiante.

## 8.1 Marea astronomica

Sulle coste dell'Adriatico Settentrionale la marea astronomica si presenta prevalentemente con due alte e due basse giornaliere (maree di tipo semidiurno). Come noto in coincidenza dei noviluni e pleniluni (sizigie) si raggiungono le massime escursioni. In vicinanza del primo e dell'ultimo quarto delle fasi lunari (quadrature) la marea si presenta con escursioni poco pronunciate, manifestando una sola alta ed una sola bassa nell'arco del giorno (maree di tipo diurno).

A questo proposito è importante far notare che al moto verticale del livello del mare è associato lo spostamento orizzontale della massa d'acqua con velocità proporzionale all'ampiezza di marea (flusso e riflusso). Tale spostamento interessa l'intero corpo d'acqua e pertanto, specialmente nelle zone costiere e di basso fondale come il Golfo di Trieste, viene continuamente garantito il ricambio dell'acqua. Tale ricambio, essendo legato alle velocità delle correnti di marea, raggiunge il massimo nei periodi di sizigie ed il minimo nei periodi di quadrature.

Nella Figura 31 è riportata la posizione del mareografo del Servizio Gestione Risorse Idriche – Unità Operativa Idrografica della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia gestito dalla Protezione Civile Regionale operativo da giugno 2010.

Le misure di livello registrate dal mareografo sono state processate per mezzo del codice Matlab (T-Tide) che consente di eseguire l'analisi delle componenti armoniche della marea astronomica.

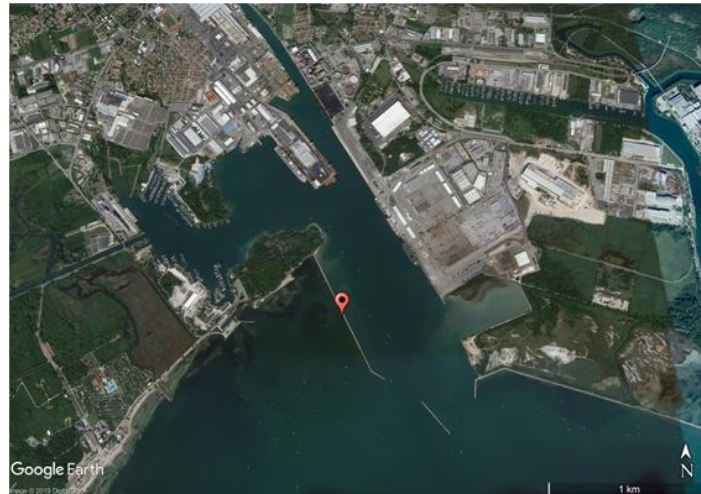


Figura 31 - Porto di Monfalcone. Localizzazione del mareografo della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.

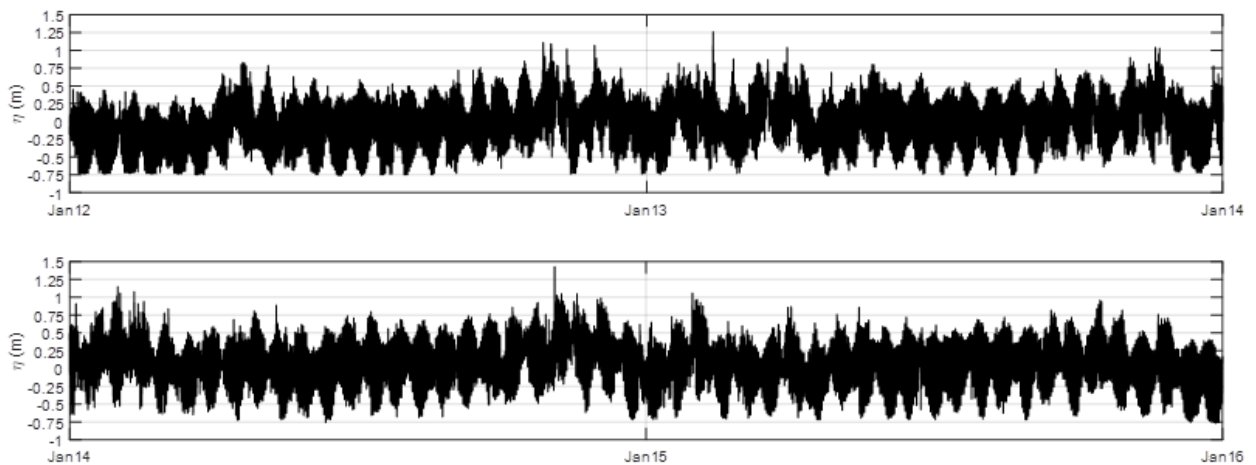


Figura 32 - Porzione della serie storica analizzata relativa al mareografo di Monfalcone.

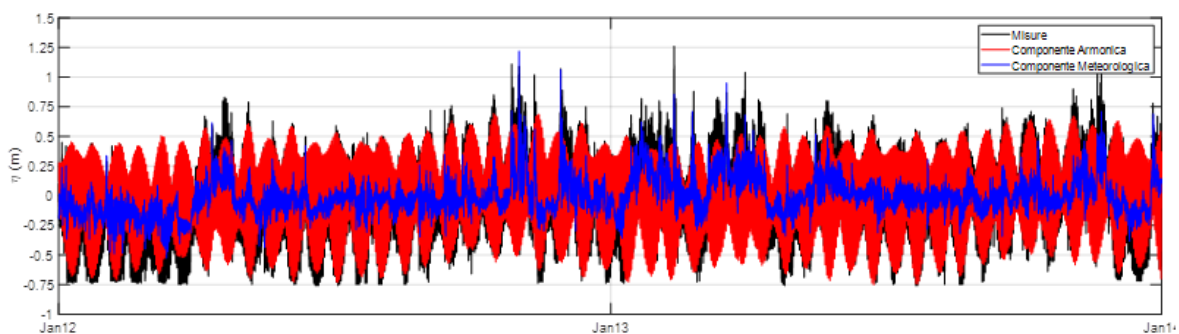


Figura 33 - Esempio di analisi della serie storica delle misure di livello misurate a Monfalcone: identificazione delle componenti armonica e meteorologica.

Nella Figura 32 è mostrata a titolo di esempio una porzione del segnale di livello registrato dal mareografo, mentre nella Figura 33 sono riportati, sempre a titolo di esempio, i risultati dell'analisi per una porzione del segnale. In particolare la linea nera della Figura 33 rappresenta il segnale registrato dallo strumento mentre la linea rossa e quella blu rappresentano rispettivamente la componente



astronomica e quella meteorologica. Quest'ultima è stata ottenuta per differenza tra il segnale registrato e quello astronomico ricostruito.

Una volta calcolate le costanti armoniche, sono stati calcolati i livelli caratteristici della marea astronomica che vengono riportati in forma sintetica nella Tabella 16.

<b>Highest Astronomical Tide</b>	HAT	0.79 m
<b>Mean High Water Spring</b>	MHWS	0.61 m
<b>Mean Higher High Water</b>	MHHW	0.41 m
<b>Mean Sea Level</b>	MSL	0.00 m
<b>Mean Lower Low Water</b>	MLLW	-0.40 m
<b>Mean Low Water Spring</b>	MLWS	-0.61 m
<b>Lowest Astronomical Tide</b>	LAT	-0.79 m

Tabella 16 - Livelli caratteristici della marea astronomica in corrispondenza della stazione mareografica di Monfalcone.

Per l'analisi dei livelli di Trieste si è fatto riferimento alla serie storica fornita dal SEA LEVEL CENTER (University of Hawaii, Caldwell, P. C., M. A. Merrifield, P. R. Thompson; 2015). I "Fast Delivery (FD) data" sono rilasciati entro 1-2 mesi dalla raccolta dei dati e ricevono il controllo qualità (QC) di base su evidenti valori anomali. I dati FD vengono sostituiti dai dati RQD (Research Quality Data) quando questi sono disponibili.

Il segnale analizzato per il presente lavoro copre il periodo 2009/06/01 – 2019/03/31.

Anche in questo caso le misure di livello sono state processate per mezzo del codice Matlab (T-Tide). I valori riportati in Tabella 17 rappresentano i livelli caratteristici di marea ottenuti mediante l'applicazione dell'analisi armonica.

Confrontando la Tabella 16 con la Tabella 17 si osserva che i valori caratteristici della marea astronomica per le stazioni di Monfalcone e Trieste risultano confrontabili.

<b>Highest Astronomical Tide</b>	HAT	0.76 m
<b>Mean High Water Spring</b>	MHWS	0.59 m
<b>Mean Higher High Water</b>	MHHW	0.40 m
<b>Mean Sea Level</b>	MSL	0.00 m
<b>Mean Lower Low Water</b>	MLLW	-0.39 m
<b>Mean Low Water Spring</b>	MLWS	-0.60 m
<b>Lowest Astronomical Tide</b>	LAT	-0.76 m

Tabella 17 – Livelli caratteristici della marea astronomica in corrispondenza della stazione mareografica di Trieste.

## 8.2 Marea meteorologica (analisi del residuo)

Una volta identificata la serie storica della sola componente meteorologica (residuo) è stata effettuata l'analisi degli eventi estremi dei sovralti di marea. L'analisi è stata eseguita utilizzando il metodo dei picchi sopra soglia (POT). La distribuzione di probabilità che meglio approssima i dati è risultata essere la distribuzione di Weibull ( $k = 1$ ).

$$P_{x_{\min}}(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right]$$

Nel pannello di sinistra della Tabella 18 è riportata la correlazione ottenuta tra i livelli del sovralto di tempesta e il tempo di ritorno per la stazione mareografica di Monfalcone. Nel pannello di destra della stessa tabella è riportata la stessa correlazione per la stazione di Trieste. Anche in questo caso i valori per le due stazioni risultano confrontabili anche se per la stazione di Monfalcone il sovralto risulta mediamente superiore rispetto a Trieste.

Questi valori di sovralto del livello del mare sono causati dai venti meridionali (scirocco e libeccio) che spirano sull'Adriatico in presenza di basse pressioni cicloniche. Per contro i venti continentali, soprattutto la bora, causano nel Golfo di Trieste un abbassamento del livello marino ed un ritardo nella marea entrante nel Golfo.

I residui meteorologici a Monfalcone e a Trieste presentano anche una variazione di tipo stagionale.

Nei mesi invernali si registra mediamente un minimo di livello, legato alla prevalenza di alte pressioni che accompagnano i venti continentali. I massimi valori di livello si registrano nel mese di novembre, corrispondente alla maggiore frequenza di venti meridionali e di bassa pressione atmosferica. Il picco autunnale è correlato al fenomeno dell'acqua alta che si manifesta prevalentemente in ottobre, novembre e dicembre.

Si osserva infine che non è raro che a Trieste si verifichino acque alte che danno luogo alla tracimazione delle banchine portuali. Tra i valori estremi osservati si ricorda il massimo di 360 cm del

26 novembre 1969 (82 cm al di sopra del piano del Molo Sartorio) ed il minimo di 30 cm del 14 febbraio 1934 (248 cm al di sotto del piano del Molo Sartorio).

Monfalcone		Trieste	
$T_r$ (anni)	Livello (m)	$T_r$ (anni)	Livello (m)
2	0.71	2	0.67
5	0.86	5	0.82
10	0.98	10	0.93
15	1.05	15	1.00
20	1.10	20	1.04
25	1.13	25	1.08
30	1.16	30	1.11
50	1.25	50	1.19
100	1.37	100	1.30
250	1.52	250	1.45

Tabella 18 – Valori relativi ai valori di sovrizzo di tempesta in relazione al tempo di ritorno per Monfalcone (pannello di sinistra) e per Trieste (pannello di destra).

### 8.3 VARIAZIONI A LUNGO TERMINE DEL LIVELLO DEL MARE

Le scale di variabilità temporale del livello marino possono essere distinte in funzione dei fattori che le determinano. Le variazioni su scale temporali fino all'interannuale sono causate dalla meteorologia, soprattutto vento e pressione atmosferica. Dalla scala interannuale in su sono importanti inoltre le variazioni delle caratteristiche termoaline dell'oceano.

