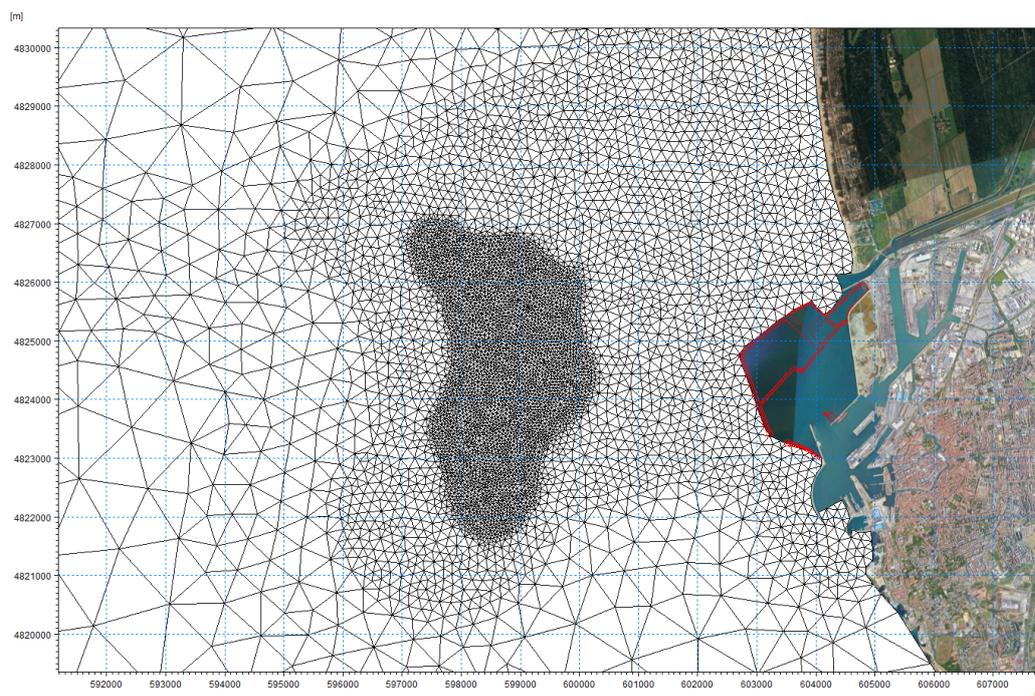


Quantificazione degli effetti dell'intervento denominato "Darsena Europa" sul litorale pisano ed individuazione di possibili misure di compensazione

Aggiornamento delle attività modellistiche in
relazione al nuovo layout di progetto

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



Quantificazione degli effetti dell'intervento denominato "Darsena Europa" sul litorale pisano ed individuazione di possibili misure di compensazione

Attività di studio e modellazione numerica

Relazione tecnica

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



*Mesh di calcolo del modello
di propagazione del moto ondoso*

Project manager	Luis Alberto Cusati
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Author	Luis Alberto Cusati

Codice progetto - elaborato	22803551-01-00200
Data di approvazione	31.12.2022
Revisione	1.0
Classificazione	Aperta



INDICE

1	Premessa	1
2	Inquadramento del sito di studio	2
3	Nuovo layout della Darsena Europa ed attività di studio condotte	3
4	Aggiornamento del modello di propagazione del moto ondoso in riferimento al nuovo layout progettuale.....	5
5	Analisi e quantificazione del clima ondoso sottocosta. Differenze tra la configurazione attuale e di progetto (nuovo e vecchio layout).....	7
6	Aggiornamento del modello per il calcolo del trasporto litoraneo in riferimento al nuovo layout di progetto	11
7	Aggiornamento del modello di evoluzione della linea di riva in riferimento al nuovo layout di progetto	14
7.1	Analisi del trasporto litoraneo.....	15
7.2	Evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva nella configurazione attuale	16
7.3	Evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva nella configurazione di progetto (layout vecchio)	18
7.4	Evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva nella configurazione di progetto (layout nuovo)	22
8	Sintesi dello studio e conclusioni	27



ALLEGATI

ALLEGATO A – MWM

Descrizione Tecnica

ALLEGATO B

MIKE 21 Spectral Waves (SW)

Descrizione Tecnica

ALLEGATO C

Littoral Process

Descrizione Tecnica

1 Premessa

Al fine di quantificare gli effetti che la realizzazione delle opere previste dal progetto dell'infrastruttura "Darsena Europa" nel porto di Livorno potrebbe determinare sul litorale pisano, il Comune di Pisa ha commissionato a DHI nel 2020 uno studio meteomarinario e di trasporto sedimentario sulla base di dati topo-batimetrici disponibili al tempo¹. Tale studio, che nel presente documento sarà indicato come "Fase1", ha previsto l'applicazione di modelli numerici di ultima generazione ad elevata risoluzione spaziale, con l'ausilio dei quali sono state simulate e comprese le dinamiche di stato attuale e quantificate le variazioni attese al moto ondoso e al trasporto sedimentario lungo la costa pisana nella configurazione di Progetto Definitivo della Darsena Europa.

Lo studio citato ha permesso di concludere, come peraltro atteso, come la realizzazione delle opere in progetto sia in grado di determinare effetti su moto ondoso e sul trasporto sedimentario limitati al tratto di costa immediatamente a Nord (circa 2 km) della foce dello Scolmatore del fiume Arno. Nello specifico, l'effetto di schermatura che le nuove opere in progetto offriranno al tratto di costa immediatamente a Nord dello Scolmatore parrebbe in grado di determinare un'inversione del trasporto netto in un limitato tratto a Nord dello Scolmatore (oggi il trasporto netto è diretto da Sud a Nord) con conseguenti prevedibili effetti sull'evoluzione locale della linea di riva.

Sulla base di queste risultanze, il Comune di Pisa ha previsto un' ulteriore fase di approfondimenti modellistici² ("Fase 2") finalizzata, a valle della disponibilità di dati topo-batimetrici e sedimentologici più recenti, alla verifica delle conclusioni dello studio di Fase 1, nonché ad estendere le analisi del primo studio anche alla simulazione dell'evoluzione della linea di riva nel tempo, sia in riferimento alla configurazione attuale, sia in riferimento alla configurazione in presenza della Darsena Europa. Le attività hanno inoltre previsto l'individuazione degli **interventi di prevenzione e/o compensazione** più adeguati a livello concettuale, nonché la quantificazione della loro efficacia attraverso modellazione numerica, evidenziando i vantaggi e le eventuali criticità in modo da indirizzare compiutamente la progettazione preliminare degli interventi stessi.

Successivamente al completamento della Fase 2, nell'ambito dell'iter autorizzativo del progetto "Darsena Europa" è stato definito un nuovo layout delle opere portuali, presentato nell'ambito di una revisione del Progetto Definitivo (Ottobre 2022), resasi necessaria a seguito dei risultati della caratterizzazione ambientale sui sedimenti marini. Il nuovo layout risulta significativamente diverso rispetto a quello analizzato nei precedenti studi DHI e pertanto si è reso necessario effettuare l'aggiornamento delle attività modellistiche condotte in Fase 1 e Fase 2. Il presente elaborato è volto a illustrare i risultati dell'aggiornamento dei modelli numerici e delle analisi condotte nelle Fasi 1 e 2 in relazione alla nuova configurazione di progetto. Le nuove attività si configurano come "Fase 3" di studio.

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

- MIKE 21 SW (Spectral Waves), modello d'onda bidimensionale;
- MIKE Litpack (Littoral Processes), sistema integrato di modelli per la simulazione del trasporto litoraneo di sedimenti.

¹ DHI, *Quantificazione degli effetti dell'intervento denominato "Darsena Europa" sul litorale pisano ed individuazione di possibili misure di compensazione, Attività di studio e modellazione numerica, Gennaio 2021*

² DHI, *Studio degli interventi necessari per mitigare gli effetti della realizzazione della Darsena Europa, Attività di studio e Modellazione numerica, Ottobre 2022*

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 condotte, è stata rivolta particolare attenzione alla caratterizzazione modellistica di tale area.

