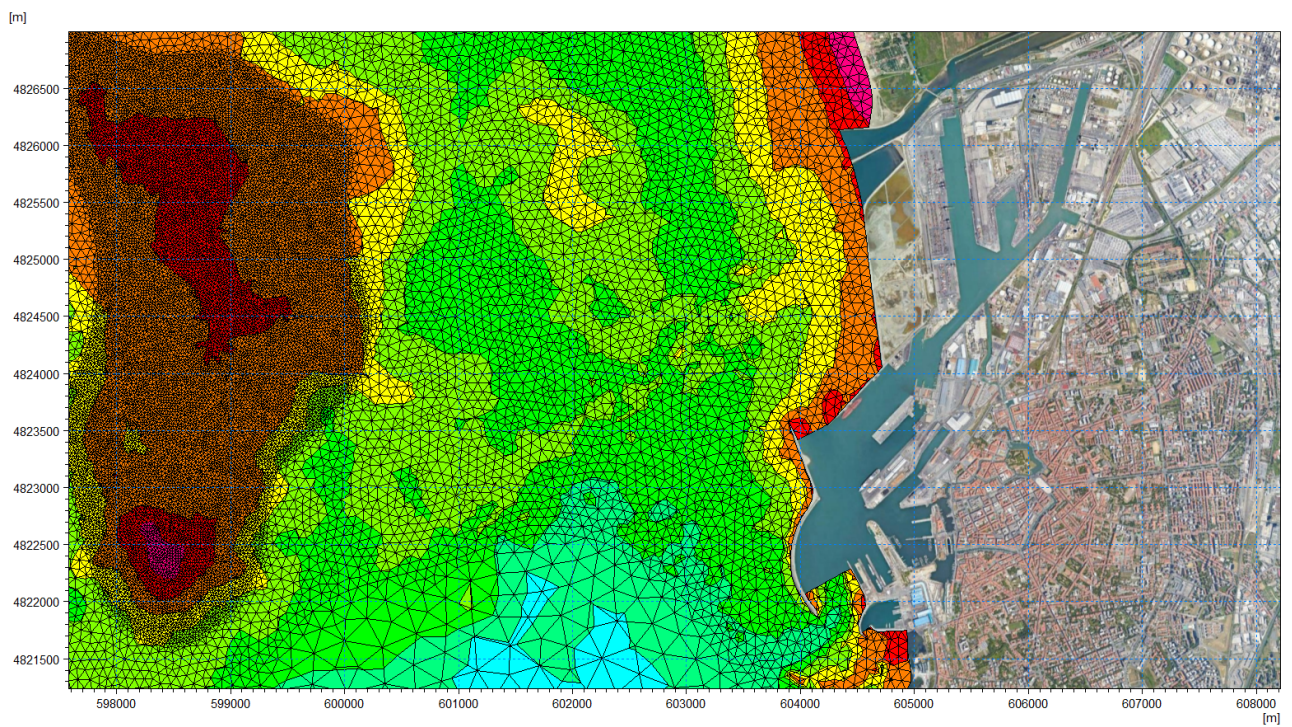


# Analisi e valutazione tecnica degli effetti dell'intervento denominato Darsena Europa sul litorale pisano

Attività di studio e modellazione numerica

Relazione tecnica



This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)

ISO 9001  
Management System Certification

BUREAU VERITAS  
Certification Denmark A/S

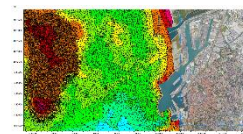


# Analisi e valutazione tecnica degli effetti dell'intervento denominato Darsena Europa sul litorale pisano

Attività di studio e modellazione numerica

Relazione tecnica

Committente **Comune di Pisa**  
Referente del Committente **dott. geol. Marco Redini**



*Dettaglio della mesh di calcolo del modello di propagazione del moto ondoso*

Project manager	Luis Cusati
Quality supervisor	Brunella Guida
Author	Luis Cusati
Codice progetto - elaborato	22803234-01-00100
Data di approvazione	29-01-2021
Emissione	1.0
Classificazione	Aperta



## INDICE

<b>1</b>	<b>Premessa .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Inquadramento del sito di studio .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Approccio metodologico ed attività di studio condotte .....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Analisi studi pregressi e raccolta dati disponibili.....</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Analisi dati meteomarini al largo .....</b>	<b>5</b>
5.1	Dati di vento .....	7
5.2	Dati di moto ondoso .....	9
5.3	Dati di livello della superficie marina.....	11
<b>6</b>	<b>Analisi statistica degli eventi estremi al largo.....</b>	<b>13</b>
6.1	Altezza d'onda significativa.....	13
6.2	Intensità del vento.....	15
6.3	Livello marino .....	16
<b>7</b>	<b>Propagazione del moto ondoso .....</b>	<b>17</b>
7.1	Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno .....	17
7.2	Scenari di simulazione .....	19
7.3	Risultati della propagazione della serie temporale quarantennale .....	19
7.4	Analisi delle differenze nel clima ondoso tra scenario attuale e progetto.....	22
<b>8</b>	<b>Analisi di base del trasporto litoraneo.....</b>	<b>26</b>
8.1	Impostazione del modello LITDRIFT .....	26
8.2	Calcolo del trasporto <i>longshore</i> netto e lordo nei transetti C1 e C2 .....	28
8.3	Analisi della variabilità del trasporto netto e lordo nei 41 anni analizzati .....	30
<b>9</b>	<b>Modello di dettaglio della dinamica costiera.....</b>	<b>33</b>
9.1	Dominio di calcolo e batimetria .....	33
9.2	Scenari di simulazione .....	35
9.3	Selezione delle condizioni d'onda utilizzate per le simulazioni.....	36
9.4	Risultati del modello integrato onda-corrente .....	37
9.4.1	Risultati del modello su tutto il dominio.....	37
9.4.2	Risultati del modello nell'area di estremo interesse.....	48
<b>10</b>	<b>Sintesi dello studio e conclusioni .....</b>	<b>58</b>

## ALLEGATI

### **ALLEGATO A – MWM**

Descrizione Tecnica

### **ALLEGATO B– MIKE 21 Spectral Waves (SW)**

Descrizione Tecnica

### **ALLEGATO C – MIKE 21 Hydrodynamics (HD)**

Descrizione Tecnica

### **ALLEGATO D – Littoral Process (Litdrift)**

Descrizione Tecnica

## 1 Premessa

Oggetto del presente studio sono le attività di analisi e modellazione numerica volte a valutare gli effetti del progetto denominato Darsena Europa sul litorale pisano ed approfondire gli studi modellistici già effettuati nell'ambito di tale progetto.

In particolare, nell'ambito del Progetto Preliminare della Piattaforma Europa è stato condotto uno studio della dinamica litoranea finalizzato ad analizzare gli impatti prodotti dal progetto sul litorale a Nord del Porto di Livorno fino alla Foce dell'Arno. Lo studio ha eseguito una serie di simulazioni delle mareggiate caratteristiche del sito, per studiare analizzare sia la circolazione idrodinamica e il trasporto solido indotti dal moto ondoso sia gli effetti delle portate di piena dello Scolmatore d'Arno. I risultati di suddetto studio mostrano che l'impatto delle nuove opere sul trasporto solido associato per esempio ad una delle mareggiate considerate (provenienti da 250°N) si esaurisce entro una distanza di circa 3000 m a Nord dello Scolmatore.

Sebbene la modellazione sia stata effettuata con l'impiego di modelli allo stato dell'arte, essa è stata limitata alle mareggiate con frequenza media di superamento 1 giorno/anno ragione per cui l'impatto stimato è da considerarsi rappresentativo delle condizioni di breve termine.

Si è pertanto ritenuto necessario effettuare una più accurata verifica di tali impatti anche sul medio-lungo termine tenendo conto il più possibile della dinamica associata alle condizioni tipiche (vale a dire quelle più frequenti) che concorrono al trasporto solido medio annuo, oltre che a quelle estreme e meno frequenti nell'arco dell'anno. Tale verifica è stata effettuata con modelli idrodinamici allo stato dell'arte, applicati ad elevata risoluzione spaziale in modo da riprodurre le condizioni meteomarine costiere che caratterizzano l'arco litoraneo in oggetto, con particolare attenzione al tratto che va da Marina di Pisa fino allo Scolmatore.

Nello specifico, per la finalità dello studio sono stati utilizzati differenti codici di calcolo appartenenti alla famiglia MIKE Powered by DHI, in particolare:

- MIKE 21 SW (Spectral Waves), modello d'onda bidimensionale;
- MIKE 21 HD (Hydrodynamics), modulo idrodinamico bidimensionale;
- MIKE 21 ST (Sand Transport), modulo di trasporto di sedimenti non coesivi;
- LitDrift, modulo per la simulazione del trasporto di sedimenti, monodimensionale.

Le attività modellistiche hanno permesso di riprodurre le condizioni meteomarine costiere che caratterizzano l'arco litoraneo in oggetto, con particolare attenzione al tratto che va da Marina di Pisa fino allo Scolmatore. Particolare attenzione è stata rivolta all'influenza che le Secche della Meloria esercitano sulla dinamica costiera.

## 2 Inquadramento del sito di studio

Il paraggio costiero del sito oggetto di studio si sviluppa per circa 20 km ed è compreso tra la foce del fiume Morto (a Nord) ed il porto di Livorno (a Sud). Il paraggio, procedendo da Nord verso Sud, risulta caratterizzato da:

- litorale sabbioso con presenza di opere di difesa costiera (prevalentemente trasversali) nel tratto compreso tra la foce del fiume Morto e Bocca d'Arno;
- litorale sabbioso con presenza di opere di difesa costiera (scogliere emerse e pennelli) nel tratto antistante Marina di Pisa;
- litorale sabbioso libero nel tratto compreso tra Marina di Pisa e lo scolmatore;
- zona portuale con presenza di scogliere radenti e dighe foranee nel tratto compreso tra lo scolmatore ed il porto di Livorno.

Principale caratteristica di questa area è l'influenza che le Secche della Meloria esercitano sul moto ondoso e – di conseguenza - sul flusso sedimentario litoraneo. Per tale ragione, nelle attività modellistiche descritte nei paragrafi a seguire, è stata rivolta particolare attenzione alla caratterizzazione modellistica di tale area.

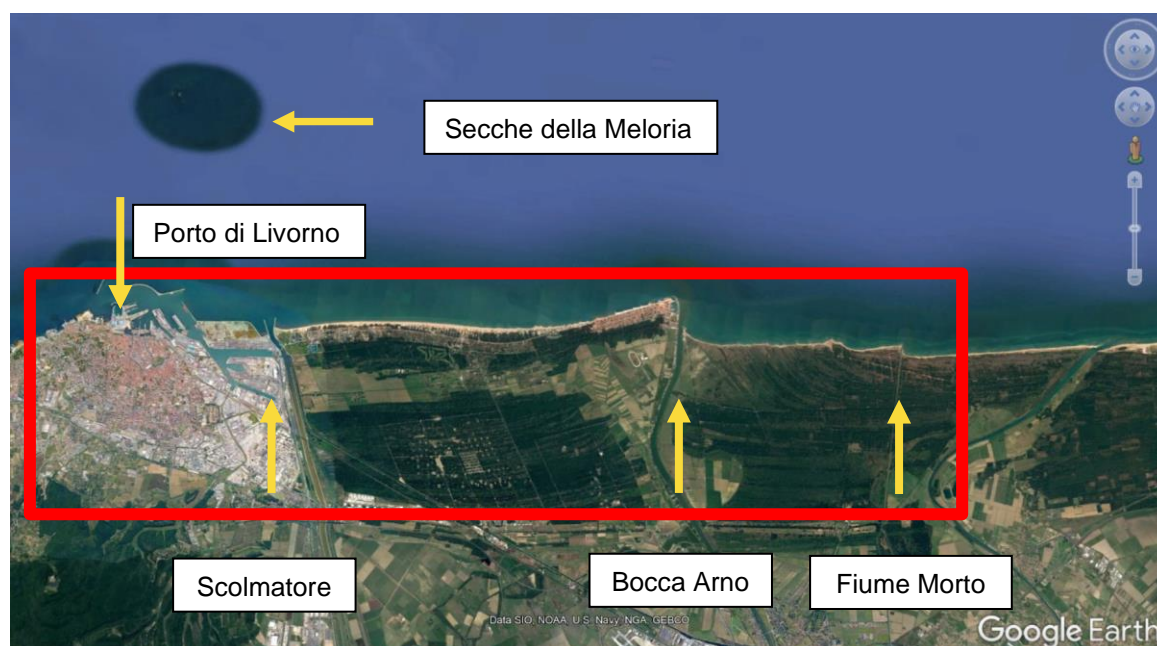


Figura 2-1 Inquadramento del litorale oggetto di studio (riquadro rosso)



### 3 Approccio metodologico ed attività di studio condotte

Come anticipato in premessa il fine ultimo del presente studio è quello di quantificare l'impatto nel medio-lungo termine della realizzazione della Piattaforma Europa sul litorale immediatamente a Nord del porto di Livorno.

Le attività di studio prevedono una fase iniziale di analisi e revisione degli studi pregressi e collezione dati batimetrici e sedimentologici (paragrafo 4). Successivamente viene effettuata la caratterizzazione dei dati meteomarini (onda vento e livelli marini) al largo del sito oggetto di studio (paragrafo 5) e la relativa analisi degli eventi estremi (paragrafo 6). Tali attività, propedeutiche alle fasi modellistiche successive, sono basate principalmente sull'analisi dei dati database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory).

In seguito, viene predisposto un modello di propagazione largo-costa del moto ondoso (paragrafo 7), mediante l'ausilio del codice di calcolo MIKE21 SW (Spectral Waves). Tale modello, che permette di effettuare la ricostruzione storica (degli ultimi 41 anni) del moto ondoso a costa, viene implementato sia nello scenario attuale che nell'ipotesi di realizzazione del progetto Piattaforma Europa. Al fine di valutare l'estensione del tratto di litorale influenzato dalle opere in progetto sono state analizzate le serie pluriennali del moto ondoso a costa (in diversi punti lungo il litorale), nei due scenari di simulazione, in modo da comprendere le differenze tra le due configurazioni in termini di risultanti energetiche e direzioni medie di provenienza.

Successivamente, al fine di effettuare una stima del trasporto sedimentario locale, viene adottato un approccio di tipo monodimensionale tramite l'impiego del modello numerico LITDRIFT, parte del pacchetto Littoral Processes (LITPROC) di DHI. L'applicazione del modulo LITDRIFT, per un transetto significativo dell'intera area oggetto di studio, permette di definire il budget sedimentario sulla base del clima meteomarino, (onda, vento, marea e *storm surge*), delle quote del profilo e della granulometria lungo lo stesso.

L'applicazione del modello LITDRIFT permette inoltre di identificare una serie di condizioni ondose frequenti e meno frequenti significative per le dinamiche di trasporto litoraneo. Sulla base di tali condizioni ondose viene poi applicato un modello bidimensionale di dettaglio della dinamica costiera composto dai moduli MIKE21 SW (Spectral Waves) e MIKE HD (Hydrodynamics). Tale modello, applicato sia nello scenario di stato attuale che in quello di progetto, consente di valutare le differenze tra stato attuale e progetto anche alla scala di ogni singola mareggiata e ad un livello di dettaglio locale.

## 4 Analisi studi pregressi e raccolta dati disponibili

Nell'ambito della realizzazione del progetto preliminare e definitivo della Darsena Europa sono stati condotti diversi studi idraulico-marittimi ed effettuate specifiche indagini topo batimetriche e sedimentologiche. L'attività di analisi di tutto il materiale messo a disposizione dalla committenza è fondamentale per inquadrare le problematiche di studio e per il raggiungimento degli obiettivi del presente studio.

Per quanto riguarda gli studi pregressi analizzati risulta utile citare i seguenti elaborati:

- Studio Idraulico Marittimo volto a caratterizzare il clima ondoso ordinario ed estremo del paraggio antistante il litorale di Marina di Pisa.
- Studio morfologico di base volto ad investigare le dinamiche evolutive del litorale oggetto di studio mediante un'analisi della cartografia storica.
- Studio della dinamica litoranea volto a caratterizzare il regime di trasporto solido sia fluviale che costiero mediante opportuna modellistica numerica.
- Studio della risospensione dei sedimenti relativo all'analisi di dispersione dei sedimenti rilasciati durante le operazioni di dragaggio mediante la realizzazione di un modello tridimensionale.

Risultano inoltre disponibili una serie di campagne topo-batimetriche messe a disposizione del comune di Pisa in formato digitale. Nello specifico:

- Rilievi batimetrici effettuati dal Comune di Pisa negli anni 2010-2019 relativi al tratto di mare antistante il litorale delimitato a sud dallo scolmatore dell'Arno ed a nord dal Fiume Serchio ed estesi indicativamente fino alla batimetrica -10m.
- Rilievo batimetrico dell'area delle Secche della Meloria del 2013 realizzato dalla Provincia di Pisa.
- Rilievo multibeam realizzato nell'ambito della realizzazione del PRP da Geopolaris srl nell'area del Porto di Livorno nel 2011.
- Rilievo di dettaglio della foce dello Scolmatore effettuato nel 2018 dalla Provincia di Pisa.

Per quanto riguarda le analisi sedimentologiche risulta disponibile una campagna di indagini effettuate dalla ditta Nuova Idrocart srl nel 2005 ed analizzati dal laboratorio Ilag srl.

## 5 Analisi dati meteomarini al largo

Tra le prime attività necessarie negli studi di dinamica costiera, vi è la caratterizzazione delle condizioni meteomarine di riferimento al largo del tratto di costa interessato, con particolare riferimento al vento e al moto ondoso.

Per quanto riguarda la disponibilità di registrazioni di moto ondoso, la principale fonte di riferimento nel nostro paese è la Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). I dati di boa possono essere utilizzati come riferimento anche ad una certa distanza dal sito di interesse, qualora l'esposizione alle mareggiate per i diversi settori direzionali possa essere considerata simile tra il sito in esame ed il sito che ospita la boa ondametrica. Frequentemente, tuttavia, per la caratterizzazione meteomarina di un sito non è possibile fare affidamento alle misure. Questo avviene o perché i dati sono troppo frammentati a causa di malfunzionamenti dello strumento o periodi di manutenzione dello stesso, o perché le serie temporali disponibili coprono solo pochi anni (5÷10) oppure ancora perché per il paragone in esame la boa o l'anemometro non sono disponibili o non sono sufficientemente rappresentativi.

Sempre più spesso, pertanto, si fa ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteomarine attraverso modellistica numerica. Tale approccio, comunemente definito come "*wind/wave hindcast*" permette di disporre di serie temporali, tra l'altro, di intensità e direzione del vento, altezza d'onda, periodo e direzione, nel punto desiderato.

Se da un lato la possibilità di disporre di ricostruzioni di condizioni meteomarine pregresse attraverso un approccio modellistico rappresenta oggi un formidabile supporto nell'ingegneria costiera ed offshore, dall'altro va sottolineata l'importanza di disporre di ricostruzioni modellistiche robuste, accurate e validate.

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM deriva dall'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW di DHI).

In Figura 5-1 e Figura 5-2 sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso e un dettaglio della "mesh" di calcolo adottata. La risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta. I dati sono stati estensivamente validati con confronti con anemometri, boe, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda da satellite.

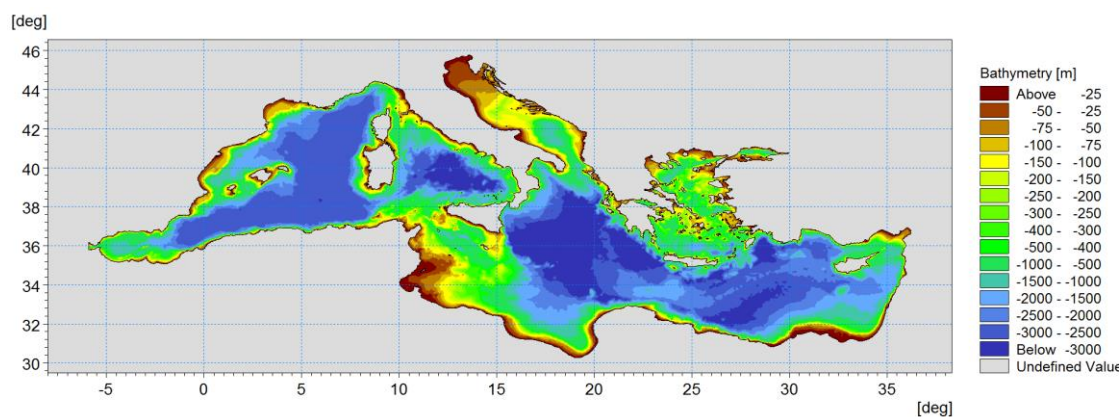


Figura 5-1 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

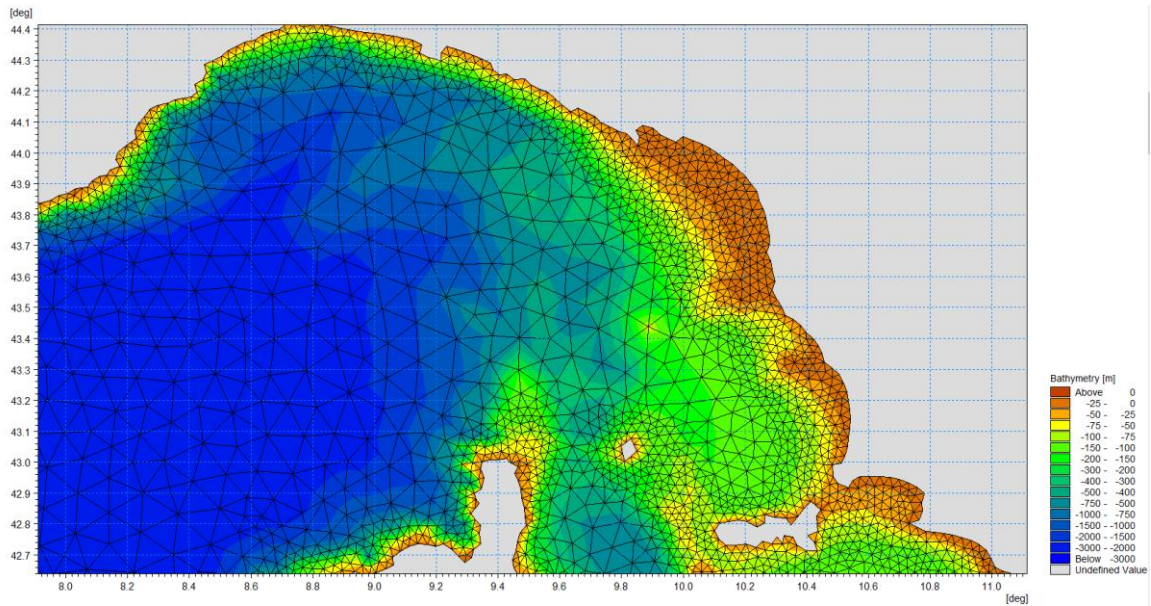


Figura 5-2 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito oggetto di studio si è fatto riferimento al sopra citato database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), descritto in Allegato A al presente documento.

La selezione della cella del database MWM più adeguata a rappresentare il clima meteomarina al largo del litorale pisano, è stata effettuata tenendo in considerazione diversi aspetti:

- il punto di estrazione deve essere ben rappresentativo dell’esposizione del sito a vento e onda;
- in virtù della risoluzione del database MWM (circa 3 km), il punto deve essere collocato ad una profondità alla quale possa essere ritenuta trascurabile l’interazione dell’onda con il fondale, che verrà pertanto demandata al modello di propagazione largo-costa descritto in seguito. In questo aspetto particolare attenzione è stata rivolta alle secche della Meloria.
- la localizzazione del punto non dovrà essere troppo lontana dalla costa, in modo che il modello di propagazione largo-costa non presenti un dominio troppo ampio, con tempi di calcolo eccessivamente onerosi.

Sulla base di tali prescrizioni e della risoluzione spaziale del database MWM è stato selezionato un punto, a circa 15 km dal sito in esame, per l’estrazione delle serie temporali orarie di vento e onda per i 41 anni di riferimento (1979-2019). A seguire si riportano l’ubicazione grafica e le coordinate del punto selezionato.

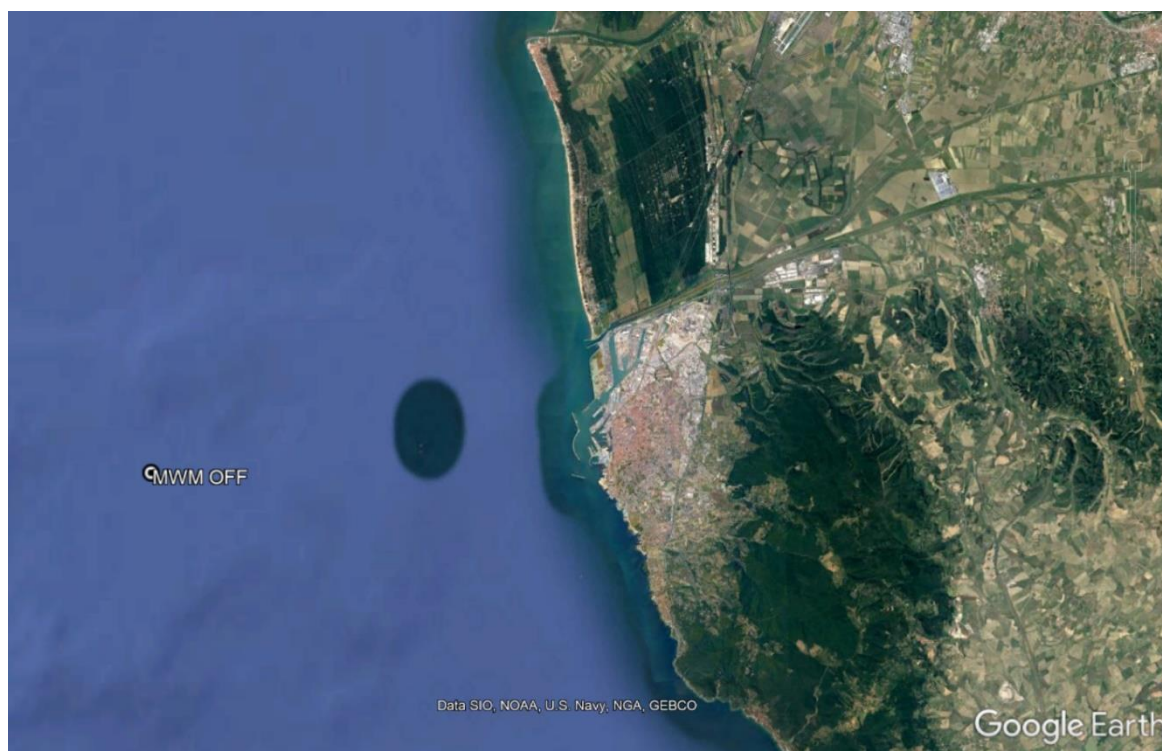


Figura 5-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N) i cui dati dal 1979 al 2019 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

Tabella 5-1 Coordinate del punto selezionato dal dataset di MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]
MWM OFF	10.099	43.541

## 5.1 Dati di vento

A seguire (Figura 5-4 e Figura 5-5) si riportano la serie delle velocità del vento per il punto MWM e la relativa rappresentazione in forma di rosa. In Tabella 5-2 è invece illustrato il numero di osservazioni per classi di velocità e direzione di provenienza del vento.

Come si può osservare, nel periodo dei 41 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento fino a 26.6 m/s circa. Dall'analisi della rosa del vento si evince che i settori caratterizzati dalla maggiore frequenza sono quelli provenienti da Est, nello specifico le direzioni comprese tra 75°N e 105°N. In termini di intensità, gli eventi caratterizzati dalle velocità maggiori (superiori a 20 m/s) sono associati prevalentemente alle direzioni di provenienza da Ovest (225°N-315°N) e da Est (75°N-105°N).

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 2.5 m/s, si verifica per circa il 20% del tempo.

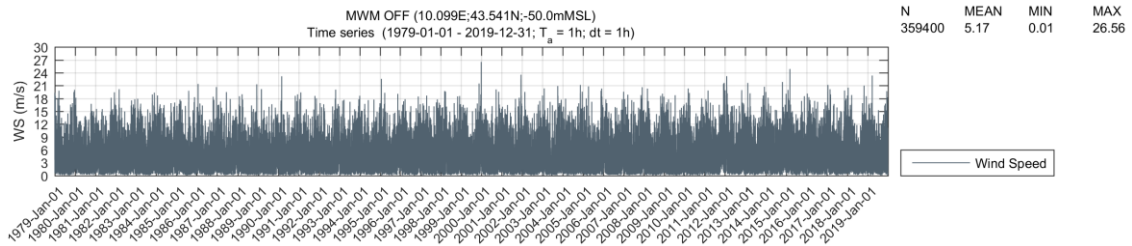


Figura 5-4 Ricostruzione storica di velocità del vento (Ws) per il punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N) i nel periodo 1979-2019

Tabella 5-2 Numero di dati per classi di intensità del vento (Ws, colonne) e direzione media di provenienza (Wd, righe) per il punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N) per l'intero periodo 1979 – 2019

	[0-2.5[	[2.5-5[	[5-7.5[	[7.5-10[	[10-12.5[	[12.5-15[	[15-17.5[	[17.5-20[	[20-22.5[	[22.5-25[	[25-27.5[	[27.5-30[	Total	Accum
[315-345[	5509	9960	4512	1206	704	253	85	20	-	-	-	-	22249	359400
[285-315[	6065	9678	3419	943	445	196	79	12	1	-	-	-	20838	337151
[255-285[	5903	8441	4184	2500	1240	703	358	145	25	10	1	-	23510	316313
[225-255[	5677	7394	5995	5707	3999	1691	502	103	22	3	-	-	31093	292803
[195-225[	5623	5491	2832	1570	686	202	32	6	1	-	-	-	16443	261710
[165-195[	5435	7572	4451	2045	883	321	104	17	3	-	-	-	20831	245267
[135-165[	5714	8722	6338	3104	1070	334	73	9	-	-	-	-	25364	224436
[105-135[	7111	13369	5876	1654	319	24	5	-	-	-	-	-	28358	199072
[75-105[	8644	31398	30217	16607	5414	1252	201	15	-	-	-	-	93748	170714
[45-75[	6894	14178	11379	7390	4655	2136	699	166	35	11	-	-	47543	76966
[15-45[	5012	5812	1927	715	235	59	25	4	-	-	-	-	13789	29423
[-15-15[	4922	6474	2690	962	405	127	44	8	2	-	-	-	15634	15634
Total	72509	128489	83820	44403	20055	7298	2207	505	89	24	1	-	359400	-
Accum	72509	200998	284818	329221	349276	356574	358781	359286	359375	359399	359400	359400	-	-

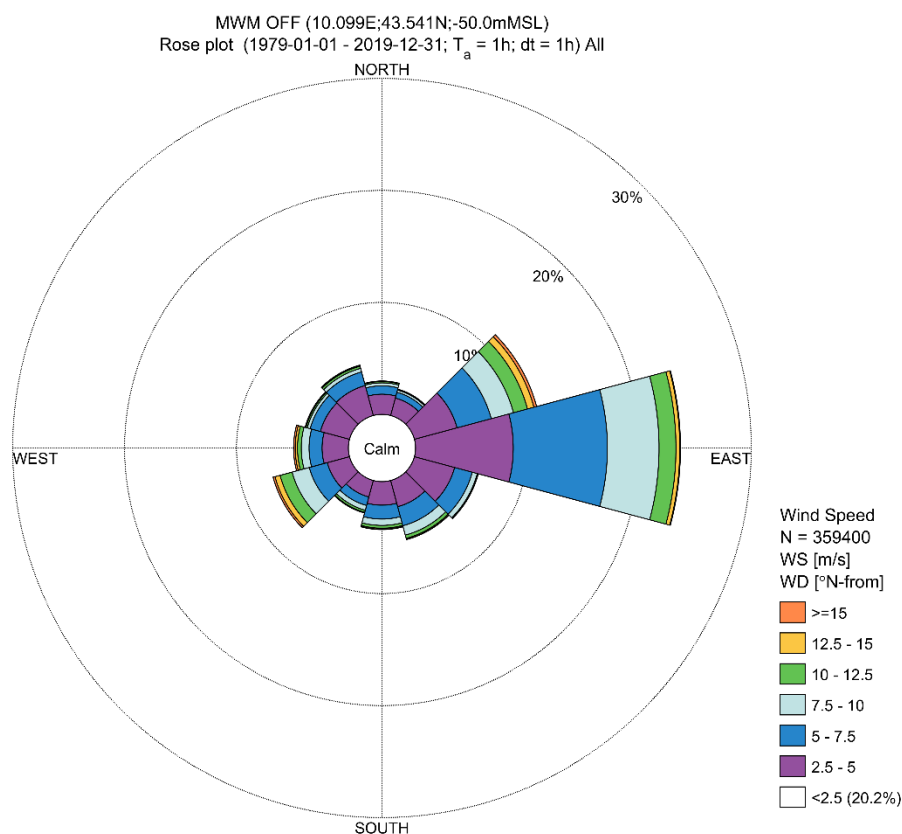


Figura 5-5 Rosa del vento per il punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N) per il periodo 1979-2019. La calma, qui associata ad intensità inferiori a 2.5 m/s, si verifica per il 20.2% del tempo, ovvero per poco meno di 2 mesi all'anno in media

## 5.2 Dati di moto ondoso

Dalla serie storica di altezza d'onda significativa al largo estratta dal database MWM emerge che nel periodo dei 41 anni considerati si raggiungono valori massimi di altezza significativa  $H_s$  oltre gli 8.0 m. Il valore più alto presente nella serie risulta associato ad una mareggiata del Dicembre 1999 ( $H_s$  al picco pari a circa 8.46 m).

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 5-7) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 5-3) si evince che le mareggiate più frequenti e più intense provengono da Sud-Ovest e da Ovest (direzioni comprese tra 225°N e 285°N). Se si esclude la calma, tale settore racchiude circa il 30% delle onde presenti nel database, corrispondenti a quasi 4 mesi / anno in media.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.5 m, si verifica per circa il 43% del tempo (corrispondenti a circa 5 mesi / anno in media).

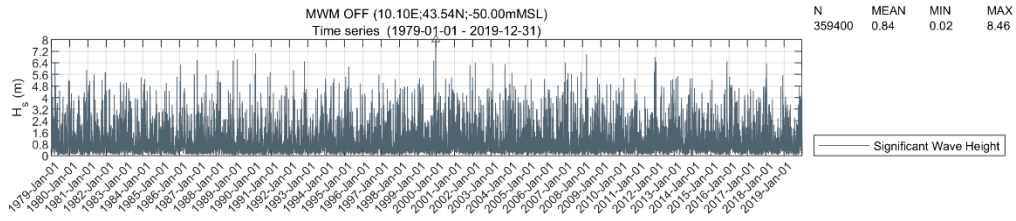


Figura 5-6 Andamento delle altezze d'onda nel punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N) per il periodo 1/1/1979 - 31/12/2019

Tabella 5-3 Numero di dati per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza (in ore) per il punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N) per il periodo 1979 – 2019

MWM OFF (10.10E;43.54N;-50.00mMSL)  
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2019-12-31) All  
 $H_s$  [m] - Significant Wave Height

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	[8-8.5[	Total	Accum
[315-345[	4780	1502	371	75	12	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6743	359400
[285-315[	13903	3917	1058	516	247	117	35	8	3	-	-	-	-	-	-	-	-	19804	352657
[255-285[	22447	13700	5275	2466	1063	762	426	387	274	197	113	47	36	6	5	2	3	47209	332853
[225-255[	41523	41200	26252	15693	7927	5722	2534	2198	1134	539	264	112	58	15	-	-	-	145171	285644
[195-225[	14802	7833	3594	1291	618	338	123	91	48	17	9	-	-	-	-	-	-	28764	140473
[165-195[	19924	14484	5556	2451	752	355	96	29	8	6	-	-	-	-	-	-	-	43661	111709
[135-165[	4464	3845	1251	149	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9718	68048
[105-135[	6696	4950	771	53	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12471	58330
[75-105[	10581	15668	2269	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28623	45659
[45-75[	3525	5280	1877	219	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10914	17236
[15-45[	1665	1318	472	69	13	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3540	6322
[-15-15[	1748	833	160	40	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2782	2782
Total	146058	114560	48906	23097	10656	7300	3214	2713	1467	759	386	159	94	21	5	2	3	359400	-
Accum	146058	260618	309524	332621	343277	350577	353791	356504	357971	358730	359116	359275	359369	359390	359395	359397	359400	-	-



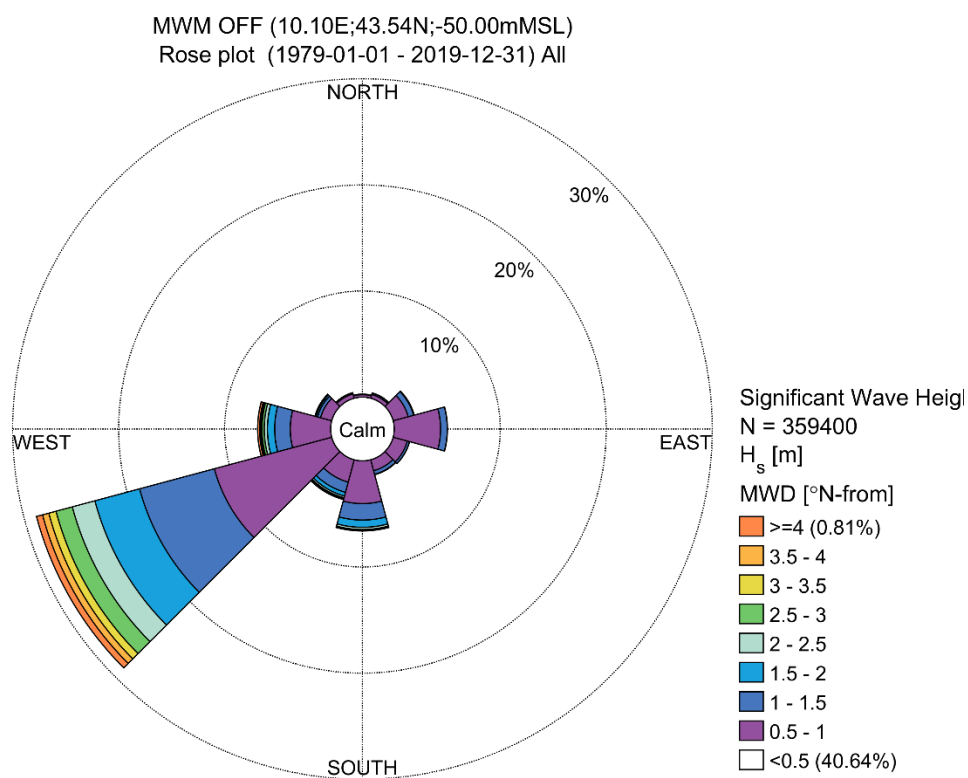


Figura 5-7 Rosa del moto ondoso al largo per il punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N) per il periodo 1979 – 2019

### 5.3 Dati di livello della superficie marina

Per la definizione dei livelli marini da considerare nella progettazione dell'opera si è fatto riferimento alla serie osservata del mareografo di Livorno, il più vicino al sito e con maggior disponibilità di dati recenti (monografia in Figura 5-8). In particolare, si è fatto riferimento alle registrazioni disponibili nel periodo 1.1.2010 – 31.12.2019.