Le variazioni di temperatura e salinità comportano cambiamenti della densità dell'acqua, che si riflettono anche sul livello marino. Si tratta dell'"effetto sterico", caratterizzato da un aumento del livello in occasione del riscaldamento dell'acqua e da una sua diminuzione in occasione di un aumento di salinità. Nel Golfo di Trieste la tendenza secolare dell'effetto sterico, circa -4 mm/secolo, è trascurabile rispetto a quella del livello osservato, dell'ordine di 100 mm/secolo (fonte CNR-ISMAR).

Su scala globale, dopo il picco glaciale di circa 21000 anni fa, il livello è sempre mediamente aumentato, con velocità variabile. Tra 2000 e 100 anni fa l'aumento è stato inferiore a 2 cm per secolo. Misure di alta qualità presso stazioni considerate stabili concordano su tendenze tra 1.5 e 2.0 mm/anno nel XX secolo, non considerando generalmente i movimenti verticali del suolo.

Nel Mediterraneo (escluso il Mar Nero) esistono solo cinque stazioni con almeno 80 anni di dati, cioè Trieste (inizio nel 1875), Genova (1884), Marsiglia (1885), Venezia (1872) e Marina di Ravenna (1896), le ultime due affette da marcata subsidenza di origine antropica.

Nel grafico di Figura 34, riportato nel sito del CNR-ISMAR (<http://www.ts.ismar.cnr.it/node/36>) è illustrato l'andamento del livello medio annuo a Trieste dal 1875 insieme con le tendenze su vari

periodi. Si noti la variabilità, e quindi la scarsa attendibilità, di queste ultime quando il periodo analizzato è breve. Il periodo dal 1992 è quello coperto dall'altimetria da satellite.

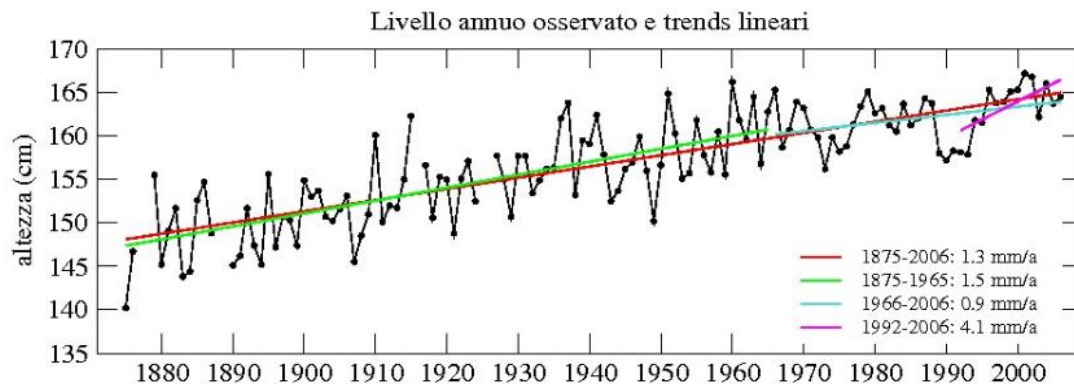


Figura 34 - Andamento del livello medio annuo a Trieste dal 1885. (Fonte CNR-ISMAR).

Secondo le proiezioni dell'IPCC per il XXI secolo il livello marino dovrebbe essere più alto di quello attuale (1980-1999) di circa 18 cm intorno al 2050 e 35 cm nel 2100. Nonostante ciò, analisi di osservazioni di Trieste e Venezia e simulazioni degli scenari futuri inducono a ritenere che la frequenza e l'intensità delle acque alte estreme non sia destinata ad aumentare rispetto al presente, per la contemporanea diminuzione della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici che le favoriscono.

## 9 LA CIRCOLAZIONE GENERALE NEL GOLFO DI TRIESTE

Da un punto di vista oceanografico il Golfo di Trieste è un bacino di piccola scala (circa 25 Km x 25 Km) di bassa profondità (massima profondità 38 m, media 20 m) all'interno del quale però la dinamica circolatoria è ricca e peculiare. Può essere classificato come una regione *influenzata dalle acque dolci*, in letteratura anglosassone ROFI (Region Of Freshwater Influence), presenta una varietà stagionale ed è caratterizzato dalle portate fluviali dell'Isonzo, dal vento (Bora e Scirocco) e dalla marea <sup>1</sup>. Una minore influenza sulla circolazione ciclonica termoaline è dovuta al fiume Po, in estate ed autunno.

La circolazione nel Golfo di Trieste è marcatamente stratificata soprattutto in primavera-estate: si riconosce uno strato superficiale fino a circa 5 m di profondità, ed uno strato profondo fino al fondo, mediamente alla profondità di 10-25 m. Nel secondo strato profondo, al di sotto dei 10 m di profondità, è presente una circolazione debole permanente di apporto verso il Golfo con velocità di circa 0,02-0,03m/s, di tipo ciclonico (rotazione antioraria) in inverno, accentuata in primavera ed estate, che risale lungo la costa slovena e fuoriesce dal Golfo lungo la costa Nord dell'Italia. Questa circolazione è in accordo ed in continuità con la circolazione a più grande scala dell'intero Adriatico.<sup>2</sup>

Lo strato superficiale è quello invece più attivo; è dominato dal vento e presenta celle di circolazione a scala di Golfo prevalentemente in senso orario (anticiclonico), che talvolta si alternano a rotazioni antiorarie. Lo strato superficiale genera mediamente un flusso in uscita dal Golfo. Questo flusso superficiale in uscita, specie in condizioni di Bora, tende a rafforzare per continuità il flusso in ingresso del secondo strato più profondo in ingresso, con modalità sicuramente non lineari ancora ad oggi oggetto di ricerca scientifica. Non solo, la Bora forza anche correnti cosiddette di risalita (*Upwelling*). In condizioni di Bora di forte intensità le acque del Golfo possono essere completamente rinnovate in circa tre giorni<sup>2</sup>! Con molto minore significatività la circolazione è anche influenzata dallo Scirocco che apporta masse di aria più tiepide e umida.

La Figura 35 seguente mostra l'immagine satellitare della corrente superficiale in occasione di un evento di Bora: si nota la corrente superficiale sopra descritta, "distaccata" dalla costa a nord e diretta "fuori" dal Golfo.

Lo strato superficiale è interessato anche dalle portate del fiume Isonzo, principale adduttore di acque dolci nel Golfo con marcato regime torrentizio, con il classico *plume* che galleggia su una fascia areale localizzata prima di disperdere le sue proprietà. L'impatto del fiume Isonzo sulla circolazione generale è comunque limitato, nonostante le grandi portate, per la natura impulsiva e localizzata nel tempo delle piene<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Cosoli S. et al (2013) *Surface circulation in the Gulf of Trieste from radar, model and ADCP comparisons*, JGR: Oceans, Vol 118, 6183-6200.

<sup>2</sup> Querin S. et al (2006) *Numerical study of the role of wind forcing and freshwater buoyancy input on the circulation in a shallow embayment (Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea)*, JGR, Vol 111



Figura 35 – 19 gennaio 2017: l'effetto della Bora sull'Adriatico settentrionale. Immagine radar da satellite ESA-Sentinel-1 (C. Fragiacommo). Cortesia OGS Trieste (da sito web).

## 10 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

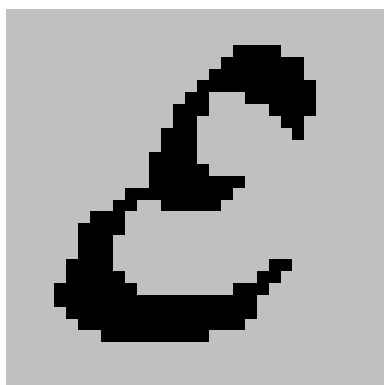
Caldwell, P. C., M. A. Merrifield, P. R. Thompson (2015), Sea level measured by tide gauges from global oceans — the Joint Archive for Sea Level holdings (NCEI Accession 0019568), Version 5.5, NOAA National Centers for Environmental Information, Dataset, [doi:10.7289/V5V40S7W](https://doi.org/10.7289/V5V40S7W).

Cosoli S. et al (2013) Surface circulation in the Gulf of Trieste from radar, model and ADCP comparisons, JGR: Oceans, Vol 118, 6183-6200.

Querin S. et al (2006) Numerical study of the role of wind forcing and freshwater buoyancy input on the circulation in a shallow embayment (Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea), JGR, Vol 111

## 11 APPENDICE: descrizione dei codici ENIF, ALTAIR e SWAN





## PROGRAMMA **ENIF**

**Caratterizzazione dei settori di traversia  
Calcolo dei fetch efficaci  
Calcolo delle correlazioni direzione vento-mare**



Modimar s.r.l.-Via Monte Zebio 40  
00195-Roma  
Tel. 06/3269461  
e-mail: [modimar@modimar.com](mailto:modimar@modimar.com)

## 1. Premesse

L'analisi dell'esposizione geografica di un sito costiero viene condotta, nelle fasi preliminari di uno studio meteomarinario per la caratterizzazione d'insieme dell'esposizione ondometrica (clima d'onda) e la definizione dell'onda di progetto.

Ponendosi al largo del sito in esame e traguardando la distanza geografica (geographical fetch) con la costa limitrofa, si definisce la traversia geografica come la porzione di mare dalla quale possono potenzialmente pervenire le perturbazioni (in termini di stati di vento e moto ondoso).

Per gli studi di dettaglio relativi alla ricostruzione indiretta del moto ondoso (tramite modelli hindcasting tipo SMB, o metodologia di trasposizione geografica di serie ondometriche note) è necessario quantificare le caratteristiche della porzione di mare (fetch efficace) lungo la quale il vento esplica la sua azione di generazione degli stati di mare. Inoltre si deve definire la correlazione esistente tra la direzione media del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso e la direzione media risultante dello stato di mare generato.

La metodologia da seguire prevede una prima classificazione della conformazione geografica dell'area lungo la quale si sviluppa il fenomeno di generazione del moto ondoso:

- traversia geografica delimitata (Restricted Fetches) per la presenza della costa a distanze inferiori a quelle proprie dell'estensione delle perturbazioni atmosferiche <sup>(1)</sup> responsabili del processo di generazione del moto ondoso;
- traversia geografica non limitata (Open-Water Fetch) da emergenze orografiche e comunque con estensioni superiori a quelle delle perturbazioni atmosferiche.

Definiti i fetch geografici, il calcolo della lunghezza, ove si può efficacemente esplicare l'azione del vento in termini di generazione del moto ondoso (effective fetch), e la correlazione esistente tra la direzione del vento e quella dello stato di mare generato, si effettuano ricorrendo a formulazioni classiche derivate dalla teoria dell'analisi spettrale del moto ondoso.