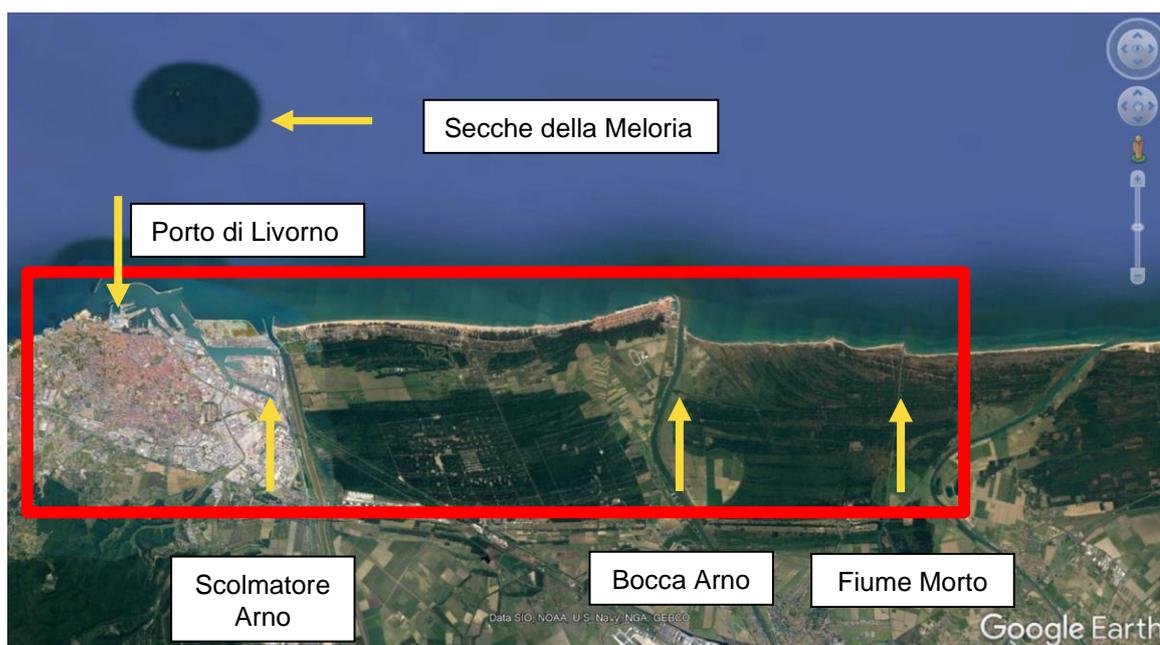


Figura 2-1 Inquadramento del litorale oggetto di studio (riquadro rosso)

3 Nuovo layout della Darsena Europa ed attività di studio condotte

Come anticipato in premessa, l'obiettivo del presente studio è quello di aggiornare le attività modellistiche di Fase 1 e Fase 2 in relazione al nuovo layout della Darsena Europa presentato nell'ambito di una revisione del Progetto Definitivo (Ottobre 2022), resasi necessaria a seguito dei risultati della caratterizzazione dei sedimenti.

In Figura 3-1 sono illustrati il layout di progetto utilizzato per gli studi modellistici di Fase 1 e Fase 2 da qui in poi denominato "vecchio" ed il layout di progetto recentemente presentato, da qui in poi denominato "nuovo" a cui faranno riferimento le attività di Fase 3. In Figura 3-2 è illustrata una sovrapposizione dei due layouts. Le immagini mostrano chiaramente come le due configurazioni progettuali presentino un ingombro significativamente diverso. Il nuovo layout si distingue per una cassa di colmata che, rispetto alla vecchia configurazione, si estende maggiormente (di circa 500m) verso Nord-Ovest.

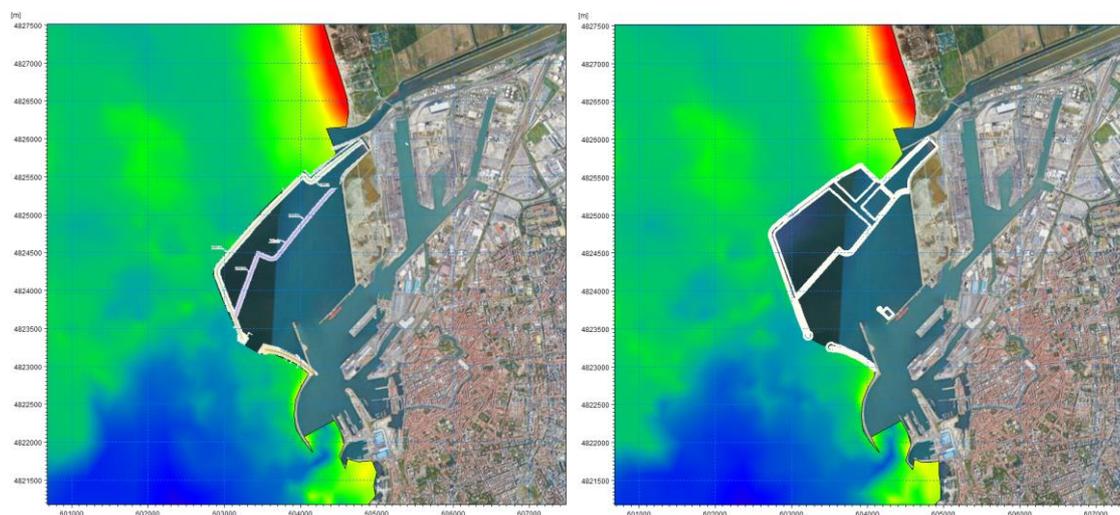


Figura 3-1 Rappresentazione dei layouts di progetto. A sinistra quello utilizzato per gli studi di Fase 1 e Fase 2, a destra la nuova versione, a cui fanno riferimento le attività di Fase 3

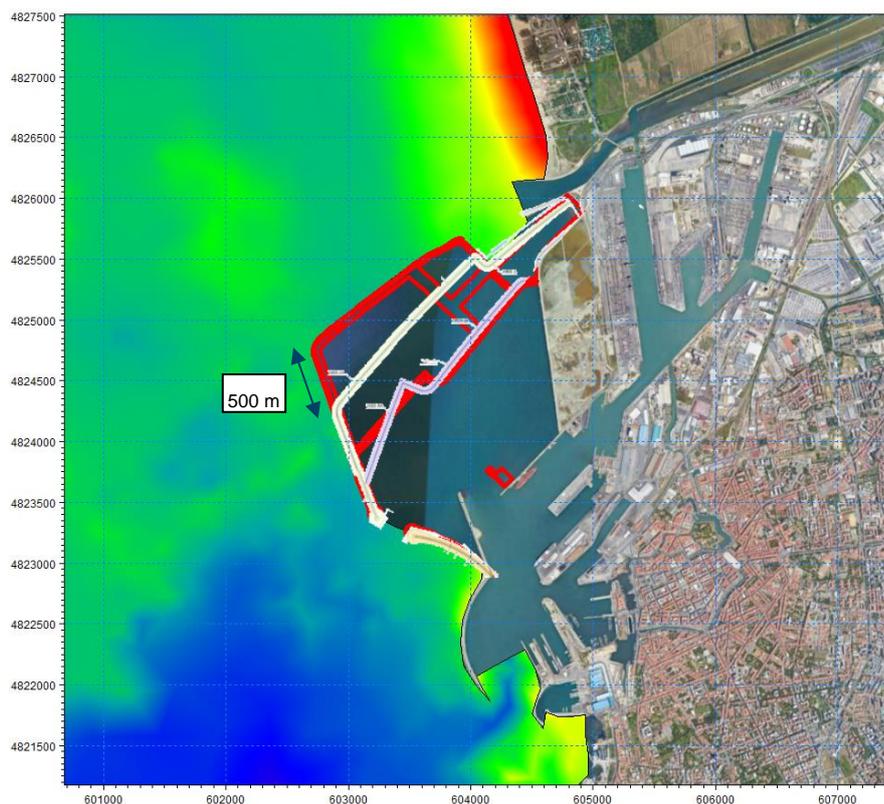


Figura 3-2 Sovrapposizione dei due layouts: in rosso il layout nuovo, in bianco il layout vecchio

Le attività di studio sono articolate secondo i task descritti di seguito:

- **aggiornamento del modello di propagazione del moto ondoso largo-costa.** L'attività prevede l'aggiornamento del modello di propagazione del moto ondoso largo-costa, già implementato nell'ambito dello studio di Fase 1, con l'introduzione del nuovo layout progettuale della Darsena Europa;
- **analisi e quantificazione delle differenze nel clima ondoso tra scenario attuale e scenari di progetto (sia in riferimento al vecchio che al nuovo layout).** L'attività prevede il calcolo delle caratteristiche energetiche del moto ondoso in riferimento al nuovo layout. Tali caratteristiche sono poi confrontate con quelle di stato attuale e quelle relative al vecchio layout;
- **aggiornamento del modello per il calcolo del trasporto litoraneo in riferimento al clima ondoso per il nuovo layout di progetto.** L'attività prevede l'aggiornamento del modello LITDRIFT, finalizzato alla stima del trasporto sedimentario longshore nell'ipotesi di realizzazione della cassa di colmata secondo il nuovo layout di progetto;
- **aggiornamento del modello di evoluzione della linea di riva nel tratto Scolmatore Arno - Tirrenia, in riferimento nuovo layout di progetto.** L'attività prevede l'aggiornamento del modello LITLINE finalizzato alla simulazione dell'evoluzione della linea di riva nell'ipotesi di realizzazione della cassa di colmata secondo il nuovo layout di progetto.

4 Aggiornamento del modello di propagazione del moto ondoso in riferimento al nuovo layout progettuale

La prima attività ha previsto una nuova predisposizione del modello di propagazione del moto ondoso, finalizzata a trasferire l'intera serie di dati d'onda disponibili dal largo a costa. Tale modello è basato sulla disponibilità della serie di dati MWM (Mediterranean Wind Wave Model) nel punto di coordinate 10.099°E e 43.541°N. Rispetto al modello predisposto in precedenza (Fase 1) è stato modificato il layout di progetto della Darsena Europa.