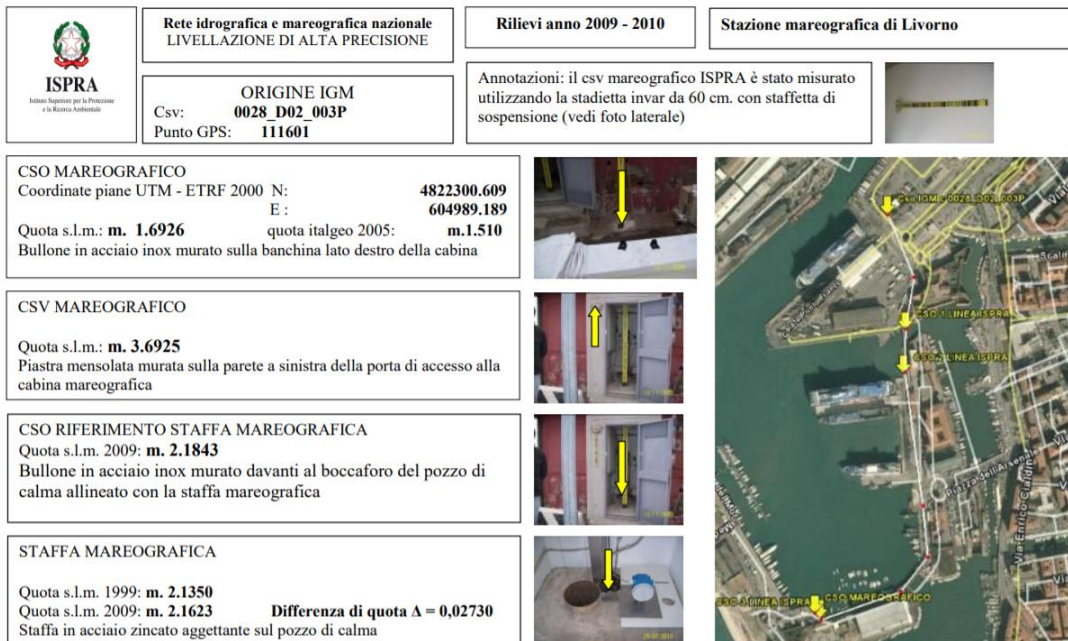


Figura 5-8 Monografia della stazione mareografica di Livorno

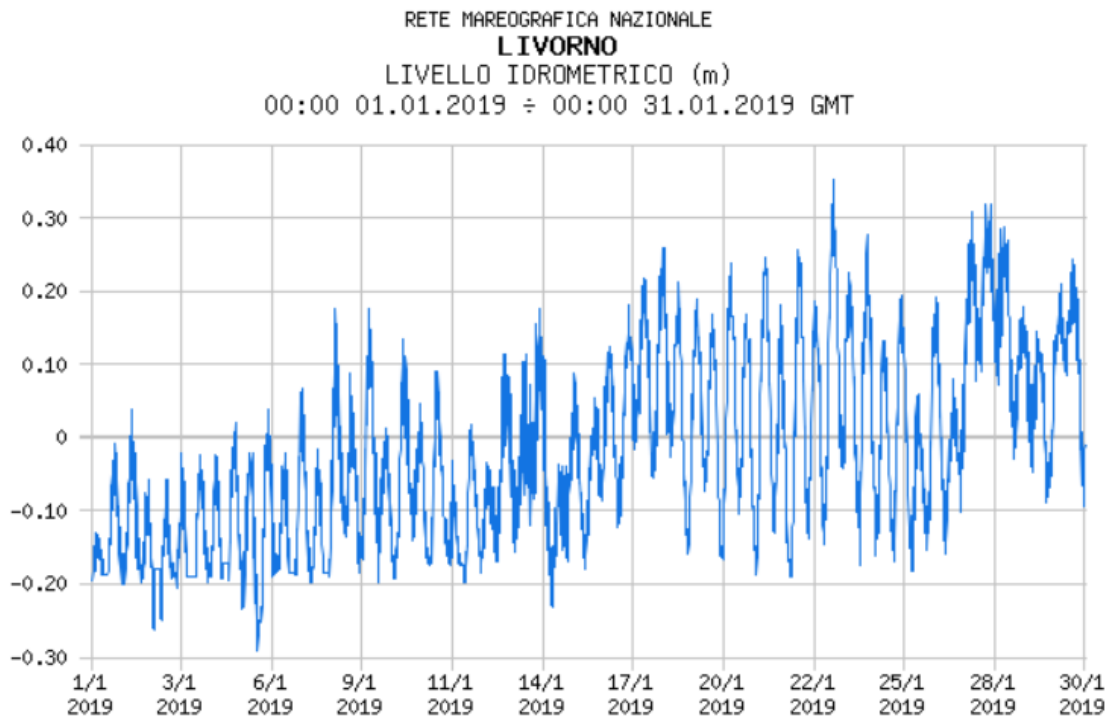


Figura 5-9 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Genova (dettaglio del mese di Gennaio 2019)

## 6 Analisi statistica degli eventi estremi al largo

Sulla base delle serie di dati disponibili al largo di Marina di Pisa si è proceduto con un'analisi statistica finalizzata alla definizione degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno. L'analisi statistica è stata svolta sia per la serie di altezza d'onda significativa, che per i dati di vento e di livello idrometrico.

I valori estremi associati a tempi di ritorno elevati sono in genere stimati applicando una distribuzione di probabilità alla serie di dati. In letteratura sono disponibili molte distribuzioni di probabilità, tecniche di selezione dei dati e di fitting e i risultati statistici risultano inevitabilmente dipendenti dalla metodologia selezionata.

Nel presente studio si è proceduto facendo riferimento ad una serie di diversi approcci, tutti opportunamente testati e confrontati, con la selezione del metodo che meglio approssimava i dati a disposizione.

### 6.1 Altezza d'onda significativa

Per quanto riguarda l'analisi statistica della variabile "altezza d'onda significativa", la procedura adottata è stata la seguente:

- individuazione, a partire dalla serie temporale di dati orari in corrispondenza del punto MWM estratto al largo, di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 36 ore) sia all'evidenza che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (in genere pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);
- *fit* della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati, sia omnidirezionale / annuale, sia direzionale / stagionale. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. Sono stati utilizzati i seguenti approcci di analisi:
  - fit dei dati con la distribuzione dei massimi annuali di Gumbel;
  - fit dei dati con la distribuzione di tutti gli eventi indipendenti sopra una determinata soglia (metodo "Peak Over Threshold"). Tra i tipi di distribuzione sono stati testati: l'esponenziale, la Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri;
- stima degli intervalli di confidenza mediante tecniche di *bootstrap*.

Nel caso in esame per modellizzare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalizzazione dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri, che meglio rappresentava l'andamento del campione.

A partire dall'intera serie temporale quarantennale si è proceduto ad estrarre un numero sufficientemente rappresentativo di eventi statisticamente indipendenti, caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa. Gli eventi selezionati sono pari a 82.

A seguire si riportano i risultati dell'analisi probabilistica (Figura 6-1) e una tabella (Tabella 6-1) riassuntiva con le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno.

Osservando il grafico riportato in figura si nota che l'evento più alto verificatosi nei 41 anni (1979-2020) cade al di fuori dalla distribuzione degli 82 eventi considerati. Si tratta della mareggiata del 28-29 Dicembre 1999, coincidente con il passaggio di due tempeste di eccezionale intensità (denominate Lothar e Martin, rispettivamente) che attraversarono l'Europa meridionale in quei giorni causando ingenti danni.

MWM OFF (10.099E;43.541N;-50.0mMSL)  
 Extreme  $H_s$  (1979-01-01 - 2019-12-31;  $T_a = 1h$ ;  $dt = 1h$ )

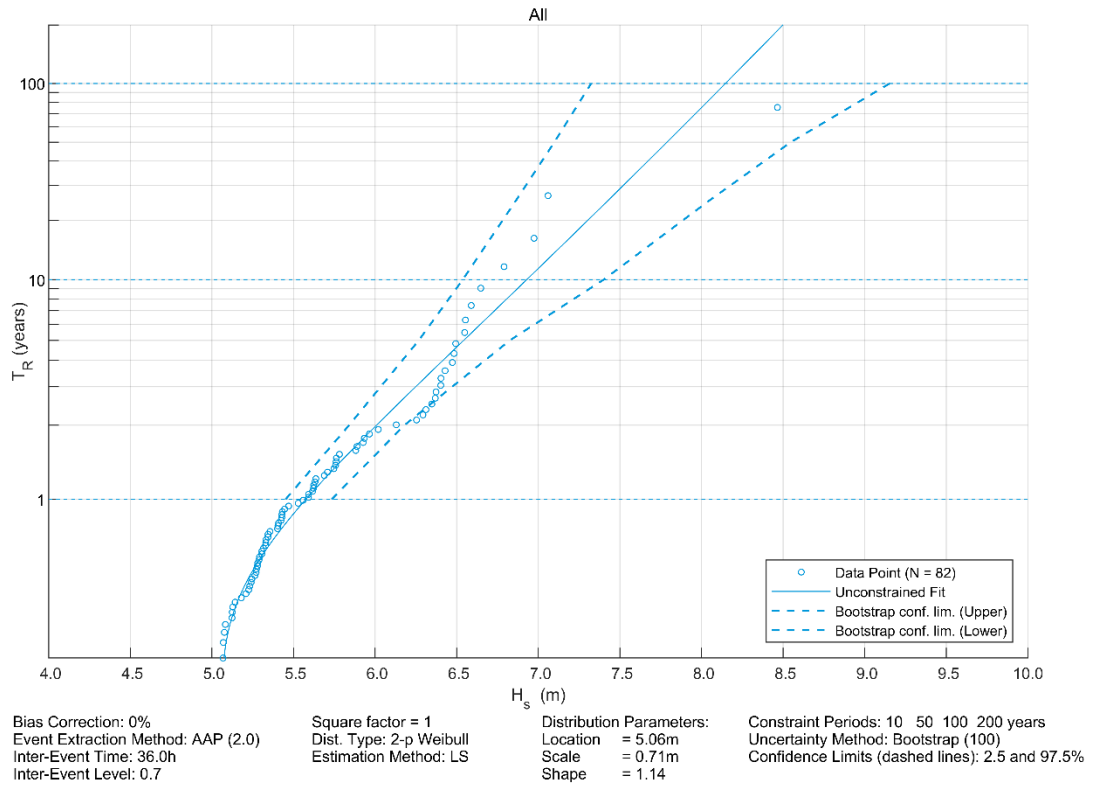


Figura 6-1 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative degli 82 maggiori eventi degli ultimi 41 anni estratte nel punto MWM al largo di Marina di Pisa

Tabella 6-1 Valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa  $H_s$  (analisi omnidirezionale)

Tempo di ritorno [anni]	$H_s$ omnidirezionale [m]
1	5.61
2	5.98
5	6.54
10	6.93
25	7.42
50	7.79
100	8.15

## 6.2 Intensità del vento

Anche per i valori di intensità del vento l'analisi statistica si basa sull'intera serie temporale dei dati estratti nel punto al largo (database MWM). Per l'analisi è stato estratto un numero sufficientemente significativo di eventi statisticamente indipendenti (61), caratterizzati dai valori più elevati di intensità del vento.

Nella tabella a seguire sono stati riportati i risultati tabellari e grafici dell'analisi statistica della velocità di vento.

Tabella 6-2 Valori di intensità del vento WS [m/s] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica

Tempo di ritorno [anni]	WS omnidirezionale [m/s]
1	19.69
5	22.07
10	23.15
25	24.6
50	25.73
100	26.86

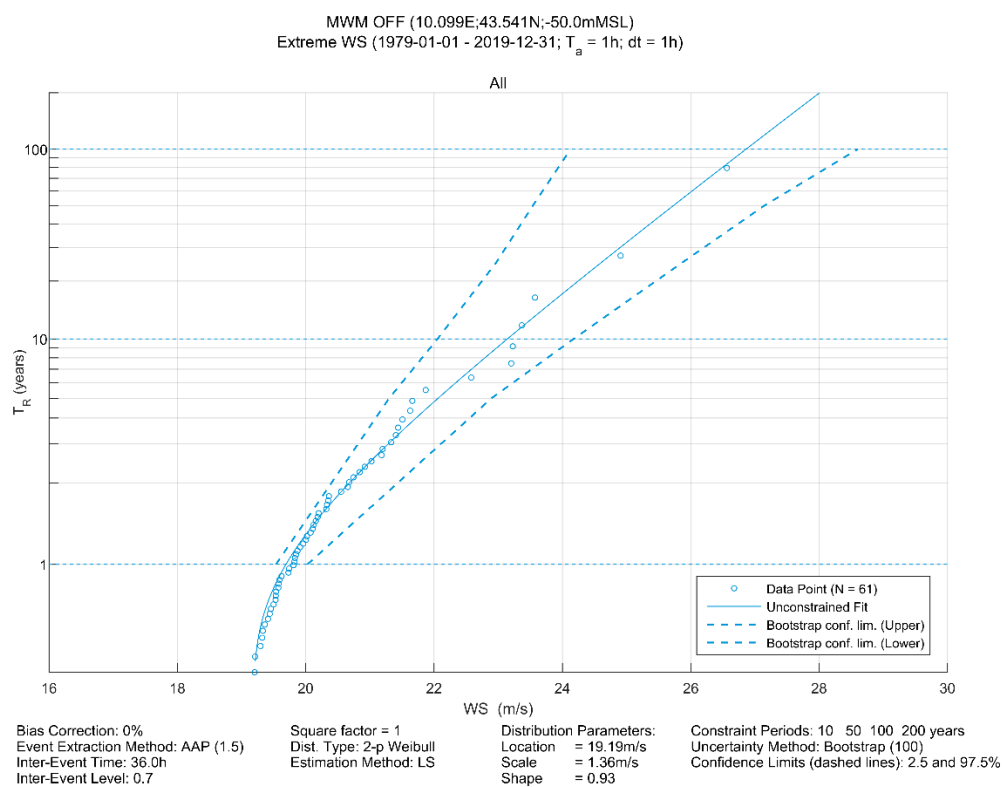


Figura 6-2 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi all'intensità del vento degli ultimi 41 anni estratte nel punto MWM al largo di Marina di Pisa

## 6.3 Livello marino

L'analisi dei dati del mareografo è basata su oltre 20 anni di osservazioni (1998-2019) a passo irregolare, portato a 30 minuti per omogeneità.

Il mareografo è posto all'interno del bacino portuale, pertanto è in grado di tenere in considerazione i seguenti contributi alla composizione del livello superficiale totale:

- contributo della marea astronomica;
- contributo della pressione atmosferica (effetto di "barometro inverso");
- contributo del vento (effetto "*wind setup*", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare).

La procedura adottata per l'analisi statistica dei livelli del mareografo è del tutto analoga a quella illustrata in precedenza per le altezze d'onda. Anche in questo caso per rappresentare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalizzazione dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri.

Il numero complessivo di eventi presi in considerazione è pari a 58 (3 all'anno in media). Il criterio di indipendenza adottato (in termini di intervallo minimo tra due eventi) è pari a 24 ore.

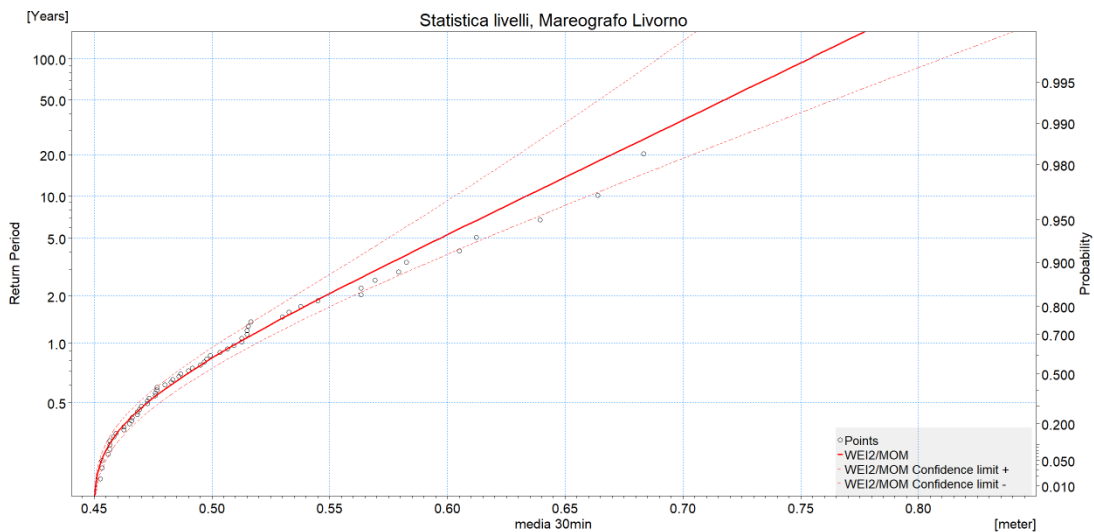


Figura 6-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Livorno (1998-2019)

Tabella 6-3 Valori di livello marino WL [m] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica

Livello marino	TR 5 anni	TR 25 anni	TR 50 anni	TR 100 anni
	WL [m]	WL [m]	WL [m]	WL [m]
Mareografo Livorno	0.60	0.68	0.72	0.75

## 7 Propagazione del moto ondoso

Al fine di propagare l'intera serie di 41 anni di moto ondoso da largo (punto di estrazione MWM) sino al litorale di Marina di Pisa è stato utilizzato il modulo SW (Spectral Waves) di MIKE 21, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di swell sia offshore, sia in aree costiere.

Tale modello, a maglia triangolare “flessibile”, permette di utilizzare una risoluzione spaziale variabile, consentendo di impiegare una risoluzione elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio, laddove rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo ed eventualmente frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell'onda incidente su distanze relativamente limitate.

I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- generazione dell'onda ad opera del vento;
- interazione non lineare onda-onda;
- dissipazione dovuta al cosiddetto “*white capping*”
- dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- dissipazione dovuta al frangimento;
- rifrazione e *shoaling* dovuti alle variazioni del fondale;
- interazione onde-correnti;
- diffrazione;
- riflessione.

Un'accurata descrizione del modulo MIKE 21 SW è riportata nell'Allegato B al presente elaborato.

I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione;
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, *white-capping*, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh e per ciascun istante temporale di calcolo (time step), sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo, direzione media, *radiation stress*.

### 7.1 Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 5, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre una porzione di mare antistante il litorale di Marina di Pisa, per uno sviluppo costiero complessivo di oltre 30 km e un'estensione verso il largo di circa 20 km. La dimensione e la risoluzione del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, come detto, si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di CMAP, ed ai rilievi batimetrici disponibili.

Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato nella figura a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

La *mesh* di calcolo del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 810 m, per arrivare a circa 30 m nella zona delle secche della meloria, caratterizzata da valori di batimetria fino a -2m. In totale, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 60'000 elementi (Figura 7-2).

I principali parametri d'onda estratti dal database MWM (paragrafo 5.2), relativamente all'intera serie disponibile, sono stati utilizzati come condizione al contorno di largo del modello (i dati sono stati assunti uniformi lungo il contorno aperto).

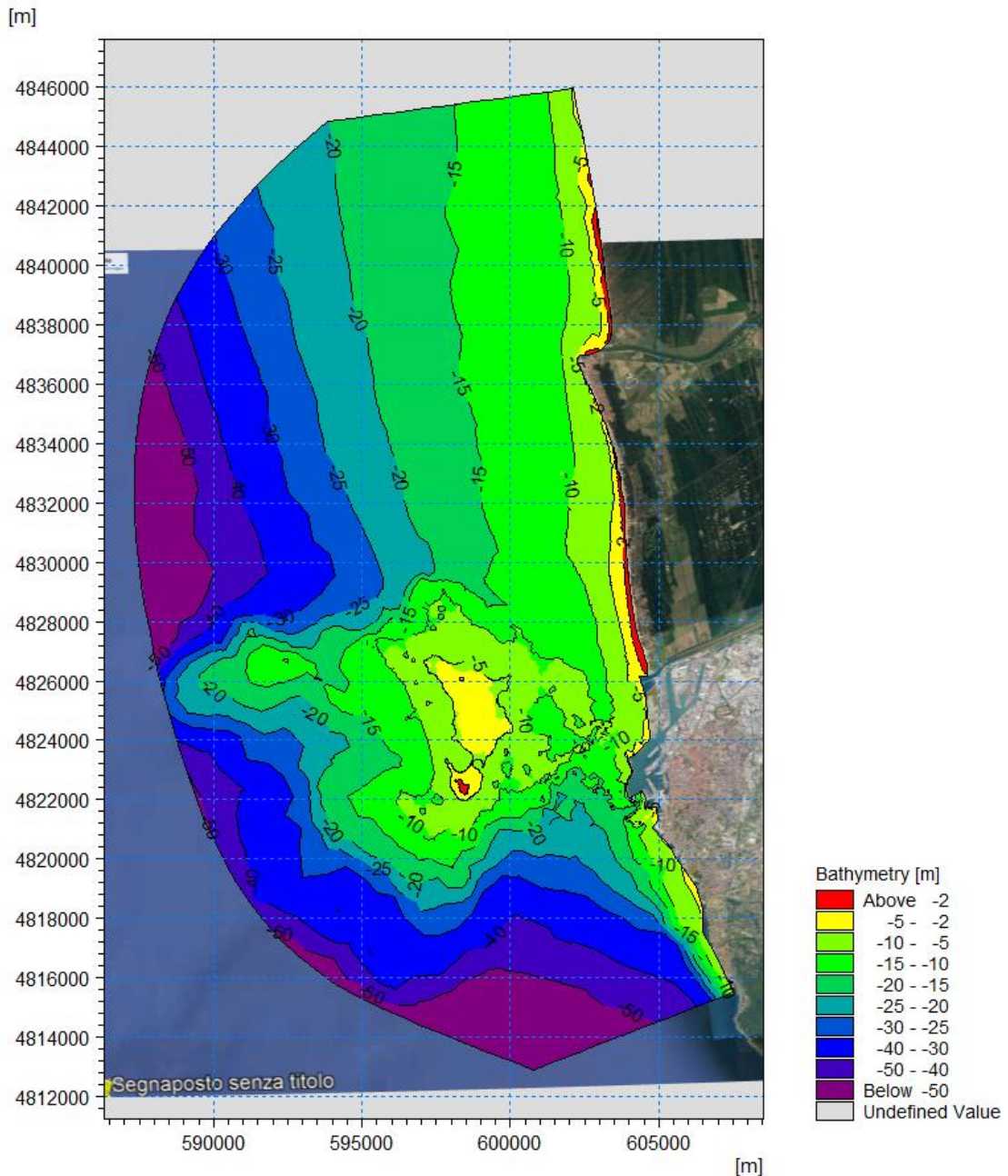


Figura 7-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione



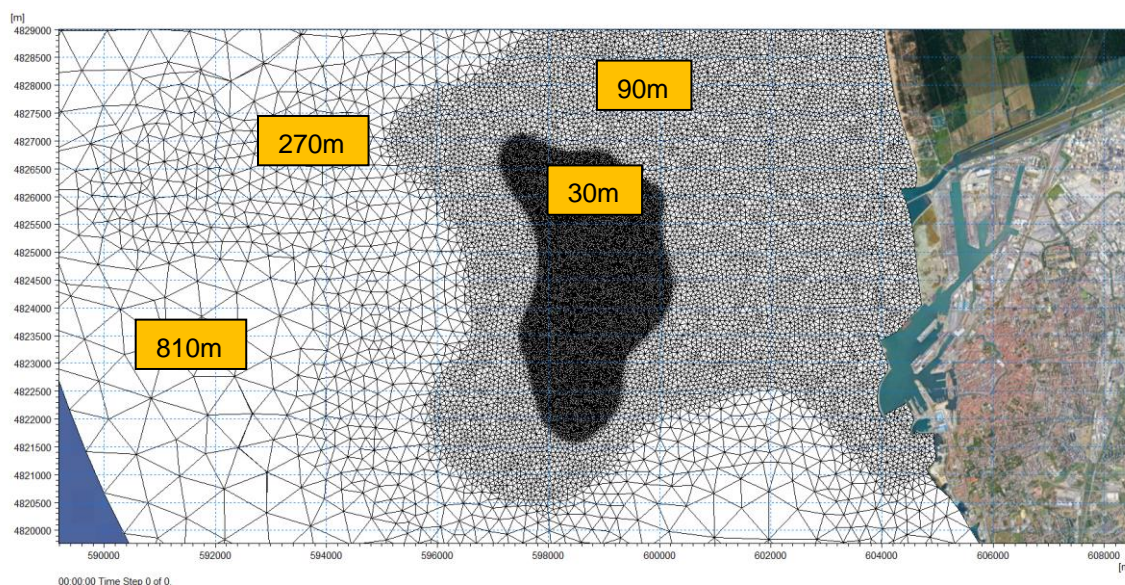


Figura 7-2 Rappresentazione della differente risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso.

## 7.2 Scenari di simulazione

Al fine di comprendere l'influenza della realizzazione delle opere in progetto sul clima ondoso medio nel tratto immediatamente a nord del porto di Livorno sono state predisposte due simulazioni: una in riferimento allo stato attuale ed una in riferimento allo stato di progetto. Entrambe le simulazioni sono state condotte per l'intero periodo di 41 anni. In Figura 7-3 sono riportati i due layout utilizzati per le simulazioni.

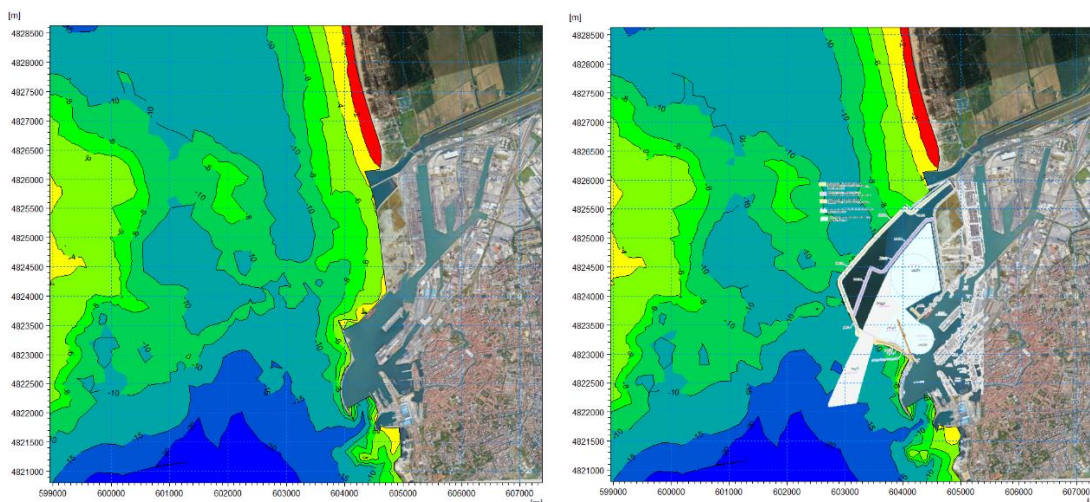


Figura 7-3 Layout attuale (a sinistra) e layout di progetto (a destra).

## 7.3 Risultati della propagazione della serie temporale quarantennale

Le simulazioni hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo per i due scenari di simulazione (attuale e progetto), rendendo pertanto possibile estrarre la serie di moto ondoso in qualsiasi punto sottocosta.

In Figura 7-4 e Figura 7-5 sono riportati i campi d'onda relativi a due stati di mare rappresentativi, in particolare, di un'onda proveniente da Ovest e una da Sud Ovest. In queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che subisce l'onda nella sua propagazione da largo verso costa. In particolare, la scala cromatica mette bene in evidenza l'effetto schermante che le secche della Meloria esercitano sul litorale oggetto di studio.

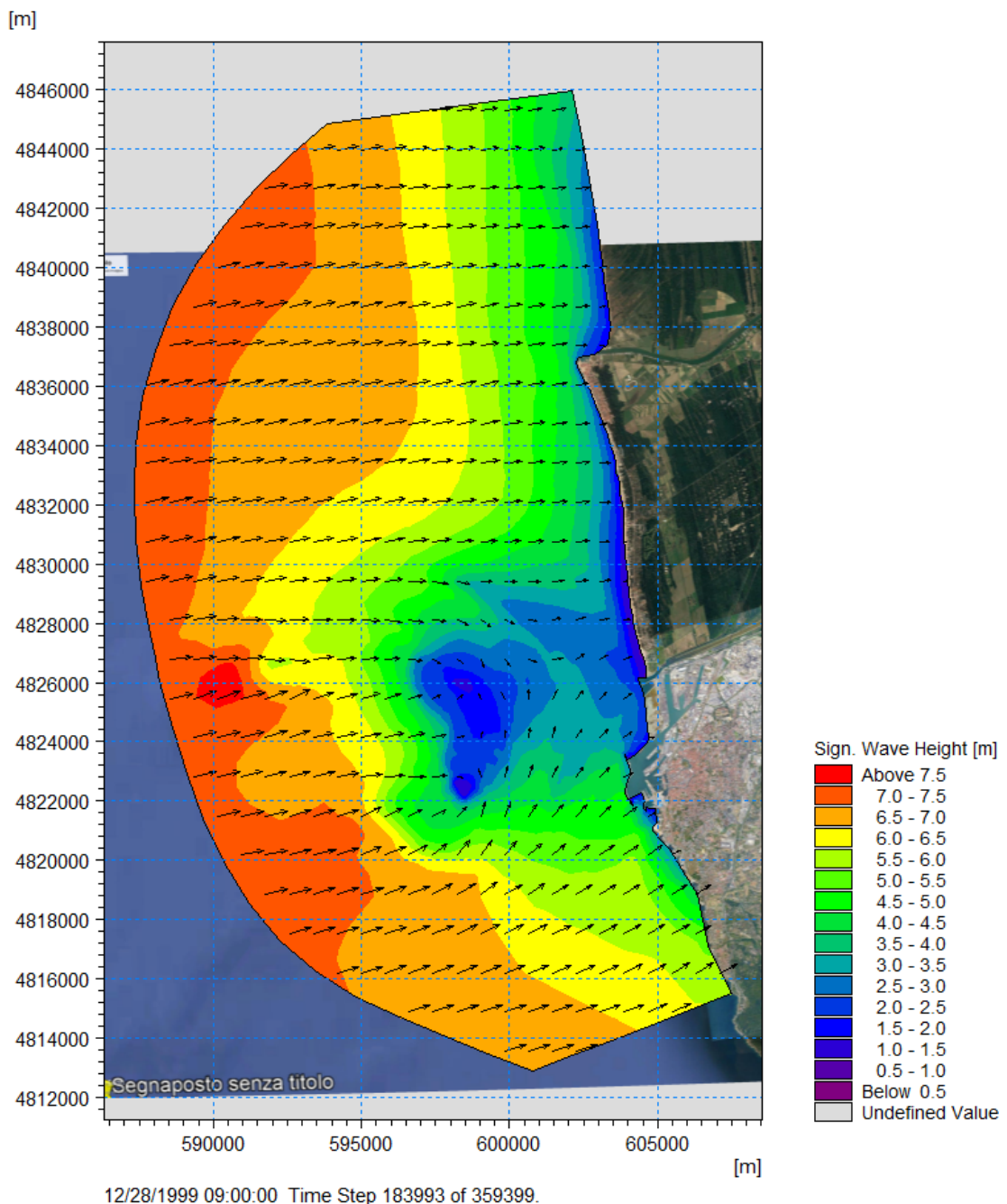


Figura 7-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Ovest (dati del 28 Dicembre 1999 ore 09)

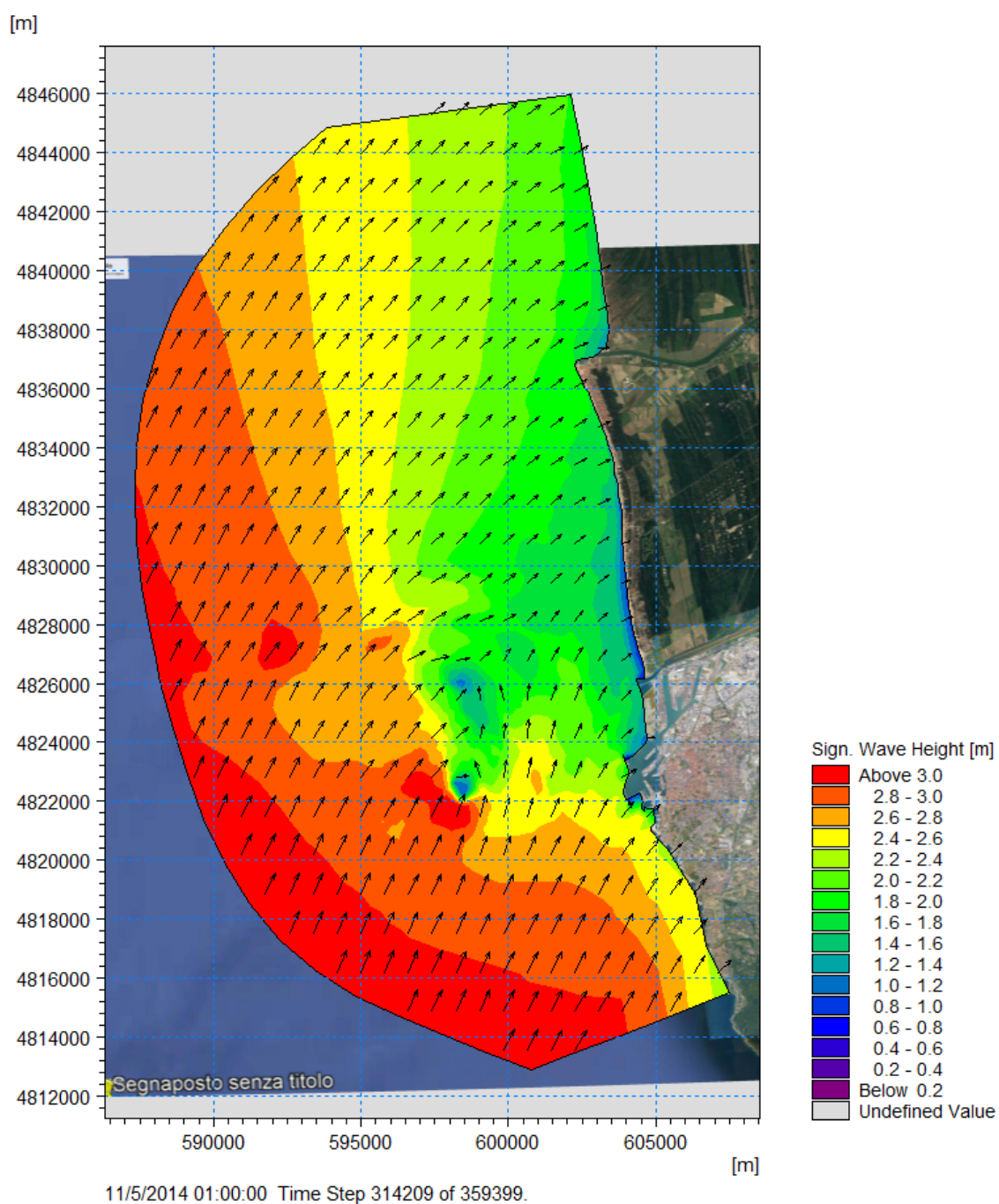


Figura 7-5 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Sud-Ovest (dati del 5 Novembre 2011 ore 01)

## 7.4 Analisi delle differenze nel clima ondoso tra scenario attuale e progetto

Al fine di valutare l'impatto della realizzazione della darsena Europa sul litorale immediatamente a Nord si è proceduto con la caratterizzazione del clima ondoso "nearshore" in diversi punti ubicati intorno alla batimetrica -6m ed in riferimento sia allo scenario attuale che a quello di progetto. Nello specifico sono stati individuati 7 punti (C1-C7) identificati in Figura 7-6.

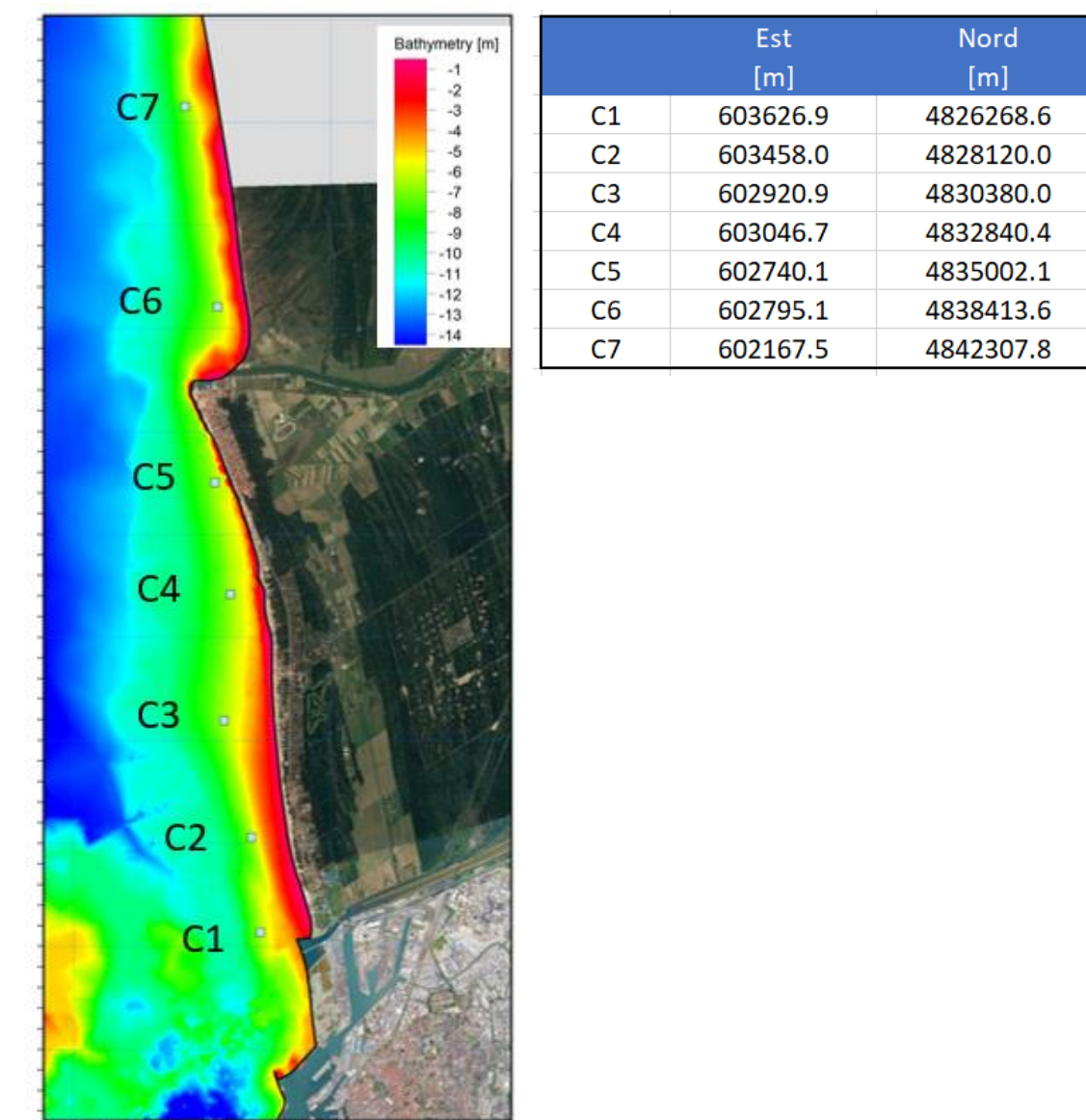


Figura 7-6 Ubicazione e coordinate (UTM33) dei 7 punti sottocosta utilizzati per l'analisi del clima nearshore.