## 2. Teoria di riferimento

Per il calcolo dei fetch efficaci si fa riferimento ad una relazione, derivata dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, S.P.M. 1984, Smith 1991), di seguito riportata nella sua forma più generale :

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

ove (fig. 1):

- $\phi_w$  direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia
- $\phi_i \leq \phi_w \pm \theta$  direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di  $2 \cdot \theta$  considerato nell'intorno della direzione  $\phi_w$ . Il metodo classico di Saville prevede un valore di  $\theta=45^\circ$  mentre la metodologia sviluppata da Seymour fa riferimento ad un valore di  $\theta=90^\circ$ .
- $F_{e,w}$  lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione  $\phi_w$

<sup>1</sup> Per il Mediterraneo si è soliti considerare comunque un limite superiore dell'estensione delle perturbazioni atmosferiche pari a 600 km

- $F_i$  lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione  $i$ -esima  $\phi_i$  (si fa riferimento alla lunghezza calcolata su base cartografica) eventualmente asunta come valore medio relativo ad un settore di  $15^\circ$  nell'intorno della direzione  $i$ -esima  $\phi_i$  (metodo proposto dal C.E.R.C. nel software package A.C.E.S.)
- $n$  termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume  $n=2$ )

Per il calcolo della relazione esistente tra la direzione del vento e quella del moto ondoso generato, si fa riferimento al criterio introdotto da Donelan. Nell'ipotesi che:

- la direzione media del moto ondoso corrisponde alla direzione della componente spettrale associata al periodo di picco;
- il moto ondoso generato dal vento è ben definito e rappresentabile tramite le relazioni introdotte dalla campagna oceanografica JONSWAP (JOint North Sea Wave Project, Hasselmann 1976).

si può affermare che la direzione media  $\beta$  del moto ondoso relativa alla direzione media di provenienza del vento  $\phi_w$  è individuata come il valore che rende massima la funzione:

$$f(\phi_w) = F_{e, \phi_w}^{0.28} \cdot (\cos \phi_w)^{0.44} \quad (2)$$

quindi per  $f'(\beta)=0$  e  $f''(\beta) < 0$

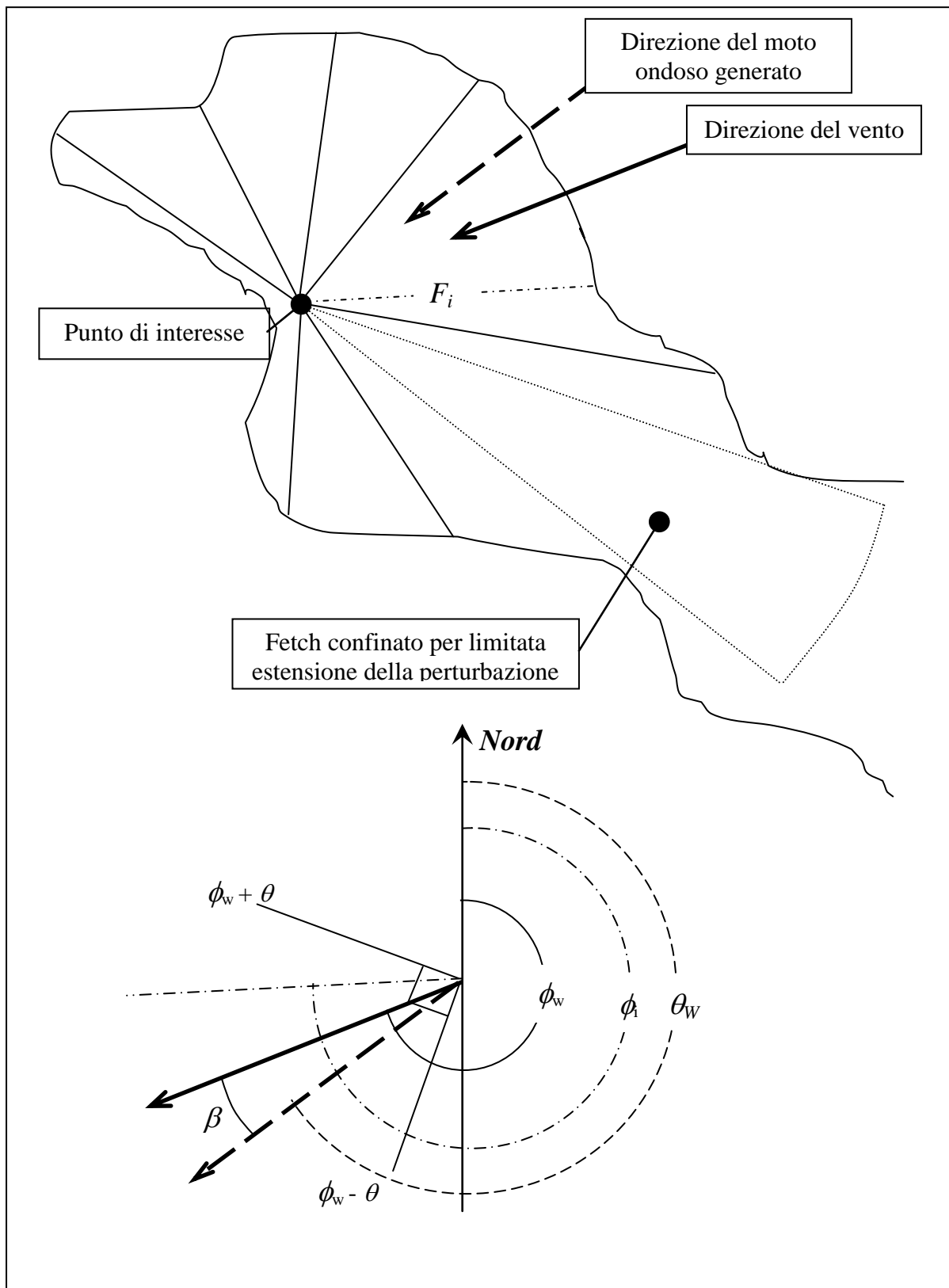


Fig. 1 - Schema di riferimento, simboli e convenzioni per il calcolo dei fetch efficaci

### 3. Descrizione del programma Enif, modalità operative

Il programma Enif calcola le caratteristiche dei fetch efficaci e la correlazione tra la direzione del vento e la direzione del moto ondoso.

Il programma richiede, come dati di ingresso, la definizione di una serie di valori in coordinate polari (riferite al nord geografico e relative ad un punto di calcolo, detto punto di interesse, solitamente posto al largo del sito in esame); è possibile derivare le caratteristiche di input da un file tipo DWG (per Autocad R.14) sul quale sono state preventivamente tracciate una polilinea, delimitante l'area del fetch geografico, ed un cerchio, il cui centro individua il punto di interesse.

Il programma fornisce come risultati la serie di valori dei fetch efficaci (in coordinate polari riferite al nord geografico) e le coppie di corrispondenza tra la direzione del vento (in gradi nord) e la direzione relativa del moto ondoso (in gradi). Oltre a fornire la stampa dei dati elaborati è possibile salvarli in file tipo testo (formato ASCII) o esportarli in file tipo XLS e DWG.

Metodologia operativa da seguire:

1. Reperimento della cartografia di riferimento (eventualmente trasferita su file tipo DWG per Autocad.14). Questa dovrà consentire una visione d'insieme della porzione di mare interessata dai fenomeni di generazione e propagazione del moto ondoso che può pervenire al sito costiero in esame (solitamente è sufficiente operare su ampie scale, pari anche a 1:5.000.000, comunque rapportate alle dimensioni d'insieme della superficie marina ove ricade il sito in esame).
2. Individuazione del punto di interesse posto al largo del sito in esame. La scelta del punto di interesse è legata alle caratteristiche orografiche del sito ed alla successiva destinazione d'uso che si vuole fare dei fetch efficaci calcolati. Solitamente questi vengono utilizzati per l'applicazione di modelli di ricostruzione indiretta del moto ondoso il punto di interesse dovrà essere rappresentativo dell'area di generazione del moto ondoso e pertanto dovrà ricadere a distanza sufficiente dalla costa. Si sottolinea che posizionandosi ad una distanza eccessiva dalla costa la traversa geografica può assumere lunghezze apprezzabili anche per direzioni dirette verso il sito in esame e di conseguenza i fetch efficaci che ne derivano tengono conto anche dei contributi energetici associati a direzioni di propagazione che non interessano il sito in esame; posizionandosi sotto costa, si rischia di definire un fetch geografico eccessivamente chiuso (per lunghezze e direzioni) dall'orografia locale del sito in esame. Operando su file tipo DWG il punto di interesse viene materializzato disegnando un cerchio il cui centro corrisponde alle coordinate del punto.
3. Discretizzazione del fetch geografico relativo al punto di interesse. Solitamente per apprezzare variazioni dei fetch geografici è sufficiente effettuare una discretizzazione angolare dell'ordine di 5° e variazioni della lunghezza dell'ordine di 50 km (ovviamente queste dimensioni sono puramente indicative e comunque vanno rapportate alla scala di dettaglio della cartografia di riferimento ed all'effettiva estensione della porzione di mare in esame). Operando su file tipo DWG il fetch geografico viene materializzato tramite il tracciamento di una polilinea che dovrà contenere ovviamente il punto di interesse (al limite quest'ultimo può ricadere sulla polilinea stessa). Comunque il programma Enif opera una discretizzazione angolare minima pari ad 1° pertanto possono essere introdotti sino ad un massimo di 360 vertici rappresentativi del fetch geografico.
4. Definizione del termine esponenziale  $n$  per il calcolo del fetch efficace. Il valore di default assunto dal programma è pari a 2 (come indicato sia da Saville che da Seymour) e successivamente confermata nell'ambito della campagna oceanografica JONSWAP. I dati relativi alle misure ondometriche condotte negli ultimi anni lungo le coste italiane indica una variabilità del termine  $n$  tra 1 e 5 con un valore medio pari a 1.9.
5. Richiesta di interpolazione dei valori di input altrimenti assunti come costanti tra i distinti azimuth di input.

6. Richiesta di regolarizzazione delle lunghezze del fetch geografico tramite un criterio definito dal C.E.R.C. (Coastal Engineering Research Center) di media dei valori contigui alla direzione considerata.
7. Visualizzazione del fetch geografico di input.
8. Calcolo del fetch efficace e della correlazione tra direzione vento e direzione mare.
9. Stampa e salvataggio dei risultati.

## **4. Manuale d'uso**

### **4.1. Configurazione del sistema**

L'applicazione è stata creata per essere utilizzata con i sistemi operativi Windows 95 e Windows NT.

Si consiglia l'utilizzo dell'applicazione su una macchina dotata di almeno 8 Mb di memoria RAM. Per il corretto funzionamento del programma è necessario impostare una risoluzione di almeno 800x600 pixels.

Configurazioni differenti da quella consigliata potrebbero portare ad una errata visualizzazione delle aree grafiche, anche se il funzionamento del programma non ne risulterebbe compromesso.

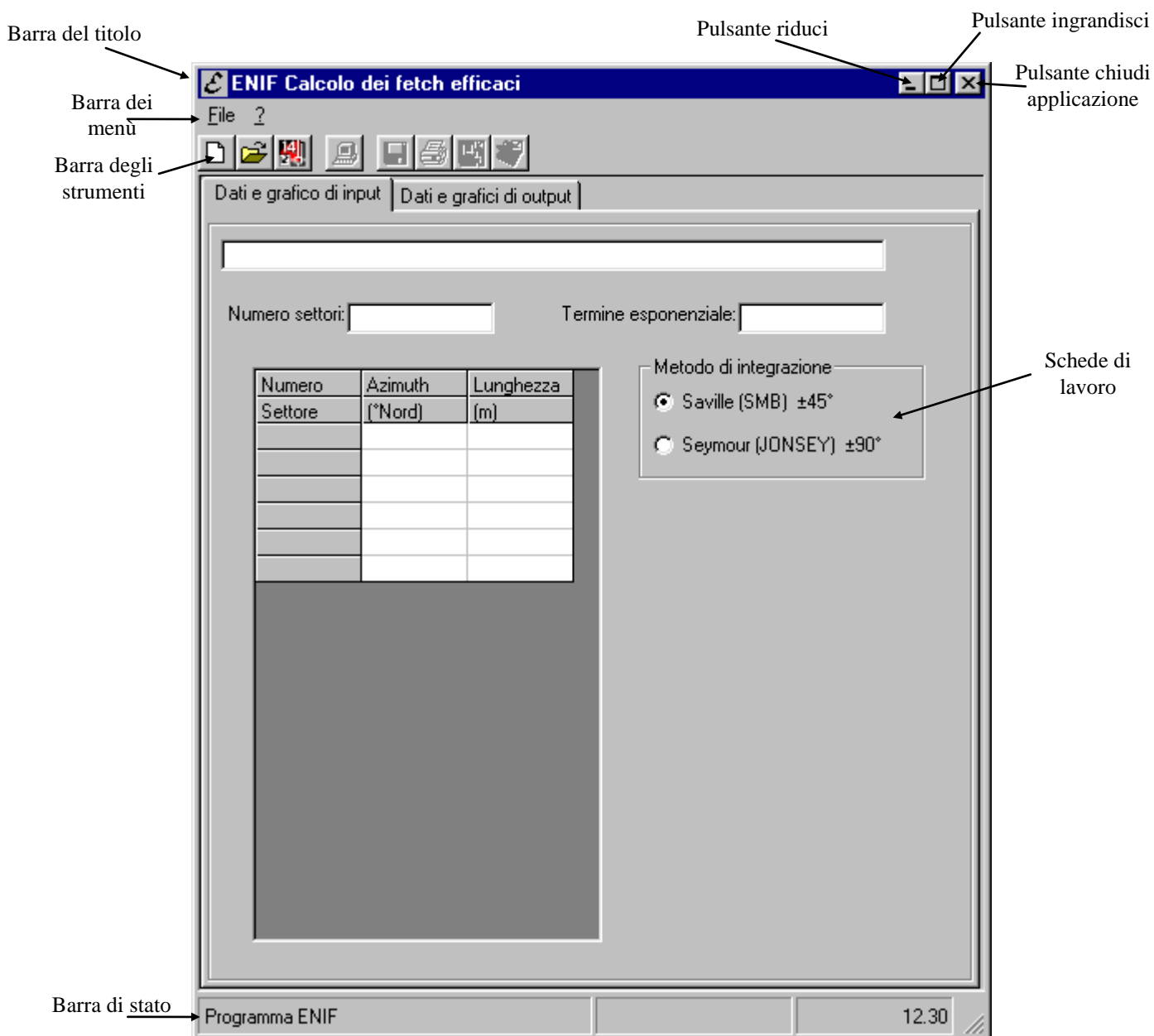


Fig. 2 - Schermata principale del programma

#### 4.2. Descrizione degli elementi per la gestione del programma

Il programma 'ENIF' richiede, quale input da parte dell'utente le caratteristiche dei fetch geografici realtivi ad un punto di interesse posto al largo del sito in esame. L'utente può procedere in tre modi: effettua l'input da tastiera; legge i dati preliminarmente registrati su un file testo; seleziona in ambiente AutoCad.14 il cerchio rappresentativo del punto di interesse e la polilinea delimitante il fetch geografico.