Le simulazioni hanno permesso di ottenere la serie di moto ondoso sottocosta per il periodo compreso tra il 1979 ed il 2021. Le serie di moto ondoso a costa sono state poi utilizzate per le fasi modellistiche descritte in seguito. In Figura 4-1 è riportato un dettaglio della mesh di calcolo che fa riferimento al nuovo layout della Darsena Europa.

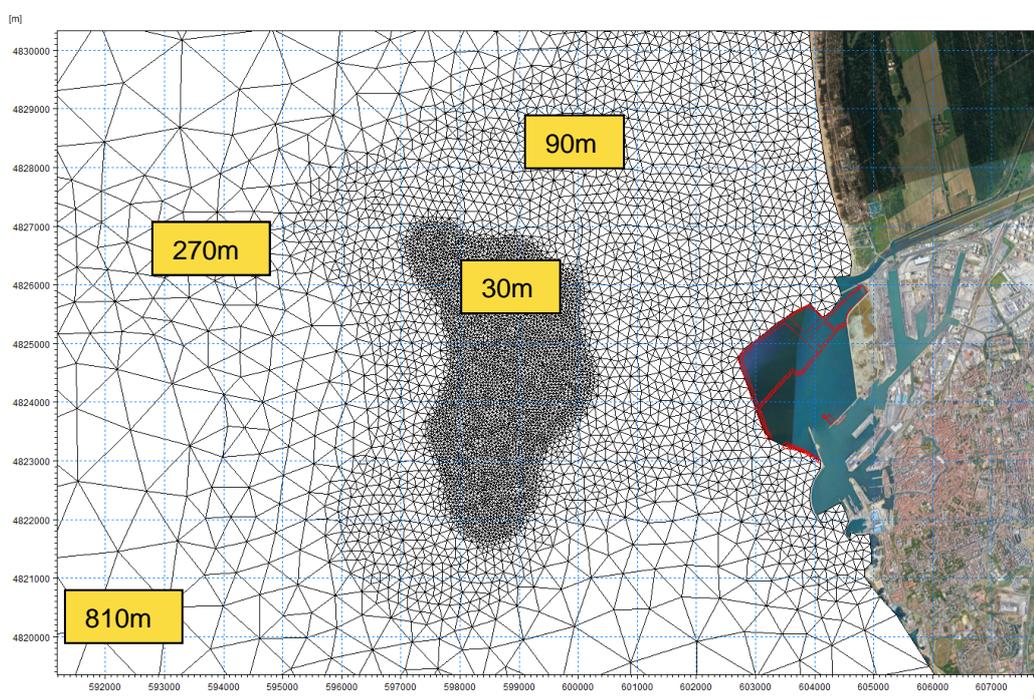


Figura 4-1 Rappresentazione della differente risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso

In Figura 4-2 è riportato a titolo di esempio il risultato della propagazione del moto ondoso, in termini di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza, relativo ad un'ondazione proveniente da Ovest. L'immagine mostra, oltre che l'impatto della Darsena Europa, anche l'influenza delle Secche della Meloria sulla trasformazione delle condizioni ondose.

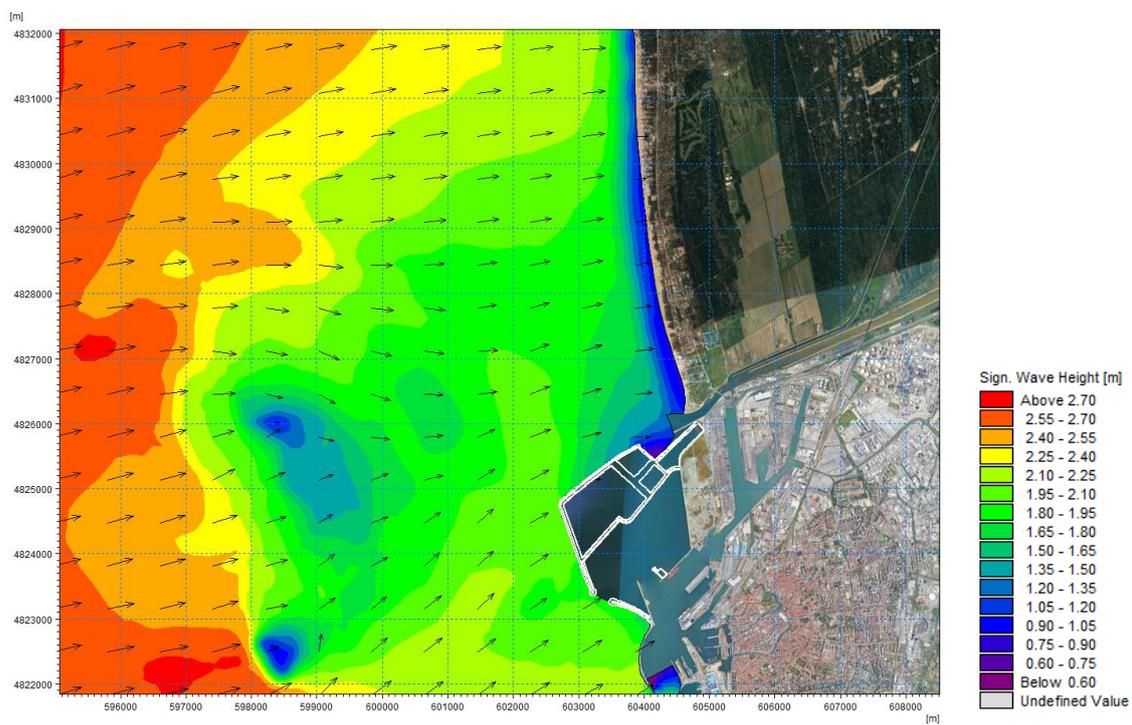


Figura 4-2 Esempio di propagazione di un evento di moto onso da proveniente da Ovest

5 Analisi e quantificazione del clima ondoso sottocosta. Differenze tra la configurazione attuale e di progetto (nuovo e vecchio layout)

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 sottocosta "nearshore" in diversi punti ubicati intorno alla batimetrica -6m ed in riferimento sia alla configurazione attuale che a quelle di progetto (layout nuovo e vecchio). Nello specifico sono stati individuati 7 punti (C1-C7) identificati in Figura 5-1.

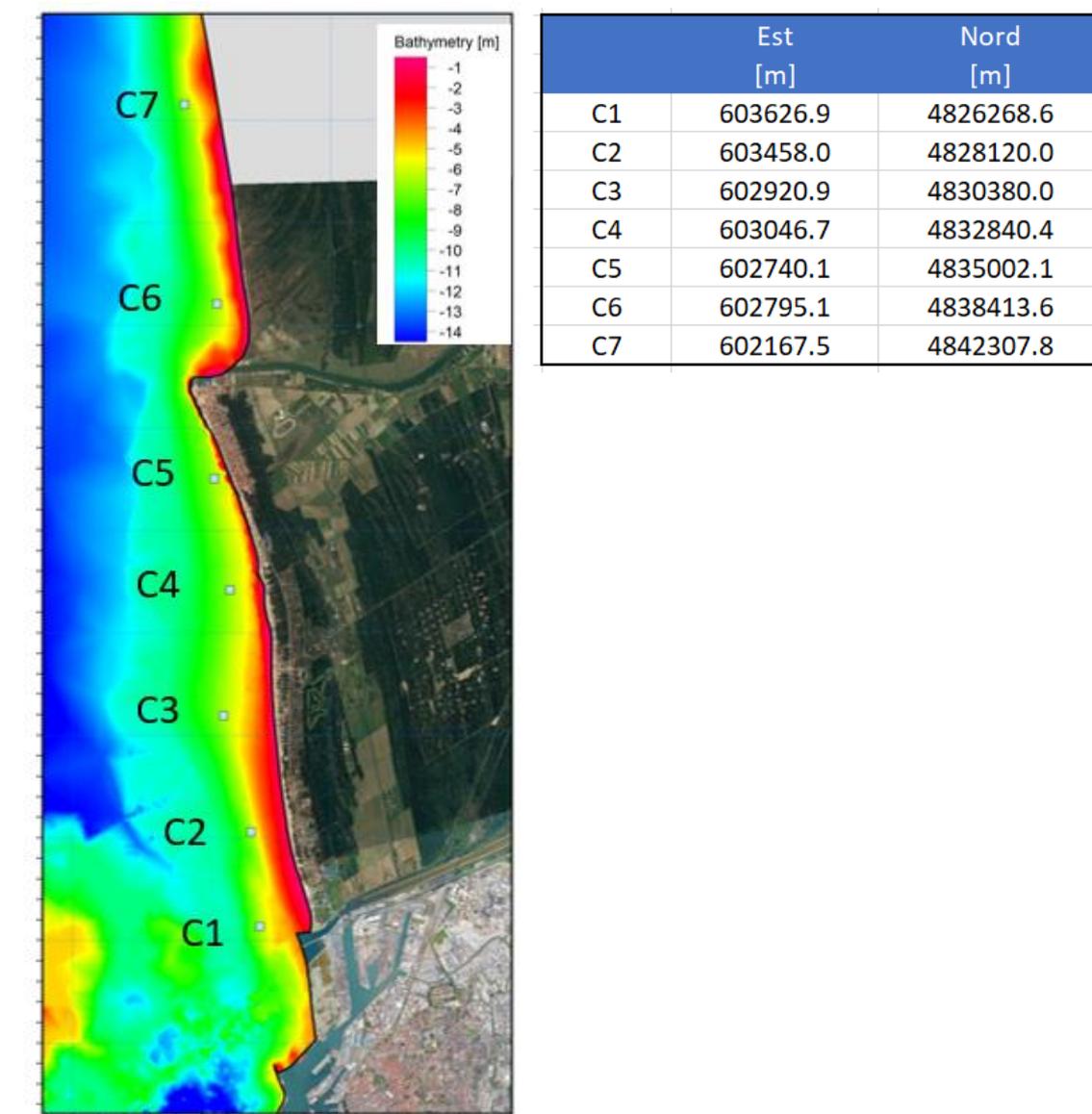


Figura 5-1 Ubicazione e coordinate (UTM33) dei 7 punti sottocosta utilizzati per l'analisi del clima ondoso nearshore