A seguire (Figura 7-7 e Figura 7-8) si riportano le rose del clima ondoso nei 7 punti C1-C7 in riferimento ai due scenari (attuale e progetto).

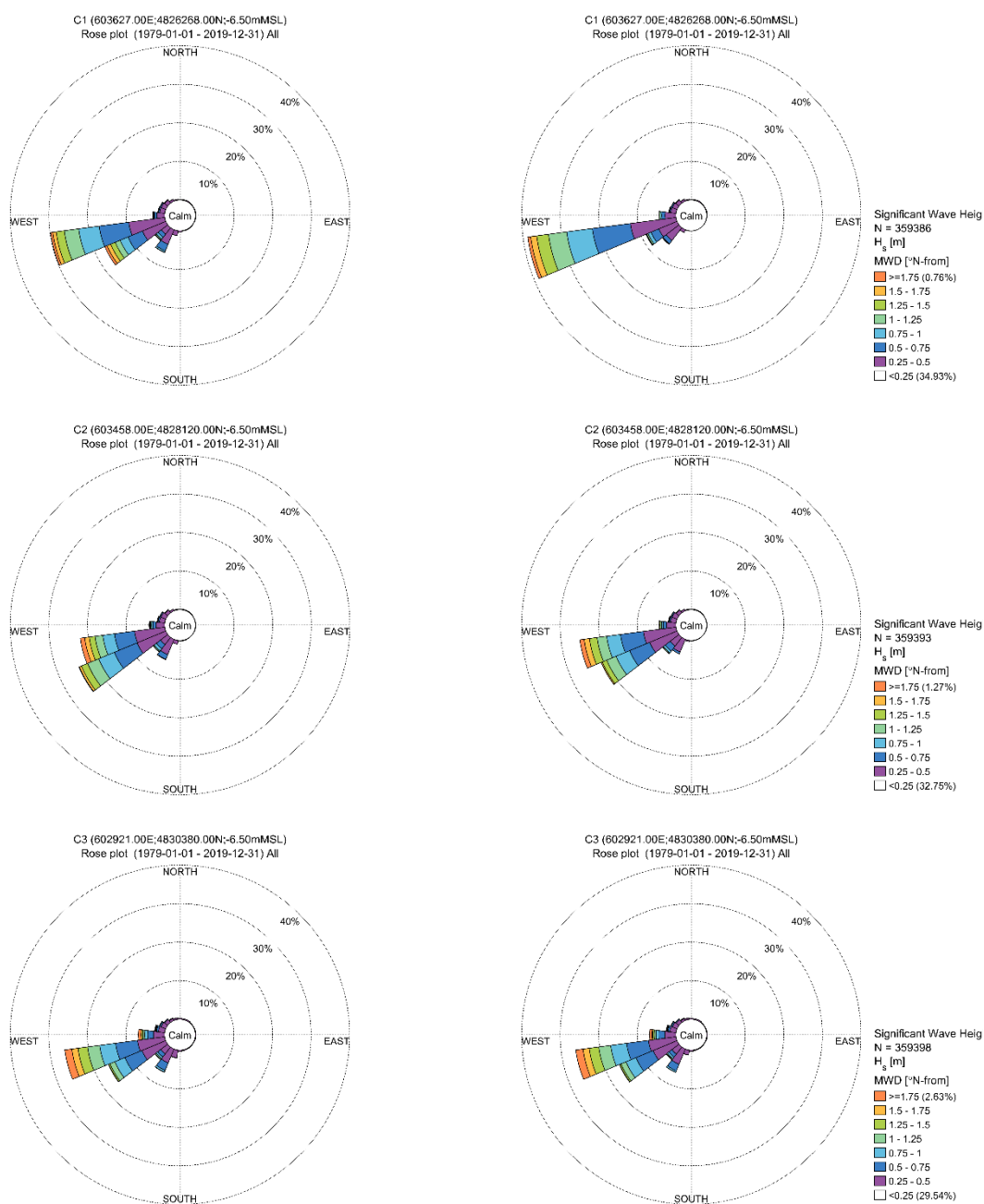


Figura 7-7 Rose del clima ondoso nello scenario attuale (a sinistra) e progetto (a destra) per i punti C1-C3

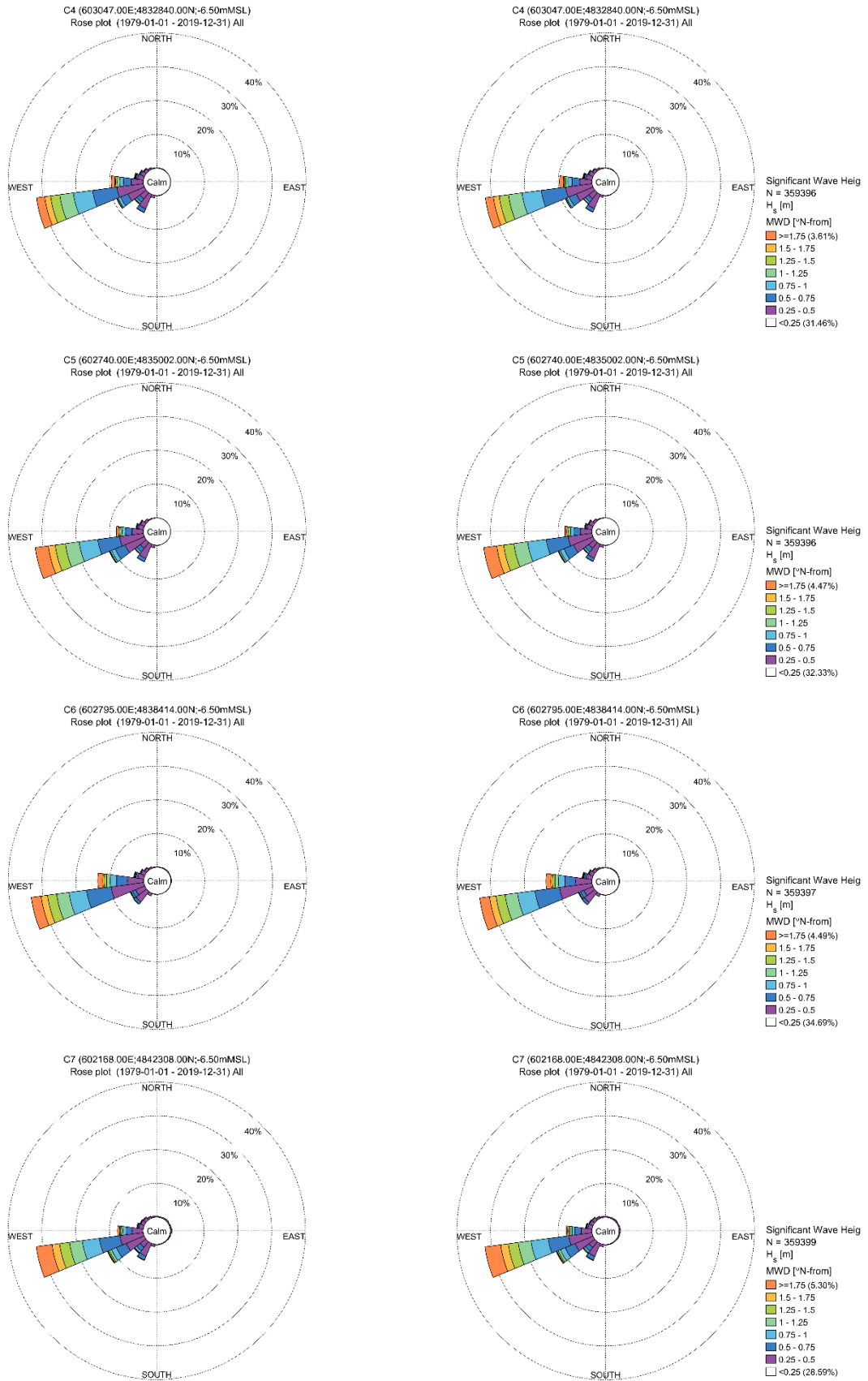


Figura 7-8 Rose del clima ondoso nello scenario attuale (a sinistra) e progetto (a destra) per i punti C4-C7

In Tabella 7-1 sono riportati i valori della direzione risultante energetica (altezza e direzione) per ciascuno dei 7 punti analizzati in riferimento allo scenario attuale e di progetto.

Tabella 7-1 Valori della risultante energetica (Altezza d'onda e direzione) per i punti C1-C7 in riferimento allo stato attuale e di progetto.

	Attuale		Progetto	
	Hs [m]	MWD [°N]	Hs [m]	MWD [°N]
C1	0.51	246.8	0.48	251.6
C2	0.51	248.7	0.50	250.2
C3	0.54	255.1	0.54	255.2
C4	0.55	258.4	0.55	258.5
C5	0.57	255.8	0.57	255.8
C6	0.55	260.1	0.55	260.1
C7	0.60	254.2	0.60	254.2

L'analisi combinata delle rose e delle risultanti energetiche mette in evidenza quanto segue:

- La realizzazione delle opere in progetto determina una riduzione significativa delle ondazioni provenienti da Sud-Ovest limitatamente ai punti C1 e C2.
- il clima ondoso nel punto C1 risulta significativamente influenzato dalla realizzazione della darsena in progetto. La differenza tra le direzioni della risultante energetica di stato attuale e progetto è pari a circa 5°;
- il clima ondoso nel punto C2 risulta leggermente influenzato dalla realizzazione delle opere di progetto. La differenza tra le direzioni della risultante energetica di stato attuale e progetto è inferiore a 2°;
- il clima ondoso nei punti C3-C7 non risulta influenzato significativamente dalle opere di progetto in quanto la differenza tra le direzioni della risultante energetica (tra stato attuale e progetto) è pressoché nulla.

## 8 Analisi di base del trasporto litoraneo

Per l'analisi preliminare del trasporto sedimentario locale è stato adottato un approccio di tipo monodimensionale tramite l'impiego del modello numerico LITDRIFT, parte del pacchetto Littoral Processes (LITPROC) di DHI. Una descrizione del codice di calcolo LITPROC è riportata nell'Allegato D.

Il modulo LITDRIFT permette di simulare la distribuzione delle altezze d'onda, del set-up e del set-down, delle correnti *longshore* e del trasporto di sedimenti non coesivi lungo uno o più profili trasversali alla costa. LITDRIFT utilizza il metodo "STP" di DHI per calcolare la distribuzione trasversale del trasporto longitudinale di sedimenti (dato dalla somma del trasporto di sedimenti al fondo ed in sospensione) per un determinato profilo batimetrico, per onde regolari e irregolari. Il trasporto al fondo viene calcolato facendo riferimento allo *shear stress* istantaneo che si verifica durante il ciclo d'onda, mentre il trasporto dei sedimenti sospesi è dato dall'integrazione della velocità istantanea con le concentrazioni lungo i profili verticali.

STP descrive inoltre nel dettaglio le condizioni idrodinamiche, inclusi i processi di propagazione, *shoaling* e frangimento delle onde, il calcolo delle forzanti derivanti dai gradienti di *radiation stress*, il bilancio dei momenti per le direzioni trasversali e longitudinali che forniscono il set-up dell'onda e le velocità di corrente longitudinali.

Pertanto, l'applicazione del modulo LITDRIFT permette di definire il budget sedimentario nei profili trasversali di interesse, sulla base del clima meteomarinario, (onda, vento, marea e *storm surge*), delle quote del profilo e della granulometria lungo lo stesso, che può essere considerata variabile.

Nel caso in esame sono stati identificati sei profili di spiaggia rappresentativi e per ciascun profilo sono state utilizzate le condizioni d'onda estratte dal modello di propagazione del moto ondoso descritto nella sezione 7, per l'intera finestra temporale di 41 anni, 1979-2019.

### 8.1 Impostazione del modello LITDRIFT

Nell'ambito del presente studio, il modulo LITDRIFT è stato applicato al fine di:

- quantificare i volumi di sedimenti movimentati nel corso dei 41 anni disponibili;
- stimare la direzione del trasporto litoraneo netto;
- individuare, se esistente, un trend evolutivo nei 41 anni di dati a disposizione;
- Valutare le differenze nel regime del trasporto longshore tra stato attuale e progetto.

Il modello LITDRIFT è stato applicato in riferimento ai transetti C1 e C2 e facendo riferimento ai due scenari simulati (attuale e progetto), allo scopo di evidenziare il potenziale impatto della realizzazione delle strutture della Darsena Europa sul regime del trasporto solido litoraneo attualmente in essere. Si è ritenuta non significativa l'applicazione del modello LITDRIFT ai transetti C3-C7 in quanto non presentano significative differenze in termini di esposizione al clima ondoso tra stato attuale e progetto, come evidenziato in sezione 7.4.

I profili su cui è stato applicato il modello coprono l'intera zona dei frangenti (*surf-zone*, indicativamente estesa fino alla profondità di 6 metri), ossia la fascia costiera dove hanno luogo i processi morfodinamici e la movimentazione di sedimenti.



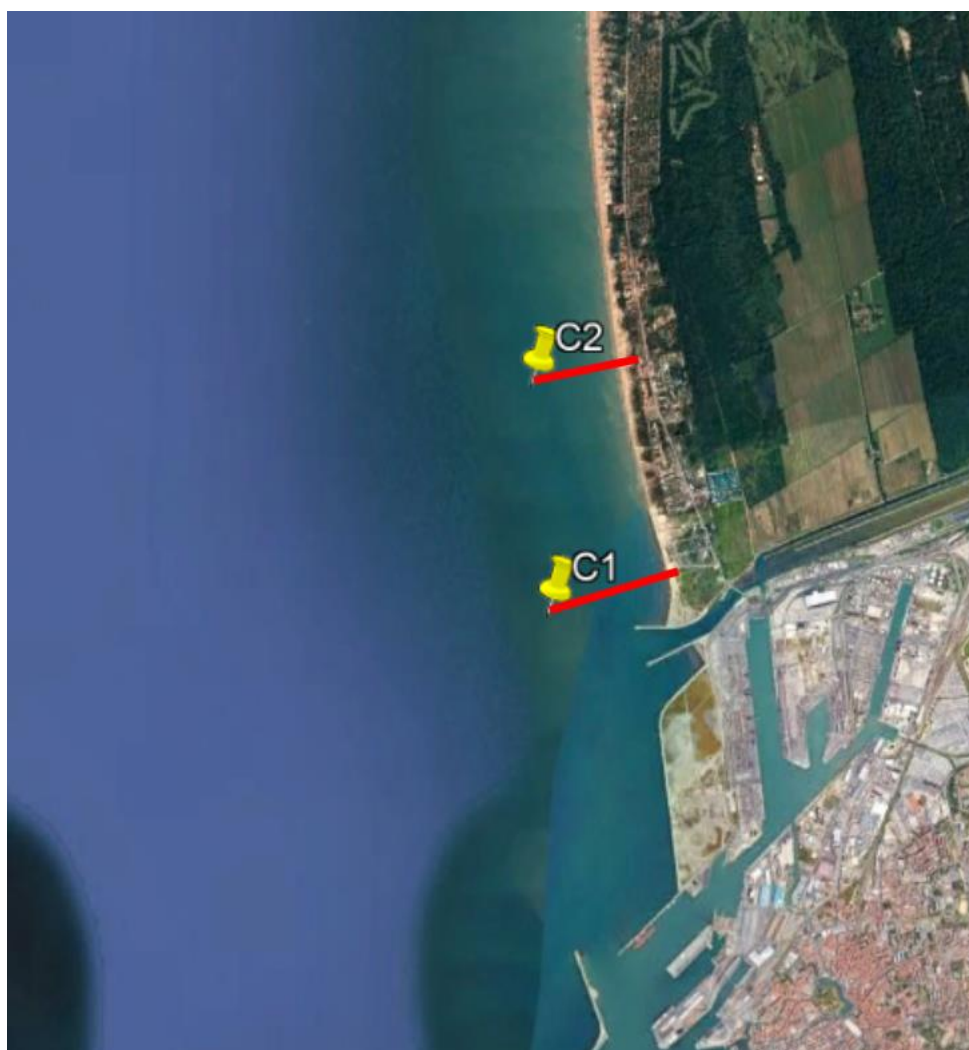


Figura 8-1 Ubicazione dei transetti utilizzati per il calcolo del trasporto litoraneo.

Per lo studio del trasporto litoraneo tramite l'applicazione del modello monodimensionale LITDRIFT sono state considerate come forzanti le condizioni d'onda locali estratte in corrispondenza dell'estremità offshore del profilo. L'estrazione è stata effettuata dai risultati del modello di propagazione ondosa verso il litorale di Marina di Pisa (sezione 7).

Come anticipato nella sezione relativa ai dati a disposizione, dal punto di vista granulometrico il fondale marino è stato descritto facendo riferimento alle campagne effettuate per conto della Provincia di Pisa nel 2005 (Figura 8-2). Nello specifico il sedimento è stato descritto facendo riferimento ad una granulometria caratterizzata da un diametro medio  $d_{50}$  costante pari a 0.2mm e da un parametro indicativo della variabilità del fuso (il cosiddetto "grading", corrispondente alla radice quadrata del rapporto tra il D84 ed il D16), pari a 1.5. Tale valore è stato assunto sulla base dell'analisi delle curve granulometriche a disposizione.

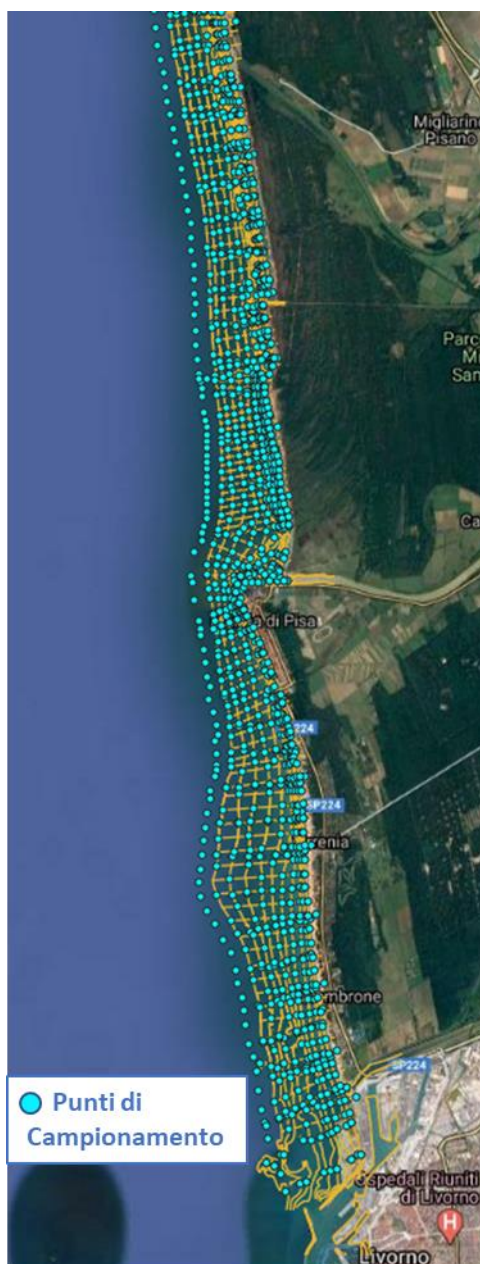


Figura 8-2 Dati sedimentologici disponibili (Provincia di Pisa, 2005): posizione dei punti di campionamento.

## 8.2 Calcolo del trasporto *longshore* netto e lordo nei transetti C1 e C2

I risultati ottenuti dalle simulazioni hanno permesso di stimare l'andamento del trasporto longshore medio annuo (lordo, netto) lungo i profili analizzati (C1 e C2). Tali risultati sono illustrati in forma grafica (Figura 6-2) e in forma tabellare (Tabella 6-1) in riferimento sia allo stato attuale sia a quello di progetto.

Tabella 8-1 Distribuzione del trasporto netto e lordo nei due scenari (stato attuale e progetto) per i profili C1 e C2.

	Attuale		Progetto	
	T. Netto	T. Lordo	T. Netto	T. Lordo
	[m3*1000]	[m3*1000]	[m3*1000]	[m3*1000]
C1	8.2	16.0	-3.5	10.2
C2	26.2	30.3	22.9	27.3

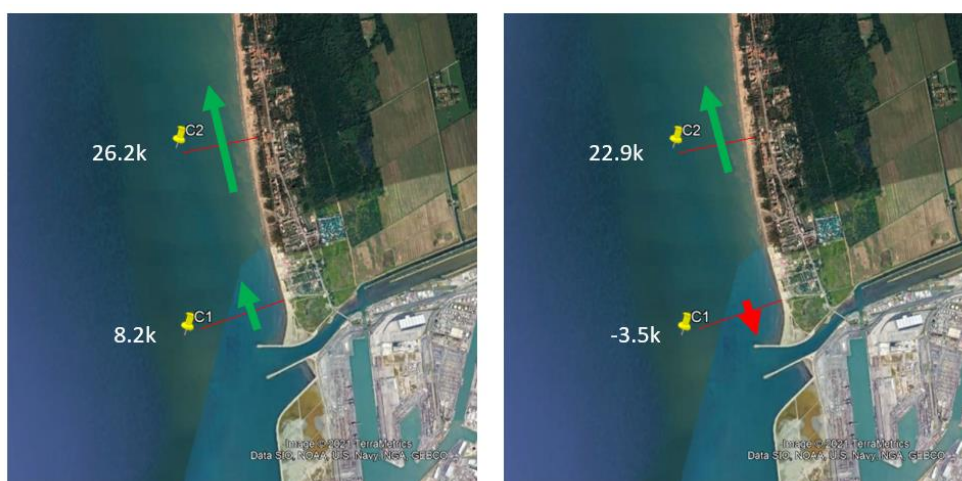


Figura 8-3 Distribuzione del trasporto netto nello scenario attuale (a destra) e progetto (a sinistra) nei due transetti C1 e C2

I risultati delle elaborazioni mostrano quanto segue:

- in riferimento allo stato attuale, il trasporto netto medio annuo nei punti C1 e C2 risulta diretto verso nord e caratterizzato da volumi pari rispettivamente a circa 8'200 m3/anno e circa 26'200 m3/anno. Il trasporto lordo risulta invece caratterizzato da volumi mediamente pari a circa 16'000 m3/anno per C1 e 30'300 m3/anno per C2.
- In riferimento allo scenario di progetto il trasporto netto medio annuo risulta diretto debolmente verso sud (3'500 m3/anno) nel punto C1, mentre risulta diretto verso nord (22'900 m3/anno) nel punto C2. Il trasporto lordo invece risulta caratterizzato da volumi mediamente pari a circa 10'200 m3/anno per C1 e 27'300 m3/anno per C2.

La realizzazione delle opere in progetto determina, come atteso, un impatto limitatamente al tratto di costa rappresentato dai transetti C1 e C2, ovvero dalla foce dello scolmatore fino a circa 2Km a nord. Nello specifico, l'effetto di schermatura che le nuove opere in progetto offriranno al tratto di costa immediatamente a nord potrebbe determinare nel transetto C1 una diminuzione consistente del trasporto proveniente da Sud fino a far prevalere il trasporto solido diretto verso sud con conseguente inversione del trasporto netto. In termini evolutivi, potrebbe determinarsi verosimilmente una rotazione della linea di riva dovuta al progressivo accrescimento dell'arenile nell'area immediatamente adiacente alla foce dello scolmatore, e al suo arretramento invece nella zona compresa tra i transetti C1 e C2. Tale effetto tenderà a ridursi fino ad annullarsi in corrispondenza del transetto C2 dove la differenza stimata in termini di trasporto netto tra stato attuale e progetto risulta quasi trascurabile.

### 8.3 Analisi della variabilità del trasporto netto e lordo nei 41 anni analizzati

Al fine di valutare la variabilità nel tempo del regime del trasporto litoraneo (netto e lordo) e l'eventuale presenza di trend evolutivi sono stati prodotti i grafici da Figura 8-4 a Figura 8-7. Tali grafici illustrano l'andamento del trasporto annuale (netto e lordo) dal 1979 al 2019 per lo scenario di stato attuale e di progetto relativamente ai transetti C1 e C2.

I grafici mostrano quanto segue in relazione al transetto C1:

- Il trasporto *longshore* netto, relativamente allo stato attuale, risulta sempre diretto verso Nord e varia da un minimo di circa 5'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 1994) ad un massimo di circa 14'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 2008 e nel 2008);
- Il trasporto *longshore* netto, relativamente allo scenario di progetto, risulta sempre diretto verso Sud e varia da un minimo di circa -7'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 1995) fino ad annullarsi nel 2008;
- Il trasporto *longshore* lordo, relativamente allo scenario di stato attuale, varia da un minimo di 12'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 1985, 1991 e 2005) ad un massimo di 23'000 m<sup>3</sup>/anno nel 2014;
- Il trasporto *longshore* lordo nel transetto C1, relativamente allo scenario di progetto, varia da un minimo di 7'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 2005) ad un massimo di 14'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 2014);

Relativamente al transetto C2 i grafici mostrano quanto segue:

- Il trasporto *longshore* netto, relativamente allo stato attuale, risulta sempre diretto verso Nord e varia da un minimo di circa 17'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 2011) ad un massimo di circa 36'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 2000);
- Il trasporto *longshore* netto, relativamente allo scenario di progetto, risulta sempre diretto verso Nord e varia da un minimo di circa 16'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 2011) ad un massimo di 31'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 2000 e 2001);
- Il trasporto *longshore* lordo, relativamente allo scenario di stato attuale, varia da un minimo di 20'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 1991 e 2011) ad un massimo di 39'000 m<sup>3</sup>/anno nel 2000;
- Il trasporto *longshore* lordo nel transetto C1, relativamente allo scenario di progetto, varia da un minimo di 19'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 2011) ad un massimo di 35'000 m<sup>3</sup>/anno (nel 2000);

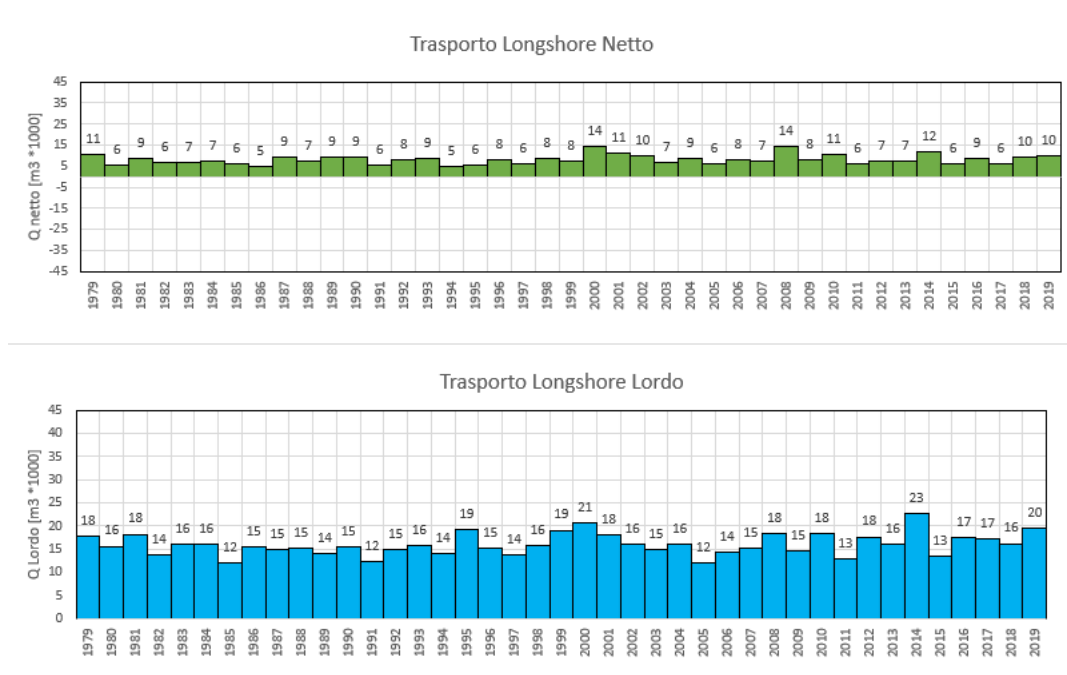


Figura 8-4 Trasporto sedimentario annuale netto e lordo per il periodo 1979-2019 in riferimento al transetto C1 ed allo stato attuale

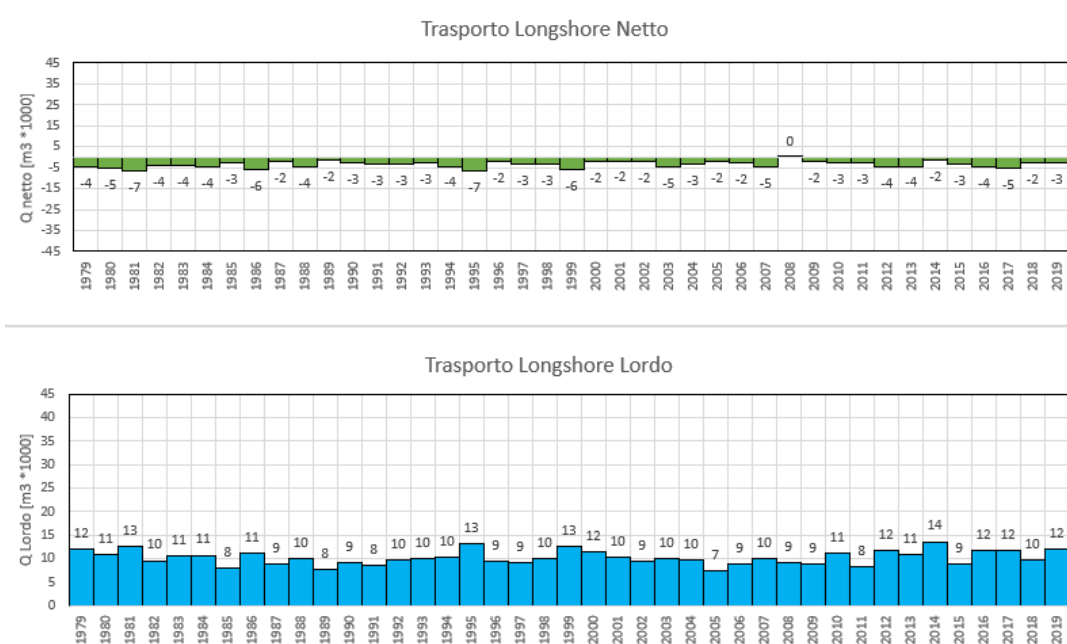


Figura 8-5 Trasporto sedimentario annuale netto e lordo per il periodo 1979-2019 in riferimento al transetto C1 ed allo scenario di progetto

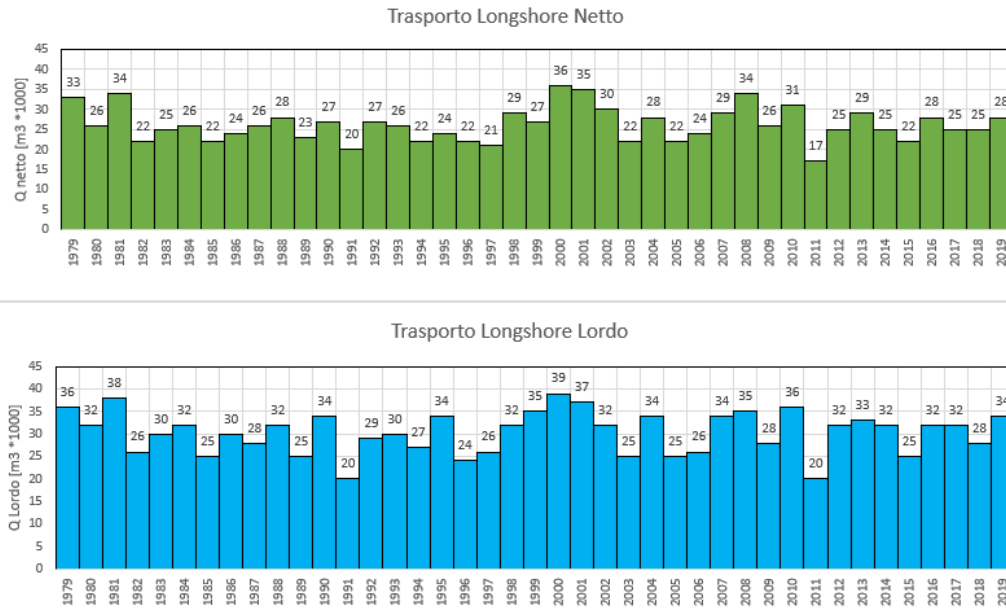


Figura 8-6 Trasporto sedimentario annuale netto e lordo per il periodo 1979-2019 in riferimento al transetto C2 ed allo scenario di stato attuale

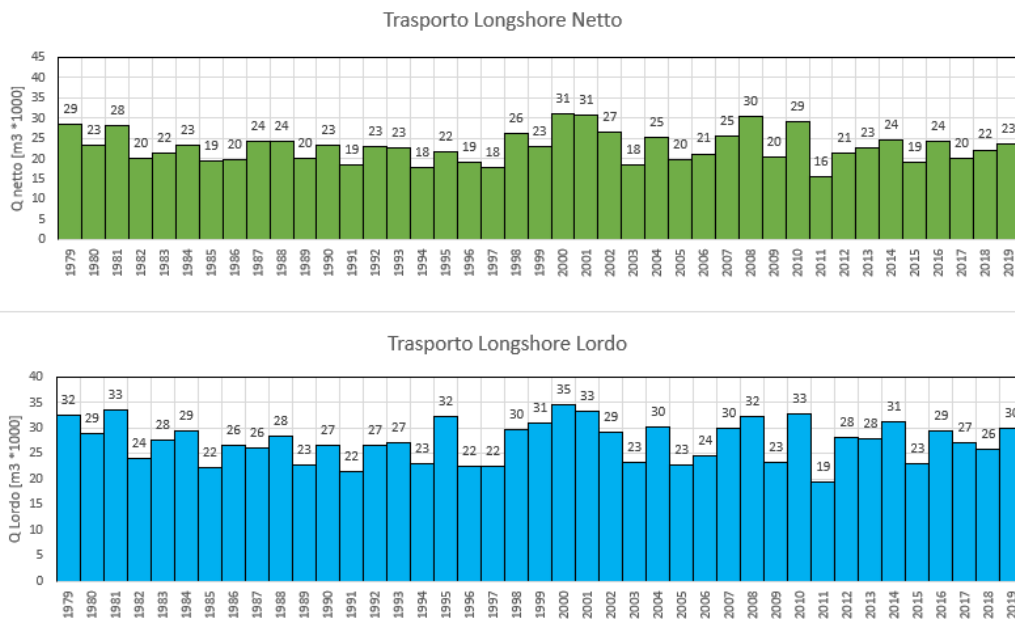


Figura 8-7 Trasporto sedimentario annuale netto e lordo per il periodo 1979-2019 in riferimento al transetto C2 ed allo scenario di progetto

L'analisi di cui sopra ha mostrato che il sito oggetto di studio presenta una significativa variabilità del trasporto litoraneo (sia netto che lordo) in entrambi i transetti analizzati, senza però evidenziare particolari trend evolutivi.

Relativamente alle differenze tra stato attuale e progetto si può ribadire quanto evidenziato nel paragrafo 8.2 ed in particolare che la realizzazione delle opere in progetto determina significative differenze nel regime del trasporto solido (per l'intero periodo analizzato) limitatamente al transetto C1. Viceversa, le differenze nell'andamento del trasporto netto e lordo tra scenario attuale e progetto risultano trascurabili per il transetto C2.

## 9 Modello di dettaglio della dinamica costiera

Al fine di identificare le principali dinamiche locali del sito di studio ed analizzare le differenze tra lo scenario di stato attuale e quello di progetto in termini di dinamica costiera, il modello d'onda MIKE 21 SW (Spectral Waves), già descritto in precedenza per la propagazione da largo a riva, è stato integrato con il modulo idrodinamico MIKE 21 HD (Hydrodynamics).

Il modulo MIKE 21 HD (Hydrodynamics), cuore del codice bidimensionale MIKE 21, simula le variazioni di livello e di corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica. La versione Flexible Mesh utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale, al pari del modello d'onda, è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il modulo necessita di una serie di dati di input, che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- fattori di calibrazione (es. scabrezza, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (es. livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (es. oscillazioni di marea, portate);
- altre forzanti (es. campi di vento, radiation stress, apporti puntuali di portata).

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno, ma anche la direzione e il verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascun elemento di calcolo, è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- velocità di corrente e direzione;
- densità, temperatura e salinità (se rilevanti);

Una descrizione di dettaglio del modulo idrodinamico HD del codice di calcolo MIKE 21 è disponibile in Allegato C.

### 9.1 Dominio di calcolo e batimetria

Il modello integrato è stato implementato su un dominio di calcolo di estensione piuttosto simile a quello utilizzato per la propagazione largo-costa al fine di includere anche la presenza delle secche della Meloria. Il dominio risulta esteso lungo costa per circa 30 km e verso il largo per circa 20 km. Il risultato finale dell'interpolazione dei dati batimetrici a disposizione sul dominio di calcolo adottato è mostrato nell'immagine a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

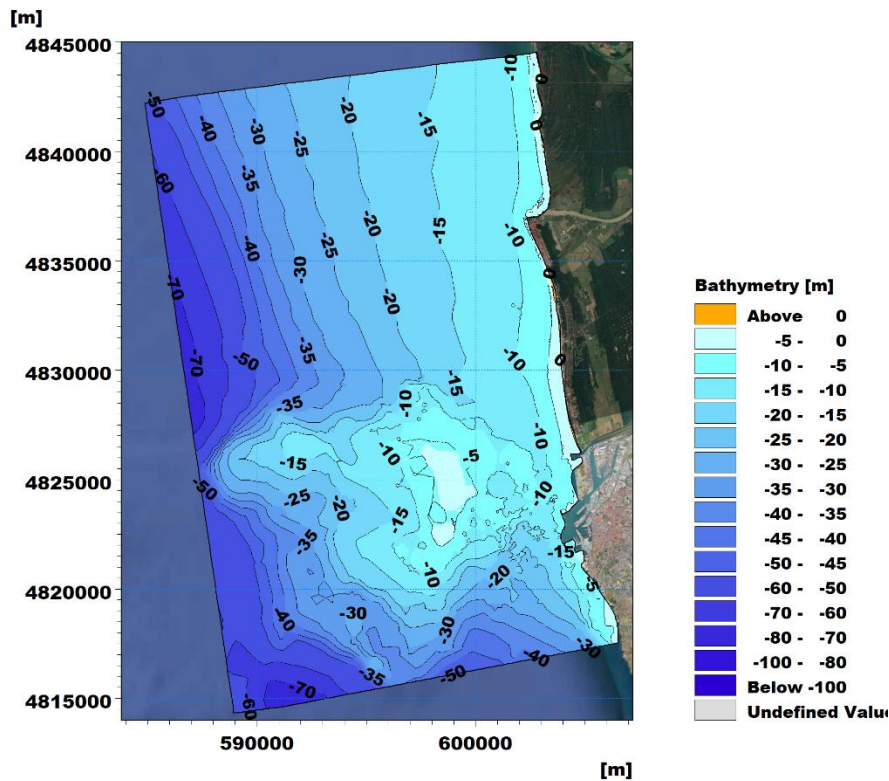


Figura 9-1 Batimetria modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

Al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica al dettaglio richiesto per una caratterizzazione di moto ondoso e idrodinamica su profondità limitate e garantire al contempo la sostenibilità dei tempi computazionali, l'area è stata suddivisa in differenti sottodomini, ognuno caratterizzato da una risoluzione (intesa come lato del triangolo della mesh) differente. Nello specifico, si passa da una risoluzione di circa 400 m nella zona più al largo, a due zone intermedia a 180 m e 60 m, sino a 20 metri per la zona caratterizzata da profondità limitate inclusa anche la zona delle secche della Meloria.