Nel seguito vengono elencate e descritte brevemente le distinte sezioni delle schermate principali del programma.

Barra dei menù:

**File**

Consente di selezionare le seguenti opzioni principali del programma.

Opzione **Nuovo**

Attiva la scheda "Dati e grafico di input" sulla quale devono essere introdotti i dati di input operando da tastiera

Opzione **Apri**

E' possibile selezionare un file di input dei dati (la cui struttura è descritta di seguito)

Opzione **Estrai dati da CAD**

E' possibile attivare una procedura che rimanda alla selezione, in ambiente AutoCAD14, di un cerchio ed una polilinea per l'input rispettivamente delle coordinate del punto di interesse e dei limiti perimetrali del fetch geografico.

Opzione **Calcola fetch efficaci**

Questa opzione si attiva solo dopo aver effettuato la procedura di input dei dati. Effettua il calcolo dei fetch efficaci e della correlazione tra le direzioni vento e moto ondosio; predispone la scheda contenente i dati di output.

Opzione **Salva**

Consente di salvare i dati di input e di output nei distinti formati previsti (testo tipo ASCII, file XLS, file DWG).

Opzione **Stampa**

Consente di stampare i dati di input e di output.

**?**

Vengono fornite ulteriori informazioni sul programma.

Le stesse funzioni possono essere attivate e richiamate tramite la barra degli strumenti oppure tramite alcuni tasti comando e/o opzioni presenti nelle schede di lavoro.

La finestra di lavoro del programma è organizzata in due schede: la prima relativa a procedure di input dei dati e selezione dei parametri di calcolo; la seconda relativa a visualizzazione, stampa e salvataggio dei risultati delle elaborazioni.

Tutti i files di dati di input e di output gestiti dal programma sono in formato ASCII, quindi possono essere editati con un qualsiasi editor per ambiente MS-DOS E WINDOWS; nei paragrafi successivi vengono descritti tali files. L'unità di misura di lavoro del programma Enif sono i metri per le distanze ed i gradi decimali (decimals degrees) riferiti al sistema polare relativo al nord geografico.

### **4.3. Procedure operative del programma Enif**

Nei sottoparagrafi seguenti si descrive brevemente lo schema tipo del flusso operativo del programma indicando le principali funzioni e procedure che l'utente dovrà seguire.



#### 4.3.1. Apertura del file di dati di input

I dati di input consistono in una sequenza di coppie di valori, rappresentativi della lunghezza del fetch geografico traguardata secondo distinte direzioni azimuthali dal punto di interesse, che l'utente dovrà introdurre nella prima scheda di lavoro "Dati e grafico di input".

L'utente può procedere in tre distinti modi:



##### Nuovo file di input

In questo caso si dovrà compilare la scheda di lavoro, operando da tastiera. Il programma predispone come valori di default la stringa di commento (Nuovo input fetch geografici), il numero di settori con cui discretizzare la traversia geografica (pari a 8), il termine esponenziale (pari a 2) utilizzato nel calcolo dei fetch efficaci. L'utente oltre a variare questi termini di input può selezionare le opzioni per l'interpolazione dei valori di input e per la visualizzazione dei dati.



##### Apri file esistente

In questo caso si dovrà selezionare il file di input (che dovrà corrispondere ai requisiti elencati nel par. 4.4) L'utente può comunque variare i dati ed i parametri di input oltre a selezionare le opzioni per l'interpolazione dei valori di input e per la visualizzazione dei dati.



##### Importa da CAD

In questo caso si dovrà aprire preliminarmente, in ambiente AutoCad.14, il file tipo DWG relativo alla rappresentazione geografica del settore di traversia del sito in esame contenente il tracciamento di una polilinea (perimetro dei fetch efficaci) e di un cerchio con centro in corrispondenza del punto di interesse. Il programma richiede di selezionare il cerchio e la polilinea; successivamente effettua la decodifica delle coordinate di lavoro aggiornando la scheda di input. E' evidente che il file DWG deve essere strutturato con unità di misura congruenti con quelle di lavoro del programma Enif (distanze in metri e angoli in gradi sessagesimali polari riferite al nord geografico). Anche in questo caso l'utente può comunque variare i dati ed i parametri di input oltre a selezionare le opzioni per l'interpolazione dei valori di input e per la visualizzazione dei dati.

#### 4.3.2. Uso della scheda di lavoro -Dati e grafico di input-

I dati di input introdotti costituiscono la base di riferimento per le successive elaborazioni; prima di procedere al calcolo dei fetch efficaci il programma effettua una preliminare discretizzazione di dettaglio dei fetch geografici secondo un passo angolare di 1°. Il programma contempla due opzioni di interpolazione dei valori di input:

- selezionando l'opzione Interpola i valori tra gli azimuth il programma effettua un'interpolazione lineare tra i valori di input (sempre secondo un passo di 1°);
- selezionando l'opzione Regolarizza il fetch geografico di input secondo il metodo C.E.R.C. il programma effettua (sempre secondo un passo angolare di 1°) un'interpolazione mediata dei valori del fetch geografico relativi ad un settore di  $\pm 7^\circ$  intorno alla direzione di riferimento;

- se non viene selezionata nessuna di queste opzioni la traversia geografica che costituisce la base di input del programma viene considerata secondo valori costanti delle lunghezze tra i distinti settori di input.

L'utente può attivare una schermata (fig. 3) per la rappresentazione grafica dei dati di input selezionando l'opzione: **Visualizza grafico Dati di Input** (la polilinea di colore rosso rappresenta il fetch geografico interpolato mentre la polilinea verde rappresenta il fetch geografico regolarizzato secondo il criterio del CERC).

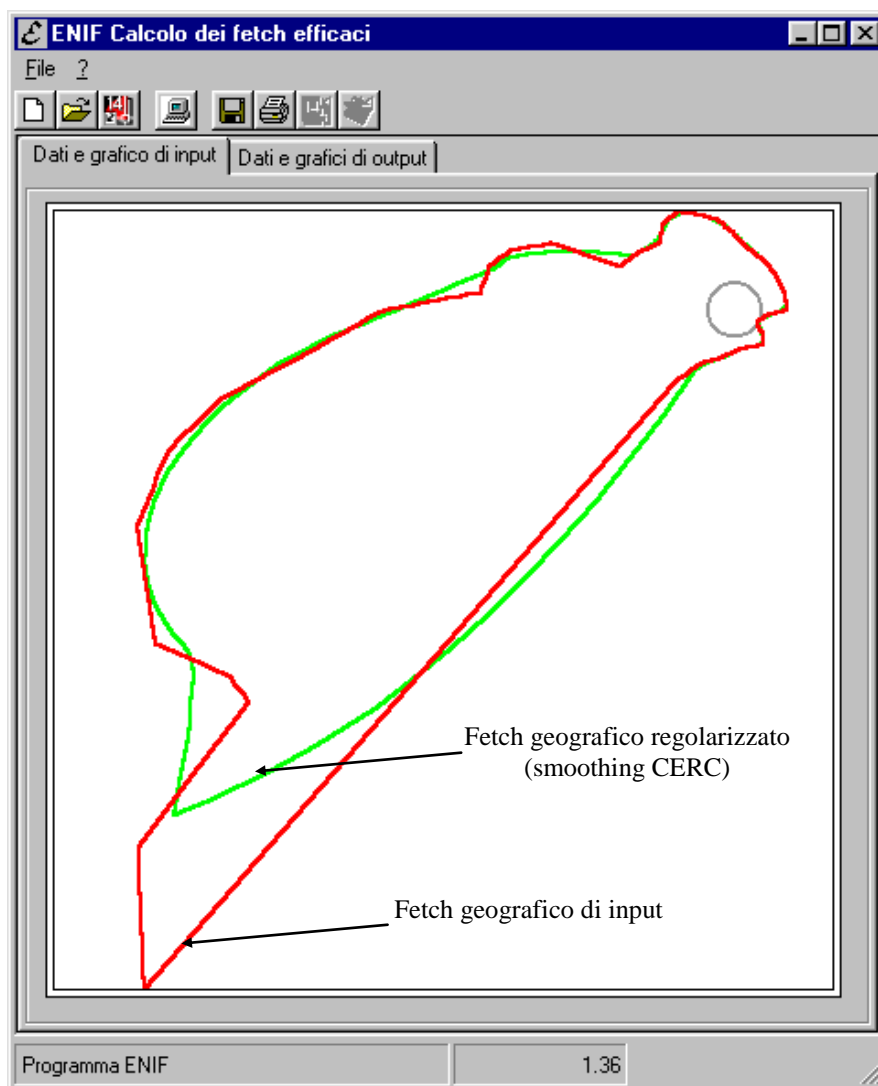



Fig. 3 – Rappresentazione grafica dei dati di input

#### 4.3.3. Calcolo dei fetch efficaci e delle correlazioni direzione vento-mare

Completato l'input dei dati e la selezione delle opzioni di interpolazione la procedura di calcolo si attiva dalla barra dei menu oppure cliccando il tasto  dalla barra degli strumenti. I risultati dei calcoli vengono trascritti nella tabella della scheda **Dati e grafico di input** dove viene evidenziata la massima lunghezza di fetch efficace (con la direzione relativa); su questa scheda è possibile selezionare le opzioni per la rappresentazione grafica dei fetch efficaci e della correlazione tra la direzione del vento e quella del moto ondoso.

The screenshot shows the 'ENIF Calcolo dei fetch efficaci' window. It features a menu bar with 'File ?', a toolbar with icons for file operations, and two tabs: 'Dati e grafico di input' and 'Dati e grafici di output'. The main area is divided into several sections:

- Data Table:** A table with columns 'Azimut (\*Nord)', 'Fetch Geograf. (m)', 'Fetch Efficace (m)', and 'Direzione ma (\*Nord)'. It contains 16 rows of data.
- Output Options:** A section titled 'output dei risultati' containing a label 'Azimuth di discretizzazione dei dati' with a value of '10', a 'Stampa Dati' button, and three 'Salva file' buttons (ASCII, XLS, DWG).
- Summary Statistics:** A section titled 'Massimo Fetch Efficace' with input fields for 'Direzione (\*Nord): 246' and 'Lunghezza (m): 92989.65'.
- Graphical Options:** A section titled 'Grafici di output' with checkboxes for 'Fetch Efficace' and 'Direzione Vento-Mare'.

Annotations with arrows point to the table ('Dati di output'), the 'output dei risultati' section ('Opzioni di output'), and the 'Grafici di output' section ('Opzioni grafiche'). The status bar at the bottom shows 'Pronto' and '8.34'.