In Tabella 5-1 sono riportati i valori della direzione risultante energetica (altezza e direzione) per ciascuno dei 7 punti analizzati in riferimento alla configurazione attuale ed alle due di progetto, mentre in Figura 5-2 e Figura 5-3 si riportano le rose del clima ondoso nei 2 punti C1-C2 in riferimento ai tre scenari (attuale e progetto nelle due diverse configurazioni).

Tabella 5-1 Valori della risultante energetica (Altezza d'onda e direzione) per i punti C1-C7 in riferimento alla configurazione di stato attuale ed a quelle di progetto

	Attuale		Progetto Layout vecchio		Progetto Layout nuovo	
	Hs [m]	MWD [°N]	Hs [m]	MWD [°N]	Hs [m]	MWD [°N]
C1	0.51	247	0.48	252	0.44	259
C2	0.51	249	0.50	250	0.49	251
C3	0.54	255	0.54	255	0.53	256
C4	0.55	258	0.55	259	0.55	258
C5	0.57	256	0.57	256	0.57	256
C6	0.55	260	0.55	260	0.55	260
C7	0.60	254	0.60	254	0.60	254

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 al punto C1.
- 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° per la configurazione nuova e pari a circa 12° per quella vecchia.
- 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 di circa 2° per la configurazione vecchia e di circa 3° per la configurazione nuova.
- Il clima ondoso nel punto C3 risulta in minima parte influenzato dalla realizzazione delle opere di progetto solo se si fa riferimento al layout nella nuova configurazione. In questo caso, infatti la differenza tra le direzioni della risultante energetica di stato attuale e progetto (nuova configurazione) è di circa 1°.
- il clima ondoso nei punti C4-C7 non risulta influenzato dalle opere di progetto (sia in riferimento allo scenario nuovo che a quello vecchio) in quanto la differenza tra le direzioni della risultante energetica (tra stato attuale e progetto) è pressoché nulla.

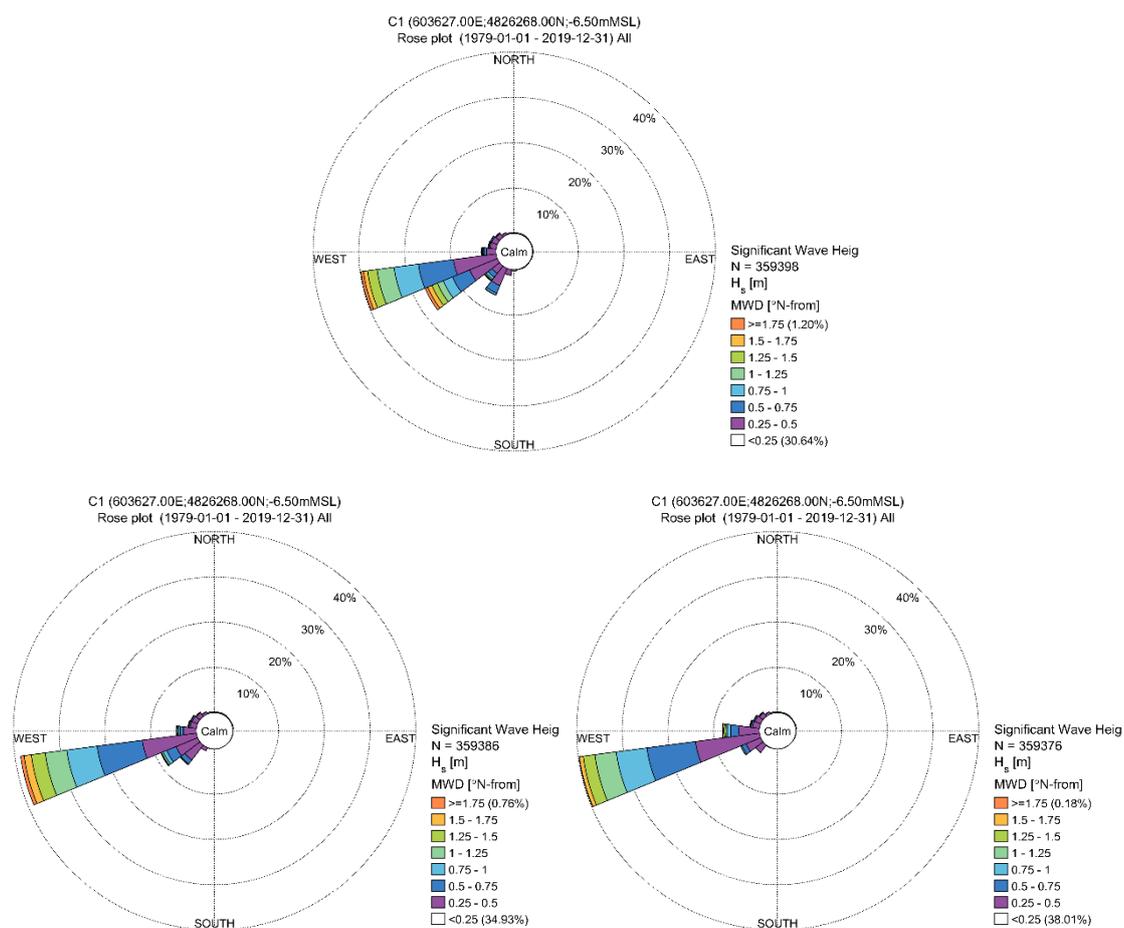


Figura 5-2 Rose del clima ondoso nella configurazione attuale (sopra) e di progetto nel layout vecchio (in basso a sinistra) e nuovo (in basso a destra) per il punto C1

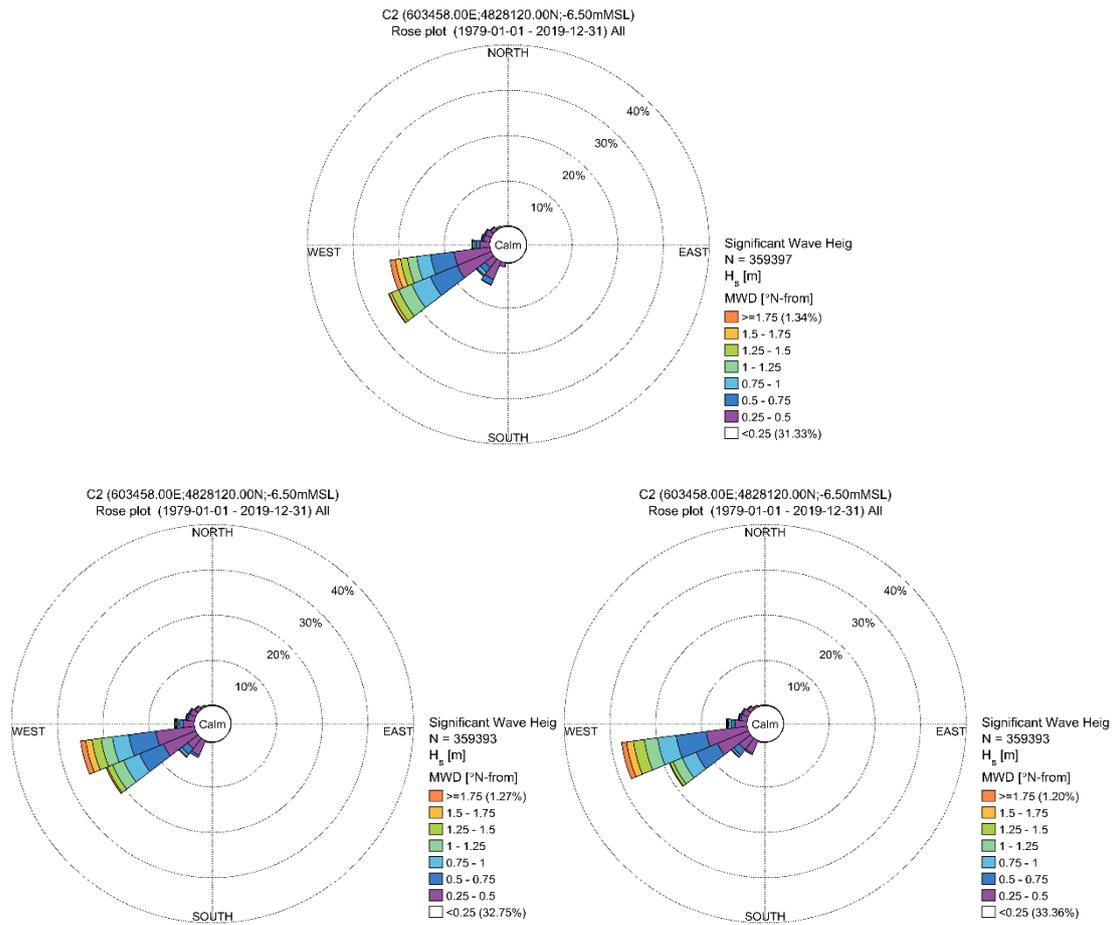


Figura 5-3 Rose del clima ondoso nella configurazione attuale (sopra) e di progetto nel layout vecchio (in basso a sinistra) e nuovo (in basso a destra) per il punto C2

6 Aggiornamento del modello per il calcolo del trasporto litoraneo in riferimento al nuovo layout di progetto

Nell'ambito delle attività di Fase 1 è stata condotta una specifica analisi finalizzata alla stima del trasporto sedimentario locale mediante un approccio di tipo monodimensionale tramite l'impiego del modello numerico LITDRIFT, parte del pacchetto Littoral Processes (LITPROC) di DHI.