La scelta di aumento incrementale di risoluzione verso costa consente di riprodurre le dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, shoaling, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro. In Figura 9-2 è illustrata, a differente livello di dettaglio, la mesh di calcolo del modello, che complessivamente è costituita da circa 270'000 elementi.



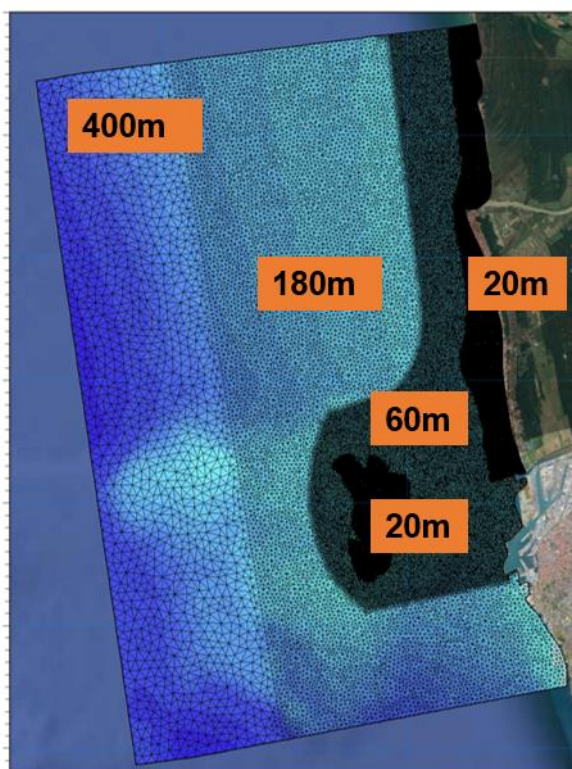


Figura 9-2 Risoluzione della mesh di calcolo del modello di dettaglio

## 9.2 Scenari di simulazione

Le simulazioni sono state condotte in riferimento sia allo scenario di stato attuale che a quello di progetto. In Figura 9-3 sono riportati layout e batimetrie relativi ad i due scenari di simulazione.

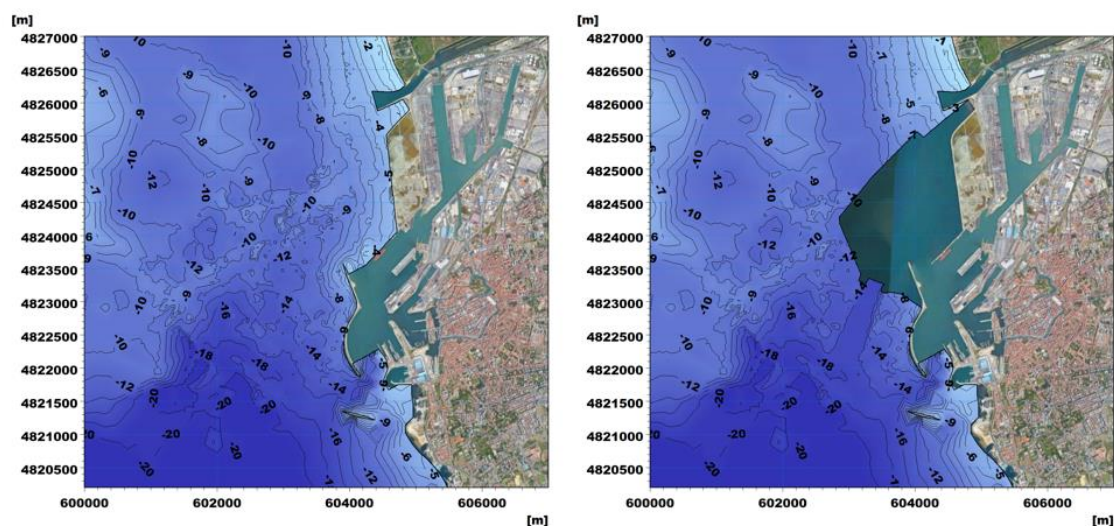


Figura 9-3 Layout e batimetria degli scenari di simulazione: stato attuale (a sinistra) e progetto (a destra).

### 9.3 Selezione delle condizioni d'onda utilizzate per le simulazioni

Il modello di dettaglio integrato onda-corrente, come anticipato, è stato utilizzato per l'identificazione e l'analisi delle principali dinamiche sottocosta, sia per la configurazione di stato attuale, sia per lo scenario di progetto.

A tal fine è stato preliminarmente necessario selezionare una serie di condizioni d'onda rappresentative. Tali condizioni sono state determinate a partire dall'analisi del moto ondoso al largo definita nel punto MWM OFF e dettagliata al paragrafo 5.2. In particolare, la rosa del clima ondoso (discretizzata in settori di 10°) è stata suddivisa in settori di 30°. In considerazione della finalità dello studio sono state selezionate 4 condizioni ondose caratterizzate da una frequenza indicativa variabile tra 34 e 49 ere all'anno, in riferimento ai 4 settori A-B-C-D illustrati in Figura 9-4.

Ai valori di altezza d'onda significativa associati alle diverse frequenze di accadimento sono stati associati i valori di periodo di picco  $T_p$ , stimati attraverso le relazioni  $H_s$ - $T_p$  definite sulla base dei dati a disposizione e specifiche per ogni settore di riferimento.

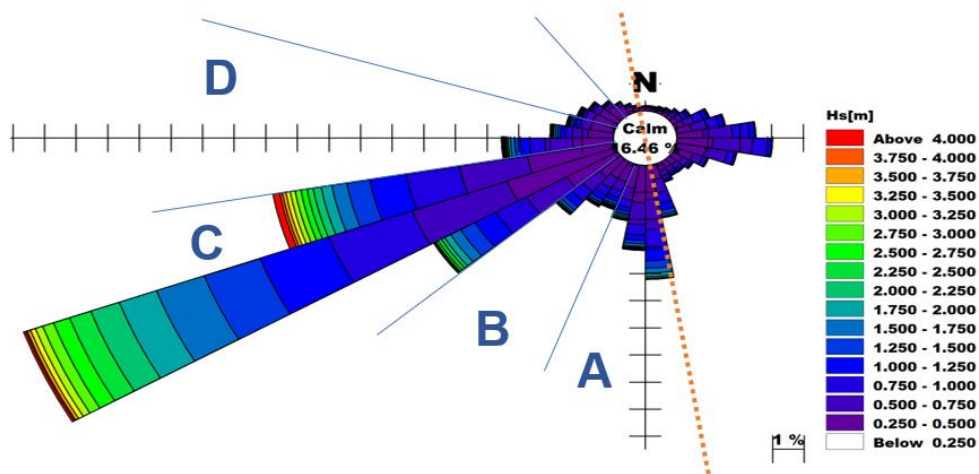


Figura 9-4 Suddivisione della rosa del clima ondoso in 4 settori significativi di 30°

Alle 4 condizioni d'onda ricavate dal clima ordinario è stata aggiunta una condizione ondosa estrema sulla base dell'analisi condotta al paragrafo 6.1. In particolare, si è fatto riferimento all'onda con periodo di ritorno pari ad 2 anni. Per l'onda estrema è stata applicata la direzione media di provenienza degli eventi più alti registrati nella serie (nel punto MWM OFF). Tale direzione è pari a 255°N. Le caratteristiche delle condizioni d'onda simulate sono riportate in Tabella 9-1.

Tabella 9-1 Elenco delle condizioni d'onda selezionate per il modello 2D di dettaglio (onda e conseguente circolazione locale)

Settore	Onda	Frequenza [ore/anno]	Hs [m]	MWD [°]	Tp [s]
A	1	49	2.1	185	6.2
B	2	34	2.0	215	7.8
C	3	39	4.0	245	9.8
D	4	35	2.2	275	9.4
	Onda	T [anni]	Hs [m]	MWD [°]	Tp [s]
	C	5	5.98	255	10.8

## 9.4 Risultati del modello integrato onda-corrente

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche in tutti i punti del dominio di calcolo sia per lo scenario di stato attuale che per quello di progetto.

I risultati del modello, riportati nei paragrafi a seguire, fanno principalmente riferimento a:

- mappe di altezza d'onda e direzione di provenienza;
- mappe di velocità e direzione di corrente.

Al fine di agevolare la comprensione dei risultati sono riportati, sia per il modello d'onda che per il modello idrodinamico, dapprima le mappe su tutto il dominio di calcolo (solo per lo stato attuale) e successivamente le mappe per la sola zona di interesse (per lo scenario di stato attuale e progetto) al fine di comprendere l'impatto della realizzazione delle opere di progetto.

### 9.4.1 Risultati del modello su tutto il dominio

Le simulazioni hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) per l'intero litorale oggetto di studio. Nelle immagini da Figura 9-5 a Figura 9-9 sono riportati i campi di altezza d'onda significativa e direzione media di provenienza per le 5 condizioni simulate ed in riferimento allo stato attuale.

Come già osservato per il modello d'onda a larga scala, in queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori mostrano in maniera efficace le trasformazioni che subisce l'onda nella sua propagazione da largo verso costa. In particolare, è possibile notare l'effetto schermante che la presenza delle secche della Meloria offrono al litorale pisano. Nello specifico, a seconda della direzione di provenienza dell'onda simulata la schermatura (che ha l'effetto di ridurre l'altezza delle onde che raggiungono il litorale) favorisce diversi tratti di costa: ad esempio, per la condizione d'onda proveniente da Sud (185°N) l'effetto di schermatura delle secche della Meloria risulta evidente per tutto il litorale oggetto di studio, dalla foce dello scolmatore fino al Fiume Morto; viceversa, per le onde provenienti da Ovest (275°N) la protezione risulta evidente solo per il primo tratto di litorale a Nord dello scolmatore, indicativamente fino a località Tirrenia.

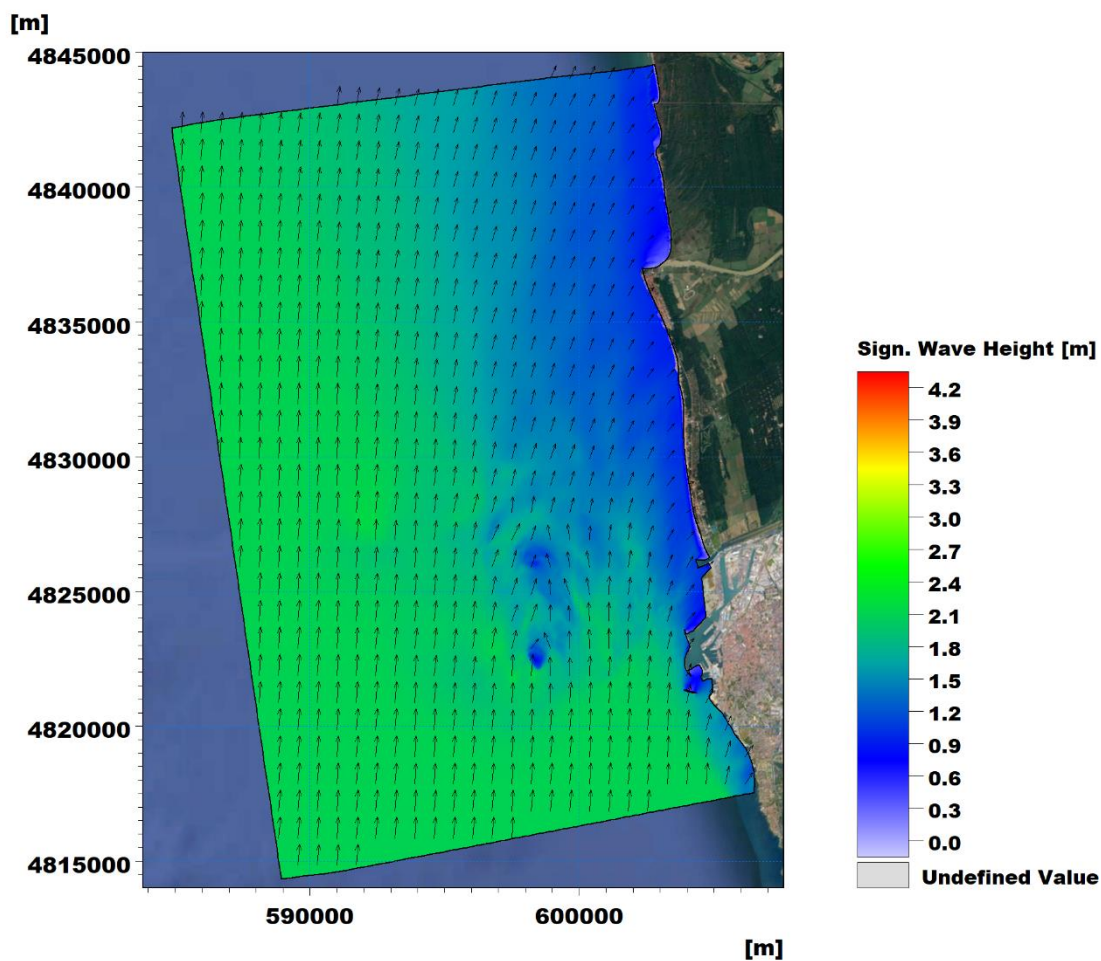


Figura 9-5 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 1, con  $H_s=2.1$  m  $T_p=6.2$  s, caratterizzata da  $MWD=185^\circ N$

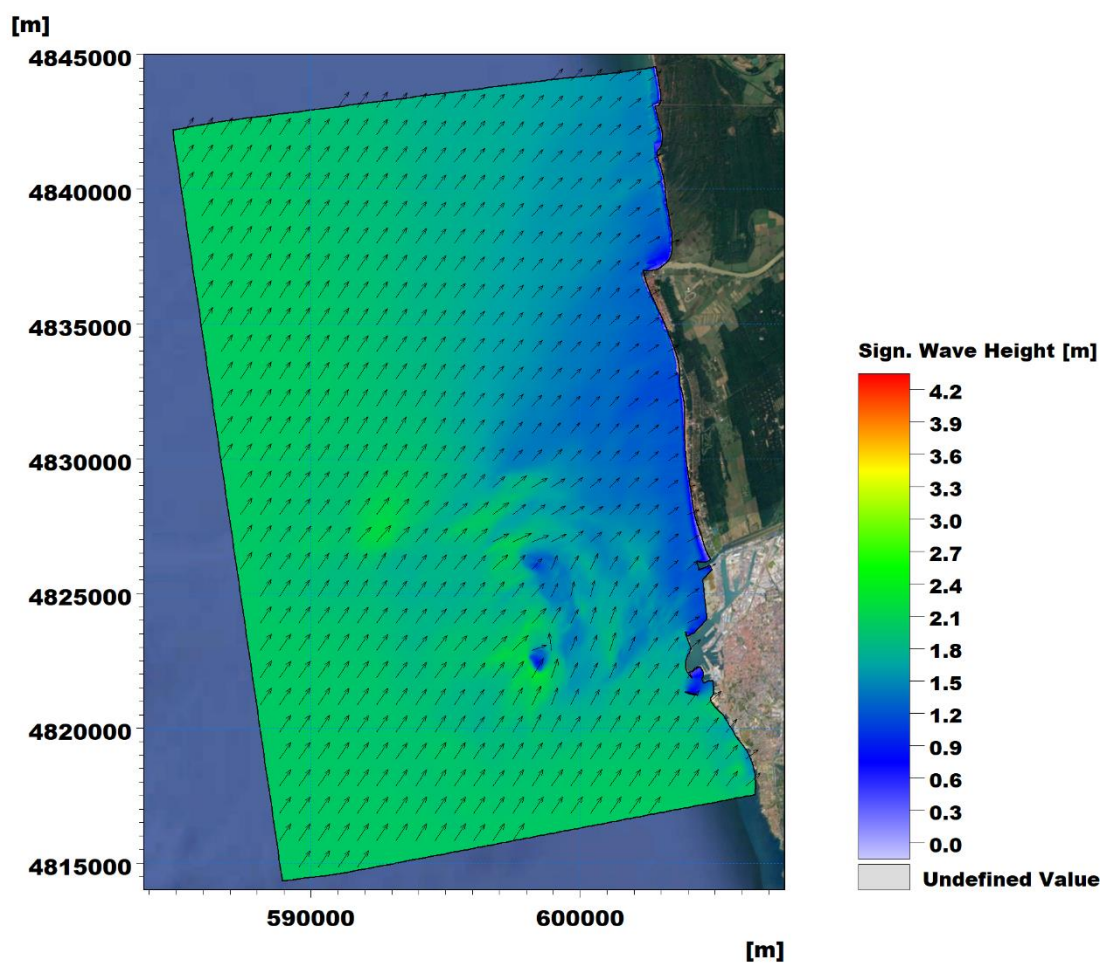


Figura 9-6 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 2, con  $H_s=2.0$  m  $T_p=7.8$  s, caratterizzata da  $MWD=215^\circ N$

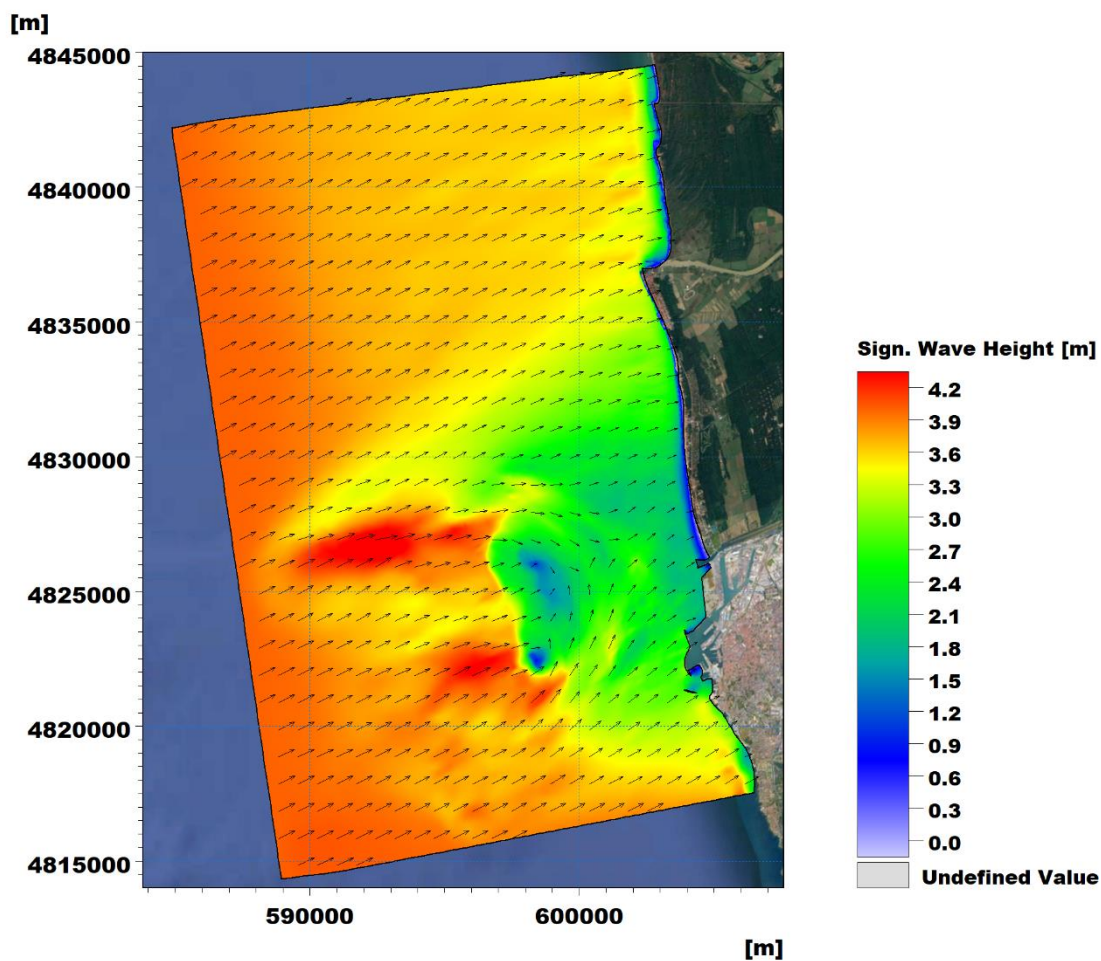


Figura 9-7 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 3, con  $H_s=4.0$  m  $T_p=9.8$  s, caratterizzata da  $MWD=245^\circ N$

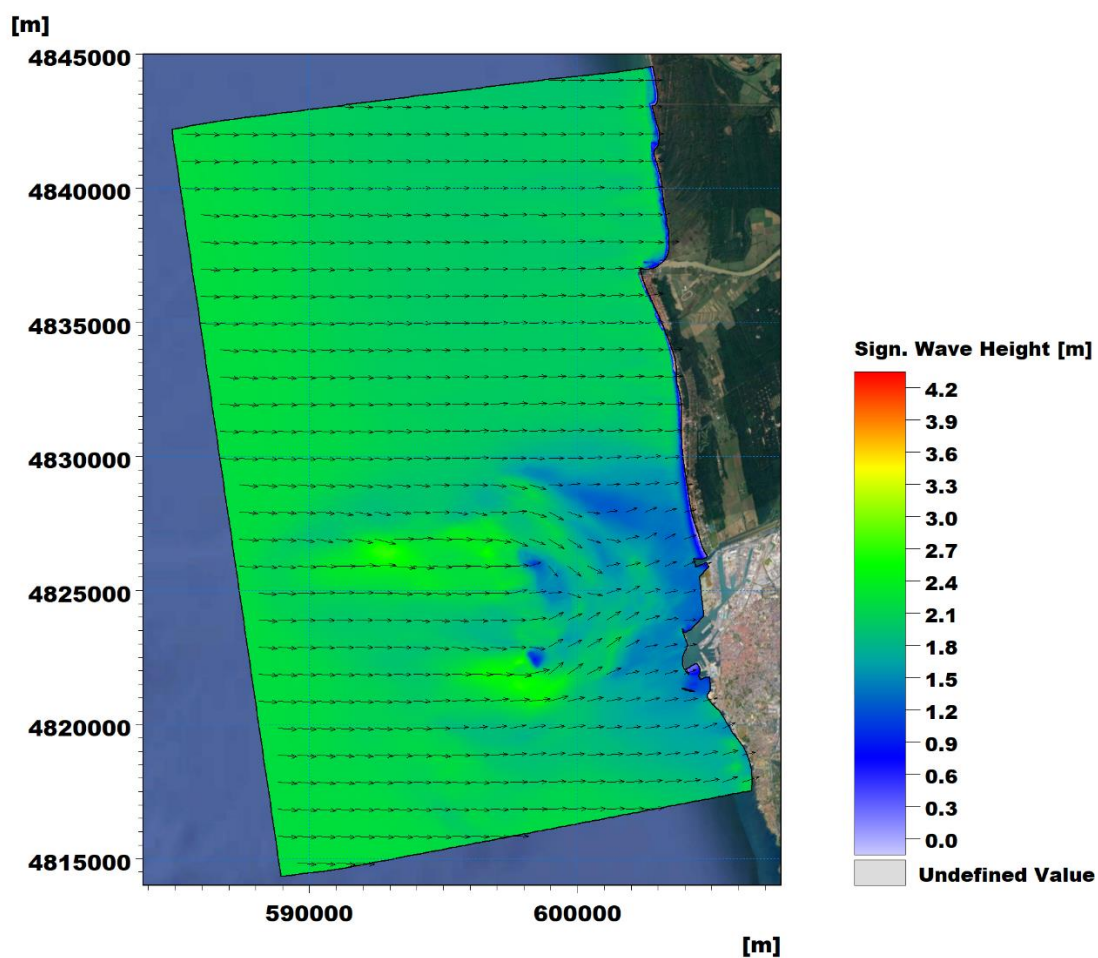


Figura 9-8 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 4, con  $H_s=2.2$  m  $T_p=9.4$  s, caratterizzata da  $MWD=275^\circ N$

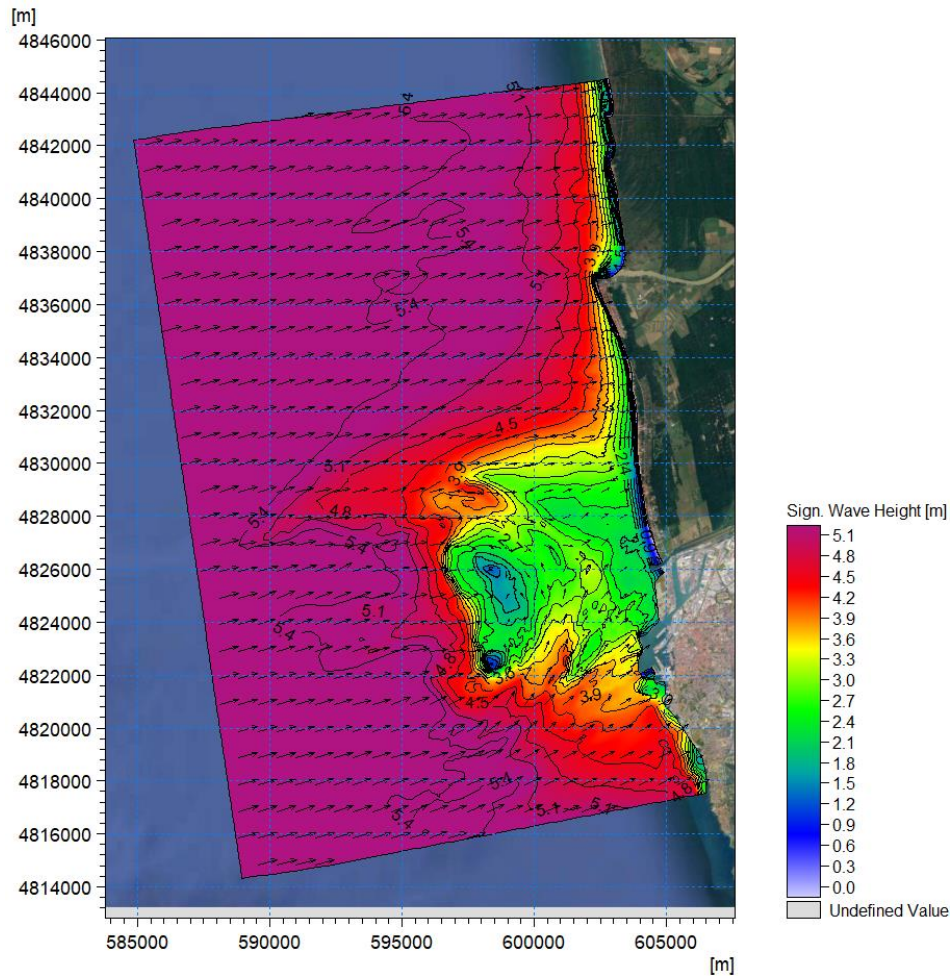


Figura 9-9 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 5, con  $H_s=5.98$  m  $T_p=10.8$  s, caratterizzata da  $MWD=255^\circ N$

A seguire si riportano le mappe di velocità e direzione di corrente per le condizioni d'onda selezionate, che forniscono una esaustiva rappresentazione dell'attuale circolazione locale.

Le correnti litoranee sono generate per effetto dei gradienti dei radiation stress, massimi in corrispondenza del frangimento. Le condizioni di moto ondoso, a seconda della loro intensità e direzione (e quindi della localizzazione della fascia di frangenti, più o meno spostata verso largo), sono in grado di generare correnti in una fascia più o meno prossima alla costa. La direzione prevalente della corrente risulta invece influenzata dall'angolo formato tra il fronte d'onda e le isobate.

Analizzando i risultati delle onde 1, 2 e 3 si osserva che in tutti e tre i casi le condizioni d'onda imposte determinano la generazione di un flusso di corrente a costa, più o meno intenso, diretto verso nord. Nel caso delle onde 1 e 2 tale flusso risulta poco intenso, con valori di velocità di corrente massimi a costa intorno a 0.5 m/s; viceversa, nel caso dell'onda 3 tale flusso risulta più intenso, con valori di velocità di corrente massimi intorno ai 0.7 m/s, e più esteso nella dimensione trasversale alla costa.

Nel caso dell'onda 4, caratterizzata da una direzione di attacco più perpendicolare alla costa, viene a determinarsi invece un campo di corrente più complesso. Nello specifico, la direzione della condizione d'onda imposta è tale da generare una corrente a costa debolmente diretta verso



sud, con valori massimi intorno ai 0.7 m/s. In alcuni punti lungo il litorale oggetto di studio è possibile notare invorticamenti e correnti di rip (dirette verso il largo).

Per quanto riguarda l'onda 5, caratterizzata da un tempo di ritorno pari ad 2 anni, si osserva un campo di corrente più intenso su tutto il dominio con un flusso di corrente principalmente diretto verso nord. In particolare, tale flusso risulta essere generalmente maggiormente distanziato dalla linea di costa dal momento che la fascia dei frangimenti risulta ubicata più al largo.

In tutte e cinque le condizioni ondose simulate nella zona delle secche della Meloria, caratterizzata da limitate profondità, è possibile osservare un intenso flusso di corrente piuttosto intenso con valori di velocità fino a 0.7m/s e direzione concorde alla direzione dell'onda imposta.

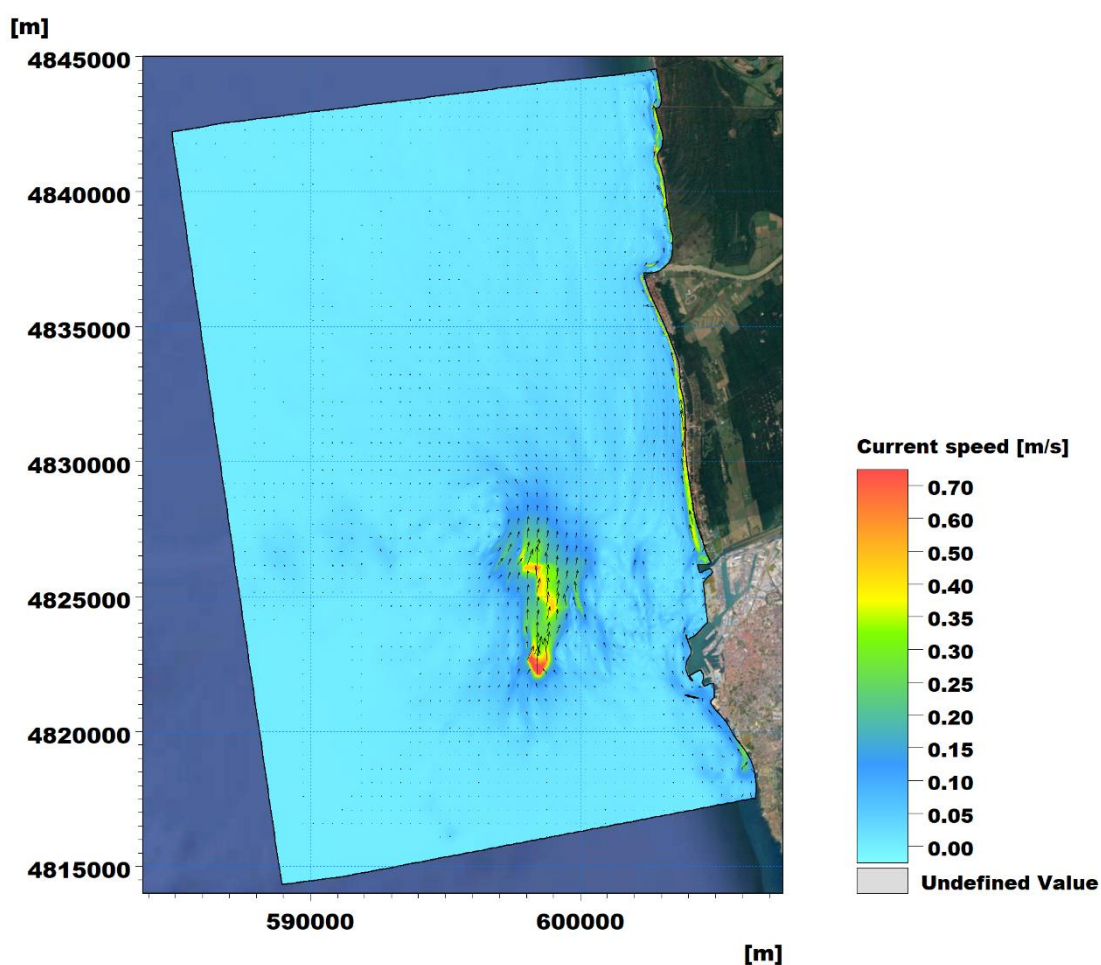


Figura 9-10 Distribuzione di velocità e direzione di corrente per la condizione 1, con  $H_s=2.1$  m  $T_p=6.2$  s, caratterizzata da  $MWD=185^\circ N$

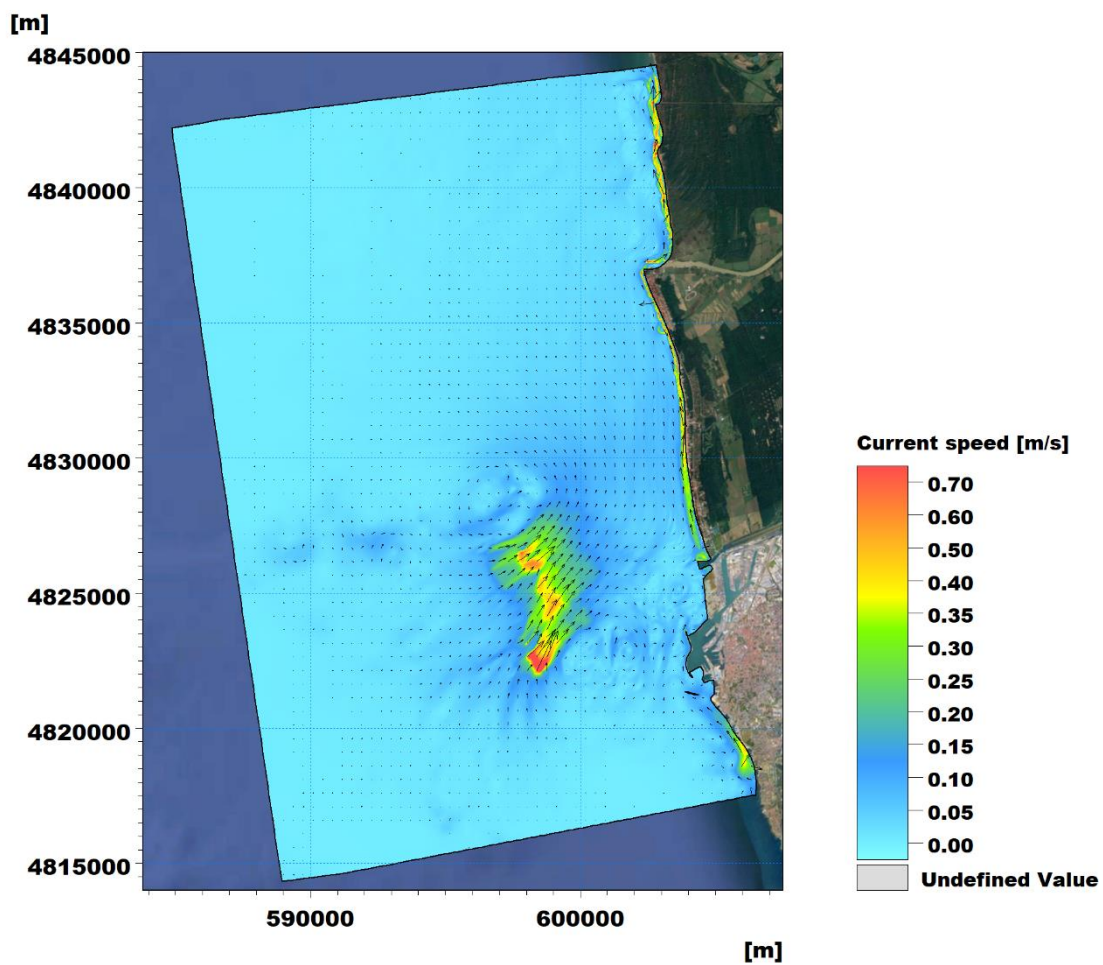


Figura 9-11 Distribuzione di velocità e direzione di corrente per la condizione 2, con  $H_s=2.0$  m  $T_p=7.8$  s, caratterizzata da  $MWD=215^\circ N$

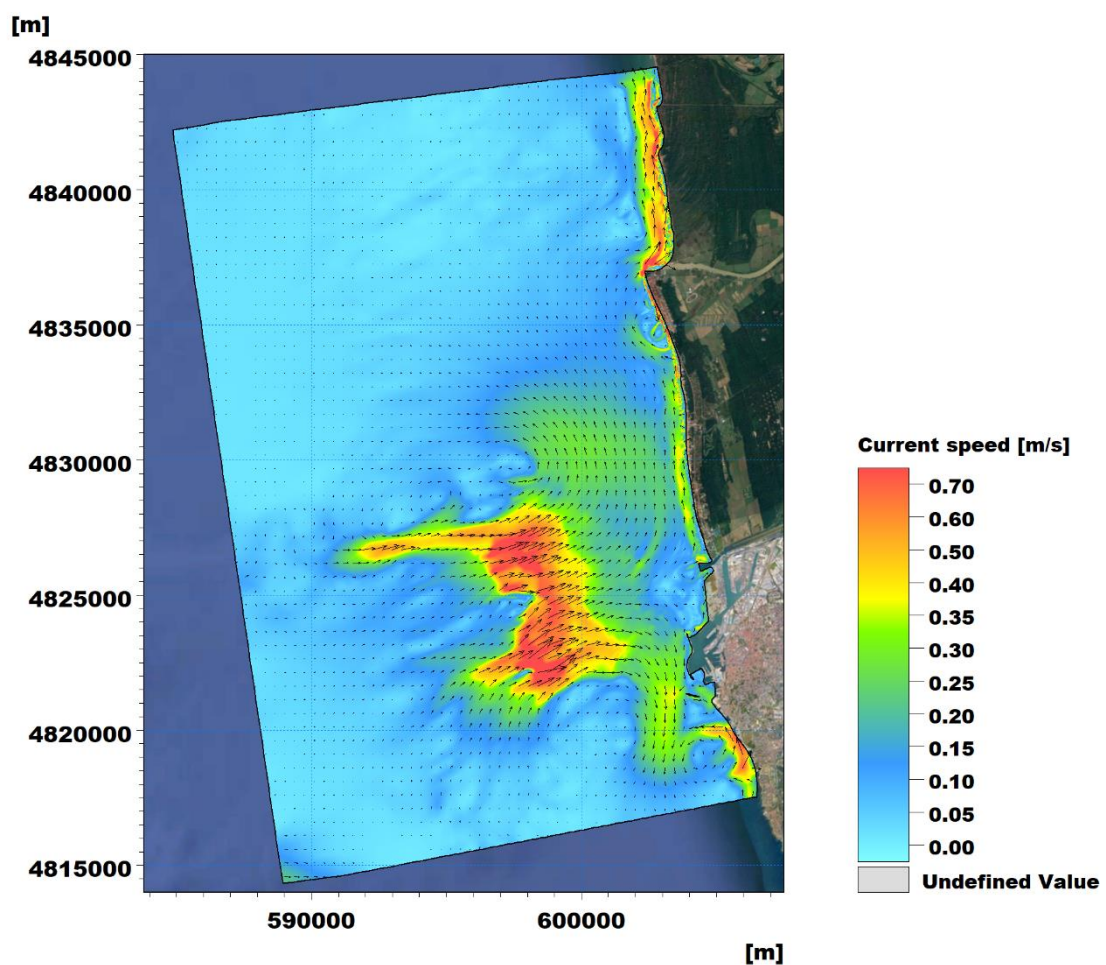


Figura 9-12 Distribuzione di velocità e direzione di corrente per la condizione 3, con  $H_s=4.0$  m  $T_p=9.8$  s, caratterizzata da  $MWD=245^\circ N$