Azimut (*Nord)	Fetch Geograf. (m)	Fetch Efficace (m)	Direzione ma (*Nord)
0	14885.9	15420.43	344
1	14610.43	15278.22	345
2	14349.27	15135.96	346
3	14101.5	14993.78	347
4	13866.29	14851.77	348
5	13642.89	14710.08	349
6	13430.59	14568.86	349
7	13228.78	14428.24	350
8	13036.84	14288.43	351
9	12854.26	14149.63	352
10	12680.53	14012.13	353
11	12515.2	13876.2	354
12	12515.2	13742.09	354
13	12515.2	13610.04	355
14	12515.2	13480.3	356
15	12515.2	13352.98	357
16	12515.2	13228.21	358

Fig. 4 – Scheda di output delle elaborazioni

In questa scheda di lavoro si possono impostare le opzioni per salvare o stampare i risultati secondo il passo angolare desiderato (ad esempio volendo predisporre un file cui fare riferimento per la ricostruzione indiretta del moto ondoso su base anemometrica si suggerisce una selezione dei valori di output ogni  $10^\circ$  perché comunque nelle serie storiche delle registrazioni anemometriche, per convenzione internazionale, la direzione del vento è definita con un passo di  $10^\circ$ ).

Le opzioni di salvataggio dei risultati prevedono oltre al formato testo standard i formati DWG ed XLS.

Per esportare i risultati in formato DWG è necessario aprire preliminarmente AutoCad.14, il programma traccia sul foglio di lavoro Cad la polilinea dei fetch efficaci ed i raggi congiungenti i vertici di questa con il punto di interesse ponendo quest'ultimo in corrispondenza dell'origine del disegno (coordinate x, y nulle).

Per esportare i risultati in formato XLS il programma richiede il nominativo del file di destinazione sul quale trasferisce la matrice di output (che viene trascritta tra le colonne A ed F); a corredo del programma Enif viene fornito il file di sola lettura ENIF\_OUT.XLS contenente un formato di editing finale tipo (riportato nei fogli "Output FETCH" e "Grafico Fetch") che può essere agevolmente aggiornato trasferendo il contenuto del file XLS (limitatamente alle colonne da A ad F) creato in precedenza sul corrispondente foglio di input ("Input Fetch").

#### 4.4. Descrizione del file di dati di input

Il file relativo ai dati di input deve essere scritto in caratteri ASCII (file testo standard) senza particolari limiti di incolonnamento dei dati (nella generica riga di input delle coppie azimuth-lunghezze è sufficiente introdurre almeno un carattere blank tra i due campi). La sequenza delle righe di input ed il formato dei distinti termini deve avere la seguente struttura:

CCCCCCCCCCCC	(Riga di commento)	[alfanumerica]
NN	(Termine esponenziale)	[numerica >1]
F1	(Metodo di integrazione) [0=Saville, 1=Seymour]	
F2	(Opzione per l'interpolazione dei fetch geografici di input) [1=vero,0=falso]	
F3	(Opzione per la regolarizzazione dei fetch geografici di input) [1=vero,0=falso]	
AAA LLLL.LL	(Sequenza di input)	
... ..	Azimuth compreso tra 0° ÷ 360° N	[campo numerico intero]
AAA LLLL.LL	Lunghezza del fetch geografico espressa in metri	[campo numerico reale]

#### 4.5. Descrizione del file di output

Nel file di output standard vengono registrati i risultati dell'elaborazione. Le prime righe riportano il testo di commento e le opzioni di calcolo. I dati elaborati sono riportati in colonne contraddistinte da tre righe di intestazione. Nella forma più generale la struttura del file di output è la seguente

12345678901234567890123456789012345678901234567890	(Numerazione colonne)			
Fetch geografico a (nominativo sito)	(riga di commento)			
Termine esponenziale = .....	(termine esponenziale)			
Metodo di integrazione : .....	(Saville;Seymour)			
Fetch geografici regolarizzati	(metodo CERC-ACES)			
Fetch Geografico	Fetch Efficace	Direzione Mare	(intest. dati di output)	
Azimuth (°Nord)	(metri)	(metri)	(°Nord)	(intest. dati di output)
0	718.0	3363.4	19	(dati di output)
10	2640.3	4769.5	24	
20	5513.7	5541.5	29	
...	...	...	...	
350	11863.6	5905.9	33	

#### BIBLIOGRAFIA

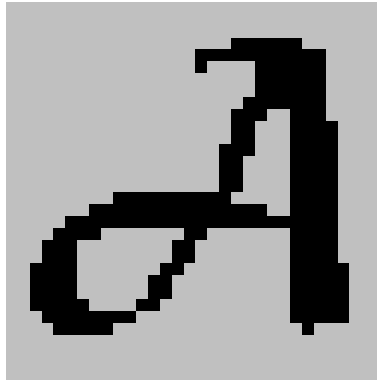
“Freeboard allowances for waves in inland reservoirs” Saville T. et altri, 1962  
Journal of the Waterways and Harbours Division, Proc. ASCE, n.18 WW2 may 1962

“Estimating wave generation on restricted fetches” Seymour R.J., 1977  
Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, Proc. ASCE, n.103 WW2 may 1977

“Shore Protection manual”  
C.E.R.C., Washington, fourth edition, 1984

“Wave prediction in reservoirs comparison of available methods” Owen M.W., 1988  
Hydraulics Research Limited, Wallingford – Oxfordshire, Report EX1809 october 1988

“Automated Coastal Engineering System – Technical Reference” Leenknecht D.A. et altri, 1992  
C.E.R.C. – W.E.S., Vicksburg, Version 1.06 january 1992



## PROGRAMMA ***ALTAIR***

**Modello Hindcasting tipo S.M.B.  
per la ricostruzione di stati di mare in funzione  
di serie storiche di registrazioni anemometriche**



Modimar s.r.l.-Via Monte Zebio 40  
00195-Roma  
Tel. 06/3269461  
e-mail: [modimar@modimar.com](mailto:modimar@modimar.com)

## 1. Premesse

Per l'analisi di dettaglio delle caratteristiche meteomarine che contraddistinguono un sito costiero, in mancanza di misure dirette di moto ondoso (sistematiche e sufficientemente continuative nel tempo) è possibile ricorrere a modelli numerici di ricostruzione indiretta (hindcasting) del moto ondoso riferite ad idonee serie di rilevazioni anemometriche.

A tal riguardo esistono diverse tipologie di modelli numerici, alcuni anche notevolmente accurati i quali tuttavia presentano notevoli oneri di calcolo e richiedono una dettagliata definizione delle condizioni al contorno. Quelli più diffusi nel campo dell'ingegneria marittima sono classificati come modelli empirico-parametrici basati su relazioni sperimentali tra stati di vento e caratteristiche del moto ondoso da questi generato. Il più noto e collaudato è il metodo noto come SMB (dalle iniziali degli autori Sverdrup-Munk-Bretschneider) basato su un bilancio di tipo energetico, esplicitato con formulazioni che richiedono la preliminare conoscenza della velocità del vento in superficie (opportunamente corretta) nonché la durata e l'estensione della perturbazione.

La metodologia da seguire prevede la preliminare caratterizzazione d'insieme della traversia (conformazione e profondità media dell'area di generazione) ed il calcolo di dettaglio dei fetch efficaci nonché la correlazione esistente tra la direzione del vento e quella dello stato di mare generato. Contemporaneamente è necessario individuare una serie di registrazioni anemometriche rappresentativa dell'area di generazione del moto ondoso e definire i termini correttivi cui fare riferimento nel successivo trasferimento delle velocità del vento al modello di ricostruzione.

## 2. Teoria di riferimento

Per il calcolo degli stati di mare generati dall'azione diretta del vento sulla superficie marina si fa riferimento alle relazioni, derivate dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, S.P.M. 1984, Smith 1991). E' necessario definire preliminarmente l'estensione e la conformazione dell'area di generazione nonché la profondità dei fondali di detta porzione di mare. Per quanto riguarda l'estensione e la conformazione si deve fare riferimento alla seguente classificazione:

- Restricted Fetches per traversie geografiche delimitate dalla presenza della costa o comunque contraddistinte da distanze inferiori a quelle proprie dell'estensione delle perturbazioni atmosferiche <sup>(1)</sup> responsabili del processo di generazione del moto ondoso;
- Open-Water Fetches per traversie geografiche non limitate da emergenze orografiche e comunque con estensioni superiori a quelle delle perturbazioni atmosferiche.

Per quanto riguarda la profondità dei fondali si deve fare la seguente distinzione:

- Shallow-Water per generazione del moto ondoso in acque basse ove cioè i fenomeni dissipativi per attrito e/o percolazione sul fondale non sono trascurabili (Bretschneider e Reid, 1954);
- Deep-Water per generazione del moto ondoso in aree contraddistinte da profondità superiori a 90 m (300 ft, SPM 1984).

Le equazioni impiegate, nella forma più generale, sono le seguenti:

$$t_{fetch,min} = D \cdot \frac{F^{1-C}}{g^C \cdot U_a^{(1-2 \cdot C)}} \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> Per il Mediterraneo si è soliti considerare comunque un limite superiore dell'estensione delle perturbazioni atmosferiche pari a 600 km

$$H_{m0} = \frac{U_a^2}{g} \cdot 0.283 \cdot \tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{\frac{A}{0.283} \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right]} \right\} \quad (2)$$

$$T_p = \frac{U_a}{g} \cdot 7.540 \cdot \tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{\frac{B}{7.54} \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^C}{\tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right]} \right\} \quad (3)$$

ove

- $d$  profondità (m) del fondale (assunto costante) relativo all'area di generazione  
 $U_a$  velocità (m/s) del vento "regolarizzata" (adjusted) in funzione delle caratteristiche della stazione di registrazione (quota e posizione geografica) e di un termine (coefficient drag) dovuto alla non linearità del legame esistente tra la velocità del vento e l'azione tangenziale di questo sulla superficie marina  
 $F$  estensione della superficie marina lungo la quale si esplica l'azione del vento (fetch)  
 $g$  accelerazione di gravità pari a  $9.81 \text{ m/s}^2$   
 $A$  costante pari a 0.0016 in condizioni di Open-Water e 0.0015 per Restricted Fetch  
 $B$  costante pari a 0.2857 in condizioni di Open-Water e 0.3704 per Restricted Fetch  
 $C$  costante pari a 0.3333 in condizioni di Open-Water e 0.28 per Restricted Fetch  
 $D$  costante pari a 68.80 in condizioni di Open-Water e 51.09 per Restricted Fetch

Per la definizione del termine  $U_a$  si fa riferimento alla relazione (SPM, 1984):

$$U_a = 0.71 \cdot U_{10}^{1.23} \quad (4)$$

ove  $U_{10}$  esprime la velocità del vento relativa alla quota standard di misura pari a 10 m s.l.m.m.

Il valore della velocità del vento misurato dallo strumento posto alla generica quota  $z$   $U_z$  deve essere quindi preliminarmente riferito alla quota standard di riferimento pari a 10 m s.l.m.m.; a tal riguardo si definisce un coefficiente correttivo tramite la relazione:

$$\frac{U_{10}}{U_z} = \frac{1}{\left[ 1 + 0.1 \ln \left( \frac{z}{10} \right) \right]} \quad (5)$$

Il termine  $F$  rappresenta il fetch efficace che viene calcolato preliminarmente, in funzione della conformazione geografica dell'area di generazione, tramite relazioni come quelle classiche di Saville o Seymour:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)} \quad (6)$$

ove:

$\phi_w$	direzione media (riferita al nord geografico) di provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia
$\phi_i \leq \phi_w \pm \theta$	direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di $2 \cdot \theta$ considerato nell'intorno della direzione $\phi_w$ . Il metodo classico di Saville prevede un valore di $\theta=45^\circ$ mentre la metodologia sviluppata da Seymour fa riferimento ad un valore di $\theta=90^\circ$ .
$F_{e,w}$	lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione $\phi_w$
$F_i$	lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima $\phi_i$ (si fa riferimento alla lunghezza calcolata su base cartografica) eventualmente assunta come valore medio relativo ad un settore di $15^\circ$ nell'intorno della direzione i-esima $\phi_i$ (metodo proposto dal C.E.R.C. nel software package A.C.E.S.)
$n$	termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume $n=2$ )



### 3. Descrizione del programma Altair, modalità operative

#### 3.1. Schema logico di calcolo

Il modello Altair ricostruisce gli stati di moto ondoso conseguenti all'azione diretta del vento sulla superficie marina. Il programma è in grado di operare secondo due distinte metodologie operative in funzione delle caratteristiche delle condizioni di input dei dati anemometrici.