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.

In questa fase dello studio, il modello LITDRIFT è stato applicato in riferimento ai transetti C1 e C2 e facendo riferimento al clima ondoso relativo al nuovo layout allo scopo di valutare il potenziale impatto della realizzazione delle strutture della Darsena Europa sul regime del trasporto solido litoraneo attualmente in essere ed in relazione al layout vecchio. Anche in questo caso 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 5.

I profili (Figura 6-1) 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.

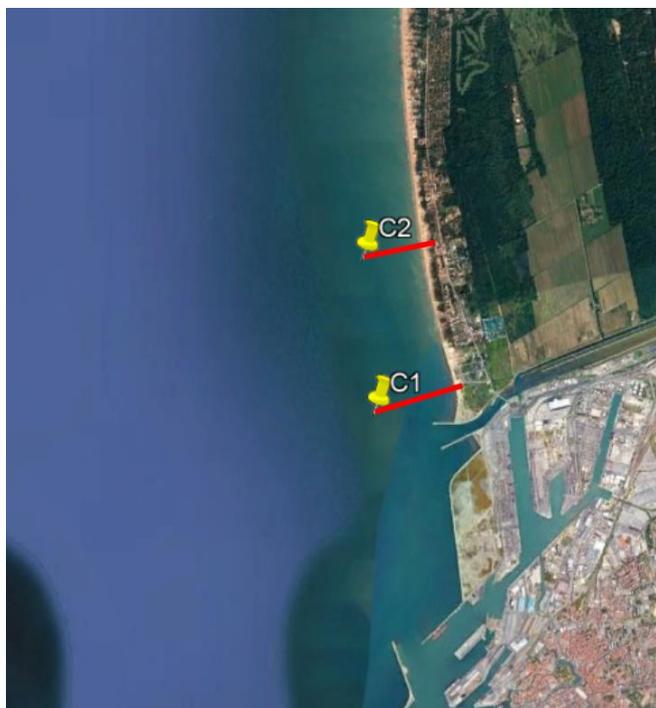


Figura 6-1 Ubicazione dei transetti utilizzati per il calcolo del trasporto litoraneo

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 in riferimento alla configurazione del nuovo layout di progetto della Darsena Europa (sezione 4).

In analogia con l'approccio adottato nelle attività di Fase 1, dal punto di vista granulometrico il fondale marino è stato descritto facendo riferimento alle campagne effettuate per conto della Provincia di Pisa nel 2005. Nello specifico il sedimento è stato descritto facendo riferimento ad una granulometria caratterizzata da un diametro medio d_{50} costante pari a 0.2 mm 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.

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 quelli di progetto (nella configurazione nuova e vecchia).

Tabella 6-1 Distribuzione del trasporto netto e lordo nei tre scenari (stato attuale e i due di progetto) per i profili C1 e C2

	Attuale		Progetto Layout Vecchio		Progetto Layout Nuovo	
	T. Netto	T. Lordo	T. Netto	T. Lordo	T. Netto	T. Lordo
	[m3*1000]	[m3*1000]	[m3*1000]	[m3*1000]	[m3*1000]	[m3*1000]
C1	8.2	16.0	-3.5	10.2	-15.1	11.1
C2	26.2	30.3	22.9	27.3	21.1	25.6

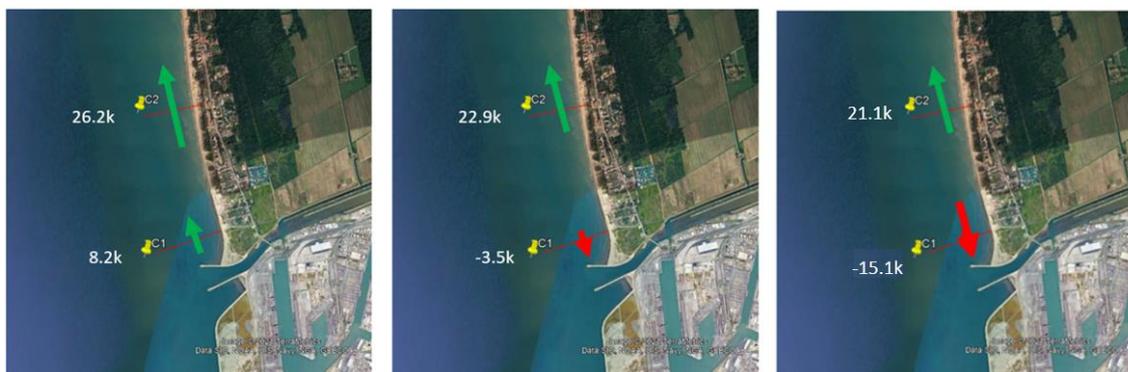


Figura 6-2 Distribuzione del trasporto netto nello scenario attuale (a sinistra) e di progetto in riferimento ai due layout vecchio (al centro) e nuovo (a destra) nei due transesti C1 e C2

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, nella configurazione di layout vecchio 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.

- In riferimento allo scenario di progetto, nella configurazione di layout nuovo il trasporto netto medio annuo risulta diretto verso sud ($15'100 \text{ m}^3/\text{anno}$) nel punto C1, mentre risulta diretto verso nord ($21'100 \text{ m}^3/\text{anno}$) nel punto C2. Il trasporto lordo invece risulta caratterizzato da volumi mediamente pari a circa $11'100 \text{ m}^3/\text{anno}$ per C1 e $25'600 \text{ m}^3/\text{anno}$ 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.

L'impatto risulta sicuramente maggiore in caso di realizzazione della Darsena Europa secondo il nuovo Layout proposto.

7 Aggiornamento del modello di evoluzione della linea di riva in riferimento al nuovo layout di progetto

Nell'ambito delle attività di Fase 2, al fine di valutare gli effetti della realizzazione della Darsena Europa sul litorale pisano, è stato predisposto un modello di evoluzione della linea di riva mediante l'applicazione del codice di calcolo LITLINE di Littoral Processes FM, un modello monodimensionale che simula gli effetti sulla costa dei gradienti del trasporto litoraneo e calcola l'evoluzione della linea di riva risolvendo l'equazione di continuità dei sedimenti con la tecnica delle differenze finite.

Il modello si basa sulla teoria ad una linea, in cui si assume che il profilo trasversale possa arretrare e avanzare rigidamente, mantenendo tuttavia la propria geometria. Pertanto, con questo modello, la morfologia costiera è descritta dalla posizione della linea di riva e da uno o più profili di riferimento.

Le simulazioni del modello LITLINE sono state condotte in riferimento ad un dominio di calcolo (*baseline*) che si estende indicativamente dalla foce dello Scolmatore del fiume Arno fino a Tirrenia, per una lunghezza complessiva di circa 6.5 km. In Figura 7-1 è raffigurata, oltre alla *baseline*, anche la linea di costa di stato attuale, ricavata da Google Earth sulla base di un'immagine datata Aprile 2020. La *baseline*, al pari della linea di riva, ha una risoluzione di 5m.

Le caratteristiche granulometriche del fondale marino sono state descritte facendo riferimento alle campagne effettuate per conto della Provincia di Pisa nel 2005 e illustrate in dettaglio nella relazione tecnica di Fase 1. Nello specifico il sedimento è stato impostato facendo riferimento ad una granulometria caratterizzata da un diametro medio d_{50} costante pari a 0.2 mm e da un parametro indicativo della variabilità del fuso (il cosiddetto "grading", corrispondente alla radice quadrata del rapporto tra il d_{84} ed il d_{16}), pari a 1.5. Tale valore è stato assunto sulla base dell'analisi delle curve granulometriche a disposizione.