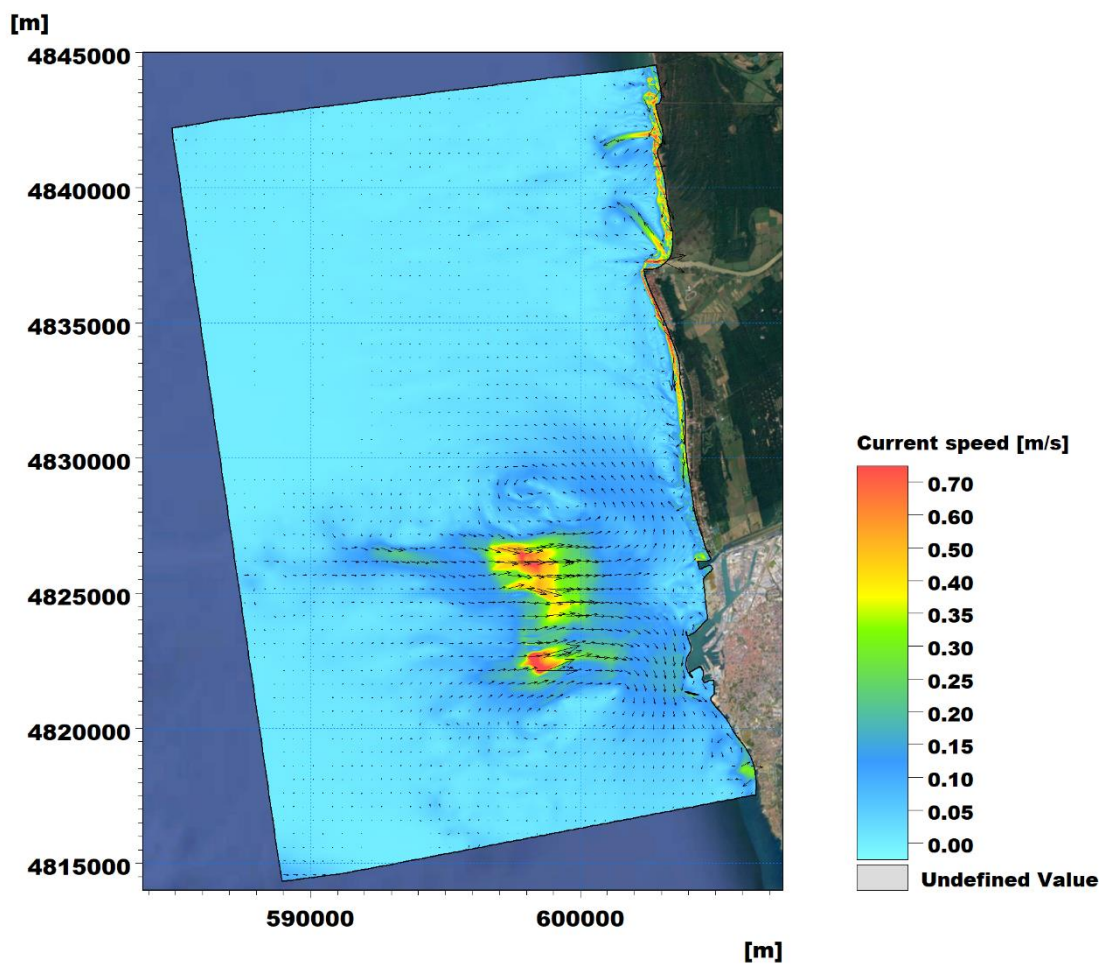


Figura 9-13 Distribuzione di velocità e direzione di corrente per la condizione 4, con  $H_s=2.2$  m  $T_p=9.4$  s, caratterizzata da  $MWD=275^\circ N$

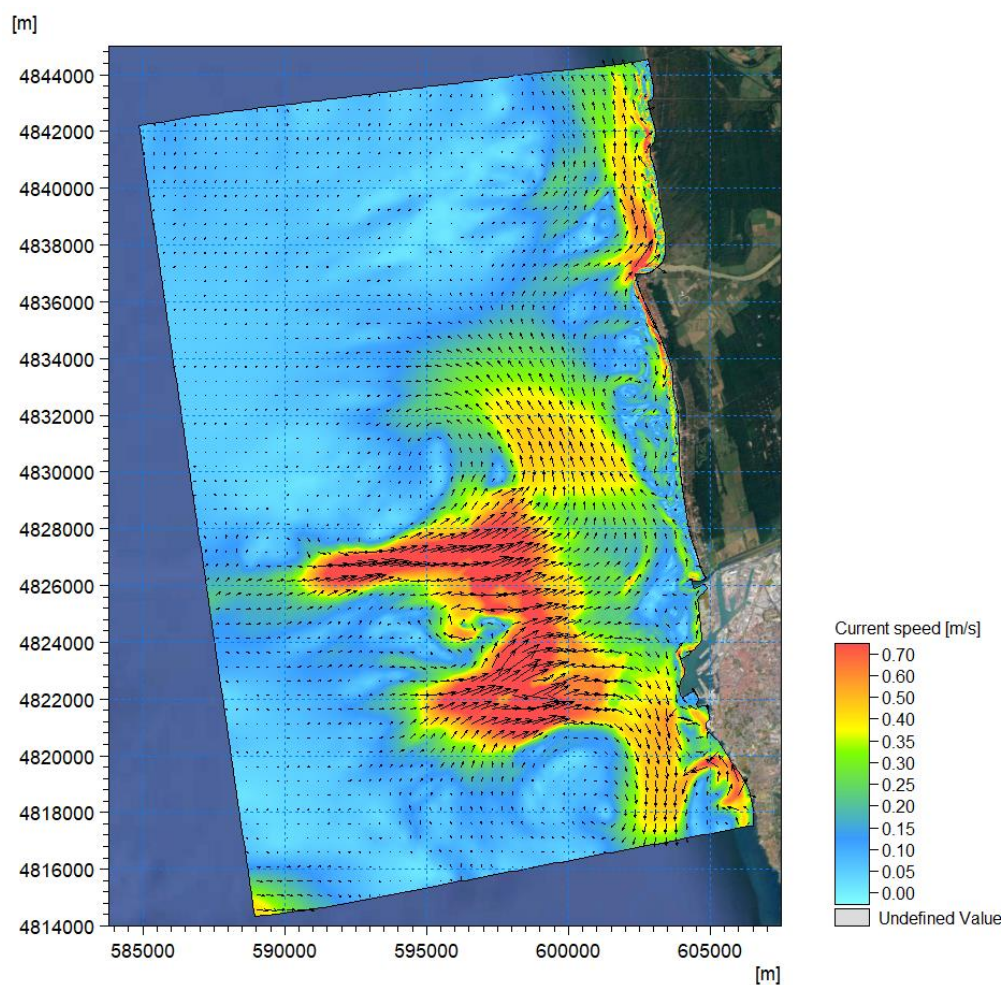


Figura 9-14 Distribuzione della velocità di corrente per la condizione 5, con  $H_s=5.98$  m  $T_p=10.8$  s, caratterizzata da  $MWD=255^\circ N$

## 9.4.2 Risultati del modello nell'area di estremo interesse

Al fine di valutare l'impatto delle opere in progetto sull'idrodinamica locale i risultati del modello d'onda, per lo scenario di stato attuale e di progetto, sono riportati affiancati nelle immagini da Figura 9-15 a Figura 9-19. Le immagini mostrano che, dal punto di vista del moto ondoso, l'estensione del tratto di costa interessato dalle modifiche di progetto è fortemente influenzato dalla direzione d'attacco dell'onda. In particolare, si può notare che in corrispondenza dell'onda 1, caratterizzata da una direzione di provenienza di 185°N, la nuova darsena determina una riduzione del moto ondoso fino a circa 2Km a nord della foce dello scolmatore. L'estensione del tratto di costa interessato da tali riduzioni diminuisce, come atteso, al variare della direzione d'attacco dell'onda (onde 2 3 e 5 caratterizzate rispettivamente da direzioni pari a 215°N, 245°N e 255°N) fino a quasi annullarsi in corrispondenza dell'onda D, proveniente da 275°N.

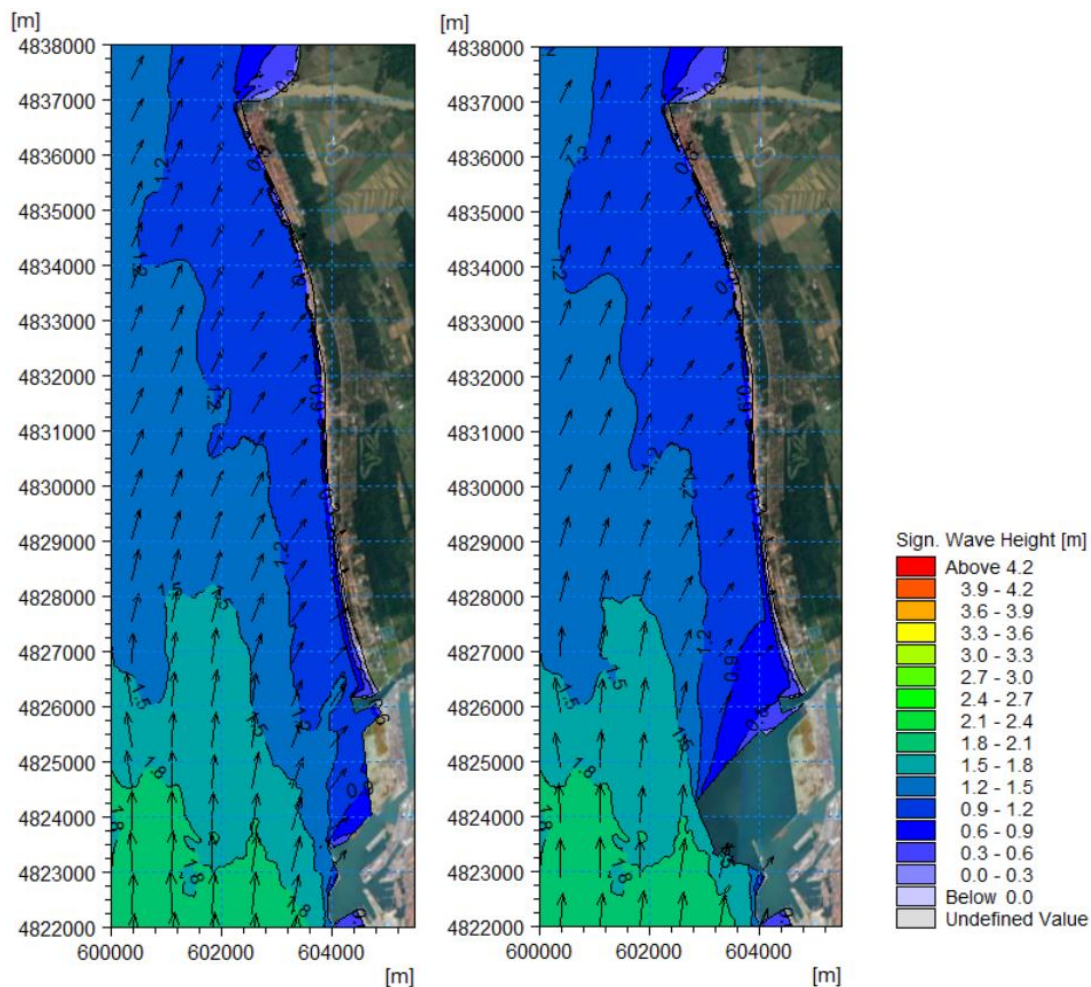


Figura 9-15 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 1, scenario attuale (a sinistra) e scenario di progetto (a destra)

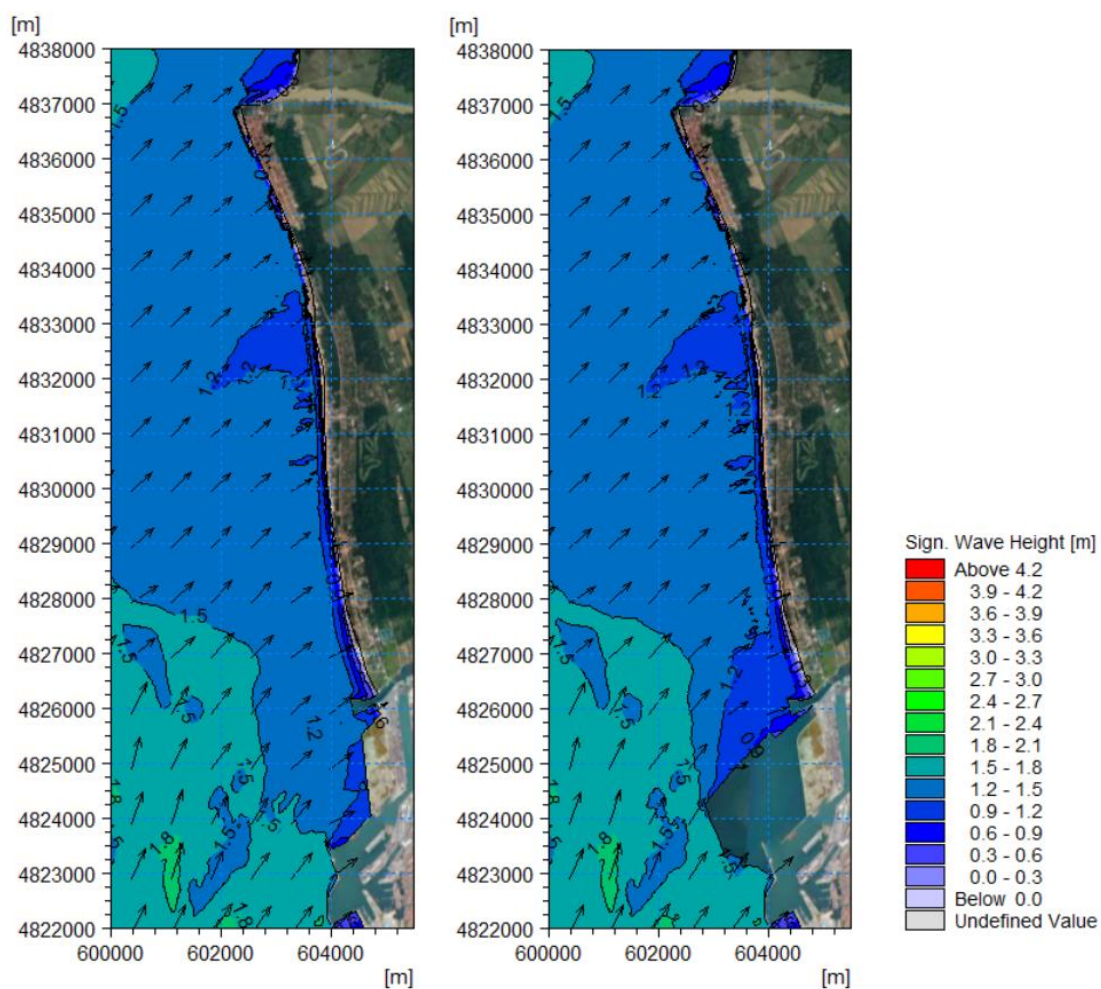


Figura 9-16 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 2, scenario attuale (a sinistra) e scenario di progetto (a destra)

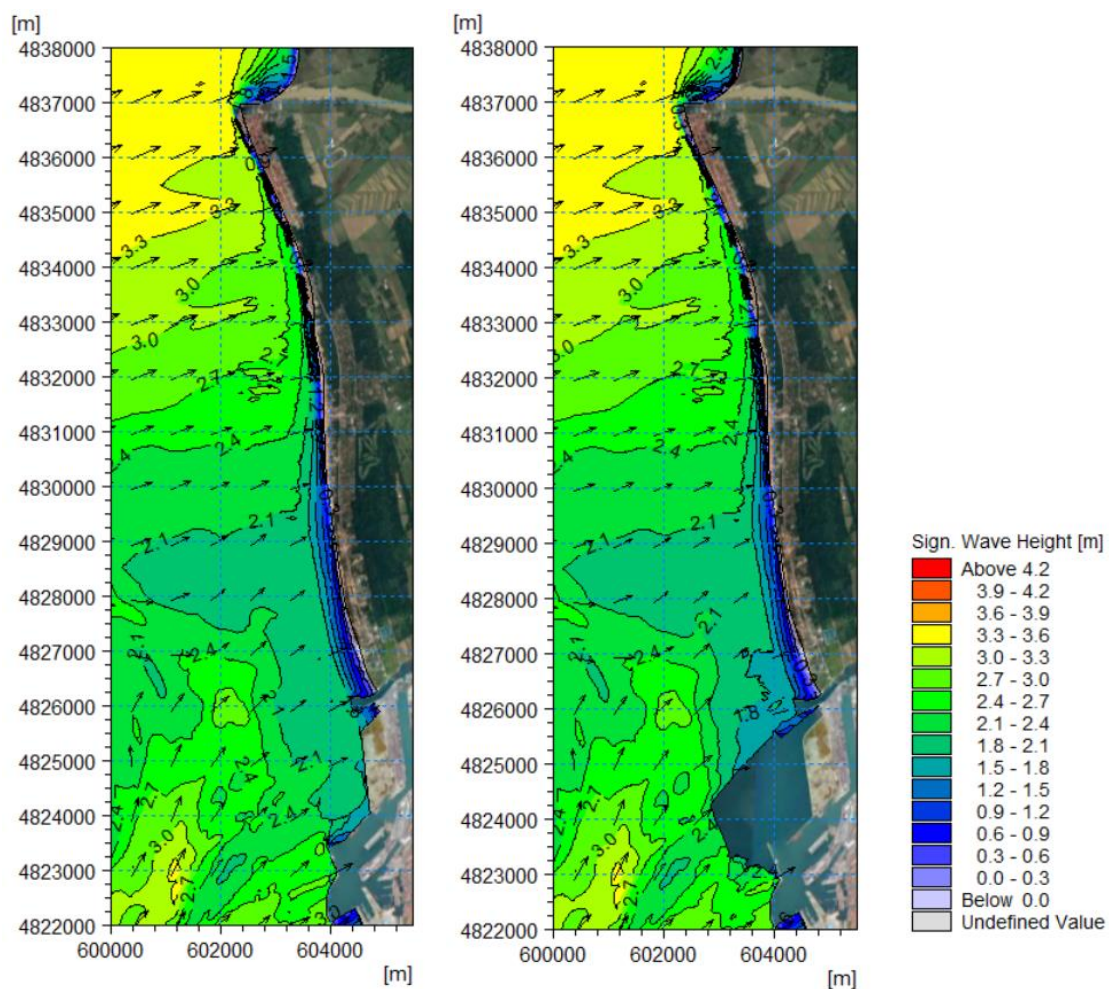


Figura 9-17 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 3, scenario attuale (a sinistra) e scenario di progetto (a destra)



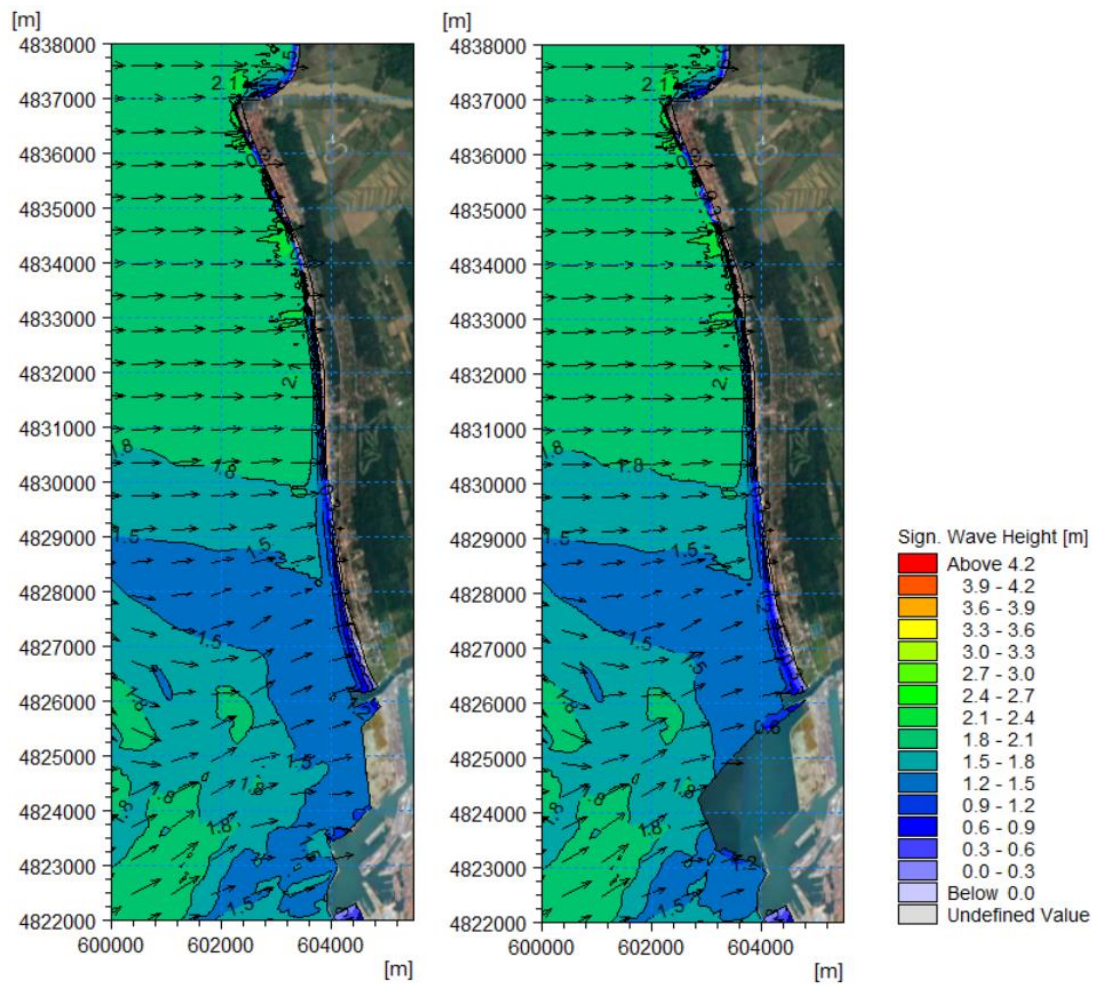


Figura 9-18 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 4, scenario attuale (a sinistra) e scenario di progetto (a destra)

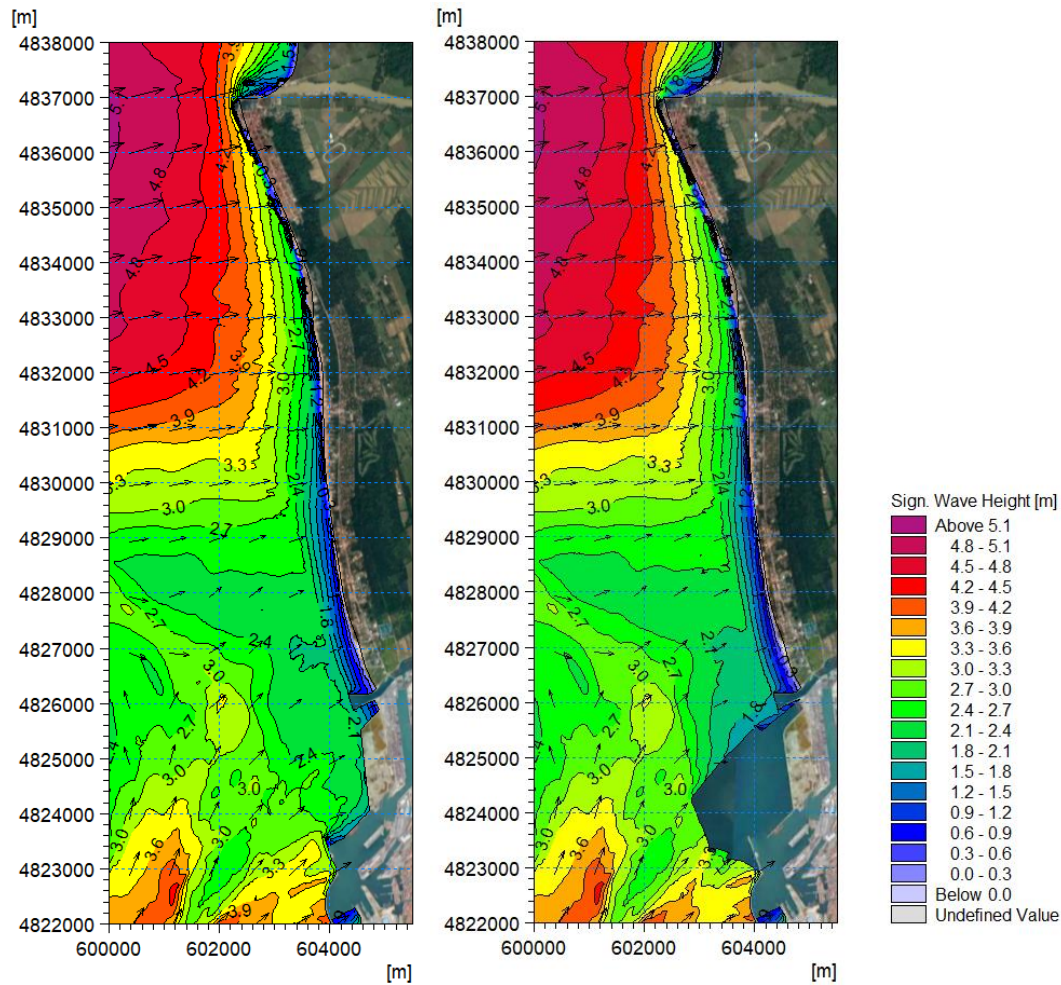


Figura 9-19 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 5, scenario attuale (a sinistra) e scenario di progetto (a destra)

Le immagini da Figura 9-20 a Figura 9-24, che riportano i campi di corrente di stato attuale e progetto, illustrano l'impatto della darsena in progetto sull'idrodinamica locale. Anche in questo caso le differenze tra stato attuale e progetto si concretizzano limitatamente al tratto di costa immediatamente a Nord della foce dello scolmatore e sono dipendenti dalla direzione di attacco delle onde. In relazione alla condizione ondosa 1, caratterizzata da una direzione di provenienza dell'onda da Sud ( $185^{\circ}\text{N}$ ), si osserva una significativa attenuazione del flusso di corrente, generalmente diretto verso nord, nel tratto di costa che va dalla foce dello scolmatore fino a circa 2Km a Nord. Situazione analoga si verifica per le condizioni ondose 2 3 e 5 (caratterizzate rispettivamente da direzioni pari a  $215^{\circ}\text{N}$ ,  $245^{\circ}\text{N}$  e  $255^{\circ}\text{N}$ ). Relativamente alla condizione ondosa 4, data la direzione di attacco dell'onda quasi perpendicolare all'orientazione media dei fondali e della linea di costa, si osserva un minore impatto delle opere in progetto sull'idrodinamica locale.

Analizzando i risultati del modello idrodinamico nello scenario di progetto si osserva che nei primi 2 Km a nord dello scolmatore la corrente litoranea è debole o del tutto assente, per quasi tutte le condizioni d'onda simulate. In quest'area la circolazione è caratterizzata dalla formazione di vortici di debole intensità, che in alcuni casi comportano flussi uscenti verso il largo in altri casi flussi prevalentemente diretti verso sud che poi si muovono lungo il pennello di foce diretti verso il largo. Procedendo ancora verso nord, la corrente litoranea si innesca e si sviluppa pienamente con direzione e intensità del tutto analoghe a quelle che si osservano nello scenario attuale. Tale circostanza conferma quanto evidenziato nell'ambito del capitolo 8, ovvero che nel tratto compreso tra la foce dello scolmatore ed il transetto C2 verrà verosimilmente a determinarsi un riequilibrio dell'orientazione della linea di riva con un progressivo arretramento della stessa nel tratto di costa compreso tra C1 e C2.

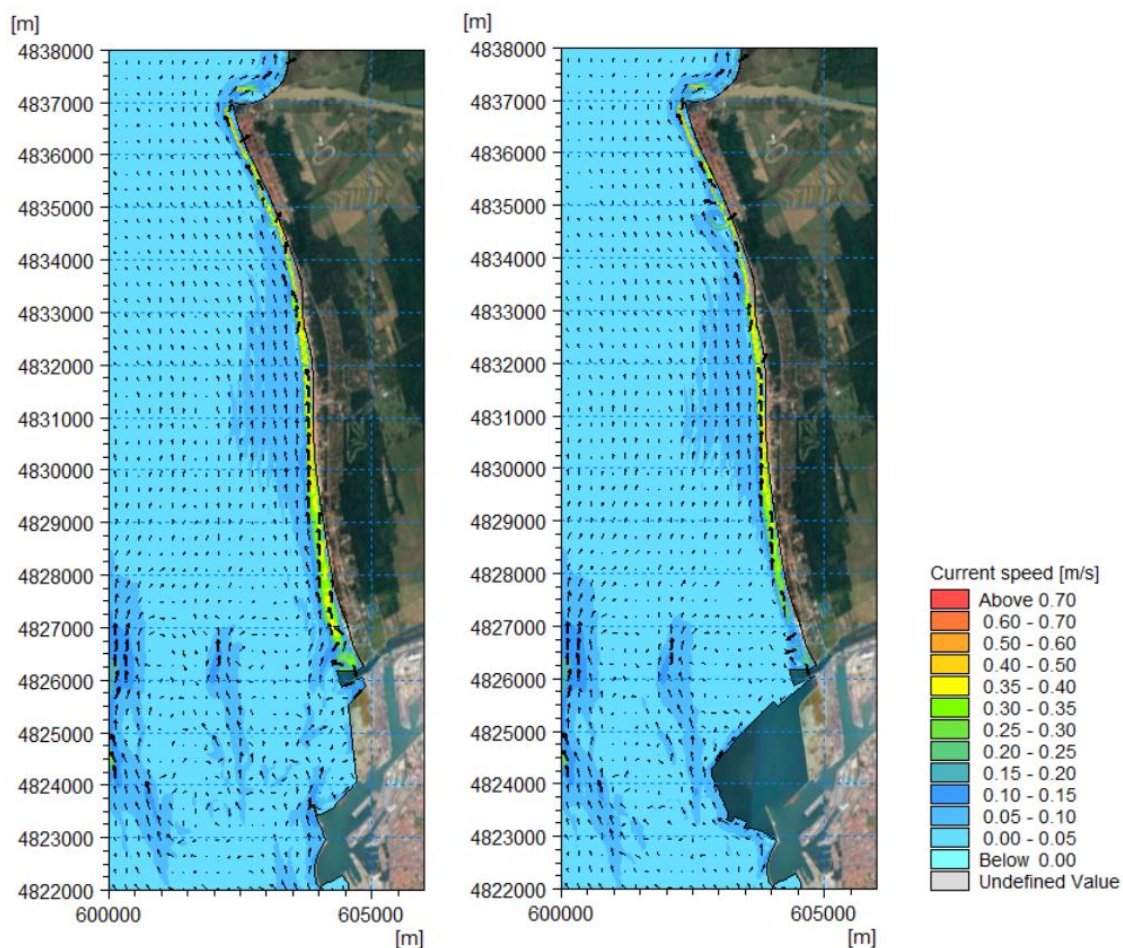


Figura 9-20 Distribuzione della velocità di corrente per la condizione 1, scenario attuale (a sinistra) e scenario di progetto (a destra)

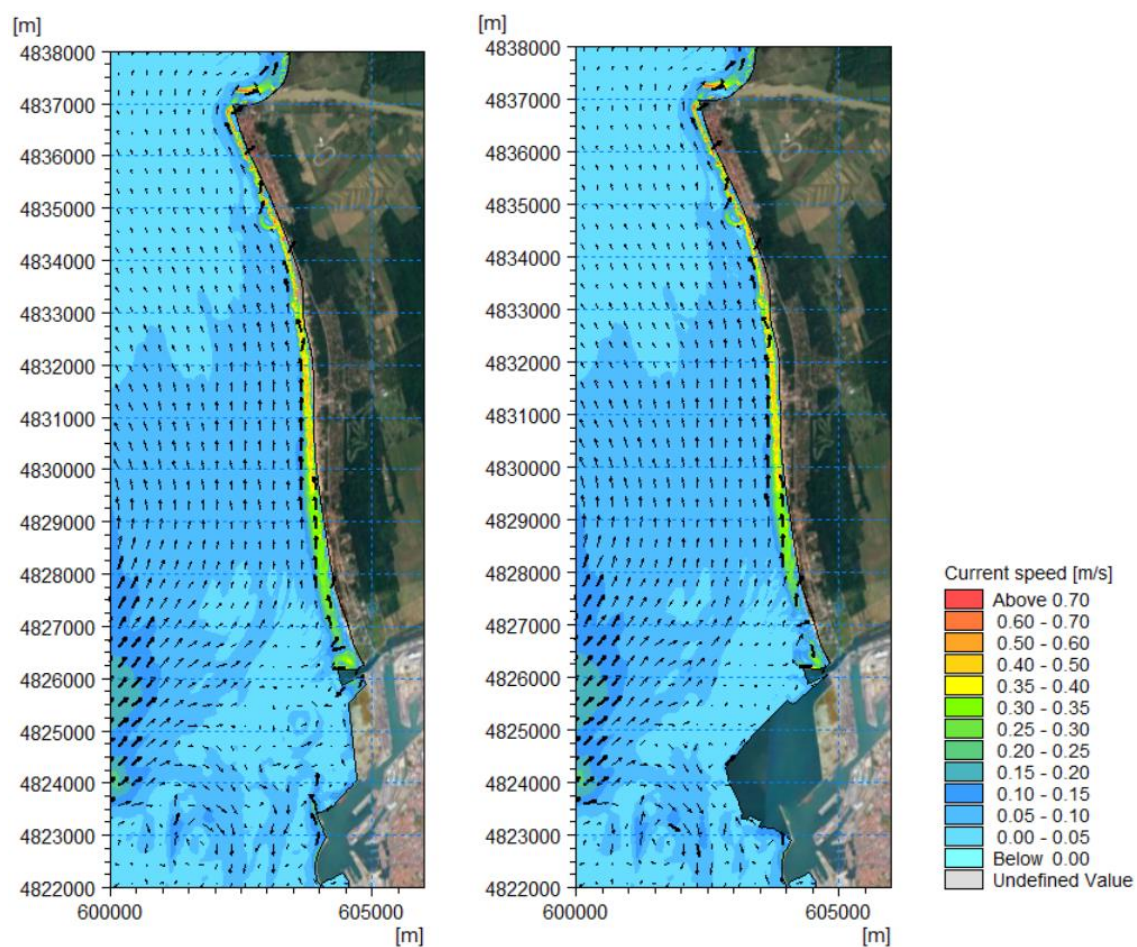


Figura 9-21 Distribuzione della velocità di corrente per la condizione 2, scenario attuale (a sinistra) e scenario di progetto (a destra)

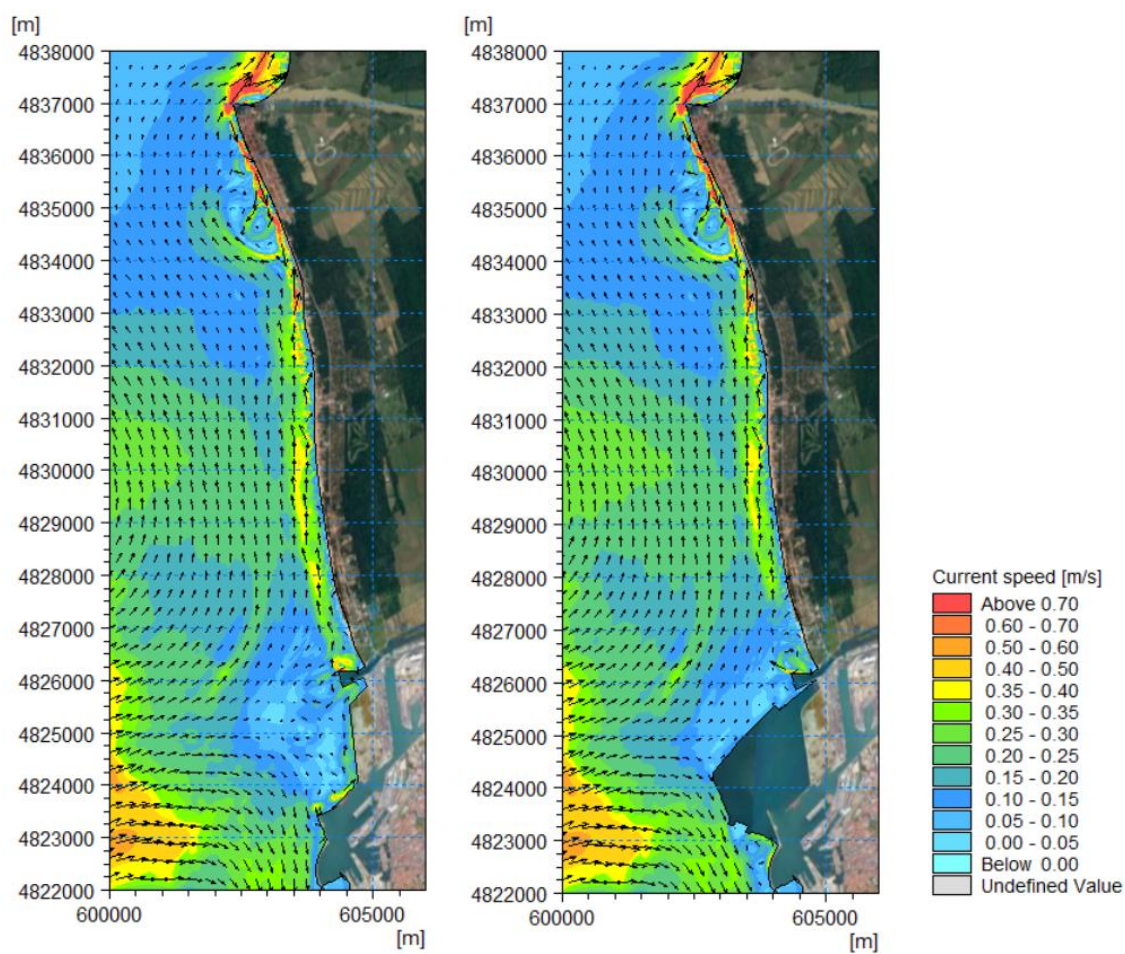


Figura 9-22 Distribuzione della velocità di corrente per la condizione 3, scenario attuale (a sinistra) e scenario di progetto (a destra)