##### 3.1.1. Calcolo del moto ondoso sulla base di una sequenza temporale di registrazioni anemometriche

Nota una sequenza temporale di stati di vento, il calcolo degli stati di mare generati viene eseguito operando una prima selezione, nella sequenza di registrazioni anemometriche, in gruppi di misure appartenenti allo stesso evento. Questa selezione viene effettuata considerando la direzione di provenienza del vento e controllando quando questa si discosta dalla direzione media relativa al periodo temporale per uno scarto superiore a  $\pm 45^\circ$  in esame. Nell'ambito di ciascun gruppo di sequenze reali di stati di vento, il programma calcola i valori di altezza significativa ( $H_{m0}$ ) periodo di picco ( $T_p$ ) e direzione media di provenienza ( $\theta_m$ ) del moto ondoso, tenendo conto dell'energia comunque trasferita dagli stati di vento precedenti. Nell'ambito della selezione dei "gruppi di stati di vento" il programma fa riferimento ai seguenti criteri per considerare chiuso un "gruppo":

- due valori consecutivi di direzione del vento sono contraddistinti da estensione nulla del fetch efficace (vento proveniente da un'area esterna a quella di generazione, ad es. vento da terra);
- due valori consecutivi di velocità del vento sono inferiori alla soglia delle calme (1 nodo);
- si verificano in successione una condizione tipo a) ed una tipo b) o viceversa;
- si presentano due valori consecutivi di vento interno alla traversia efficace ma tra loro sfasate di oltre  $45^\circ$  rispetto al valore medio ponderale di tutte le direzioni registrate in precedenza ed appartenenti allo stesso "gruppo".

Per simulare l'effetto di smorzamento del moto ondoso al fine di tenere conto dell'effettiva dissipazione energetica in atto nelle fasi calanti delle velocità del vento si è fatto riferimento all'espressione proposta da Lacombe (1965) calcolando l'altezza d'onda  $H_{sm}$  "di smorzamento", esplicitata in funzione dell'altezza  $H_i$  e del periodo  $T_i$  relativi al precedente intervallo di calcolo, e nell'ipotesi che nell'intervallo di tempo  $i+1$  la velocità del vento sia nulla:

$$H_{sm} = \sqrt{H_i^2 - \frac{H_i^4}{T_i^4} - 122.866} \quad (7)$$

In definitiva quando, per l'intervallo di tempo  $(i+1)$ -esimo, lo stato di vento è tale da non determinare un'incremento dell'agitazione ondosa (perché il vento ha una velocità inferiore a quella relativa al precedente intervallo di calcolo), viene automaticamente calcolata anche l'altezza smorzata in funzione del moto ondoso noto per l'intervallo  $i$ -esimo; nella fase successiva del calcolo, se l'altezza d'onda  $H_{i+1}$  ricavata con la relazione (2) è inferiore a quella di smorzamento  $H_{sm}$  definita dalla (7), si assume questo valore come rappresentativo dell'intervallo  $(i+1)$ -esimo (infatti è improbabile che una riduzione di velocità del vento faccia calare l'altezza d'onda in misura superiore a quella che si registrerebbe nell'ipotesi di totale assenza di vento). Nel caso in cui l'altezza  $H_{i+1}$  risulti maggiore di  $H_{sm}$  si assume come valore dell'altezza d'onda la media aritmetica tra  $H_{i+1}$  e  $H_i$  (si tiene così conto del "ritardato" adeguamento del mare alle nuove ridotte condizioni di vento).

### 3.1.2. Calcolo del moto ondoso sulla base di tabelle climatiche di sintesi di misure anemometriche

Le informazioni anemometriche, desunte su base tabellare, ovviamente non consentono di simulare la ricostruzione degli stati di vento secondo una sequenza temporale reale. In questo caso il programma utilizza le equazioni di base del metodo S.M.B. senza tenere però conto del trasferimento di energia tra stati di vento successivi. Il metodo di calcolo procede definendo per ciascuna delle distinte classi di provenienza e velocità del vento una serie di coppie di valori di velocità e direzione pari al numero di eventi dichiarati nella tabella di riferimento; i valori di velocità e direzioni assunti sono comunque compresi tra i limiti inferiore e superiori delle classi di riferimento; nell'impostazione di questi valori viene utilizzata una funzione di estrazione casuale distribuita uniformemente tra i valori di estremità.

Nota la direzione di provenienza del vento il programma calcola i valori di altezza significativa ( $H_{m0}$ ) periodo di picco ( $T_p$ ) e direzione media di provenienza ( $\theta_m$ ) del moto ondoso, nell'ipotesi di fetch comunque limitato. I risultati di queste elaborazioni vengono memorizzati in forma di tabelle sintetiche del moto ondoso e del flusso di energia associato. Per un completo riscontro dei calcoli effettuati, è possibile anche memorizzare la sequenza degli stati di vento e mare derivati dalle tabelle anemometriche di input.

### 3.2. Caratteristiche e modalità operative del programma

Il programma Altair consente la ricostruzione del moto ondoso generato dall'azione diretta del vento lungo la superficie marina note preliminarmente le caratteristiche dell'area di generazione e una serie storica di dati di vento.

Il programma richiede, come dati di ingresso:

- la definizione dei fetch efficaci (riferiti ad una discretizzazione polare con passo di  $10^\circ$ ) e la correlazione esistente tra la direzione del vento e la direzione del moto ondoso generato da questo;
- i dati di vento (direzione e velocità) che possono essere riferiti ad una sequenza temporale oppure derivati da tabelle sintetiche;
- le condizioni di generazione (Open-Water oppure Restricted Fetches; Deep-Water oppure Shallow-Water dichiarando in quest'ultimo caso la profondità media del fondale);
- eventuale coefficiente di correzione della velocità del vento (legato alla posizione dell'anemometro di riferimento) e l'opzione di eventuale regolarizzazione dell'intensità del vento.

Il programma fornisce come risultati:

- la serie temporale degli stati di mare ricostruiti (in termini di altezza significativa, periodo di picco e direzione media) se si è fatto riferimento ad una sequenza storica di dati anemometrici;
- tabelle climatiche di sintesi del moto ondoso ricostruito sulla base di tabelle climatiche di vento.

All'atto pratico per l'uso del programma Altair si procede nel modo seguente:

1. Analisi preliminare dell'area di generazione del moto ondoso anche in funzione della reale esposizione alle perturbazioni climatiche. Individuazione delle stazioni anemometriche rappresentative dell'area di generazione del moto ondoso (è buona norma verificare preliminarmente sulla base di tabelle e grafici di sintesi le caratteristiche della serie anemometrica da utilizzare).
2. Calcolo dei fetch efficaci e della correlazione vento-mare; selezione delle caratteristiche dell'area di generazione del moto ondoso; calcolo dei coefficienti correttivi per l'intensità del vento.
3. Calcolo e memorizzazione della serie di moto ondoso ricostruita

## 4. Manuale d'uso

### 4.1. Configurazione del sistema

L'applicazione è stata creata per essere utilizzata con i sistemi operativi Windows 95 e Windows NT.

Si consiglia l'utilizzo dell'applicazione su una macchina dotata di almeno 8 Mb di memoria RAM. Per il corretto funzionamento del programma è necessario impostare una risoluzione di almeno 800x600 pixels.

Configurazioni differenti da quella consigliata potrebbero portare ad una errata visualizzazione delle aree grafiche, anche se il funzionamento del programma non ne risulterebbe compromesso.

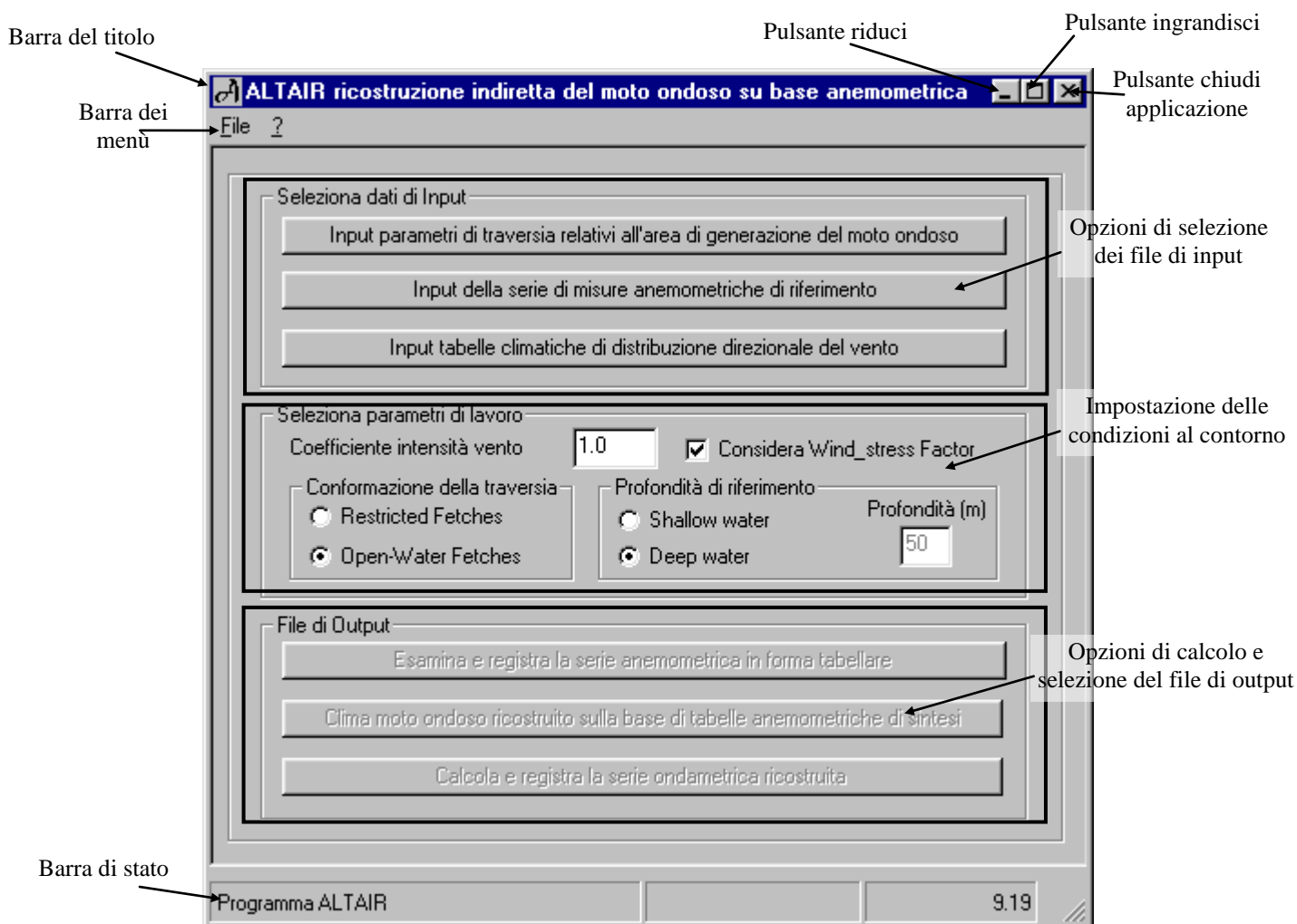


Fig. 2 - Schermata principale del programma

## **4.2. Descrizione degli elementi per la gestione del programma**

### **4.2.1. Selezione dati di input**

L'utente deve preliminarmente selezionare i file di input operando tramite opportuni tasti di comando così definiti:

**Input parametri di traversia relativi all'area di generazione del moto ondoso** file contenente le caratteristiche dei parametri di traversia relativi all'area di generazione del moto ondoso. Questo file deve avere il formato dei file tipo ASCII di output predisposti dal programma ENIF;

**Input della serie di misure anemometriche di riferimento** file contenente la serie storica di dati anemometrici strutturato in campi data/ora (giorno mese anno ora), direzione (°nord) e velocità del vento (nodi);

**Input tabelle climatiche di distribuzione direzionale del vento** in alternativa al file di dati sequenziali anemometrici è possibile fare riferimento a tabelle sintetiche degli stati di vento.