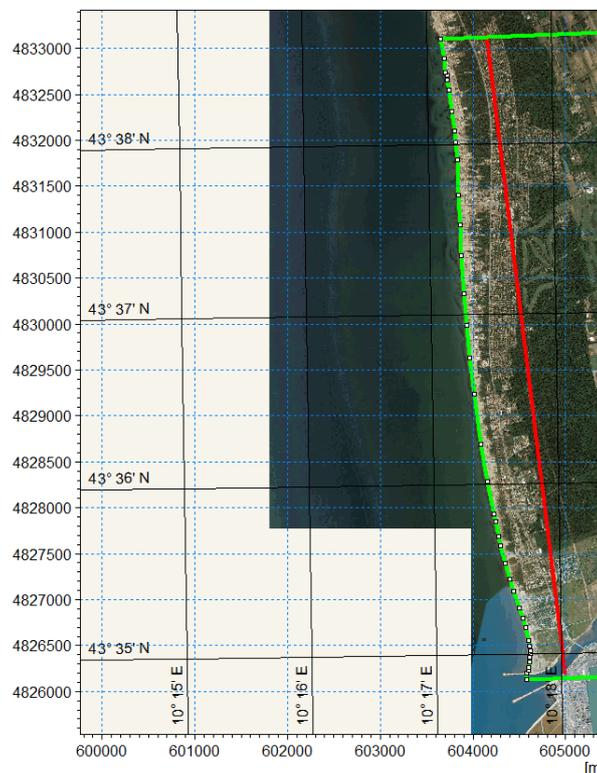


Figura 7-1 Dominio di calcolo di LITLINE: in rosso la *baseline*, in verde la linea di costa dell'Aprile 2020

Il modello è stato forzato dalla serie di moto ondoso estratta lungo tutto lo sviluppo costiero ad una batimetrica di circa -4 m. Per la previsione di evoluzione futura della posizione della linea di riva, si è fatto riferimento alle medesime condizioni di moto ondoso utilizzate per la caratterizzazione storica del litorale. Per le configurazioni di progetto è stato fatto riferimento al clima ondoso relativo alle simulazioni che includono i due layout (nuovo e vecchio) della Darsena Europa.

Il modello di evoluzione della linea di riva è stato inoltre calibrato sulla base delle immagini satellitari ricavate da Google Earth e opportunamente digitalizzate. Nello specifico, la calibrazione ha previsto la simulazione di un periodo di circa 1 anno, a partire dalla posizione della linea di riva del Giugno 2019 fino all'Aprile 2020. I dettagli della calibrazione sono disponibili nel report di Fase 2.

A seguire si riportano i risultati del modello in termini di trasporto litoraneo (stato attuale) e di evoluzione della linea di riva (stato attuale e configurazioni di progetto).

7.1 Analisi del trasporto litoraneo

L'applicazione del modello LITLINE, opportunamente calibrato sulla base delle immagini satellitari (come descritto al paragrafo precedente), ha permesso di affinare le stime del trasporto litoraneo condotte nell'ambito della Fase 1. Nello specifico, il modello fornisce per ogni punto del dominio di calcolo (*baseline*) la stima del trasporto long-shore. I risultati delle elaborazioni in riferimento allo stato attuale, riportati in **Error! Reference source not found.** in termini di andamento del trasporto long-shore lungo la linea di costa, permettono di affermare quanto segue.

- Il litorale in studio è caratterizzato generalmente da valori positivi del trasporto che pertanto, in accordo con la convenzione utilizzata nel modello, risulta diretto da Sud verso Nord.
- i valori del trasporto long-shore netto sono in generale piuttosto contenuti e di norma inferiori ai 10'000 m³/anno. Tale aspetto risulta sicuramente legato all'attenuazione che le secche della Meloria esercitano sul clima ondoso locale ed in particolar modo sul litorale di Calambrone (ubicato nella parte più a Sud);
- il primo tratto a Sud, fino a circa 1000 m dal pennello di foce, risulta caratterizzato da valori del trasporto litoraneo estremamente ridotti, che localmente possono essere anche leggermente negativi (con inversione del trasporto: da Nord verso Sud). Qui, oltre all'effetto esercitato dalle secche della Meloria, bisogna evidenziare l'influenza del pennello di foce Scolmatore, il quale determina un'attenuazione di tutte le condizioni ondose provenienti dai settori meridionali;
- nel tratto compreso tra 1000 m e 3000 m dal pennello di foce il trasporto litoraneo netto risulta in crescita. Nello specifico si passa da un trasporto quasi nullo fino ad arrivare ad oltre 10'000 m³/anno. Valori crescenti del trasporto litoraneo nella direzione del flusso possono determinare l'insorgenza di dinamiche erosive, le quali saranno discusse nella successiva sezione 7.2;
- viceversa, nel tratto di Tirrenia compreso tra le progressive 3000 m e 6500 m, il trasporto litoraneo risulta in leggero calo fino a quasi annullarsi in corrispondenza del litorale di Marina di Pisa. Valori decrescenti del trasporto litoraneo nella direzione del flusso possono determinare l'instaurarsi di dinamiche di deposito, che al pari di quelle erosive saranno discusse nella successiva sezione 7.2.

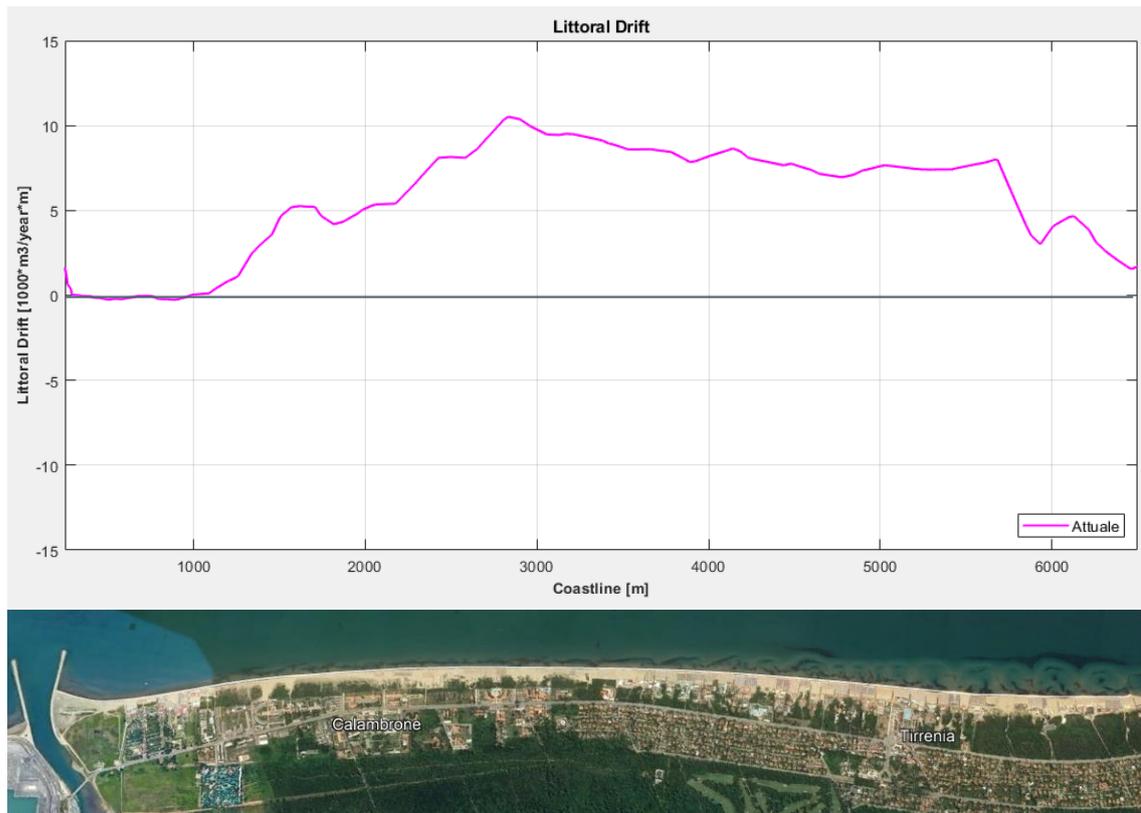


Figura 7-2 Andamento del trasporto *long-shore* lungo il litorale oggetto di studio. Valori positivi del trasporto sono indicativi di una direzione Sud-Nord

7.2 Evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva nella configurazione attuale

Il modello LITLINE implementato e calibrato sulla base di quanto dettagliato precedentemente è stato utilizzato per la simulazione dell'evoluzione della linea di riva a medio-lungo termine nella configurazione attuale. La simulazione è stata predisposta per un periodo di 10 anni, nell'ipotesi che il clima meteomarinario possa essere assimilabile a quello degli ultimi 10 anni a disposizione. In Figura 7-3 viene riportato il grafico dell'evoluzione della linea di riva per l'intera area di studio a partire dalla linea di costa iniziale (2020) per i successivi 10 anni. Il grafico evidenzia che:

- il tratto di costa compreso tra la foce dello Scolmatore e circa 100-200 m più a Nord presenta una linea di riva in leggero avanzamento con tendenza alla stabilizzazione. Dopo un anno, si osserva un avanzamento massimo di 1 m mentre dopo 5 e 10 anni l'avanzamento massimo risulta essere di circa 2-3 m. Come atteso, la realizzazione del pennello destro di foce, avvenuta tra il 2016 ed il 2017, ha creato uno squilibrio nelle dinamiche evolutive che a sua volta ha determinato, specialmente nei primi anni dopo la realizzazione, l'avanzamento della linea di riva nella zona immediatamente a Nord del pennello stesso. Secondo le elaborazioni modellistiche, in circa 5 anni (a partire dal 2020) verranno a determinarsi nuovamente delle condizioni di equilibrio con la conseguente stabilizzazione della linea di riva in questo tratto di costa.
- il tratto di costa in corrispondenza della frazione Calambrone, ubicato da circa 500 m a 3000 m a Nord del pennello di foce, presenta caratteristiche erosive con tendenza all'equilibrio. In particolare, dopo un anno, la linea di riva arretra fino ad un massimo di circa 1-2 m; dopo 5 anni l'arretramento prosegue fino ad un massimo di 5 m. arrivando dopo 10 anni fino ad un massimo di circa 7-8 m. Spostandosi verso Nord tale effetto erosivo tende a ridursi ed

annullarsi progressivamente all'incirca alla progressiva 3000 m, al confine tra Calambrone e Tirrenia, nel punto in cui cambia significativamente l'orientazione della linea di costa.