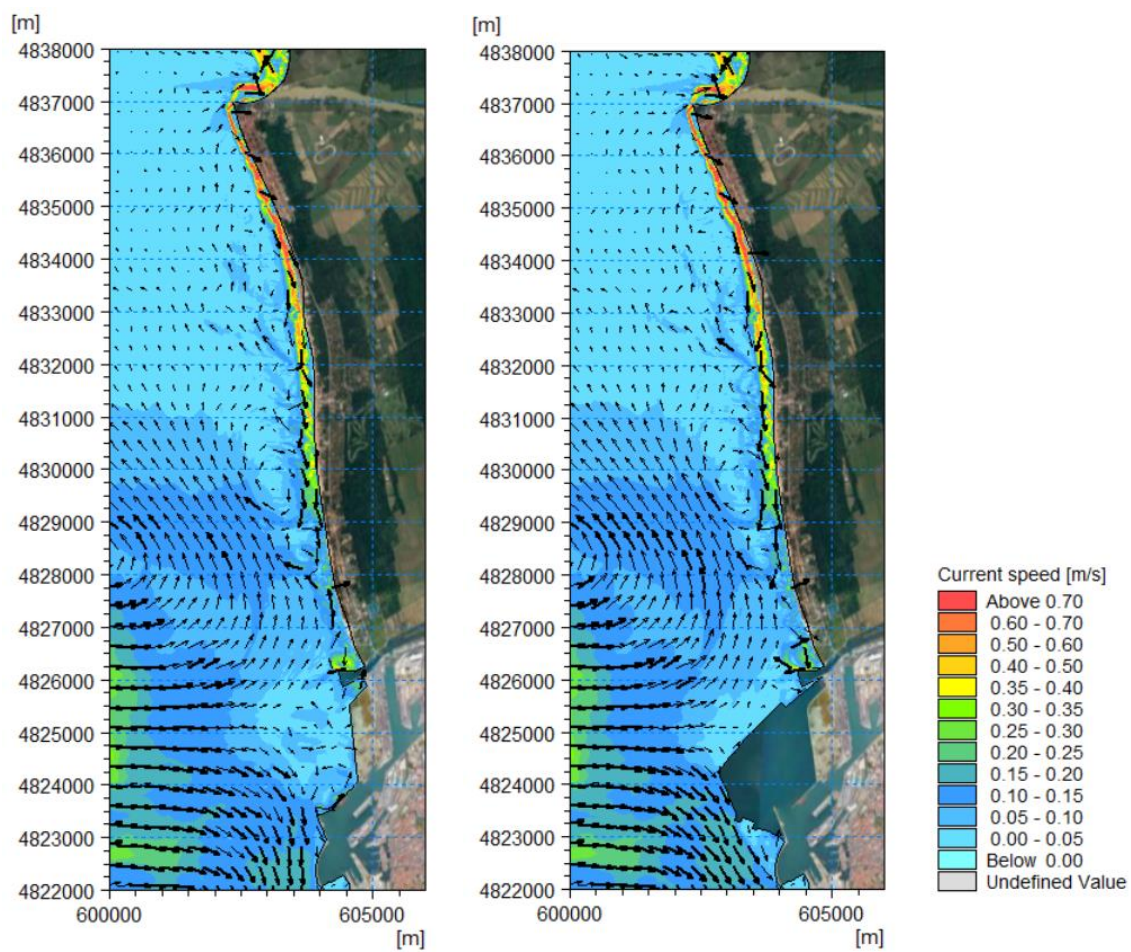


Figura 9-23 Distribuzione della velocità di corrente per la condizione 4, scenario attuale (a sinistra) e scenario di progetto (a destra)

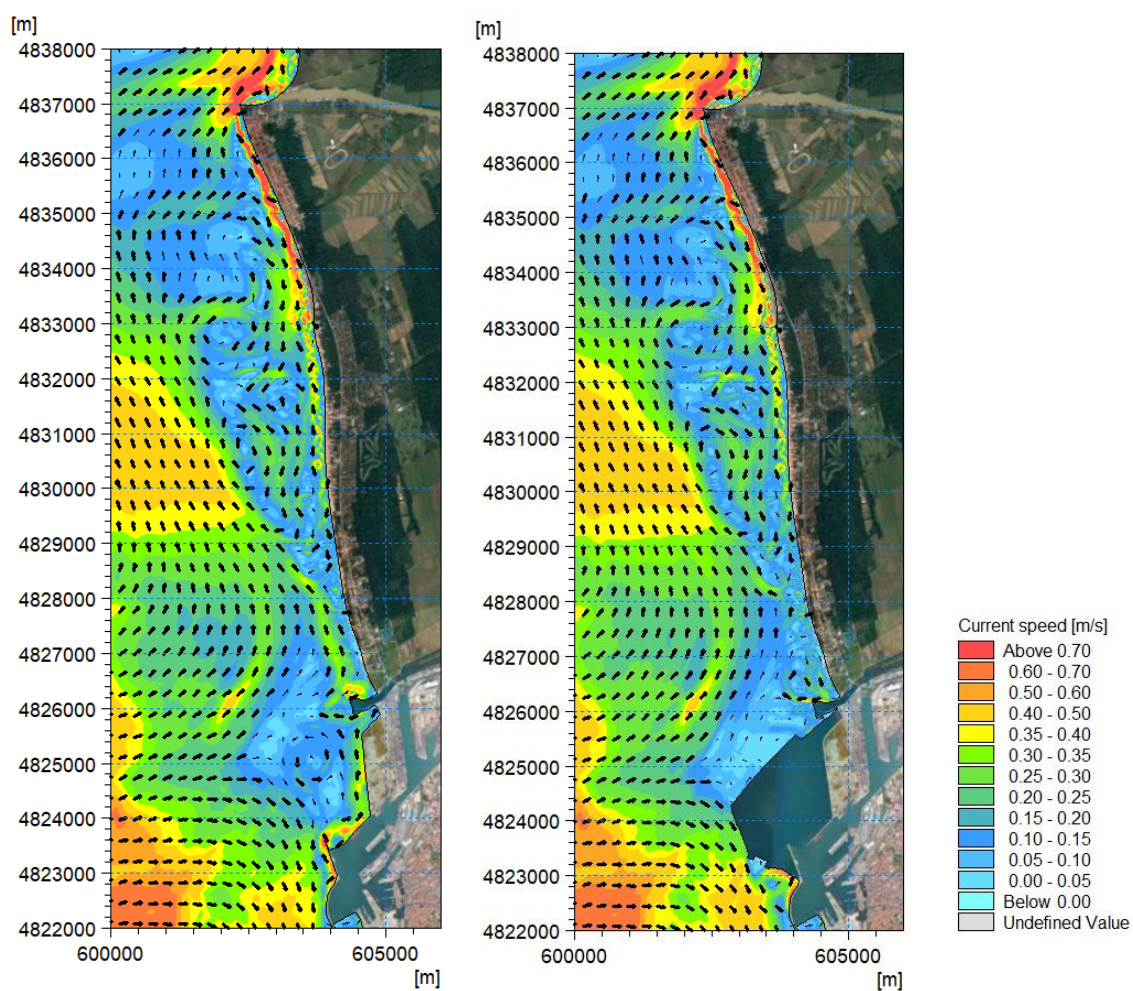


Figura 9-24 Distribuzione della velocità di corrente per la condizione 5, scenario attuale (a sinistra) e scenario di progetto (a destra)

## 10 Sintesi dello studio e conclusioni

Oggetto dello studio sono le attività di analisi e modellazione numerica volte a valutare gli effetti del progetto denominato Darsena Europa sul litorale pisano ed approfondire gli studi modellistici già effettuati nell'ambito di tale progetto. Come riportato in premessa, gli studi condotti nell'ambito del Progetto Preliminare e Definitivo della Piattaforma Europa hanno evidenziato che l'impatto delle nuove opere sul trasporto solido si esaurisce entro una distanza di circa 3000m a nord dello scolmatore. Sebbene la modellazione sia stata effettuata con l'impiego di modelli allo stato dell'arte, essa è stata limitata alle mareggiate con frequenza media di superamento 1 giorno/anno ragione per cui l'impatto stimato è da considerarsi rappresentativo delle condizioni di breve termine.

In questa sede si è pertanto ritenuto necessario effettuare una più accurata verifica di tali impatti anche sul medio-lungo termine tenendo conto il più possibile della dinamica associata alle condizioni tipiche (vale a dire quelle più frequenti) che concorrono al trasporto solido medio annuo, oltre che a quelle estreme e meno frequenti nell'arco dell'anno. Tale verifica è stata effettuata con modelli idrodinamici allo stato dell'arte, applicati ad elevata risoluzione spaziale in modo da riprodurre le condizioni meteomarine costiere che caratterizzano l'arco litoraneo in oggetto, con particolare attenzione al tratto che va da Marina di Pisa fino allo Scolmatore.

Le attività sono state predisposte con l'ausilio della modellistica numerica sviluppata da DHI, con l'obiettivo di simulare e comprendere le dinamiche di stato attuale e valutare le differenze con lo scenario di progetto.

I dati meteomarini al largo utilizzati nello studio fanno riferimento al database di ricostruzione storica MWM (Mediterranean Wind Wave Model) caratterizzato dalla disponibilità di 41 anni di dati orari dei principali parametri di vento e onda dal 1979 al 2019. L'intera serie quarantennale di moto ondoso al largo è stata propagata dal largo verso costa.

L'analisi del clima ondoso a costa in 7 punti (da C1, ubicato in prossimità della foce dello Scolmatore, fino a C7, ubicato in prossimità della foce del fiume Morto) lungo il litorale di interesse ha evidenziato che la realizzazione delle opere in progetto determina una riduzione significativa delle ondate provenienti da Sud-Ovest limitatamente ai punti C1 e C2 (quelli ubicati più a Sud e prossimi alla foce dello scolmatore). Nello specifico il clima ondoso nel punto C1 risulta significativamente influenzato dalla realizzazione della darsena in progetto, con una differenza tra le direzioni della risultante energetica di stato attuale e progetto è pari a circa 5°. Il clima ondoso nel punto C2 risulta leggermente influenzato dalla realizzazione delle opere di progetto, con una differenza tra le direzioni della risultante energetica di stato attuale e progetto è inferiore a 2°. Viceversa, il clima ondoso nei punti C3-C7 non risulta influenzato significativamente dalle opere di progetto in quanto la differenza tra le direzioni della risultante energetica (tra stato attuale e progetto) è pressoché nulla.

L'estrazione dei risultati in corrispondenza del litorale pisano ha inoltre permesso di predisporre l'analisi di base del trasporto litoraneo, finalizzata a stimare le direzioni del trasporto prevalente e quantificare i volumi di sedimenti movimentati mediamente in un anno nella configurazione attuale del litorale. Tale analisi è stata predisposta anche nella configurazione di progetto della Darsena Europa, allo scopo di stimare il potenziale impatto delle future opere sul regime del trasporto solido litoraneo potenziale su un arco temporale pluridecennale. I risultati delle elaborazioni hanno mostrato che in riferimento allo stato attuale, il trasporto netto medio annuo nei punti C1 e C2 risulta diretto verso nord e caratterizzato da volumi pari rispettivamente a circa 8'200 m3/anno e circa 26'200 m3/anno. Viceversa, in riferimento allo scenario di progetto il trasporto netto medio annuo risulta diretto debolmente verso sud (3'500 m3/anno) nel punto C1, mentre risulta diretto verso nord (22'900 m3/anno) nel punto C2.

Ne consegue che la realizzazione delle opere in progetto determina, come atteso, un impatto limitatamente al tratto di costa rappresentato dai transetti C1 e C2, ovvero dalla foce dello scolmatore fino a circa 2Km a nord. Nello specifico, l'effetto di schermatura che le nuove opere in



progetto offriranno al tratto di costa immediatamente a nord potrebbe determinare nel transetto C1 una diminuzione consistente del trasporto proveniente da Sud fino a far prevalere il trasporto solido diretto verso sud con conseguente inversione del trasporto netto. In termini evolutivi, potrebbe determinarsi verosimilmente una rotazione della linea di riva dovuta al progressivo accrescimento dell'arenile nell'area immediatamente adiacente alla foce dello scolmatore, e al suo arretramento invece nella zona compresa tra i transetti C1 e C2. Tale effetto tenderà a ridursi fino ad annullarsi in corrispondenza del transetto C2 dove la differenza stimata in termini di trasporto netto tra stato attuale e progetto risulta quasi trascurabile.

In ultimo, è stato predisposto un modello di dettaglio combinato onde-correnti che ha permesso di valutare con approccio bidimensionale la dinamica costiera del litorale in oggetto. Il modello è stato finalizzato principalmente a fornire i campi d'onda e di corrente in relazione ad alcune condizioni ondose significative per il sito e valutare le differenze tra i due scenari (stato attuale e progetto).

Dal punto di vista del moto ondoso, l'estensione del tratto di costa interessato dalle modifiche di progetto è fortemente influenzato dalla direzione d'attacco dell'onda. In particolare, si può notare che in corrispondenza dell'onda 1, caratterizzata da una direzione di provenienza di  $185^{\circ}\text{N}$ , la nuova darsena determina una riduzione del moto ondoso fino a circa 2Km a nord della foce dello scolmatore. L'estensione del tratto di costa interessato da tali riduzioni diminuisce, come atteso, al variare della direzione d'attacco dell'onda (onde 2 e 3 caratterizzate rispettivamente da direzioni pari a  $215^{\circ}\text{N}$  e  $245^{\circ}\text{N}$ ) fino a quasi annullarsi in corrispondenza dell'onda 4, caratterizzata da una direzione di  $275^{\circ}\text{N}$ .

Dal punto di vista dell'idrodinamica, le differenze tra stato attuale e progetto si concretizzano, come atteso, limitatamente al tratto di costa immediatamente a Nord della foce dello scolmatore e sono dipendenti, anche in questo caso, dalla direzione di attacco delle onde. Nello specifico, in relazione alla condizione ondosa 1, caratterizzata da una direzione di provenienza dell'onda da Sud ( $185^{\circ}\text{N}$ ), si osserva una significativa attenuazione del flusso di corrente, normalmente diretto verso nord, nel tratto di costa che va dalla foce dello scolmatore fino a circa 2Km a Nord. Situazione analoga si verifica per le condizioni ondose 2 e 3 (caratterizzate rispettivamente da direzioni pari a  $215^{\circ}\text{N}$  e  $245^{\circ}\text{N}$ ). Relativamente alla condizione ondosa 4, data la direzione di attacco dell'onda quasi perpendicolare alla linea di costa, si osserva un minore impatto delle opere in progetto sull'idrodinamica locale. In definitiva, analizzando i risultati del modello idrodinamico nello scenario di progetto si osserva, procedendo dalla foce dello scolmatore verso nord, un progressivo aumento dell'intensità di corrente nella direzione del flusso, per quasi tutte le condizioni d'onda simulate. Analizzando i risultati del modello idrodinamico nello scenario di progetto si osserva che nei primi 2 Km a nord dello scolmatore la corrente litoranea è debole o del tutto assente, per quasi tutte le condizioni d'onda simulate. In quest'area la circolazione è caratterizzata dalla formazione di vortici di debole intensità, che in alcuni casi comportano flussi uscenti verso il largo in altri casi flussi prevalentemente diretti verso sud che poi si muovono lungo il pennello di foce diretti verso il largo. Procedendo ancora verso nord, la corrente litoranea si innesca e si sviluppa pienamente con direzione e intensità del tutto analoghe a quelle che si osservano nello scenario attuale. Tale circostanza conferma quanto evidenziato nell'ambito dello studio di base del trasporto litoraneo, ovvero che nel tratto compreso tra la foce dello scolmatore ed il transetto C2 verrà verosimilmente a determinarsi un riequilibrio dell'orientazione della linea di riva con un progressivo arretramento della stessa nel tratto di costa compreso tra C1 e C2.



ALLEGATI



# ALLEGATO A – MWM

## Descrizione Tecnica



## General description of the models' chain

The models and datasets used for the development of the MWM database are:

- the *CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)* global re-analysis dataset, produced and freely published by NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) (Saha et al, 2010; <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>), hourly (re-forecast) data with a space resolution of 0.5°; these data are used as initial (IC) and boundary conditions (BC) of the *WRF-ARW model* (below);
- the atmospheric model *WRF-ARW – version 3.4.1 (Weather Research and Forecast - Advanced Research WRF)*, model developed by NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) (Skamarock and Klemp, 2007; Michalakes et al, 2001; Michalakes et al, 2005); *WRF-ARW* is presently considered among the best state-of-the-art non-hydrostatic meteorological models; it is supported by a massive worldwide community that contributes to its local use and development (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm>; <http://www.wrf-model.org/index.php>);
- the wave model *MIKE 21 Spectral Waves (SW)* developed by DHI (former Danish Hydraulic Institute) (Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004). *MIKE 21 SW* is among the state of the art wave models, widely used in thousands of offshore and coastal applications worldwide.

In the following a description of the *CFSR* dataset, the *WRF-ARW* and the *MIKE 21 SW* model is given, with specific interest to the implementation adopted in MWM.

### CFSR Dataset

The *CFSR* dataset (Fig. A.1) is the result of a long and complex process performed by NCEP, an ensemble of nine weather prediction centers in the United States belonging to the *NWS (National Weather Service)* of the *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)*. The simulation, completed in 2011, is based on a global atmospheric numerical model including atmosphere-ocean and sea-ice couplings, with a systematic ingestion of both conventional (point) and satellite observations with data assimilation procedures.

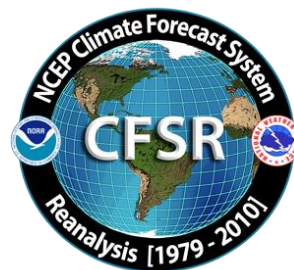


Figure A.1

The *CFSR* now covers a 35-year period from 1979 to 2013 (included) and is continuously updated with new recent data. The simulations were performed as 9 hours forecast simulations, initialized 4 times a day (at 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00) between the 6-hourly re-analysis frames. The

results of these simulations, gathered in the CFSR dataset, consist in complete atmospheric data over ocean and lands with a one hour time resolution and a  $0.5^\circ$  horizontal resolution, while the vertical resolution changes greatly amongst the atmospheric variables, spanning from the single surface value up to values at 64 different isobaric levels.

MWM dataset ingest the 6-hourly CFSR data, specifically the *ds093.0* dataset.

Chawla et al (2013) presented a thorough analysis of the *CFSR* dataset against satellite and oceanic buoys data. The final goal of that study is the use of the  $U_{10}$  wind data from the *CFSR* dataset as the forcing term of *WWIII* to generate wave fields at global scale, without any assimilation of wave data. The analysis of the *CFSR* dataset shown in that paper includes the intrinsic performance of the model in terms of the seasonal and annual variability of the percentiles. A moving average is applied to smooth the altimeter data from the satellites and from the buoys. The normalized percentiles ("...normalized with the wind speeds at corresponding percentiles from the altimeters") computed over the satellite tracks exhibit an oscillatory behavior, never below 0.93 or 0.90 in the Northern and Southern hemisphere respectively. From that analysis, the wind and wave *CFSR* and *WWIII* data compare very well with satellite data in terms of normalized percentiles. The Q-Q plots at selected offshore buoys are generally good or very good, with some unexpected variations from case to case for some buoys close to the coast, with even a contradictory behavior between  $U_{10}$  and  $H_s$  in some locations.

The analysis of the wind field of the *CFSR* dataset is far beyond the scope of the present work but still some checks have been done in specific cases, like the event of November 1999 in Trieste (Italy). The performance of a local area model is directly related to the information contained in the global model used as boundary and initial conditions; Fig. A.2 after Contento et al (2014) shows the wind speed for the case of November 1999 in Trieste (Northern Adriatic Sea - Italy); the red dots are experimental data by NOAA (<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>); the yellow line corresponds to the re-analysis data *CFSR d093.0* (Saha et al, 2010; <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>) interpolated at the same position of the station; the blue dots are related to a fully certified and verified measurement station of the Regional Agency for the Environment Protection (ARPA FVG-OSMER, <http://www.osmer.fvg.it/home.php>) located few meters far from the station used by NOAA (<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>); the cyan line corresponds to the present hindcast dataset (model *WRF-ARW*). It is rather evident that the *CFSR* dataset ingests the experimental data from NOAA but there are some non-negligible discrepancies between the two experimental datasets (private communication with ARPA FVG-OSMER - Regional Agency for the Environment Protection – Friuli Venezia Giulia Region, Italy). In this case the local model *WRF-ARW* is able to develop the local wind field and matches correctly the measurement by ARPA, irrespective of the wrong assimilated data as BC and IC; this, however, cannot be always guaranteed.

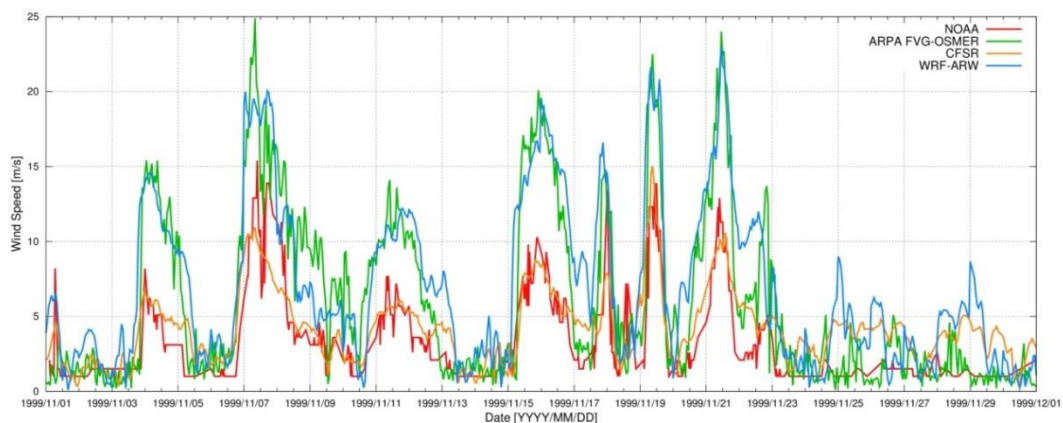


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA



(<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>) (red line) and from ARPA-FVG OSMER (<http://www.osmer.fvg.it/home.php>) (blue line). Model data from CFSR (Saha et al, 2010) (yellow line) and the present simulations with WRF-ARW (cyan line) are overlapped.

The scope of these checks was solely to verify the sensitivity of the CFSR wind pattern to a complex steep geographic area facing the sea. The eastern coast of the Adriatic Sea is just an example among many others. The availability of certified wind data from the local Regional Agency for the Environment Protection – Friuli Venezia Giulia (ARPA FVG-OSMER, <http://www.osmer.fvg.it/home.php>) related to ground stations and to a fixed station in the middle of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea <http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84>), helped a lot in defining the set-up of the local area meteorological model. The aim of the set-up process was to let the model WRF-ARW develop mesoscale and local weather structures, thus using a domain large enough to develop these structures, but at the same time avoiding the use of too large a domain that may lead to a model drift from the experimental data. These undesired effects were observed along the entire Adriatic Sea, specifically on the eastern side (Contento et al, 2011; Contento et al, 2014).

## WRF-ARW meteorological model

The WRF model is an open source mesoscale to microscale atmospheric model developed by the American atmospheric research center NCAR in cooperation with many other meteorological institutions. It is largely used worldwide for both atmospheric research and forecast or hindcast purposes due to its ability to perform atmospheric simulations over a wide range of length scales spanning from less than 1 kilometer to thousands of kilometers. This flexibility is further increased by its capability of performing two way coupled nested runs.

The WRF modelling system includes a pre-processor system (WPS), a data assimilation system (WRF-DA) and the dynamic solver. During this work the ARW dynamic solver, developed and maintained by the Mesoscale and Microscale Meteorology Division of NCAR, has been used. The ARW dynamic core is a fully compressible and non-hydrostatic model, based on a terrain-following hydrostatic pressure vertical coordinate system and on an Arakawa C-grid staggered evaluation of the vector quantities. The solver uses high order time integration and 3-D advection schemes.

The WRF model works internally with NetCDF files, a self-describing and machine-independent data format particularly suitable for the manipulation of long arrays of scientific data.

A WRF-ARW model run is a quite complex process, since it involves several different steps to be run in a precise order. First of all, WRF requires boundary and initial conditions; these conditions can be supplied by the GRIB files obtained from the CFSR dataset files described in CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010.” [Online] Available at <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>

GRIB files needed to cover completely the whole simulated period must be fed to the model to complete the simulation process successfully.

Moreover, since the atmosphere behaviour is strongly dependent on the soil characteristics, detailed data about these characteristics must be fed to the model too in order to let it develop the local weather phenomena correctly. However, there is no need to produce this type of data since suitable 30" resolved geographic data are included in the default WRF pre-processing (WPS). Since these data are time-independent they need to be downloaded only once, and they remain valid for every simulation unlike the GRIB files. Actually, some of the parameters contained in the geographic data cannot be considered as completely time-independent; in fact, some of the parameters show a time dependence which, however, is limited to seasonal changes, e.g. the

reduced vegetation cover in winter. The possible seasonal variability of the geographical parameters is included in the geographical data archive of WPS.

A complete WRF-ARW simulation needs the WPS (*WRF Pre-processor System*) to be run before the numerical solver (*wrf.exe*). The WPS pre-processor system deals with both the domain set-up and the preliminary input manipulations; it is composed by three main executables carrying out different tasks:

- *geogrid.exe* is responsible for the definition of the horizontal grid as well as for the interpolation of the geographic data on the user-defined grid. When performing nested runs, the *geogrid.exe* run produces a NetCDF file *geo\_em.dxx.nc* containing the grid and geographic data for each domain, where *xx* stands for the code of the domain (01, 02, ...).
- *ungrib.exe* is responsible for the decoding of the input GRIB files used as initial and boundary conditions. The GRIB files, which need to be linked to the work directory of WPS by means of the script *link\_grib.csh*, are “ungribbed” and rewritten in an intermediate format suitable for further manipulations, excluding all the fields not needed for the following model run.
- *metgrid.exe* is responsible for the horizontal interpolation of the intermediate input files produced by *ungrib.exe* on the grid defined by *geogrid.exe*. Moreover, the geographic data contained in the *geo\_em* files are ingested by *metgrid* and written on its output files. The output of *metgrid.exe* is in fact composed by the NetCDF files *met\_em.dxx.YYYY-MM-DD\_HH:00:00.nc*, each containing the interpolated boundary conditions and geographic data for the *xx* domain and for every timestep of the supplied GRIB files. In the case considered, as the CFSR dataset is composed of hourly data, the produced *met\_em* files are hourly spaced too.

The whole WPS process is controlled by a single external configuration file: *namelist.wps*, which contains the user specified parameters defining the time length and the domain of the simulation as well as the time and space resolutions.

An additional manipulation is needed before launching the actual solver: the NetCDF data produced by *metgrid.exe* must be vertically interpolated onto the user-defined vertical levels of the WRF simulation. This task is performed by the *real.exe* executable, which, despite actually being a pre-processing routine, is not included in the WPS system. The *real.exe* run finally produces the NetCDF files needed by the bare solver: *wrfinput\_dxx* and *wrfbdy\_dxx*, containing respectively, for each of the nested domains under simulation, the initial condition inclusive of the domain geographic data and the boundary conditions forcing the domain over time.

The last step of a WRF-ARW model simulation is the *wrf.exe* solver run which performs the numerical integration and produces the final output files *wrfout\_dxx\_YYYY-MM-DD\_HH:MN:SS*, one for each simulated domain and for every temporal frame in the total simulated period. Each *wrfout* file contains therefore the complete atmospheric variables set calculated by the ARW solver for every point of the user defined simulation 3-D grid at a single temporal frame.

Both *real.exe* and *wrf.exe* are controlled by *namelist.input*, an external configuration file gathering the user defined parameters regarding the vertical resolution of the simulation, the atmosphere microphysical parameters and, again, the time / length scales and resolutions of the simulation.

A script that makes all steps involved automatic in a WRF-ARW simulation procedure, from the set-up of the configuration files to the archiving of output files, was developed and tested extensively.

The above depicted working scheme is summarized in Figure A.3:

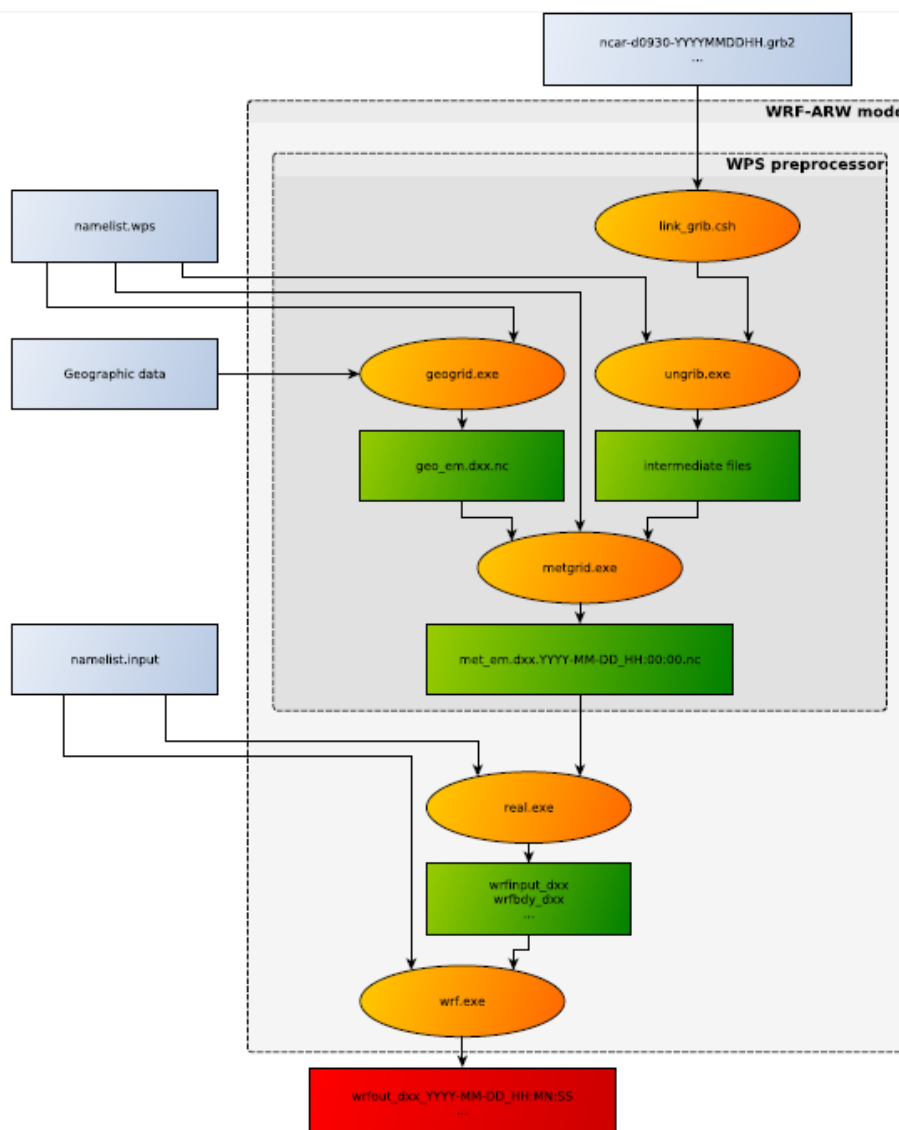


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

### WRF-ARW domains, resolution, set-up in MWM

The preliminary set-up and tuning of the met-ocean models chain was performed simulating the month of November 1999, chosen for the remarkable number of very intense storms occurred over the Mediterranean Sea. The second step, before running the entire period 1979-2013, was done simulating one complete year, from November 1999 to October 2000, relying on 41 ground stations along the Mediterranean coast and 25 wave buoys for comparison. The results obtained in these steps are summarized in Contento et al. (2014), Contento et al. (2012-2014) and Donatini (2013).

The two-steps set-up started with the meteorological model *WRF-ARW*, adopting different configurations (domain size, resolution, run length, spin-up time) and comparing the wind speed and direction with observational data from ground stations. Since the *CFSR* (Saha et al, 2010) re-analysis dataset reproduces large scale events correctly, after several tests the final decision was to adopt three relatively small, overlapping domains, which cover respectively the Western, Eastern and Central Mediterranean Sea (Fig. A.4). Hereafter these domains will be referred as MEW, MEE and MEC respectively. The wind field obtained from the 3 domains was merged in a

single dataset by a bi-linear interpolation on a Lat-Lon grid and by a linear blending of the results inside the two overlapping zones (Fig. A.4).

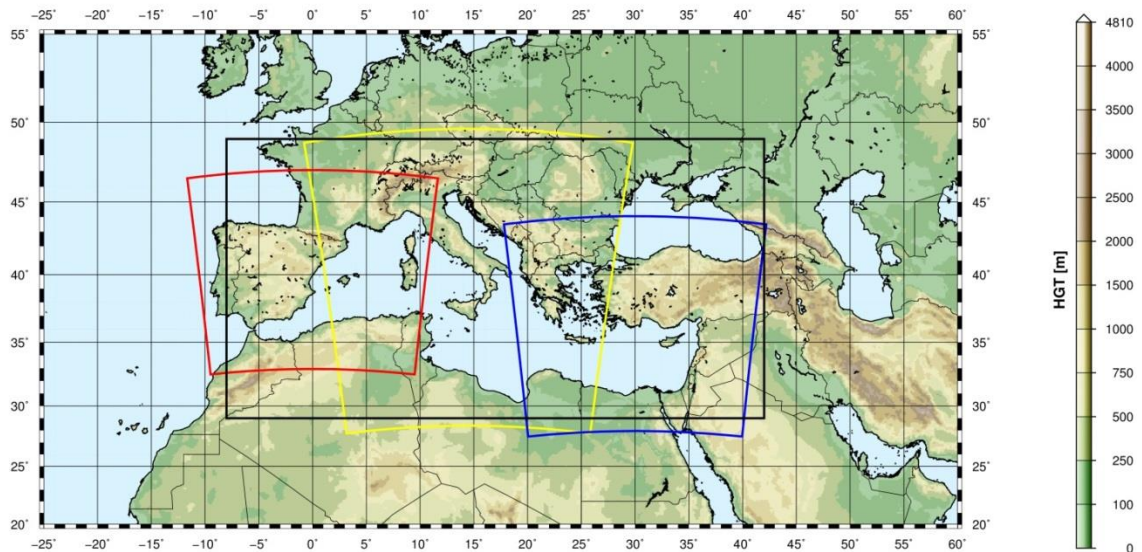


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

The horizontal resolution of *WRF-ARW* was set to 10.53 km, with a grid ratio to the *CFSR* re-analysis data of 1:5 approximately. An additional domain (ITN) with a resolution of 3.51 km was run over Northern Italy as a nested domain of MEC.

The time length of the model run, in terms of hours simulated continuously between two consecutive model initializations with *CFSR* frames, proved to be among the most important parameters that influence the quality of the results. Keeping a small run length reduces the risk of model drift. On the other hand, shortening it excessively may lead to a too constrained behavior of the model, which prevents the correct development of the mesoscale weather structures. The problem of the model drift proved to be particularly tough over the Adriatic Sea where the orography is rather complex and the North-Eastern wind (Bora) can occasionally reach the speed of 150 km/h or more in very narrow zones.

A spin-up time window was used in order to let the model *WRF-ARW* ingest and process the coarser initial conditions from *CFSR*, thus letting it evolve and develop local weather structures. This spin-up window was overlapped with the tail of the previous run so that the data of the simulation during the spin-up window were discarded. The time length of this overlapping window is typically of few hours.

The Mediterranean Sea is a very complex basin from the meteorological point of view, with violent storms usually characterized by a short duration. The two examples given below show the importance of resolving the large space and time gradients of the variables.

Fig. A.5 shows a typical winter wind pattern (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The reference distance of these large variations is of 1° at most.

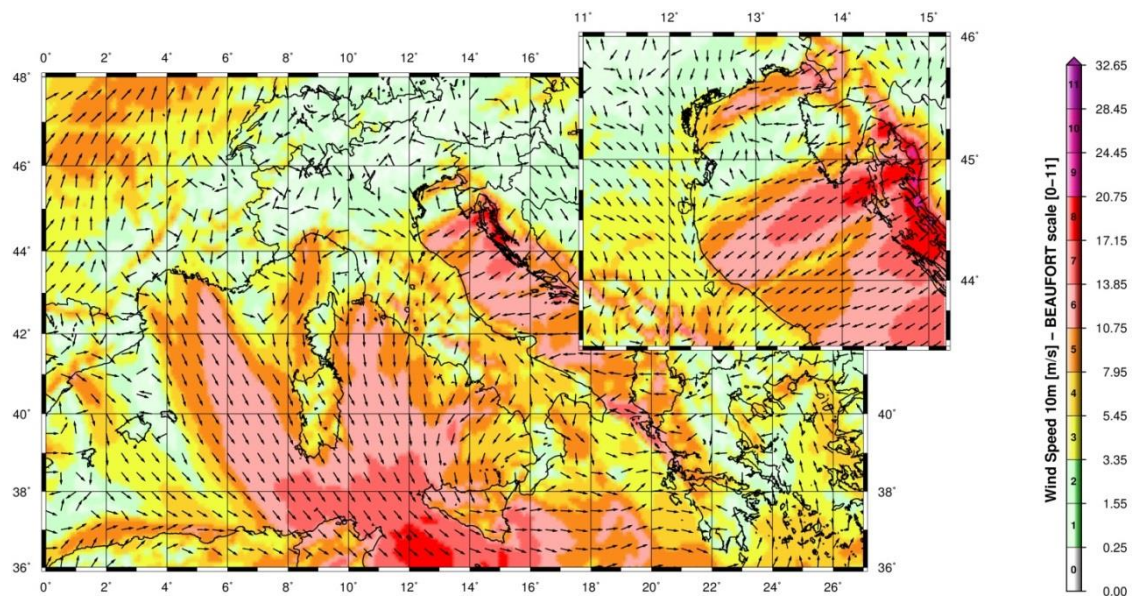


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure shows a zoom over the Northern part of the Adriatic Sea (Istria peninsula).

Fig. A.6 (Contento et al., 2011) shows the time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste that caused the loss of two human lives and damages in the main harbor. The squall lasted about 10 min reaching more than 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW* run at that time by some of the authors of this work for ARPA FVG-OSMER, <http://www.osmer.fvg.it/home.php>. The black line corresponds to the measurement at the station PALOMA (45° 37' 06" N, 13° 33' 55" E) [<http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84>]. The station is a fixed pole in the middle of the Gulf of Trieste. The measured wind speed is 5 min averaged with 5 min samples. The time step of the model is approximately 13 s. This situation is not uncommon in the Adriatic zone, mostly during the summer, with violent fronts from North and North-West then rotating to North-East.