Per le strutture e formati di detti file si rimanda ai paragrafi specifici. Quando viene selezionato un file di input il programma ne effettua la lettura preliminare predisponendo le matrici di lavoro; vengono infine attivati i tasti di comando per la successiva selezione dei file di output e l'esecuzione dei calcoli.

### **4.2.2. Selezione parametri di lavoro**

L'utente può definire il coefficiente di intensità del vento (di default questo coefficiente è posto pari ad 1) ed optare per la condizione di "adeguamento" della velocità del vento in funzione del wind-stress factor;

L'utente deve indicare se la conformazione dell'area di generazione è tale da rispecchiare le condizioni di Restricted-Fetches (tipica per i nostri mari) o di Open-Water Fetches (tipica per siti costieri oceanici)

Infine l'utente deve definire le profondità di riferimento per l'area di generazione tenendo conto che la teoria indica come Deep-Water profondità superiori a 90 m ma solitamente sino a 50 m di profondità le equazioni relative alle condizioni di Shallow-Water o di Deep-Water forniscono valori tra loro molto simili

### **4.2.3. Condizioni di calcolo e File di Output**

Effettuate le dovute selezioni delle condizioni di input l'utente può procedere nella richiesta del tipo di calcolo da effettuare e nella selezione dei file sui quali memorizzare i risultati. A tal riguardo si utilizzano i seguenti tasti di comando:

**Esamina e registra la serie anemometrica in forma tabellare** in questo caso il programma registra, nel file selezionato dall'utente, tabelle climatiche di sintesi della serie anemometrica esaminata (a tal riguardo si utilizzano due tipologie di tabelle per distinte classi di velocità e settori di provenienza del vento); nel contempo vengono predisposti file in formato DXF per il tracciamento di rose polari relative alle precedenti tabelle;

**Clima di moto ondoso ricostruito sulla base di tabelle anemometriche di sintesi** in questo caso il programma ricostruisce il moto ondoso sulla base delle tabelle di vento e dei fetch e delle correlazioni vento-mare; predispone e salva le tabelle climatiche e a richiesta dell'utente registra la serie di stati di mare ricostruiti;

**Calcola e registra la serie ondometrica ricostruita** il programma ricostruisce il moto ondoso sulla base della sequenza reale degli stati di vento dei fetch e delle correlazioni vento-mare; viene predisposta e salvata la sequenza di stati di mare ricostruiti.

Per le strutture e formati di detti file si rimanda ai paragrafi specifici. Quando viene selezionato un file di input il programma ne effettua la lettura preliminare predisponendo le matrici di lavoro; vengono infine attivati i tasti di comando per la successiva selezione dei file di output e l'esecuzione dei calcoli.

### 4.3. Descrizione dei file per i dati di input

I file relativi ai dati di input devono essere scritti in caratteri ASCII (file testo standard) e formattati come segue.

#### 4.3.1. File di input dei fetch efficaci e delle correlazioni vento-mare

Viene utilizzato il file standard prodotto come output dal programma ENIF.

Nella forma più generale la struttura di questo tipo di file è la seguente

12345678901234567890123456789012345678901234567890	(Numerazione colonne)
Fetch geografico a (nominativo sito)	(riga di commento)
Termine esponenziale = .....	(termine esponenziale)
Metodo di integrazione : .....	(Saville;Seymour)
Fetch geografici regolarizzati	(metodo CERC-ACES)
	(intest. dati di output)
Azimuth           Fetch           Fetch           Direzione	(intest. dati di output)
(°Nord)           Geografico   Efficace       Mare	Obbligatorio (intest. dati di output)
0                 718.0         3363.4         19	" " (dati di output)
10                2640.3        4769.5         24	" "
20                5513.7        5541.5         29	" "
...                ....           ....            ...	
350               11863.6        5905.9         33	" "

Le prime righe del file standard non sono necessarie per le elaborazioni di Altair (quindi possono anche essere omesse o cancellate); è invece obbligatorio scrivere la terza riga di intestazione dei dati perché delimita la riga successiva di input dei dati.

E' necessario introdurre 36 righe relative agli azimuth definiti con passo angolare di 10° a partire da 0°nord; di conseguenza il primo campo di ogni riga di input è predefinito mentre i restanti tre campi sono riferiti alla traversia del sito in esame. Il programma legge le righe di input in formato libero pertanto è sufficiente separare ogni campo con almeno uno spazio.

#### 4.3.2. File di input della serie di misure anemometriche

Nella forma più generale la struttura di questo tipo di file è la seguente:

123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890	(Numero colonna)
GG           MM           AA           OO           DDD           VV.V	
01           12           98           12           210           11.6	

per ogni riga di input i campi di input devono essere rigidamente riportati e contenuti nell'ordine seguente:

GG =	GIORNO	colonne (1-10)	viene comunque letto come numero intero al massimo di due cifre
MM =	MESE	colonne (11-20)	viene comunque letto come numero intero al massimo di due cifre
AA =	ANNO	colonne (21-30)	viene comunque letto come numero intero al massimo di due cifre
OO =	ORA	colonne (31-40)	viene comunque letto come numero intero al massimo di due cifre

DDD = DIREZIONE colonne (41-50)	si intende la direzione di provenienza del vento (riferita al nord geografico) viene letto come numero reale ma è bene che non abbia cifre decimali
VV.V = VELOCITÀ colonne (51-60)	velocità (misurata in nodi) viene letto come numero reale può presentare anche cifre decimali

Il programma è in grado anche di interpretare e filtrare eventuali righe di commento; i valori di velocità indefiniti devono essere dichiarati usando il numero -999 secondo gli standard internazionali di archiviazione dei dati meteorologici.

#### 4.3.3. File di input di tabelle climatiche di distribuzione direzionale del vento

Viene utilizzato il file standard prodotto dalla procedura di Altair predisposta per l'analisi delle serie anemometriche.

### 4.4. Descrizione dei file di output

#### 4.4.1. File di output di tabelle climatiche di distribuzione direzionale del vento

Questo file viene generato dall'opzione di lavoro:

**Esamina e registra la serie anemometrica in forma tabellare**

Vengono prodotte due tipologie di tabelle riferite alle stagioni ed al totale annuale per un totale complessivo di 10 tabelle. Le stagioni sono classate secondo lo standard internazionale della meteorologia (Inverno dal 1-gennaio al 31-marzo; Primavera dal 1-aprile al 30-giugno; Estate dal 1-luglio al 30-settembre; autunno dal 1-ottobre al 31-dicembre)

I dati esaminati vengono preliminarmente filtrati eliminando i valori non validi (oltre a quelli dichiarati con il valore -999, secondo lo standard meteorologico internazionale, vengono scartati i valori con direzione superiore a 360° ed intensità del vento superiore a 98 nodi) e classando i dati in funzione dell'intensità del vento e della direzione di provenienza.

Il primo tipo di tabella riassume i dati di vento riportando in colonne la provenienza, per settori di 30° (ad es. la direzione di 180° è rappresentativa di direzioni maggiori di 165°N e minori/uguali a 195° N), ed in righe le classi di intensità definite secondo la nota scala Beaufort:

Forza del vento	Scala descrittiva	Velocità del vento (nodi)
0	Calma	< 1
1	Bava di vento	1 ÷ 3
2	Brezza leggera	4 ÷ 6
3	Brezza tesa	7 ÷ 10
4	Vento moderato	11 ÷ 16
5	Vento teso	17 ÷ 21
6	Vento fresco	22 ÷ 27
7	Vento forte	28 ÷ 33
8	Burrasca	34 ÷ 40
9	Burrasca forte	41 ÷ 47
10	Tempesta	48 ÷ 55
11	Tempesta violenta	56 ÷ 63
12	Uragano	≥ 64

Il secondo tipo di tabella riassume i dati di vento riportando in colonne le classi di intensità (comunque definite in funzione delle soglie di velocità della scala Beaufort discretizzando però in quattro classi le velocità superiori a 64 nodi) ed in righe le direzioni di provenienza distinte per settori di 10° (ad esempio la direzione di 180° è rappresentativa di direzioni maggiori di 175°N e minori/uguali a 185° N).

REGISTRAZIONI ANEMOMETRICHE - ESTATE													
Distribuzione direzionale per classi di velocità del vento in scala Beaufort													
Forza	CLASSI DI PROVENIENZA (° nord)												
Beaufort	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	Tot
1	57	29	21	31	40	35	29	9	10	15	22	29	327
2	104	86	32	32	47	89	35	16	7	7	15	24	494
3	38	60	23	17	17	42	22	9	7	1	2	7	245
4	1	19	22	4	5	6	3	3	5	1	0	0	69
5	1	5	3	2	2	1	1	1	1	0	1	0	18
6	0	2	3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	7
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Totale	203	205	104	86	112	173	90	38	31	24	40	60	1166

Numero totale eventi rilevati = 1314  
 Numero degli stati di vento (vel.>= 1 nodo) = 1171  
 Calme di vento (vel.< 1 nodo) = 87  
 Eventi indefiniti 56

Esempio del primo tipo di tabella climatica di sintesi delle registrazioni anemometriche

REGISTRAZIONI ANEMOMETRICHE (nodi) - ANNUALE																		
velocità >	1	5	9	13	17	21	25	29	33	37	44	51	58	65	72	79		Tot
=<	4	8	12	16	20	24	28	32	36	43	50	57	64	71	78	85	>85	
0	189	136	11	4	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	4	348
10	161	149	34	3	4	0	2	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	356
20	108	167	77	18	6	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	378
30	85	114	60	20	11	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	293
40	60	60	44	28	8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	202
50	48	37	24	29	13	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	157
60	40	45	26	13	7	7	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	145
70	37	30	19	16	5	1	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	114
80	52	32	12	9	5	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	113
90	48	35	10	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	97
100	54	28	7	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93
110	49	27	7	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90
120	71	43	16	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139
130	87	82	26	5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	201
140	68	72	14	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	163
150	63	61	12	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	142
160	36	48	15	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	102
170	57	36	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104
180	32	21	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
190	29	24	7	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66
200	36	26	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66
210	28	17	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
220	36	8	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51
230	39	13	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
240	25	9	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38
250	39	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
260	36	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42
270	59	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70
280	55	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63
290	60	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	72
300	91	15	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	108
310	88	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104
320	90	19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110
330	102	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	123
340	145	73	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	222
350	244	138	8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	391
Tot.	2585	1646	473	189	75	21	15	6	2	0	3	2	0	2	1	1	8	5029

Numero totale eventi rilevati = 6206  
 Numero degli stati di vento (vel.>= 1 nodo) = 5028  
 Calme di vento (vel.< 1 nodo) = 1075

Esempio del primo tipo di tabella climatica di sintesi delle registrazioni anemometriche

#### 4.4.2. File di output del clima di moto ondoso ricostruito sulla base di tabelle climatiche di distribuzione direzionale del vento

Questo file viene generato dall'opzione di lavoro:

**Clima di moto ondoso ricostruito sulla base di tabelle anemometriche di sintesi**

Nel file vengono salvate, in tabelle di sintesi le caratteristiche del moto ondoso ricostruito ed il flusso di energia associato a questo.

Vengono prodotte cinque tipologie di tabelle riferite alle stagioni ed al totale annuale, una prima serie relativa ai valori di altezza d'onda ed una seconda relativa al flusso di energia, per un totale complessivo di 25 tabelle.

Il primo tipo di tabelle riassume il clima di moto ondoso riportando in colonne le direzioni di provenienza distinte per settori di 30° ed in righe nove classi di altezza d'onda significativa:

Classe	Altezza significativa $H_s$ (m)
1	< 0.25
2	0.25 ÷ 1.5
3	1.5 ÷ 2.5
4	2.5 ÷ 3.5
5	3.5 ÷ 4.5
6	4.5 ÷ 5.5
7	5.5 ÷ 6.5
8	6.5 ÷ 7.5
9	≥ 7.5

Il secondo tipo di tabelle riassume il clima di moto ondoso riportando in colonne le stesse nove classi di altezza d'onda significativa ed in righe le direzioni di provenienza distinte per settori di 10°.