- il tratto di costa in corrispondenza di Tirrenia, ubicato da circa 3000 m a circa 6500 m a Nord del pennello di foce, risulta essere viceversa in leggero avanzamento con tendenza all'equilibrio. Il massimo avanzamento si osserva nella porzione di costa ubicata più a Nord, appena prima del confine con il litorale di Marina di Pisa caratterizzato da una significativa presenza di strutture a protezione della costa. Nello specifico, dopo un anno la linea di riva avanza fino ad un massimo di 1 m; dopo 5 anni fino ad un massimo di 3-5 m; dopo 10 anni fino ad un massimo di 4-5 m.

Le elaborazioni numeriche hanno altresì evidenziato che il tratto di costa in avanzamento (Tirrenia) presenta un accumulo di sedimenti pari a circa 6'000 m³, 20'000 m³ e 35'000 m³ rispettivamente dopo 1, 5 e 10 anni; Viceversa, il tratto di costa in arretramento (Calambrone) presenta una perdita di sedimenti pari a circa 9'000 m³, 27'000 m³ e 45'000 m³ rispettivamente dopo 1, 5 e 10 anni.

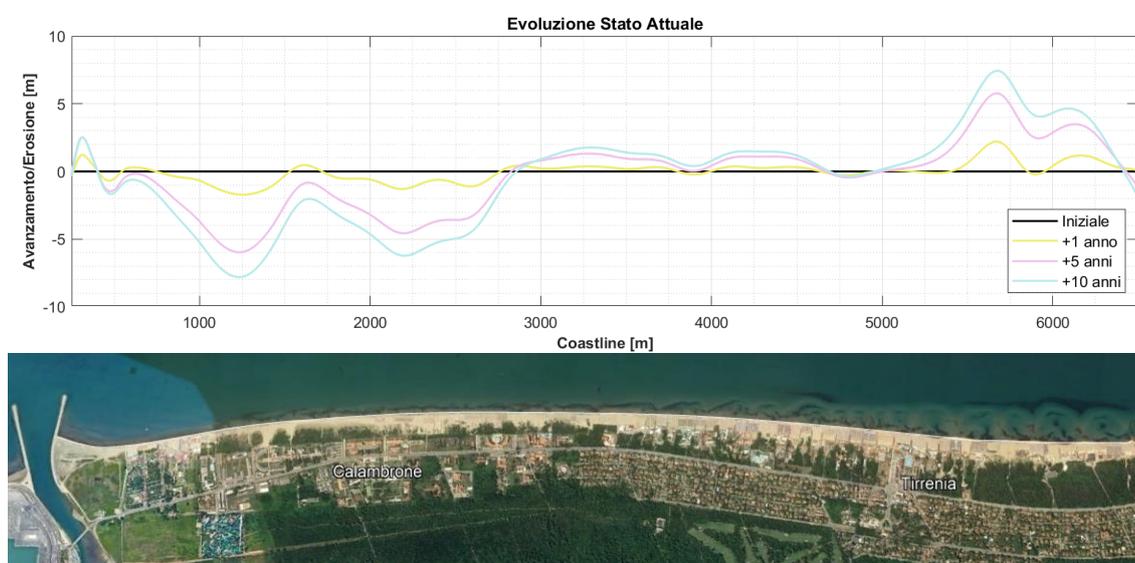


Figura 7-3 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione di stato attuale

In Figura 7-4 è illustrata l'evoluzione della linea di riva ad 1, 5 e 10 anni in riferimento ai tratti di costa di Calambrone e Tirrenia, che presentano rispettivamente il maggiore arretramento ed il maggiore avanzamento.



Figura 7-4 Evoluzione della linea di riva nel tratto di maggiore arretramento (sopra) e maggiore avanzamento (sotto) con riferimento alla simulazione di stato attuale

7.3 Evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva nella configurazione di progetto (layout vecchio)

Il modello LITLINE implementato e calibrato sulla base di quanto dettagliato in precedenza è stato utilizzato anche per la simulazione dell'evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva in riferimento alla configurazione di progetto, con la presenza della Darsena Europa secondo il vecchio layout. Analogamente a quanto visto nella precedente sezione, la simulazione è stata predisposta per un periodo di 10 anni a partire dalla linea di riva di Aprile 2020, nell'ipotesi che il clima meteomarinario di tale periodo coincida con quello degli ultimi 10 anni a disposizione.

In Figura 7-5 è riportato il grafico dell'evoluzione della linea di riva per l'intera area di studio a partire dal 2020 (linea di costa iniziale) per i successivi 10 anni, nelle immagini di Figura 7-6 e Figura 7-7 sono riportati rispettivamente un dettaglio dell'evoluzione della linea di riva (per i tratti di costa dove è previsto il massimo arretramento ed il massimo avanzamento) ed il confronto tra simulazioni di stato attuale e progetto. In Figura 7-8 è invece riportata la differenza tra l'evoluzione della linea di riva nella configurazione di progetto rispetto a quella di stato attuale.

La lettura dei grafici, con particolare riferimento all'evoluzione alla fine del periodo di 10 anni, mostra che le differenze in termini evolutivi tra configurazione di progetto e attuale sono apprezzabili per un tratto di costa di circa 4 km a partire dalla foce dello Scolmatore verso Nord. Nello specifico si può osservare quanto segue:

- come atteso la realizzazione della Darsena Europa determina un effetto di schermatura per il litorale immediatamente a Nord, che si concretizza in un maggiore avanzamento, rispetto alla configurazione di stato attuale, nei primi 1000 m a Nord del pennello di foce. L'incremento di tale avanzamento risulta essere pari a circa 0.5 m, 2 m e 3 m rispettivamente dopo 1 anno, 5 anni e 10 anni.
- il tratto di costa da circa 1000 m a circa 1500 m a Nord del pennello di foce risulta viceversa caratterizzato da un arretramento lievemente maggiore rispetto alla configurazione attuale:

dopo 1 anno le differenze non risultano apprezzabili, mentre la variazione è quantificabile fino ad un massimo di 1 m dopo 5 e 10 anni;

- proseguendo ulteriormente verso Nord, il litorale risulta invece caratterizzato da un'alternanza di tratti in cui la linea di costa nella configurazione di progetto è più avanzata rispetto a quella di stato attuale e viceversa. Tali oscillazioni sono comunque comprese tra +0.5 m e -0.5 m dopo 10 anni di simulazione.

Le elaborazioni numeriche con riferimento alla configurazione di progetto hanno inoltre evidenziato che il bilancio complessivo sedimentario, tra volumi accumulati nel tratto in accrescimento e persi in quello in arretramento, non subisce variazioni apprezzabili rispetto alla configurazione di stato attuale.