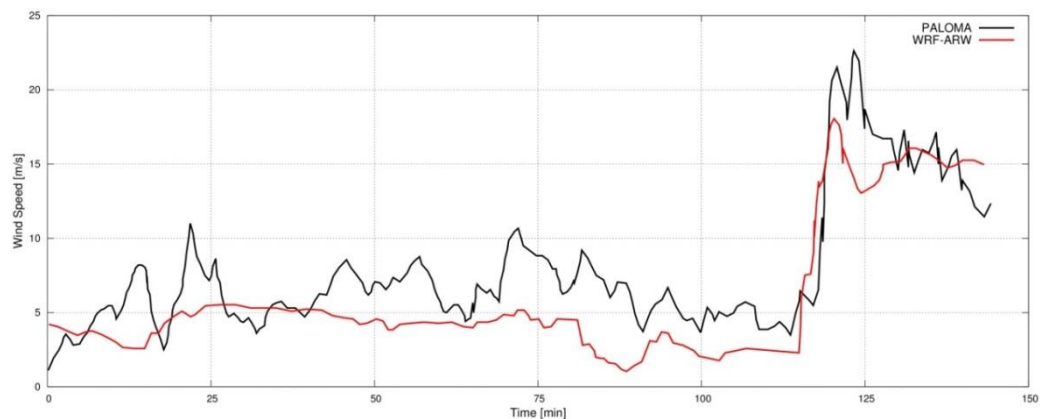


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black line corresponds to the measurements at the measurements station PALOMA (45° 37' 06" N, 13° 33' 55" E) [<http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84>]. The measured wind speed is 5 min averaged with 5 min samples. The time step of the model is approximately 13 s.

## MIKE 21 SW wave model

The wave modeling system includes the state of the art third generation spectral wind-wave model MIKE 21 SW, developed by DHI. MIKE 21 SW simulates the growth, decay and transformation of wind-generated waves and swell in offshore and coastal areas.

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Directional decoupled parametric formulation
- Fully spectral formulation

and includes the following physical phenomena:

- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction
- Dissipation due to depth-induced wave breaking
- Refraction and shoaling due to depth variations
- Wave-current interaction
- Effect of time-varying water depth

The discretization of the governing equation in geographical and spectral space is performed using cell-centered finite volume method. In the geographical domain, an unstructured mesh technique is used. The time integration is performed using a fractional step approach where a multisequence explicit method is applied for the propagation of wave action.

For the production of the MWM database, the fully spectral formulation has been adopted, based on the wave action conservation equation, as described in e.g. Komen et al. and Young where the directional-frequency wave action spectrum is the dependent variable.

The time integration of the governing equations is done by using a dynamically determined time step. The time step is determined in order to verify the stability criteria (CFL number).

The only driving force is represented by the two components of wind fields  $U_{10}$  and  $V_{10}$ , ( $x$  and  $y$  component of wind at the elevation of 10m). The process by which the wind transfers energy into the water body for generating waves is controlled by a uncoupled air-sea interaction.

The spectral discretization adopted in the wave model has been deeply investigated and the final configuration is able to guarantee at the same time a high level of accuracy of the results and a reasonable computational effort.

The model domain covers the whole Mediterranean Sea but the spatial resolution is not the same everywhere: while in the offshore areas the spatial resolution is around  $0.1^\circ$ , when approaching the coast the spatial resolution increases up to around  $0.03^\circ$ .

The wave model is forced by the wind fields coming from the WRF Atmospheric models, illustrated above. The wave model generated results in terms of wave parameters (Significant Wave Height, Wave Periods, Wave Directions, etc.) over the whole domain and, in addition, spectral parameters in predefined output locations have been stored, too.

## MIKE 21 SW domain, resolution, set-up in MWM

The model domain, covering the entire Mediterranean Sea, is illustrated in Figure A.7.

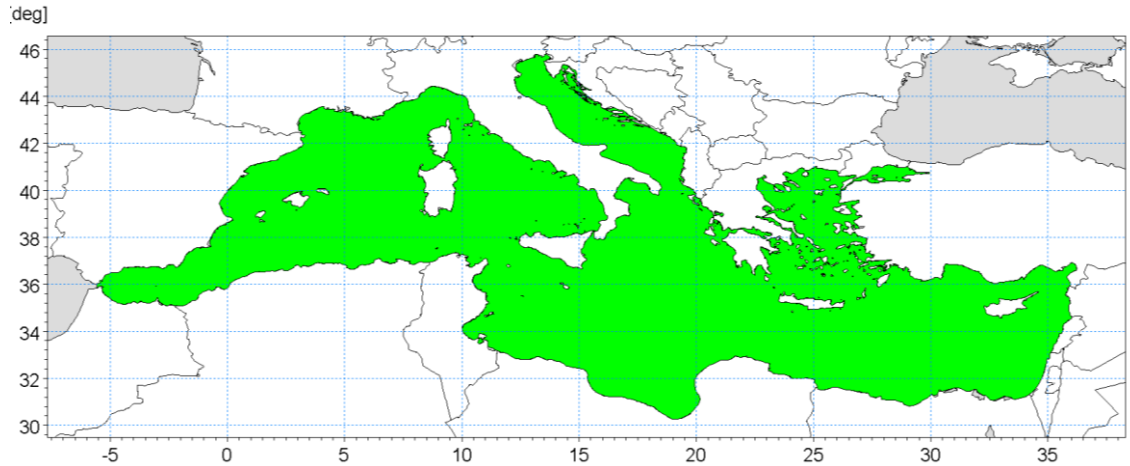


Figure A.7 Wave model domain filled in green

The unstructured mesh, generated over the entire domain by means of a specific tool included in MIKE 21 package, is characterized by different resolutions (in terms of mean length of triangle sides) over the domain. In particular the following criteria have been adopted:

- a coarser resolution of  $0.1^\circ$  (about 10 Km) is used for offshore areas;
- a finer resolution of  $0.03^\circ$  (about 3 Km) has been adopted in shallow water areas, where bathymetry is less than 100m depth or, in coastal areas characterized by very steep profiles, where the distance from the coastline is less than 5÷10 Km.

Figure A.8 illustrates the computational mesh of the Mediterranean wave model.

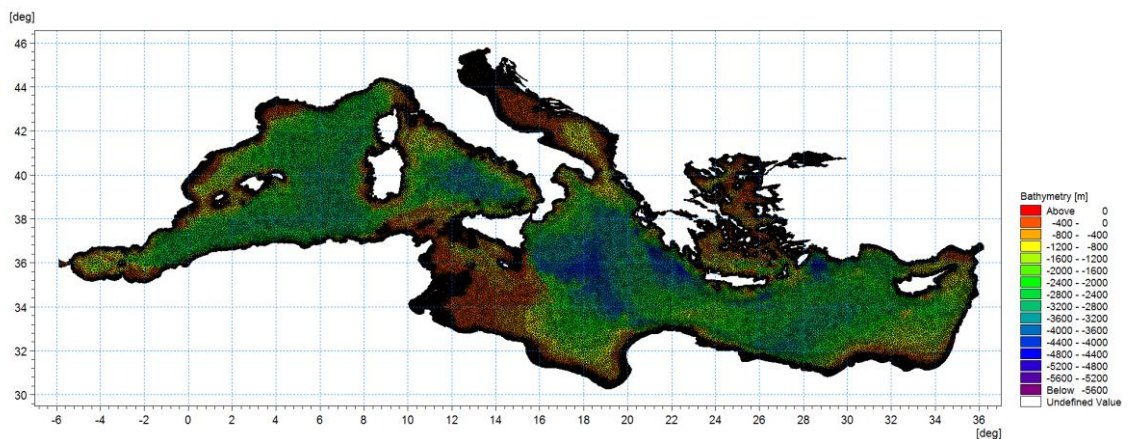


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

Figure A.9 illustrates a detail of the above computational mesh, with special focus on the Adriatic Sea.

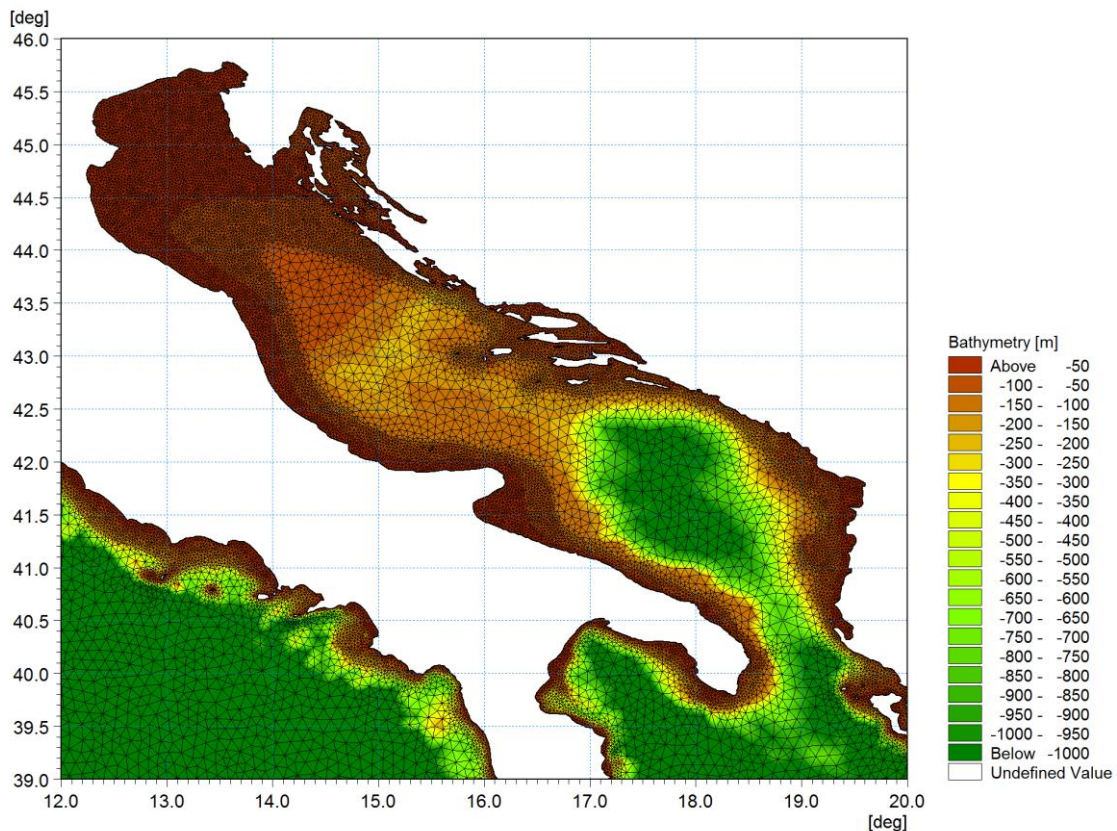


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

Scatter bathymetry data have been derived from GEBCO\_08 database. The GEBCO\_08 Grid is a 30 arc-second grid of global elevations and it is a continuous terrain model for ocean and land. The grid was generated by combining quality-controlled ship depth soundings with interpolation between sounding points guided by satellite-derived gravity data.

The gridded data are stored in a netCDF data file. Grids are stored as one dimensional arrays of 2-byte signed integer values. The complete data sets provide global coverage. Each data set consists of 21,600 rows x 43,200 columns, resulting in a total of 933,120,000 data points. The data start at the Northwest corner of the file, i.e. for the global file, position 89°59'45"N, 179°59'45"W, and are arranged in latitudinal bands of 360 degrees x 120 points/degree = 43,200 values. The data range eastward from 179°59'45"W to 179°59'45"E. Thus, the first band contains 43,200 values for 89°59'45"N, then followed by a band of 43,200 values at 89°59'15"N and so on at 30 arc-second latitude intervals down to 89°59'45"S. Data values are pixel centred registered, they refer to elevations at the centre of grid cells.

Figure A.10 illustrates GEBCO\_08 scatter data for the entire area of the Mediterranean Sea.

GEBCO scatter data have not been used in the whole domain of the Mediterranean Sea. Following a detailed check of agreement and discrepancies between GEBCO database and nautical charts, it has been assumed to limit the use of GEBCO database for offshore areas (up to 500 m water depth) and to use nautical charts for shallower water areas (mainly coastal areas).

The nautical charts database which has been used is the CM93/3 database from CMAP.



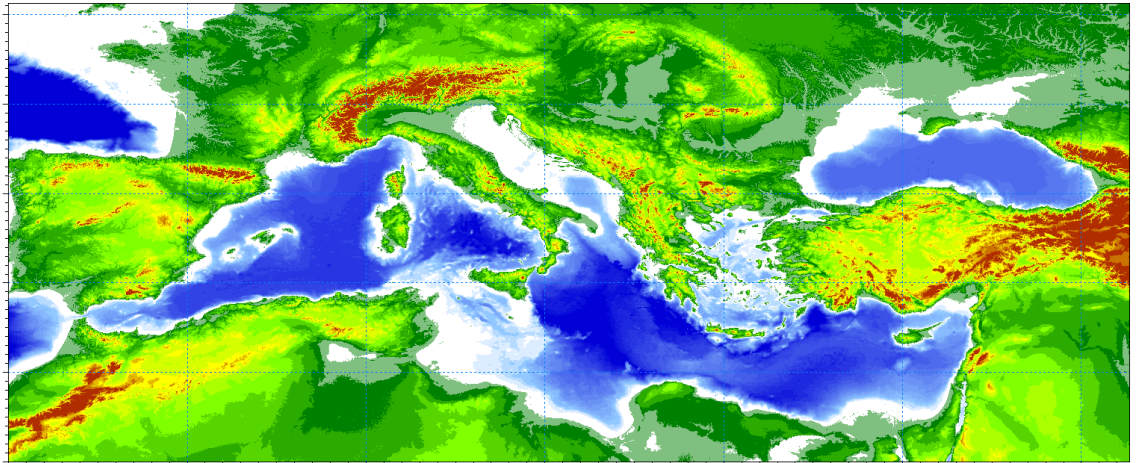


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO\_08 database

The number of discrete frequencies and directions form the so called “spectral resolution”, which is a key parameter for wave models in general. The number of discrete frequencies and directions should in fact be high enough to properly represent the “real shape” of the wave spectrum and, on the other hand, it can’t be too high, since it would lead to unacceptable computational times and memory consumption.

In terms of frequency range, the minimum frequency  $f_{min}$  (which corresponds to the maximum wave period  $T_{max}$ , according to the common relation  $f = \frac{1}{T}$ ) should be able to capture the longest wave periods that can occur in the Mediterranean Sea.

The analysis of ordinary and extreme waves in the Mediterranean Sea (from available data of wave buoys) has highlighted that almost all the wave energy associated to waves in the Mediterranean Sea are associated to wave periods between 1.5 seconds and 20 seconds.

In addition, a logarithmic distribution for the discrete frequencies acts better than a simple linear distribution, since most of the wave periods are concentrated below 8-10 seconds. A number of frequencies around 30 is widely considered as adequate for a proper discretization of wave energy spectra in the Mediterranean Sea. The following formulation has therefore been adopted:

$$f_n = 0.04 \cdot 1.1^n,$$

where n goes from 0 to 29 (30 frequencies in total). The discrete frequencies range from 0.04 Hz to 0.63 Hz (from 1.6s to 25.0s of Mean Wave Period  $T_m$ ).

Also the choice of the number of discrete directions (directional discretization) is the result of detailed investigations and tests. In particular, a high number of wave model tests, each one characterized by a different spectral resolution (directional), i.e. by a different number of discrete directions have been setup and run.

Few examples of the results of the above model tests are illustrated from Figure A.11 to Figure A.13 in terms of short time series of wave heights extracted at 3 different locations where also measurements were available (La Spezia wave buoy, Ponza wave buoy, Cetraro wave buoy).

In all the below test cases, it appears that the two time series of wave height characterized by 24 and 36 discrete directions are almost coincident. Higher discrepancies can be found for a much limited number of discrete directions (12). After a high number of tests, the 24 directions solution has been assumed as a very good compromise between accuracy of results and computational time (the computational time of the wave model is linearly dependent on the number of discrete directions).

Provided that wave directions can vary within the 360° rose, the directional resolution of the wave model is  $360^\circ/24 = 15^\circ$

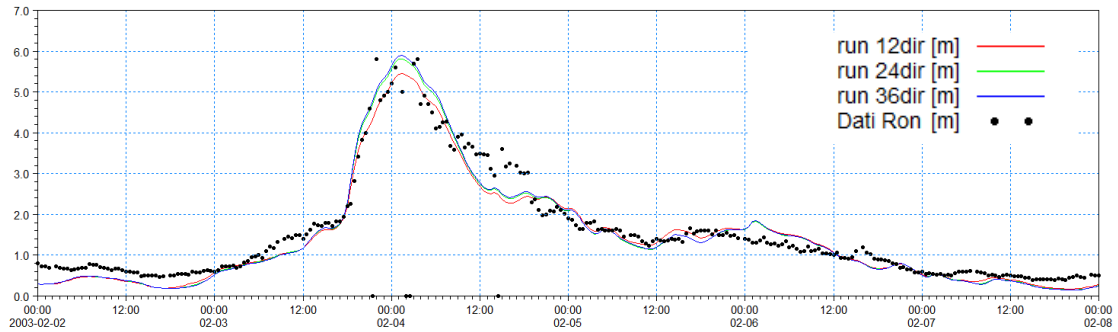


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

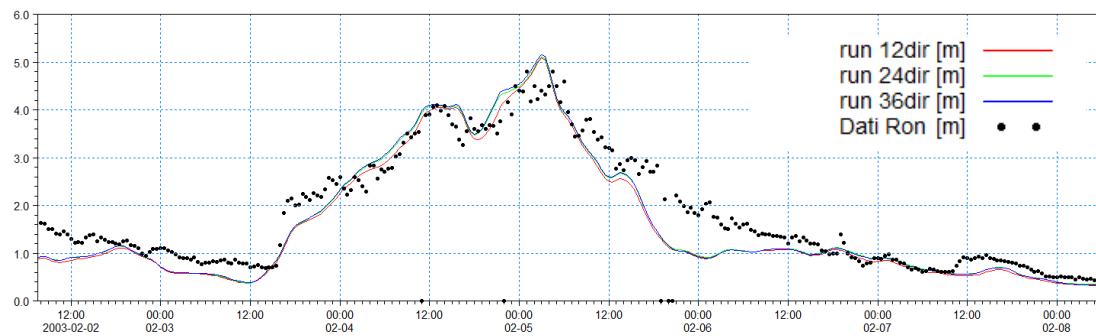


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

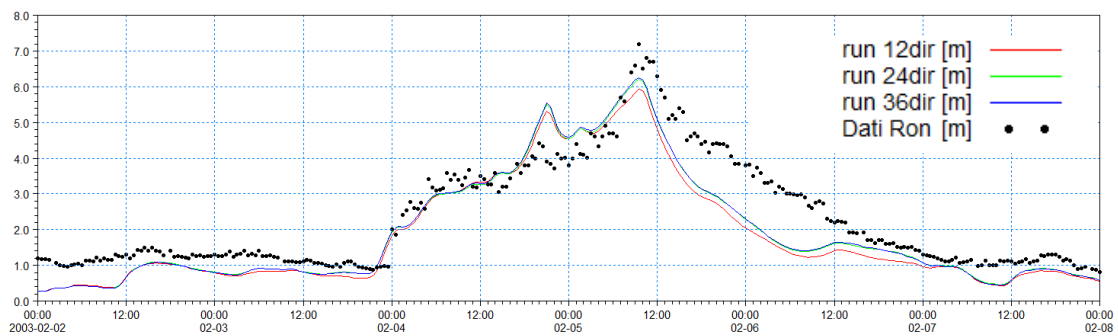


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

## Available products of the MWM database

The results of the wind and wave model are stored, in the whole domain, in terms of wind parameters and wave parameters averaged over the wave period (“phase averaged results”). In particular, the following hourly time series are available:

- Wind speed, WS [m/s]
- Wind direction, WD [deg]
- Significant Wave height, Hs [m]
- Mean wave period, Tm [s]
- Peak wave period, Tp [s]
- Zero crossing period, Tz [s]
- Mean wave direction, MWD [deg]
- Peak wave direction, PWD [deg]
- Directional standard deviation, DSD [deg]

In addition, hourly spectral results (in terms of wave energy associated to the frequency-direction bins) are saved on a regular grid with an equidistant spatial resolution of  $0.1^\circ$ .

Figure A.14 and Figure A-15 illustrate respectively an example of phase averaged results over a portion of Mediterranean Sea (Hs) and an local example of spectral results.

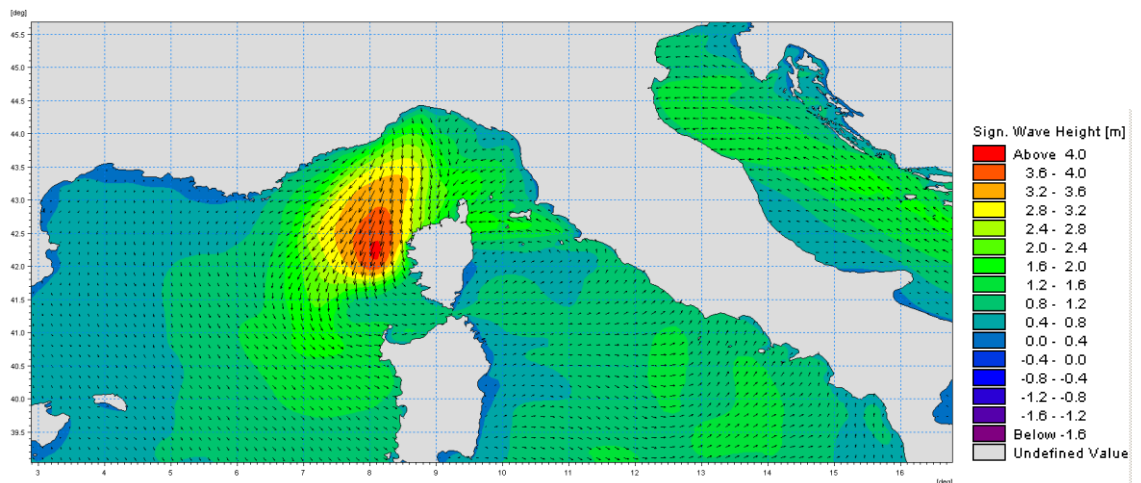


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

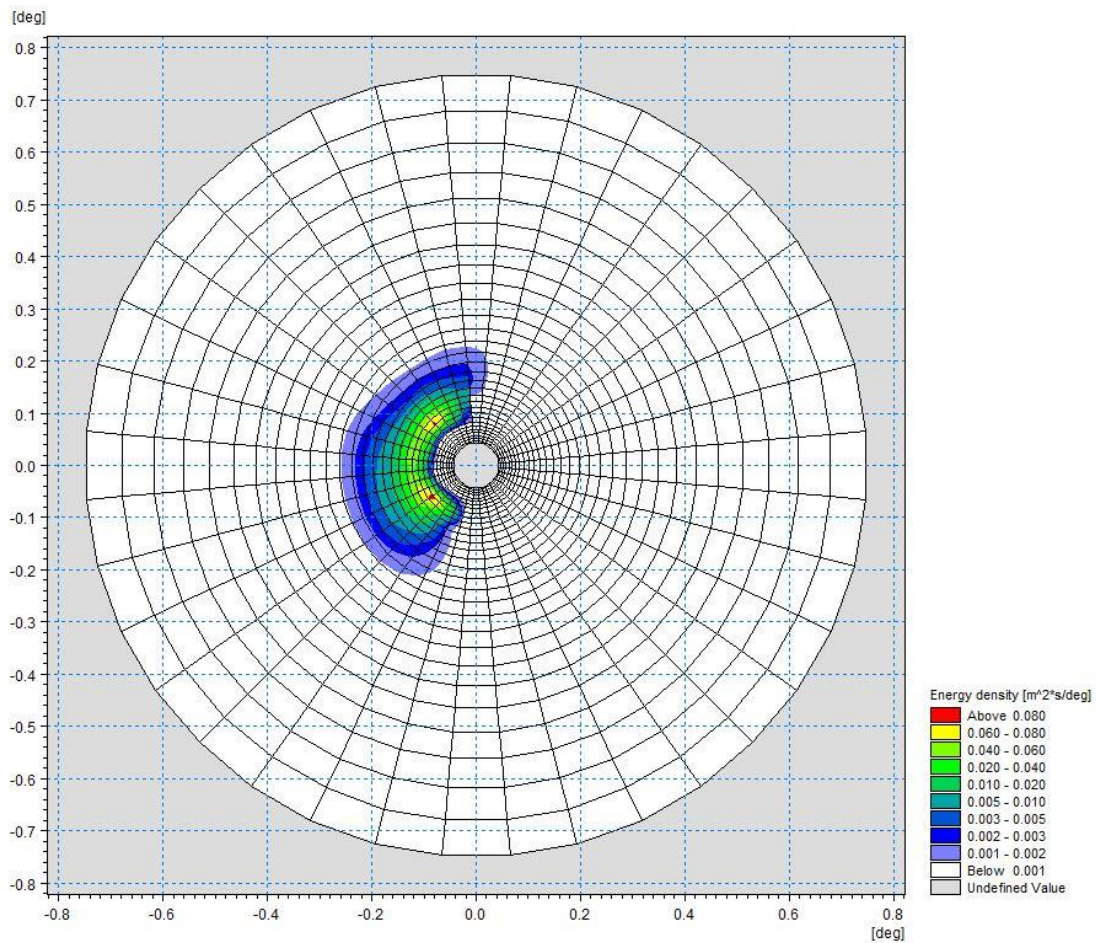


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

## References

Arduin, F., Bertotti, L., Bidlot, J.R., Cavaleri, L., Filipetto, V., Lefevre, J.M., Wittmann, P., 2007, Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 526-541.

Athanassoulis, G., Stefanakos, Ch., Cavaleri, L., Ramieri, E., NoEL, C., Lefevre, J.M., Gaillard, P., 2004, RTP 10.10 / WW\_MEDATLAS Scientific Report.

Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M., 1978, Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings, 16<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.569-587.

Bolaños-Sanchez, R., Sanchez-Arcilla, A., Cateura, J., 2007, Evaluation of two atmospheric models for wind-wave modeling in the NW Mediterranean. *Journal of Marine Systems* 65:336-353.

Cavaleri, L., Bertotti, L., 2004, Accuracy of the modelled wind and wave fields in enclosed seas. *Tellus*, Vol. 56, pp. 167-175.

Cavaleri, L., 2005, The wind and wave atlas of the Mediterranean Sea – the calibration phase. *Advances in Geosciences*, Vol. 2, pp. 255-257.

Cavaleri, L., Sclavo, M., 2006, The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, Vol.53, pp. 613-627.

Chawla, A., Spindler, D.M., Tolman, H.L., 2013, Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds, *Ocean Modelling*, Vol. 70, pp. 189-206.

Contento, G., Lupieri, G., Venturi, M. Ciuffardi, T., 2011, A medium-resolution wave hindcast study over the Central and Western Mediterranean Sea, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 16(2), pp. 181–201.

Contento, G., Lupieri, G., Donatini, L, Feudale, L, Pedroncini, A., Cusati, L.A., 2014, A state-of-the-art met-ocean model chain for wind&wave hindcast over the Mediterranean and Black Seas: implementation, tuning and validation against field data, accepted for presentation at the 21<sup>th</sup> Symposium Theory and Practice of Shipbuilding SORTA 2014, Oct. 2-4, 2014, Baška, Island of Krk, Croatia.

Contento, G., Lupieri, G., Donatini, L, 2012-2014, Project SEAPOL - Sistema modellistico ad Elevata risoluzione per l'Analisi storica e la Previsione del moto Ondoso nel mar Ligure, Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Technical Reports codes SEAPOL\_UT\_1.1.0 to SEAPOL\_UT\_5.1.0.

Donatini, L., 2013, Implementation of a state-of-art met-ocean model chain for hindcast wave simulations over the Mediterranean Sea and comparison of results with field data, Master Degree Thesis, Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Italy.

Donatini, L., Lupieri, G., Contento, G., 2014, A medium resolution wind&wave hindcast study for the Mediterranean Sea, Journal Paper, under review.

Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Krusemann, P., Meerburg, A., Mueller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973, Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe, A(8)*, 12, 95 pp.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.H., Barnett, T.P., 1985. Computations and parametrizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: Parametrizations of the nonlinear energy transfer for applications in wave models. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 15, pp. 1378–1391.

ISPRA (formerly APAT), 2004, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Dipartimento Tutela Acque Marine ed Interne, Servizio difesa delle coste, Analisi preliminare dei dati marini lungo le coste italiane – Atlante delle coste – Il moto ondoso al largo delle coste italiane, Technical Report (in Italian). [http://www.apat.gov.it/site/\\_files/Atlante\\_coste/Introduzione.pdf](http://www.apat.gov.it/site/_files/Atlante_coste/Introduzione.pdf).

Janssen, P.A.E.M., Abdalla, S., Hersbach, H., Bidlot, J.R., 2007: Error Estimation of Buoy, Satellite, and Model Wave Height Data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. **24**, pp. 1665–1677. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH2069.1>

Michalakes, J., Chen, S., Dudhia, J., Hart, L., Klemp, J., Middlecoff, J., Skamarock, W., 2001, Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. *Developments in Teracomputing. In Proceedings of the 9<sup>th</sup> ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. Eds. Walter Zwiefelhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, 269-276.

Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W., Wang, W., 2005, The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance. In *Proceedings of the 11<sup>th</sup> ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. Eds. Walter Zwiefelhofer and George Mozdzyński. World Scientific, 56 - 168.

Ponce del León, S., Guedes Soares, C., 2008, Sensitivity of wave model predictions to wind fields in the Western Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, Vol. 55, pp. 920-929.

Puertos del Estado, Spain, 2009, – ([http://www.puertos.es/oceanografia\\_y\\_meteorologia/](http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/)), private communication.

Queffeuou, P., 2004, Long term validation of wave height measurements from altimeters. *Marine Geodesy*, Vol. 27, 495-510.

Queffeuou, P., Croizé-Fillon, D., 2010, Global altimeter SWH data set, version 7, Technical Report, Ifremer, [ftp://ftp.ifremer.fr/cersat/products/swath/altimeters/waves/documentation/altimeter\\_wave\\_merge\\_\\_7.0.pdf](ftp://ftp.ifremer.fr/cersat/products/swath/altimeters/waves/documentation/altimeter_wave_merge__7.0.pdf)

Queffeuou, P., 2009, Altimeter Wave Height Measurements - Validation of Long Time Series. Poster: Ocean Surface Topography Science Team meeting, Seattle, Washington, USA. (<http://www.avisioceanobs.com/en/courses/ostst/ostst-2009-seattle/posters/>).

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Wollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y., Chuang, H., Juang, H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., VanDelst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R., Rutledge, G., Goldberg, M., 2010, *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 91, 1015–1057.

Skamarock WC, Klemp JB, 2007, A time-split nonhydrostatic atmospheric model for research and NWP applications. *J. Comp. Phys.* Special issue on environmental modeling.

Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004: A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29<sup>th</sup> International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Tolman, H.L., 2002a. Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models. *Ocean Modelling*, Vol. 4, pp. 269–289.

Tolman, H.L., 2002f, Validation of WAVEWATCH III, version 1.15 for a global domain. Tech. Note 213, NOAA/NWS/NCEP/OMB, 33p.

Tolman, H.L., 2008, [http://cioss.coas.oregonstate.edu/CIOSS/workshops/Altimeter\\_workshop\\_08/Coastal\\_Alt\\_Presentations/18\\_Tolman\\_Sig\\_Wave\\_Ht.pdf](http://cioss.coas.oregonstate.edu/CIOSS/workshops/Altimeter_workshop_08/Coastal_Alt_Presentations/18_Tolman_Sig_Wave_Ht.pdf)

Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004: A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29<sup>th</sup> International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Komen, G.J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and Janssen, P.A.E.M., (1984). Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 560 pp.

Young, I.R., (1999). Wind generated ocean waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.

WAMDI-group: S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing, (1988) "The WAM model – a third generation ocean wave prediction model", *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810

General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) – [www.gebco.net](http://www.gebco.net)

CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - [www.jeppesen.com/marine/commercial/professional/](http://www.jeppesen.com/marine/commercial/professional/)

Ole Baltazar Andersen (1995), Global ocean tides from ERS 1 and TOPEX/POSEIDON altimetry, J. of Geophys. Res., 100, C12, p. 25249-25260

Doodson, A. T., Warburg, H. D., 1941 "Admiralty manual of tides"

## Web references

ARPA-FVG OSMER, [Online] <http://www.osmer.fvg.it/home.php>

ARW Online Tutorial." [Online] Available at <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm>

CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010." [Online] Available at <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>

NOAA, Hourly/Sub-Hourly Observational Data." [Online] Available at <http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>

The Weather Research&Forecasting Model Website." [Online] Available at <http://www.wrf-model.org/index.php>





**ALLEGATO B**  
**MIKE 21 Spectral Waves (SW)**  
**Descrizione Tecnica**



## MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi,  
aree costiere ed offshore



## INDICE

1	PREMESSA .....	1
2	MODULO D'ONDA (SW).....	4

## 1 PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice, indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto e in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero, può essere anche applicato per la simulazione di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi. I principali campi di applicazione sono:

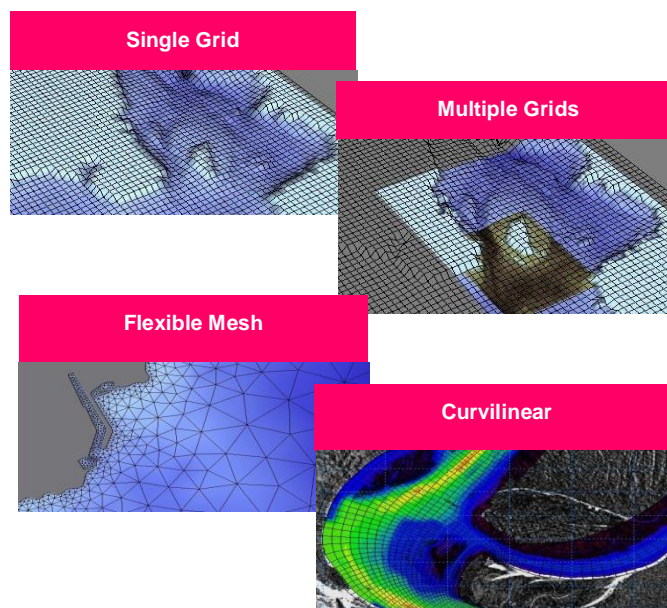
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- **SINGLE GRID** (Griglia singola): le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- **MULTIPLE GRID** (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- **FLEXIBLE MESH** (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- **CURVILINEAR** (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.



In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

<b>Breve descrizione dei moduli MIKE 21</b>	
<b>Modulo</b>	<b>Descrizione</b>
<b>PP (Pre and Post Processing)</b>	Il modulo PP è l'ambiente di lavoro di base e fornisce un insieme di tool per l'importazione e processamento dei dati di input nonché l'elaborazione degli output e la preparazione di immagini ed animazioni. PP è necessario per tutti i moduli di MIKE 21.
<b>HD (Hydrodynamics)</b>	Il modulo idrodinamico simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. HD consente la simulazione di un'ampia gamma di fenomeni idraulici anche in presenza di strutture complesse.
<b>AD (Advection – Dispersion)</b>	Il modulo simula trasporto, dispersione e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. Può essere utilizzato per studi di dispersione di soluti non reagenti o caratterizzati da decadimento lineare o eccesso di temperatura o salinità.
<b>ST (Sand Transport)</b>	E' il modulo avanzato per il trasporto solido di materiale non coesivo generato da correnti o dall'azione combinata di onde e correnti. ST include svariate formulazioni di trasporto e può essere utilizzato indistintamente in campo marittimo-costiero o fluviale.
<b>MT (Mud Transport)</b>	Modulo multifrazione e multistrato in grado di descrivere l'erosione, il trasporto e la rideposizione di materiale coesivo e di sedimenti misti coesivi e non. Particolarmente adatto per studi di dispersione di sedimento conseguenti a dragaggi dei fondali.
<b>SM (Shoreline Morphology)</b>	Questo modulo combina la modellistica di dettaglio 2D per onde e correnti in un modello morfologico, consentendo di simulare in modo stabile e robusto l'evoluzione della linea di riva in ambiente 2D.
<b>OS (Oil Spill)</b>	Simula la dispersione ed il trasporto di sostanze oleose in corpi idrici, considerandone i processi di trasformazione e decadimento.
<b>PA/PT (Particle Tracking)</b>	Simula il trasporto e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. E' utilizzato in particolare per analisi di rischio, versamenti accidentali e monitoraggio delle attività di dragaggio. Utilizza un approccio Lagrangiano.
<b>SW (Spectral Waves)</b>	Modulo di propagazione spettrale di onde <i>sea</i> ed onde <i>swell</i> in aree offshore e costiere. Permette di simulare rifrazione, diffrazione, shoaling, attrito con il fondo, frangimento, riflessione semplice utilizzando un approccio con maglia FM. E' il modulo d'onda oggi più utilizzato per applicazioni costiere e offshore.
<b>BW (Boussinesq Wave)</b>	E' il modulo d'onda più completo, in grado di simulare anche gli effetti di riflessione in ogni direzione e di diverso ordine; per questo viene utilizzato per le analisi di agitazione ondosa all'interno di bacini portuali. Include i fenomeni idrodinamici ed utilizza una maglia quadrata.
<b>MA (Mooring Analysis)</b>	Questo modulo consente di calcolare le tensioni delle linee di ormeggio insieme con i movimenti che la nave ormeggiata può avere nei suoi 6 gradi di libertà (surge, sway, heave, roll, pitch e yaw), in relazione a diverse tipologie di forzanti: onda, vento e corrente.
<b>ECOLab (Ecological Modelling)</b>	Modulo avanzato per lo studio della qualità delle acque ed idro - ecologia in presenza di reazioni, decadimenti complessi, eutrofizzazione e trasporto di metalli pesanti.
<b>ABMLab</b>	Modulo avanzato per modellizzazione "agent based".

## 2 MODULO D'ONDA (SW)

MIKE 21 SW rappresenta lo stato dell'arte tra i modelli numerici spettrali di nuova generazione per vento ed onde sviluppato da DHI. Il codice di calcolo simula la crescita, la trasformazione e la dissipazione di onde corte e onde lunghe in aree costiere e offshore.