Il terzo e quarto tipo di tabelle sintetizzano i valori del flusso di energia associato al moto ondoso secondo la classazione degli eventi di moto ondoso già definita per le precedenti tipologie di tabelle.

Nel quinto tipo di tabelle vengono sintetizzate le coppie di altezza significativa e periodo di picco secondo la classazione delle altezze d'onda già definita per le precedenti tipologie di tabelle e per quanto riguarda il periodo:

Classe	Periodo di picco $T_p$ (s)
1	1 ÷ 2.
2	2 ÷ 4
3	4 ÷ 6
4	6 ÷ 8
5	8 ÷ 10
6	10 ÷ 12
7	12 ÷ 14



8	$\geq 14$
---	-----------

TABELLA CLIMATICA RICOSTRUITA SULLA BASE DI TABELLE DI REGISTRAZIONI ANEMOMETRICHE - INVERNO													
Distribuzione direzionale per settori di 30°													
Hs (m)	CLASSI DI PROVENIENZA (° nord)												Tot
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	
<=.25	231	166	158	72	107	63	4	13	26	25	40	0	905
0.25-1.5	9	40	167	45	23	4	0	0	0	1	0	0	289
1.5-2.5	0	0	14	11	0	0	0	0	0	0	0	0	25
2.5-3.5	0	0	2	6	0	0	0	0	0	0	0	0	8
3.5-4.5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4.5-5.5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5.5-6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5-7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>=7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totale	240	206	341	136	130	67	4	13	26	26	40	0	1229

TABELLA CLIMATICA RICOSTRUITA SULLA BASE DI TABELLE DI REGISTRAZIONI ANEMOMETRICHE - INVERNO										
Distribuzione direzionale per settori di 10°										
Hs (m)	CLASSE DI PROVENIENZA (° nord)									Tot
	>	0.25	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	
<0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	25	0	0	0	0	0	0	0	0	25
20	108	0	0	0	0	0	0	0	0	108
30	161	15	0	0	0	0	0	0	0	176
40	104	57	0	0	0	0	0	0	0	161
50	35	43	0	0	0	0	0	0	0	78
60	14	13	0	0	0	0	0	0	0	27
70	19	19	0	0	0	0	0	0	0	38
80	23	26	0	0	0	0	0	0	0	49
90	38	50	9	1	1	0	0	0	0	99
100	26	27	6	7	0	0	0	0	0	66
110	21	4	1	0	0	0	0	0	0	26
120	33	7	0	0	0	0	0	0	0	40
130	33	9	0	0	0	0	0	0	0	42
140	29	10	0	0	0	0	0	0	0	39
150	33	5	0	0	0	0	0	0	0	38
160	38	3	0	0	0	0	0	0	0	41
170	31	1	0	0	0	0	0	0	0	32
180	11	0	0	0	0	0	0	0	0	11
190	6	0	0	0	0	0	0	0	0	6
200	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
210	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
220	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3
230	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5
240	6	0	0	0	0	0	0	0	0	6
250	10	0	0	0	0	0	0	0	0	10
260	9	0	0	0	0	0	0	0	0	9
270	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5
280	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8
290	9	0	0	0	0	0	0	0	0	9
300	11	0	0	0	0	0	0	0	0	11
310	22	0	0	0	0	0	0	0	0	22
320	18	0	0	0	0	0	0	0	0	18
330	13	0	0	0	0	0	0	0	0	13
340	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5
350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tot.	915	289	16	8	1	0	0	0	0	1229

FLUSSO DI ENERGIA DEL MOTO ONDOSO RICOSTRUITO SULLA BASE DI TABELLE DI REGISTRAZIONI ANEMOMETRICHE - INVERNO

Distribuzione direzionale per settori di 30°

CLASSI DI PROVENIENZA (° nord)

Hs (m)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	Tot
<=.25	3.8	4.6	4.7	1.5	1.9	0.6	0.0	0.1	0.1	0.4	0.3	0.0	17.9
0.25-1.5	2.6	30.6	291.3	159.0	31.4	1.7	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	516.7
1.5-2.5	0.0	0.0	297.9	245.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	543.3
2.5-3.5	0.0	0.0	101.0	400.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	501.4
3.5-4.5	0.0	0.0	0.0	145.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	145.8
4.5-5.5	0.0	0.0	0.0	186.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	186.7
5.5-6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6.5-7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
>=7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Totale	6.4	35.2	694.9	1138.7	33.3	2.3	0.0	0.1	0.1	0.5	0.3	0.0	1911.7

FLUSSO DI ENERGIA DEL MOTO ONDOSO RICOSTRUITO SULLA BASE DI TABELLE DI REGISTRAZIONI ANEMOMETRICHE - INVERNO

Distribuzione direzionale per settori di 10°

Hs (m)	>	0.25	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	Tot
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
20	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1
30	3.6	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8
40	2.5	31.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.9
50	1.3	29.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.0
60	0.4	14.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.5
70	0.8	22.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.0
80	0.4	56.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	57.0
90	0.9	167.7	172.1	46.9	93.2	0.0	0.0	0.0	0.0	480.8
100	0.4	100.1	110.7	402.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	613.5
110	0.2	2.8	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.0
120	17.7	466.1	300.8	449.1	93.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1326.9
130	0.4	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1
140	0.7	9.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8
150	0.9	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8
160	0.8	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4
170	0.2	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9
180	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
190	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
210	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
220	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
230	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
240	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
250	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
260	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
270	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
280	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
290	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
310	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
320	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
330	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
340	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
350	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tot.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABELLA CLIMATICA H-T RICOSTRUITA SULLA BASE DI TABELLE DI REGISTRAZIONI ANEMOMETRICHE - INVERNO

PERIODO DI PICCO Tp (s)

Hs (m)	Tp >= 1	2	4	6	8	10	12	14	Tot
<=.25	516	66	0	0	0	0	0	0	974
0.25-1.5	0	251	3	0	0	0	0	0	254
1.5-2.5	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2.5-3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5-4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5-5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5-6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5-7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>=7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totale	516	317	4	0	0	0	0	0	1229

#### 4.4.3. File di output del clima di moto ondoso ricostruito sulla base di una serie di misure anemometriche

Questo file viene generato dall'opzione di lavoro:

**Calcola e registra la serie ondometrica ricostruita**

Nel file di output standard vengono registrati i risultati dell'elaborazione. Vengono riportati secondo la struttura seguente:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	(N. colonne)
AA	MM	GG	OO	D_V	V_V	Hs	Tp	Dsm	FETCH																																																					
				(°N)	(m/s)	(m)	(s)	(°N)	(km)																																																					
94	05	18	15	100	14.8	01.26	04.29	212.0	128.3																																																					
94	05	18	18	130	08.8	01.16	04.38	227.5	175.0																																																					
94	05	18	21	170	04.0	00.25	02.09	316.0	191.5																																																					

ove:

AA =	ANNO	colonne (1-2)	
MM =	MESE	colonne (5-6)	
GG =	GIORNO	colonne (9-10)	
OO =	ORA	colonne (13-14)	
D_D =	DIREZIONE	colonne (20-22)	direzione di provenienza del vento (riferita al nord geografico)
V_V =	VELOCITÀ	colonne (27-30)	velocità (m/s) del vento
Hs =	ALTEZZA	colonne (34-38)	Altezza significativa (m) dell'onda ricostruita
Tp =	PERIODO	colonne (42-46)	Periodo di picco (s) dell'onda ricostruita
Dsm =	DIREZIONE	colonne (50-54)	direzione media di provenienza del moto ondoso (riferita al nord geografico)
FETCH =	FETCH	colonne (56-62)	Fetch efficace di riferimento (km)

**BIBLIOGRAFIA**

- “Freeboard allowances for waves in inland reservoirs” Saville T. et altri, 1962  
Journal of the Waterways and Harbours Division, Proc. ASCE, n.18 WW2 may 1962
- “Estimating wave generation on restricted fetches” Seymour R.J., 1977  
Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, Proc. ASCE, n.103 WW2 may 1977
- “Shore Protection manual”  
C.E.R.C., Washington, fourth edition, 1984
- “Wave prediction in reservoirs comparison of available methods” Owen M.W., 1988  
Hydraulics Research Limited, Wallingford – Oxfordshire, Report EX1809 october 1988
- “Automated Coastal Engineering System – Technical Reference” Leenknecht D.A. et altri, 1992  
C.E.R.C. – W.E.S., Vicksburg, Version 1.06 january 1992
- “Coastal Stabilization” R.Silvester, J.R.C. Hsu, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1997

## DESCRIZIONE SINTETICA DEL CODICE SWAN

Il codice SWAN (Simulating Waves Nearshore) è un modello spettrale di terza generazione sviluppato dall'Università olandese "Delft University of Technology".

Il codice, che può essere scaricato ed utilizzato liberamente, consente di studiare la propagazione di stati di mare descritti da uno spettro di energia disperso in frequenza e direzione tenendo conto dei principali fenomeni fisici che intervengono su fondali intermedi e bassi in presenza dell'azione del vento. In particolare i fenomeni fisici presi in esame dal modello sono:

- propagazione del moto ondoso sia in condizioni stazionarie che in condizioni transitorie tenendo conto dei fenomeni di rifrazione e shoaling indotti sia dal fondale che dalla presenza di correnti;
- generazione delle onde ad opera del vento;
- interazione non-lineare tra le componenti spettrali indotta da "triplette" e da "quadruplette";
- dissipazioni di energia per frangimento in acqua profonda e in acqua bassa;
- dissipazioni di energia per attrito sul fondo;
- sovrizzo del livello del mare indotto dalle onde frangenti;
- diffrazione del moto ondoso (approccio semplificato).

Il modello SWAN è un modello mediato sulla fase delle onde che risolve l'equazione di bilancio della densità di azione  $N = E/\sigma$  dove  $E(\sigma, \theta)$  è la densità di energia dello spettro, con  $\sigma$  frequenza delle onde (osservata in un sistema di riferimento mobile che si sposta con la velocità della corrente) e  $\theta$  direzione di propagazione delle onde (direzione normale alla cresta delle onde di ciascuna componente spettrale). Si evidenzia che mentre la densità di azione  $N$  si conserva nella propagazione delle onde in presenza di una corrente pre-esistente (corrente ambientale), la stessa cosa non vale per la densità di energia  $E$ .

L'evoluzione nello spazio e nel tempo della densità di azione  $N$  è governata dall'equazione di bilancio dell'azione che può essere espressa nella seguente forma:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_z \left[ \left( \vec{c}_g + \vec{U} \right) N \right] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

Il termine di sinistra dell'equazione esprime la parte cinematica dell'evoluzione delle onde. Il termine di destra esprime invece tutti i processi fisici che determinano:

- la generazione delle onde ad opera del vento (termini "sorgente");
- la dissipazione di energia delle onde (termini "pozzo")
- lo scambio di energia tra le componenti spettrali.

Questi processi sono riferiti alla densità di energia dello spettro.

Il secondo termine della parte sinistra dell'equazione esprime la propagazione dell'energia nello spazio geografico coincidente con il livello medio marino;  $c_g$  è celerità di gruppo definita dalla relazione:

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial \vec{k}}$$

e dalla relazione di dispersione:

$$\sigma^2 = g |\vec{k}| \tanh(|\vec{k}| d)$$

dove  $\vec{k}$  è il vettore numero d'onda e  $d$  è la profondità locale.

Il terzo termine della parte sinistra dell'equazione esprime l'effetto della variazione della frequenza  $\sigma$  indotta dalla variazione della profondità e dalla variazione della corrente. Il quarto termine della parte sinistra esprime l'effetto di rifrazione indotto dalla profondità e dalla corrente.

I termini  $c_\sigma$  e  $c_\theta$  sono le celerità di propagazione nel dominio della frequenza e della direzione.

Per maggiori dettagli sul codice SWAN ci si può riferire alla documentazione scientifica e tecnica del codice disponibile in rete.