MIKE 21 SW comprende due differenti formulazioni:

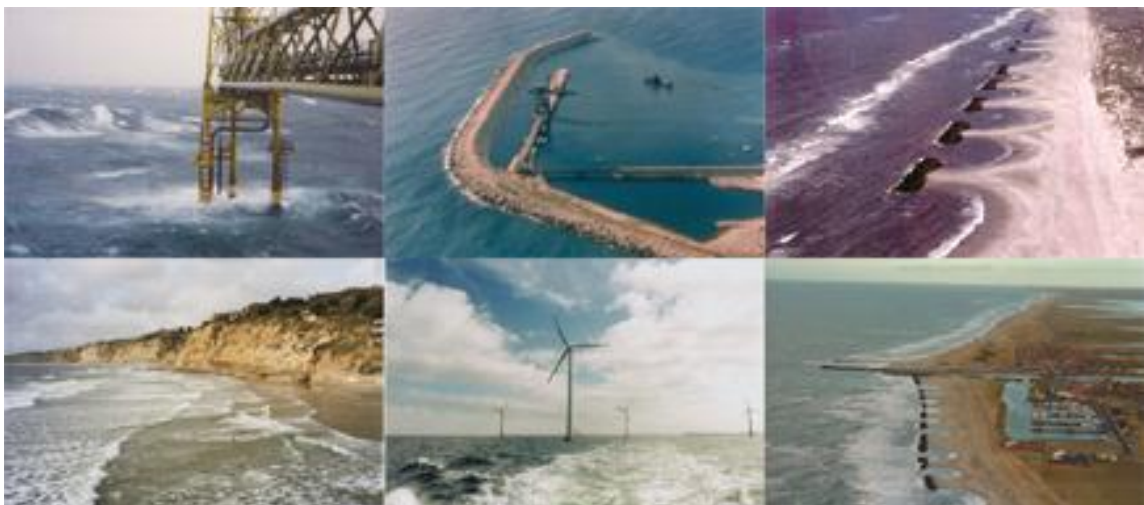
- fully spectral formulation;
- directional decoupled parametric formulation.

La prima è basata sulla “wave action conservation equation” sviluppata da Komen et al. (1994) e Young (1999). La seconda, è basata su una parametrizzazione della “wave action conservation equation” introdotta nel dominio delle frequenze. Le equazioni di base sono formulate sia nelle coordinate cartesiane, per domini di calcolo a scala limitata, sia nelle coordinate polari per applicazioni a larga scala. La discretizzazione spaziale delle equazioni di base è effettuata utilizzando l'approccio ai volumi finiti, attraverso l'utilizzo di una mesh di calcolo non strutturata.

Il modello, nella formulazione “fully spectral”, include i seguenti fenomeni fisici:

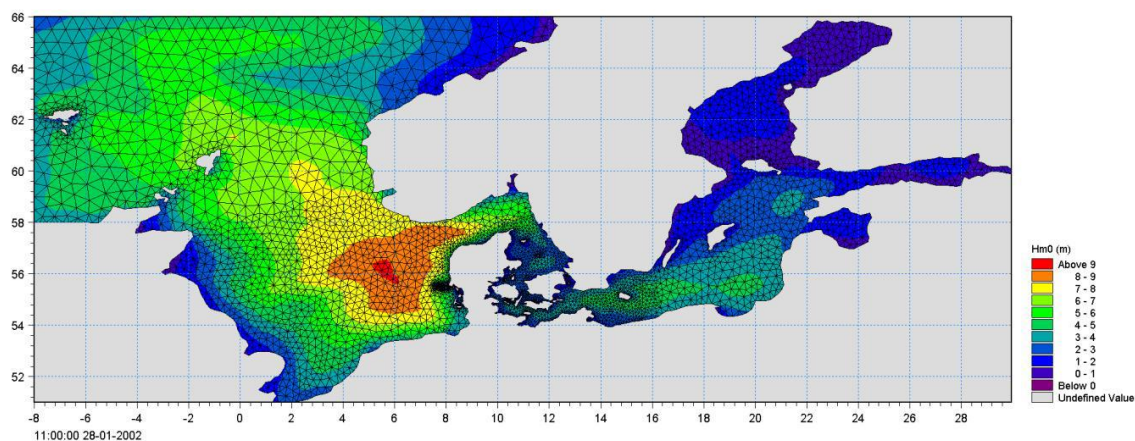
- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra onde;
- dissipazione dovuta al white capping;
- dissipazione dovuta all'attrito col fondo;
- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche;
- effetto delle variazioni del fondale;
- diffrazione;
- riflessione semplice;

MIKE 21 SW è utilizzato per la valutazione del clima ondoso off-shore ed in aree costiere, per scopi previsionali e analisi storiche. Una tipica applicazione di SW è il supporto alla progettazione di un'opera costiera o portuale, partendo dalla disponibilità di dati meteo marini off-shore (boe ondometriche o modelli a larga scala) individuando il clima ondoso ordinario sotto costa o le condizioni estreme di progetto.





MIKE 21 SW è inoltre utilizzato, sempre a supporto della progettazione di un'opera costiera, come strumento di base del calcolo sia delle correnti sia del trasporto solido litoraneo indotti dall'azione del moto ondoso. I campi di corrente e di trasporto sono infatti determinati, a partire dai campi di radiation stress forniti in output da MIKE 21 SW, mediante l'utilizzo di altri moduli del pacchetto MIKE21.



## EQUAZIONI DEL MODELLO

### Fully spectral formulation

L'equazione alla base di MIKE 21 SW è la "wave action balance equation", sviluppata in coordinate cartesiane e sferiche. Tale equazione, in coordinate cartesiane, è indicata di seguito:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma}$$

dove  $N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$  è la "density action",  $t$  è il tempo,  $\bar{x} = (x, y)$  rappresenta le coordinate cartesiane,  $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$  è la velocità di propagazione di gruppo delle onde in quattro dimensioni  $(x, y, \theta, \sigma)$ .  $S$  è il termine di generazione di energia. Le celerità dell'onda sono date dalle equazioni della cinematica lineare:

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{c}_g + \bar{U} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} + \bar{U}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla_{\bar{x}} d \right) - c_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial s}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right)$$

dove  $s$  ed  $m$  sono le coordinate spaziali rispettivamente parallele e perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda  $\theta$ ,  $d$  è la profondità,  $\bar{k}$  è il vettore del numero di onde di magnitudo  $k$ ,  $\bar{U}$  è il vettore di velocità di corrente.

Il termine di generazione,  $S$ , a secondo membro della “wave action balance equation” è dato da:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

Dove  $S_{in}$  rappresenta il trasferimento di quantità di moto dovuta al vento,  $S_{nl}$  il contributo dovuto all'interazione non lineare tra onde,  $S_{ds}$  la dissipazione dovuta al white capping,  $S_{bot}$  la dissipazione dovuta all'attrito col fondo e  $S_{surf}$  la dissipazione dovuta al frangimento.

Il contributo del vento è basato sulla quasi-linear theory of wind-wave generation (Janssen's 1989, 1991), dove la quantità di moto trasferita dal vento alla superficie libera non dipende solo dalle tensioni del vento ma anche dallo stato di mare stesso. Il contributo legato all'interazione non lineare tra onde è approssimato mediante l'approccio DIA (Hasselmann et al. 1985). Il termine di generazione relativo alla dissipazione da white capping è basato sulla teoria di Hasselmann (1974) e Janssen (1989). La dissipazione dovuta all'attrito col fondo è modellata usando l'approccio di Johnson e Kofoed-Hansen (2000), che dipende dal moto ondoso e dalle caratteristiche dei sedimenti. Il frangimento è basato sull'approccio di Battjes e Janssen (1978) e Eldeberky e Battjes (1996).

#### Directional decupled parametric formulation

Questa formulazione del modello è basata su una parametrizzazione della “wave action balance equation” (Holthuisen 1989) nel dominio delle frequenze introducendo come variabile dipendente il momento di ordine zero e di ordine uno. Le equazioni quindi diventano le seguenti:

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta} = T_0$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta} = T_1$$

dove  $m_0(x, y, \theta)$  e  $m_1(x, y, \theta)$  sono rispettivamente i momenti di ordine zero e ordine uno della “action spectrum”  $N(x, y, \sigma, \theta)$ .  $T_0(x, y, \theta)$  e  $T_1(x, y, \theta)$  sono i termini di generazione basati sulla action spectrum. I momenti  $m_n(x, y, \theta)$  sono definiti dall'equazione:

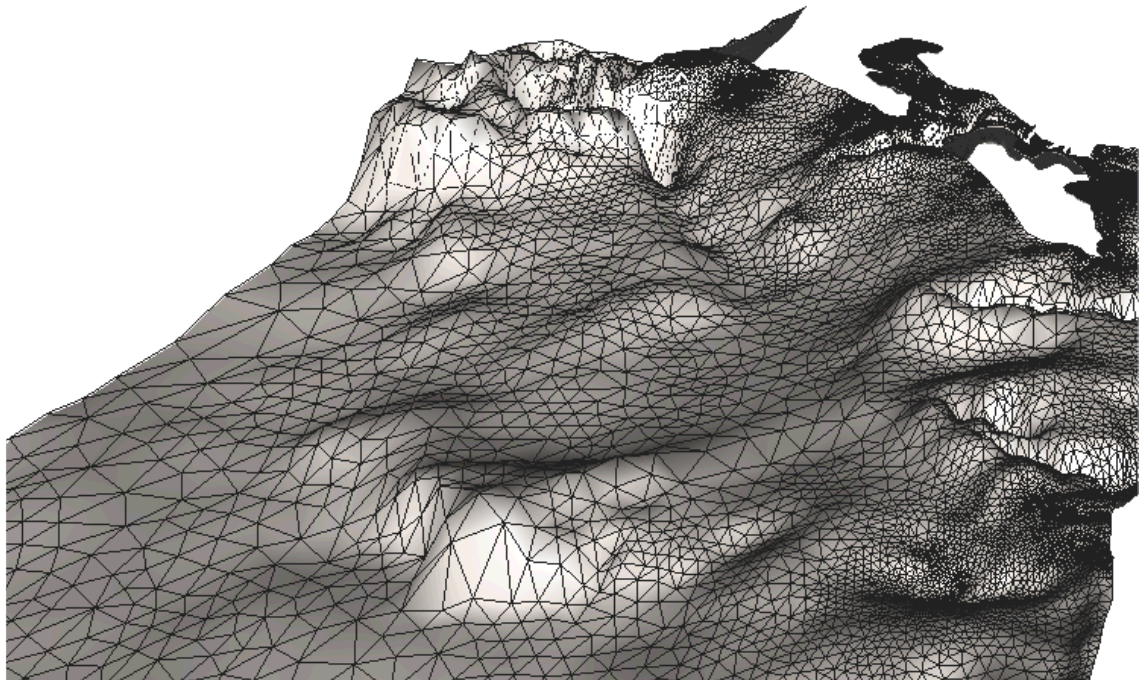
$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega$$

I termini di generazione  $T_0$  e  $T_1$  tengono conto dell'effetto del vento (solo per la modalità stazionaria) attraverso una relazione empirica (Johnson 1998) della dissipazione di energia dovuta all'attrito col fondo e al frangimento, e dell'effetto di interazione onde-correnti.

## TECNICHE DI SOLUZIONE

La discretizzazione spaziale e spettrale è effettuata utilizzando un metodo ai volumi finiti con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il dominio delle frequenze può essere discretizzato sia in maniera lineare che logaritmica.

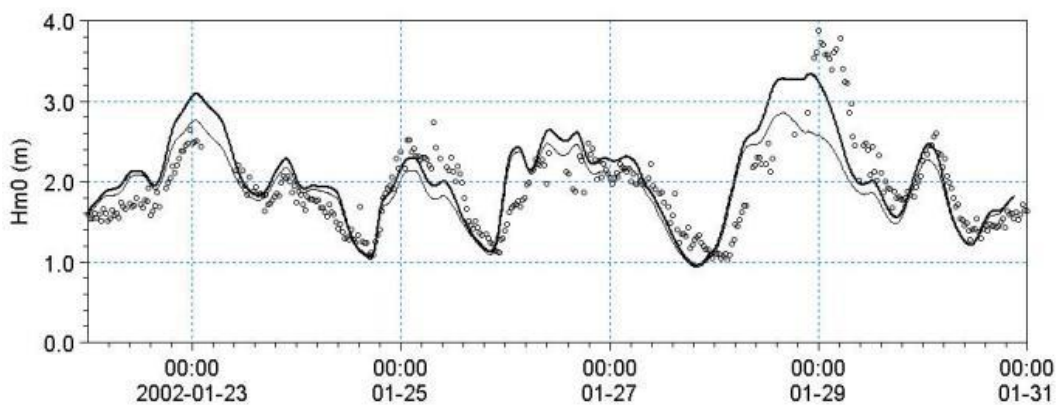
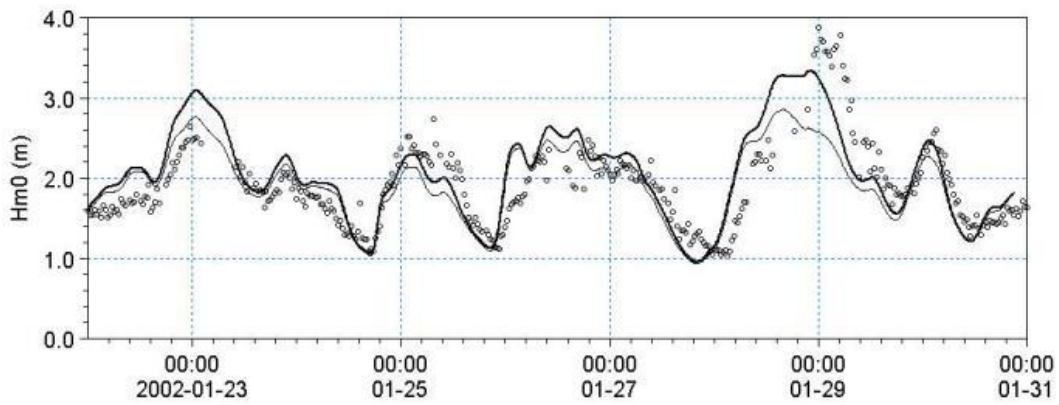
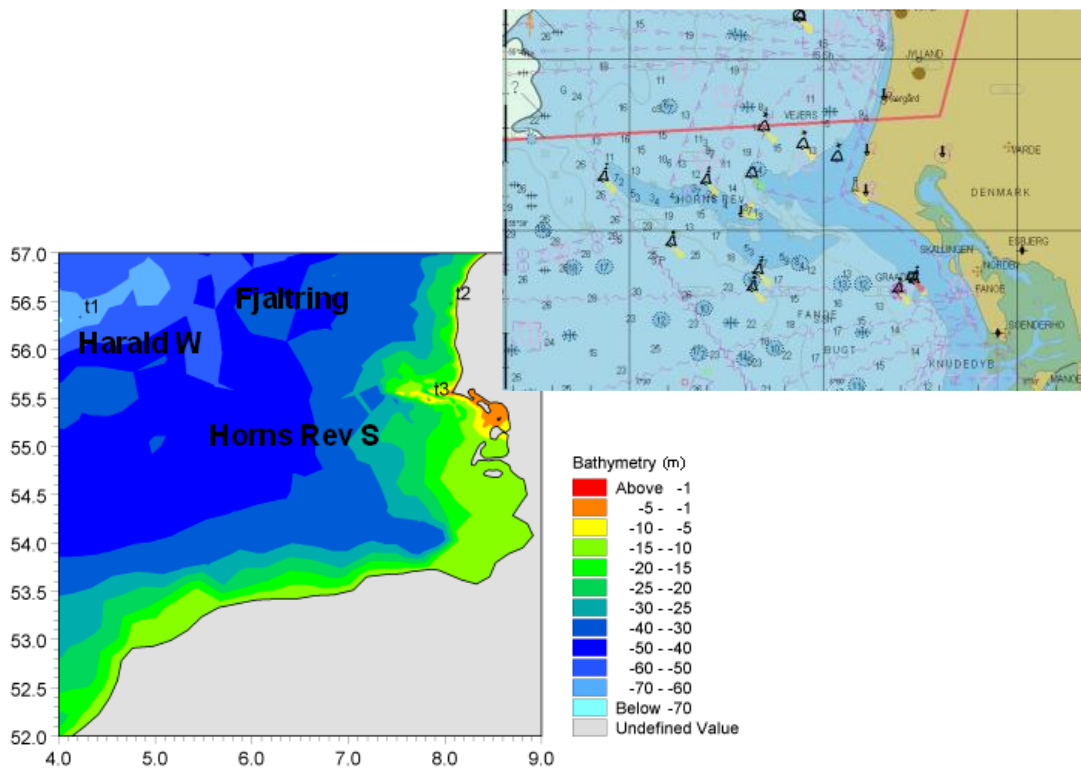
La discretizzazione nel dominio temporale è fatta mediante time-steps, la propagazione della "wave action" è fatta attraverso un metodo esplicito in multi frequenza.



## INPUT AL MODELLO

I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

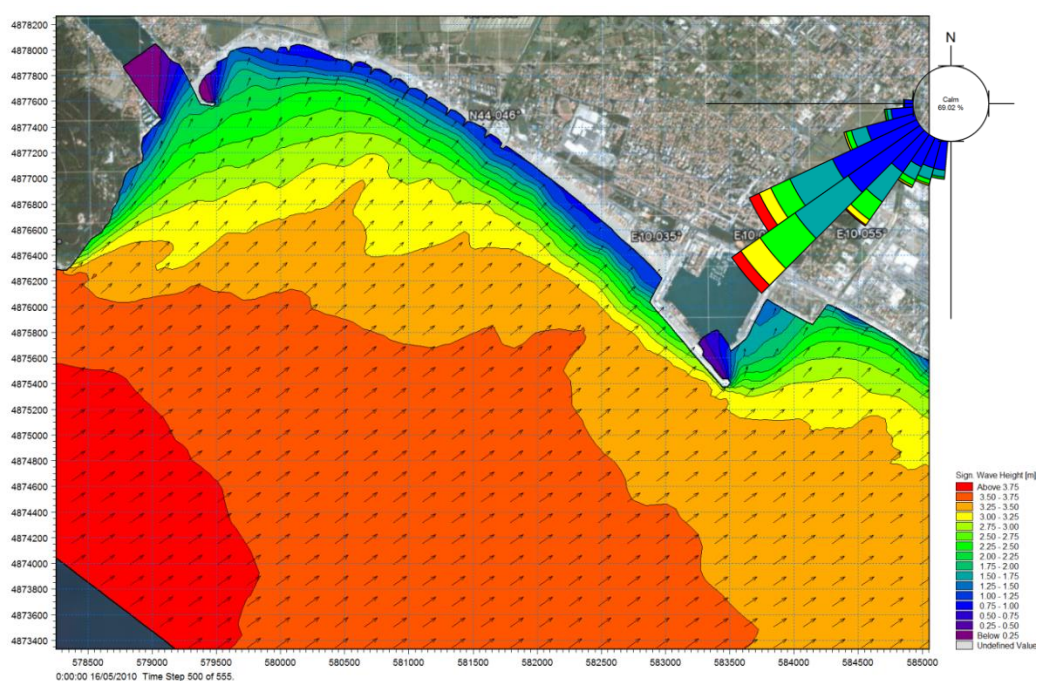
- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- scelta del tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, white-capping, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).



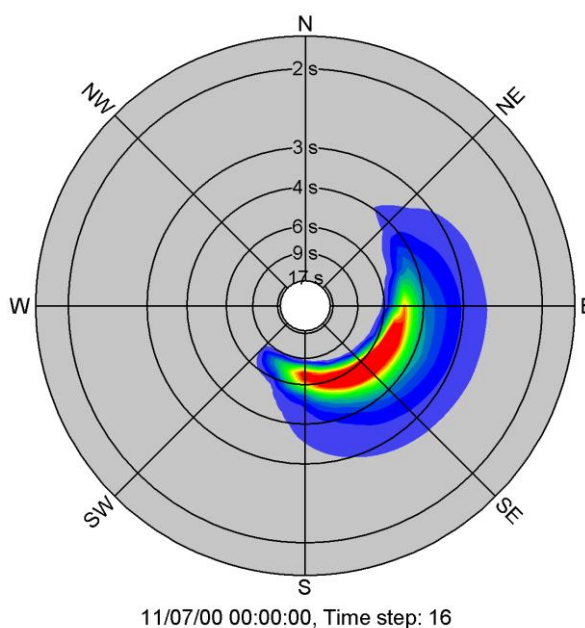
## OUTPUT DEL MODELLO

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh e per ciascun time step, si dividono essenzialmente nelle seguenti categorie.

- parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa  $H_m0$ , periodo di picco  $T_p$ , Periodo medio  $T_{01}$ , periodo di zero up crossing  $T_{02}$ , Periodo dell'energia  $T_{-10}$ , Direzione di picco  $PWD$ , Direzione media  $MWD$ , Deviazione standard direzionale  $\sigma$ , Tensore dei radiation stress  $S_{xx}$   $S_{xy}$   $S_{yy}$ . Se il modello è utilizzato in modalità fully spectral, ciascuna delle variabili sopra riportate possono essere suddivise in componente swell e wind sea. La divisione può essere effettuata mediante l'introduzione di una soglia fissa o dinamica;



- output spettrali: spettro combinato frequenza-direzione, spettro direzionale, spettro di frequenza.





ALLEGATO C  
MIKE 21 Hydrodynamics (HD)  
Descrizione Tecnica





## MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi,  
aree costiere ed offshore





## INDICE

1	MODULO IDRODINAMICO (HD FM) .....	1
---	-----------------------------------	---

## 1 MODULO IDRODINAMICO (HD FM)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. MIKE 21 HD FM può essere utilizzato da solo o insieme ad altri moduli che, pur finalizzati alla simulazione di altri fenomeni (es. trasporto di sedimenti) richiedono la risoluzione contestuale degli aspetti idrodinamici.

In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- flooding and drying;
- gradienti di densità;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/evaporazione;
- moto ondoso (attraverso i radiation stress);
- apporti puntuali (pozzi e sorgenti).

Il modulo idrodinamico, utilizzato assieme al modulo di trasporto TR, è utilizzato per simulare la dispersione di sostanze disciolte o in sospensione. Analogamente, il modulo idrodinamico può essere accoppiato al modulo di qualità delle acque ed idro-ecologia (ECO Lab) per gli studi ed applicazioni nel settore ecologico.

Inoltre, il modulo HD può essere utilizzato insieme ai moduli Sand Transport e Mud Transport per simulare il trasporto rispettivamente di materiale non coesivo e coesivo.

Nelle aree costiere, laddove il trasporto è in gran parte dominato dalle correnti indotte dal moto ondoso, il modulo idrodinamico può essere forzato dai campi di radiation stress ottenuti mediante l'utilizzo del modulo SW (Spectral Wave).

### EQUAZIONI DEL MODELLO

Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica.

Il modello risolve le equazioni di continuità, quantità di moto, temperatura, salinità e densità. La densità non dipende dalla pressione ma dai soli gradienti di temperatura e salinità. Per il modello 3D, la superficie libera è modellata utilizzando l'approccio di trasformazione delle coordinate sigma o combinato sigma-z. A seguire si presentano in coordinate cartesiane, le equazioni utilizzate.

Equazione di continuità:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

Equazione della quantità di moto lungo la componente x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

Equazione della quantità di moto lungo la componente y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

Il calcolo degli scambi di temperatura (T) e di salinità (s) è modellato secondo le equazioni generali del trasporto:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + \hat{H} + s_s S$$

I termini di diffusività orizzontale sono definiti da:

$$(F_T, F_s) = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s)$$

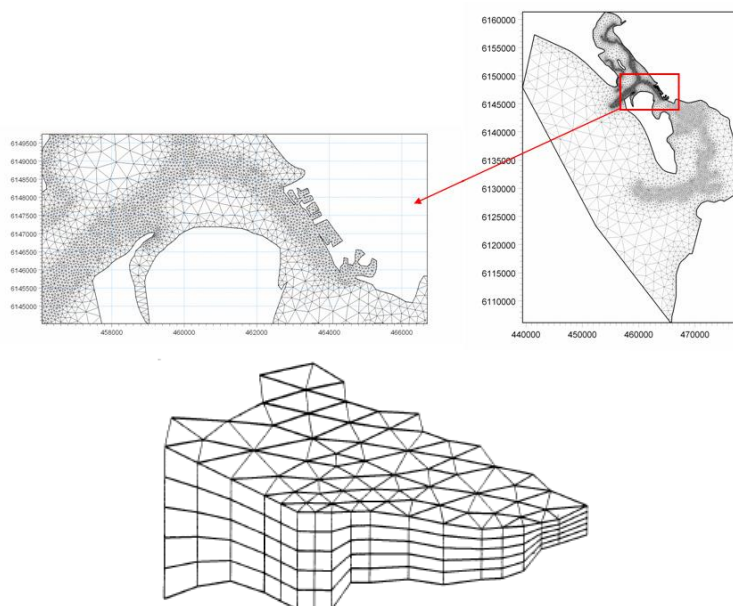
Le equazioni per l'idrodinamica bidimensionale sono ottenute integrando le equazioni lungo la verticale. Possono essere considerati anche gli scambi termici con l'atmosfera.

### Symbol list

$t$	<i>time</i>
$x, y, z$ :	<i>Cartesian coordinates</i>
$u, v, w$ :	<i>flow velocity components</i>
$T, s$ :	<i>temperature and salinity</i>
$D_v$ :	<i>vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient</i>
$\hat{H}$ :	<i>source term due to heat exchange with atmosphere</i>
$S$ :	<i>magnitude of discharge due to point sources</i>
$T_s, s_s$ :	<i>temperature and salinity of source</i>
$F_T, F_s, F_c$ :	<i>horizontal diffusion terms</i>
$D_h$ :	<i>horizontal diffusion coefficient</i>
$h$ :	<i>depth</i>

## TECNICHE DI SOLUZIONE

La versione FM utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte.

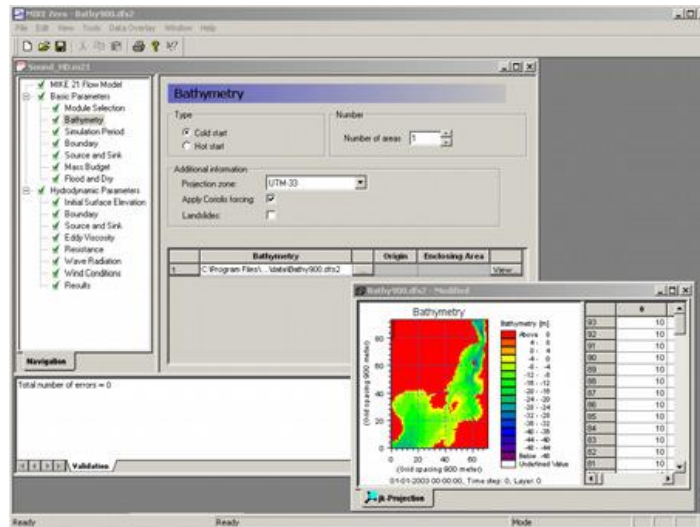


Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangolari o quadrilateri.

## INPUT AL MODELLO

Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- fattori di calibrazione (es. scabrezza, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (es. livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (es. oscillazioni di marea, portate);
- altre forzanti (es. campi di vento, radiation stress, apporti puntuali di portata).

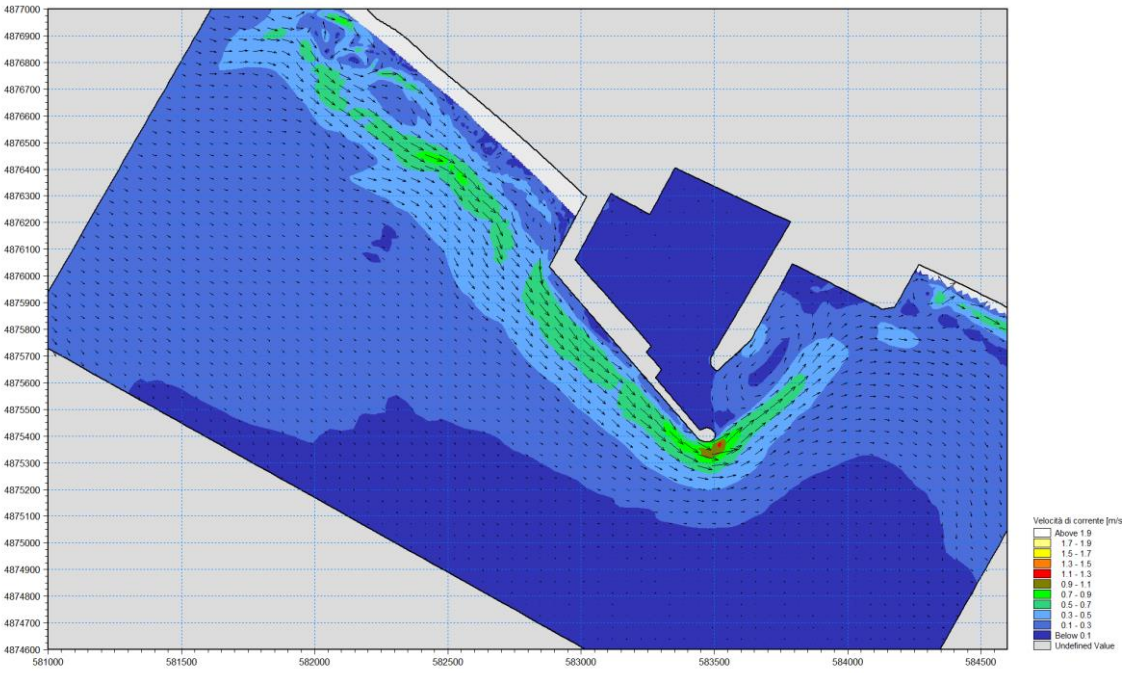


## OUTPUT DEL MODELLO

I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazioni da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascuna cella/elemento di calcolo (griglia classica o flessibile), è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- densità, temperatura e salinità;
- velocità di corrente e direzione;
- velocità del vento;
- pressione atmosferica.







**ALLEGATO D**  
**Littoral Process (Litdrift)**  
**Descrizione Tecnica**



## LITPACK

Sistema modellistico integrato per lo studio dei processi di dinamica costiera





## INDICE

1	PREMESSA .....	1
2	IL METODO STP .....	2
3	LITDRIFT .....	3



## 1 PREMESSA

La pianificazione e la messa in opera di interventi e strategie di gestione della costa, a scala sia locale che regionale, richiede un'approfondita conoscenza dei processi fisici che controllano i fenomeni di erosione e sedimentazione. LITPACK comprende un insieme di moduli ad una linea sviluppati ad hoc per l'analisi e simulazione delle differenti fenomenologie caratteristiche della fascia costiera, risultando uno strumento di grande supporto ed efficacia nelle attività di pianificazione degli interventi di difesa della costa e di supporto alla progettazione.

I diversi moduli di LITPACK sono generalmente utilizzati in affiancamento a MIKE 21 nell'affrontare uno studio sulle dinamiche costiere. L'approccio monodimensionale di LITPACK consente infatti di condurre analisi rapide su una notevole quantità di dati (intero insieme del clima ondoso di un sito per il calcolo dell'orientazione di equilibrio della costa e del trasporto annuo complessivo) o su orizzonti temporali estesi (evoluzione della linea di costa).

In presenza di opere complesse o di fenomeni prettamente bidimensionali è però necessario affiancare a LITPACK un modello quale MIKE 21 che consente di simulare in 2 dimensioni, ad elevato dettaglio, le trasformazioni del moto ondoso, le correnti ed il trasporto solido.

I principali campi di applicazione sono:

- supporto alla progettazione e verifica di opere di difesa costiera;
- previsione dell'evoluzione della linea di costa;
- ottimizzazione di interventi di ripascimento;
- studio dell'evoluzione di profili longitudinali e trasversali;
- analisi dell'interrimento di canali;
- analisi dell'evoluzione morfologica presso condotte sul fondale.

Tutti i moduli di LITPACK, fondati su un approccio deterministico, sono basati sul metodo STP, la cui formulazione permette di calcolare il trasporto di sedimenti non coesivi nella modalità combinata onde-correnti. Di seguito è riportata una tabella con una breve descrizione di tutti i moduli.

<b>Breve descrizione dei moduli LITPACK</b>	
<b>Modulo</b>	<b>Descrizione</b>
<b>PP (Pre and Post Processing)</b>	Il modulo PP è l'ambiente di lavoro di base e fornisce un insieme di tool per l'importazione e processamento dei dati di input nonché l'elaborazione degli output e la preparazione di immagini ed animazioni. PP è necessario per tutti i moduli di LITPACK.
<b>STP</b>	E' il modulo di base per il calcolo puntuale della capacità di trasporto solido di materiale non coesivo per effetto di onde e correnti.
<b>LITDRIFT</b>	E' il modulo che permette il calcolo del trasporto solido long-shore relativo ad un singolo evento o su base annuale (trasporto lordo e netto) lungo un profilo trasversale. Il modulo calcola la trasformazione dell'onda lungo il profilo e la relativa capacità di trasporto solido longshore.
<b>LITLINE</b>	E' il modulo per lo studio dell'evoluzione della linea di costa sul lungo periodo. Utilizzando il clima ondoso ed una rappresentazione della costa mediante linea di riva e profili trasversali, il modulo è in grado di prevedere l'evoluzione della linea di costa nel tempo, considerando anche la presenza di opere di difesa e di apporti solidi fluviali.

## 2 IL METODO STP

Il metodo STP permette di calcolare il trasporto di sedimenti non coesivi nella modalità combinata onde-correnti e rappresenta la base di tutti i moduli di LITPACK.

Il metodo STP risolve l'equazione della diffusione verticale di sedimenti con step di integrazione temporale contenuti nel periodo dell'onda, permettendo di ottenere una soluzione dettagliata del trasporto in condizioni di corrente ed onde frangenti e non.

La capacità di trasporto viene calcolata separatamente per quanto riguarda il trasporto di fondo ed il trasporto in sospensione. Il trasporto del materiale non coesivo di fondo è calcolato secondo le equazioni di *Engelund e Fredsoe (1976)*. Tali equazioni, estese per il calcolo del trasporto in modalità combinata onde correnti, consentono di calcolare il trasporto di fondo attraverso la formulazione adimensionale del bed shear stress,  $\theta$ . In sostanza il trasporto di fondo corrisponde al *bed shear stress* istantaneo in condizioni non stazionarie.

$$\theta = \frac{U_f^2}{(1-s) \cdot gd}$$

dove:

$U_f^2$  = shear velocity

s = densità relativa

g = accelerazione di gravità

d = diametro del sedimento

Il trasporto solido in sospensione è calcolato attraverso la concentrazione di sedimenti, C, data dalla equazione della diffusività verticale turbolenta:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right] + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

dove:

w = velocità di sedimentazione

$\varepsilon_s$  = viscosità turbolenta.

La condizione al contorno di fondo è data dalla concentrazione di fondo  $C_b$  al livello  $z=2d$ .  $C_b$  è calcolata in funzione di  $\varepsilon$  in accordo con la teoria di *Bagnold (1954)*, secondo cui una certa concentrazione di sedimenti al fondo è necessaria per trasferire gli sforzi di taglio (shear stress) al fondo attraverso l'interazione sedimento-sedimento.

Il trasporto solido in sospensione,  $q_s$ , viene calcolato come il prodotto della concentrazione di sedimenti, C, e la corrente media di circolazione,  $U_{mean}$ , mediata sul periodo dell'onda T (*Hedegaard et al. 1988*).

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{0}^{2d} C \cdot U_{mean} dy dt$$



### 3 LITDRIFT

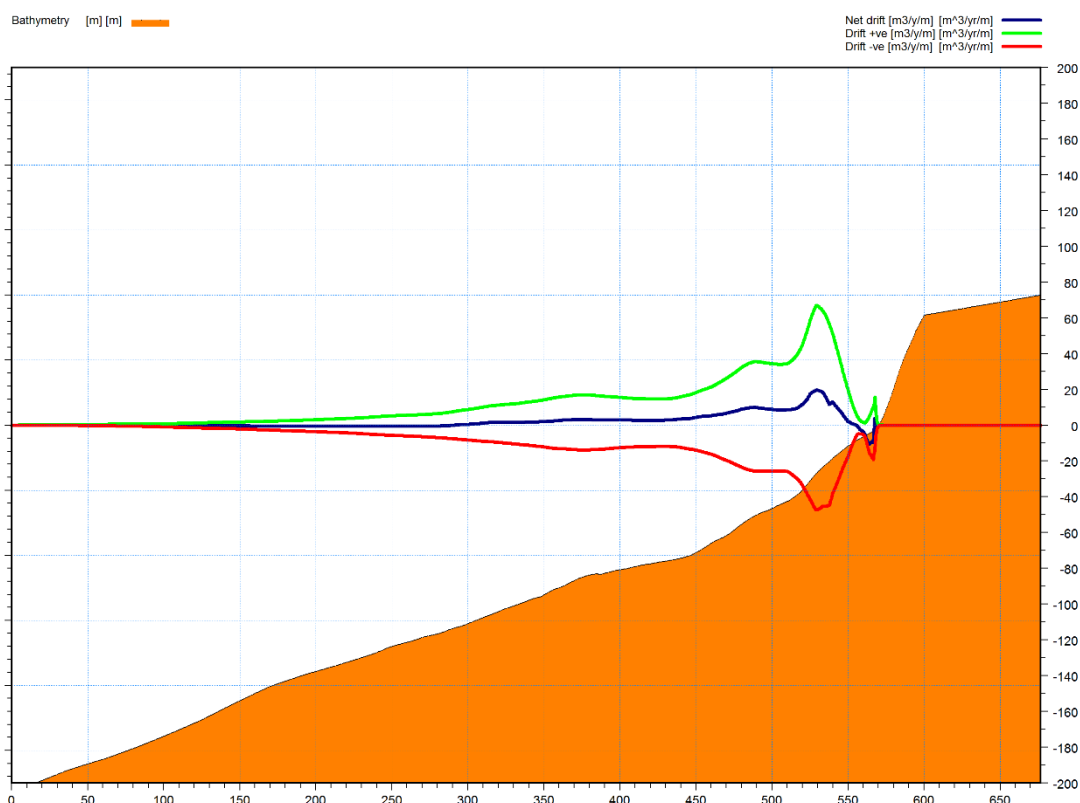
LITDRIFT è un modello numerico per il calcolo deterministico del trasporto solido long-shore lungo un profilo di costa trasversale, si compone essenzialmente di due parti:

- un modello idrodinamico;
- un modello di trasporto, STP.

Il modello idrodinamico permette di simulare nel dettaglio la distribuzione di altezza d'onda significativa, il set-up e le correnti longshore relative ad un profilo trasversale di costa. Il modello risolve l'equazione di conservazione della quantità di moto nelle direzioni longitudinali e trasversali alla costa e tiene conto di tutti i fenomeni legati alla propagazione dell'onda: shoaling, rifrazione, frangimento, attrito col fondo e permette di considerare onde regolari ed irregolari.

Il modello di trasporto, attraverso il metodo STP, permette di calcolare la distribuzione della capacità trasporto long-shore lungo il profilo trasversale per stati di mare regolari ed irregolari.

LITDRIFT viene generalmente applicato per calcolare, su base annuale e/o a scala di mareggiata, il trasporto long-shore netto e lordo lungo un profilo trasversale. Il modulo inoltre permette di calcolare l'orientazione di equilibrio di un tratto di costa e di individuare le onde più significative in termini di incidenza nel bilancio di trasporto solido annuo.



## INPUT DEL MODELLO

Il modello richiede in input:

- profilo trasversale di batimetria con informazioni relative alla scabrezza ed alle caratteristiche dei sedimenti (D50, velocità di sedimentazione);
- livelli di riferimento;
- clima ondoso: altezza, periodo e direzione dell'onda;
- eventuali correnti di marea.

## OUTPUT DEL MODELLO

Gli output forniti dal modello sono:

- distribuzione cross-shore di: livelli, altezza e direzione d'onda , trasporto in sospensione e di fondo, trasporto cumulato;
- distribuzione cross-shore del trasporto annuo;
- rosa del trasporto;
- curva Q-alfa per la determinazione della direzione di zero-trasporto.