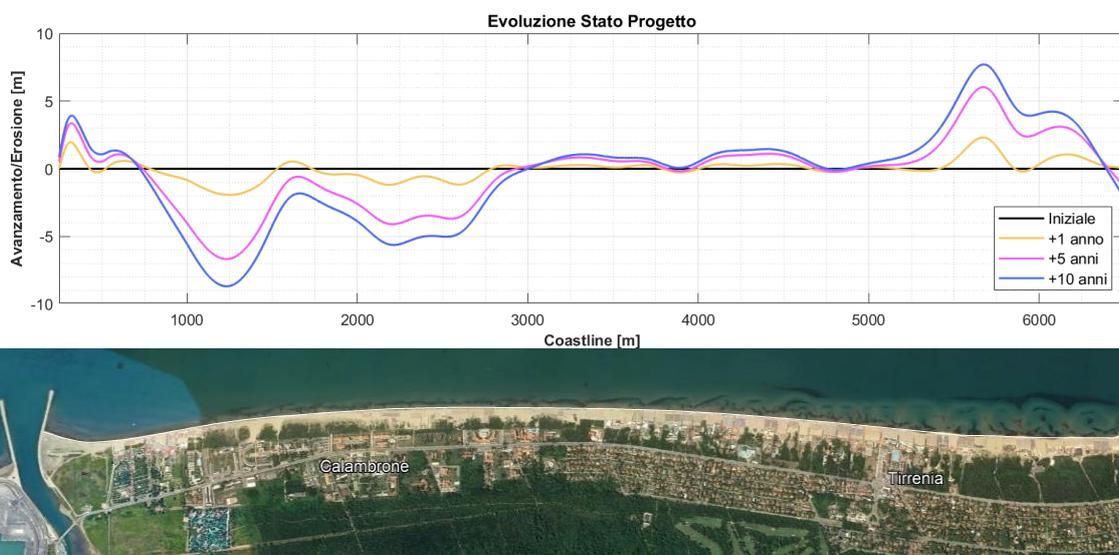


Figura 7-5 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione di progetto



Figura 7-6 Evoluzione della linea di riva nel tratto di maggiore arretramento (sopra) e maggiore avanzamento (sotto) con riferimento alla configurazione di progetto

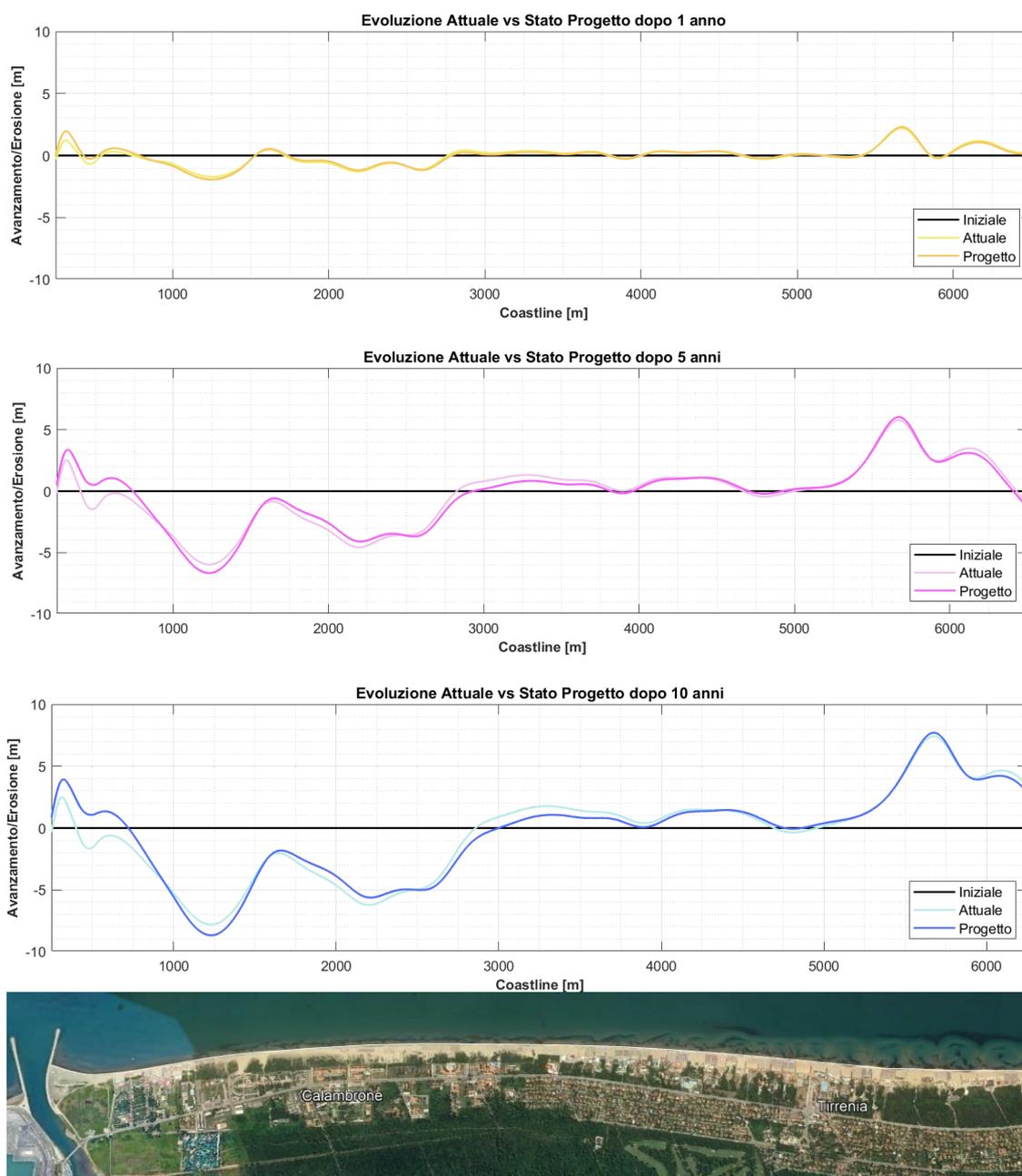


Figura 7-7 Confronto dell'evoluzione della linea di riva tra configurazione attuale e di progetto dopo 1 anno, 5 anni e 10 anni

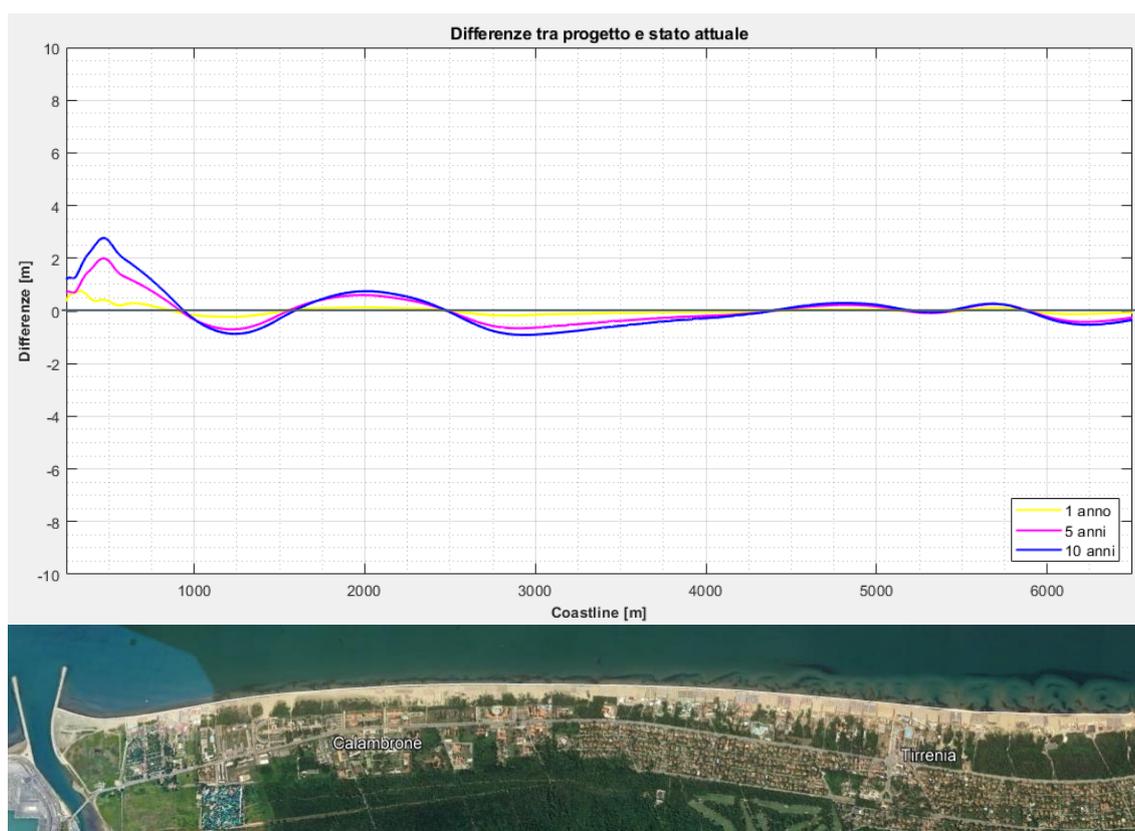


Figura 7-8 Differenze tra evoluzione della linea di riva nella configurazione di progetto ed in quella di stato attuale

In Figura 7-9 è riportato l'andamento del trasporto litoraneo per l'intero tratto di costa interessato con riferimento sia alla configurazione di stato attuale, già trattato alla sezione 7.2, sia a quella di progetto nella configurazione con il vecchio layout (valori positivi del trasporto indicano che questo è diretto verso Nord).

Si può affermare che nella configurazione di progetto l'andamento del trasporto risulta molto simile a quello in configurazione attuale. Le differenze, seppur minime (inferiori a circa 1'000 m³/anno), si apprezzano fino a circa 3000 m - 4000 m a Nord della foce dello Scolmatore. Nello specifico, l'effetto di schermatura dal moto ondoso dovuto alla presenza della Darsena Europa determina una riduzione dei valori del trasporto, che progressivamente tende ad annullarsi procedendo verso Nord. Nel tratto compreso tra la foce e circa 1000 m a Nord i valori del trasporto nella configurazione di progetto risultano negativi, ovvero tale tratto è caratterizzato da un trasporto diretto verso Sud.

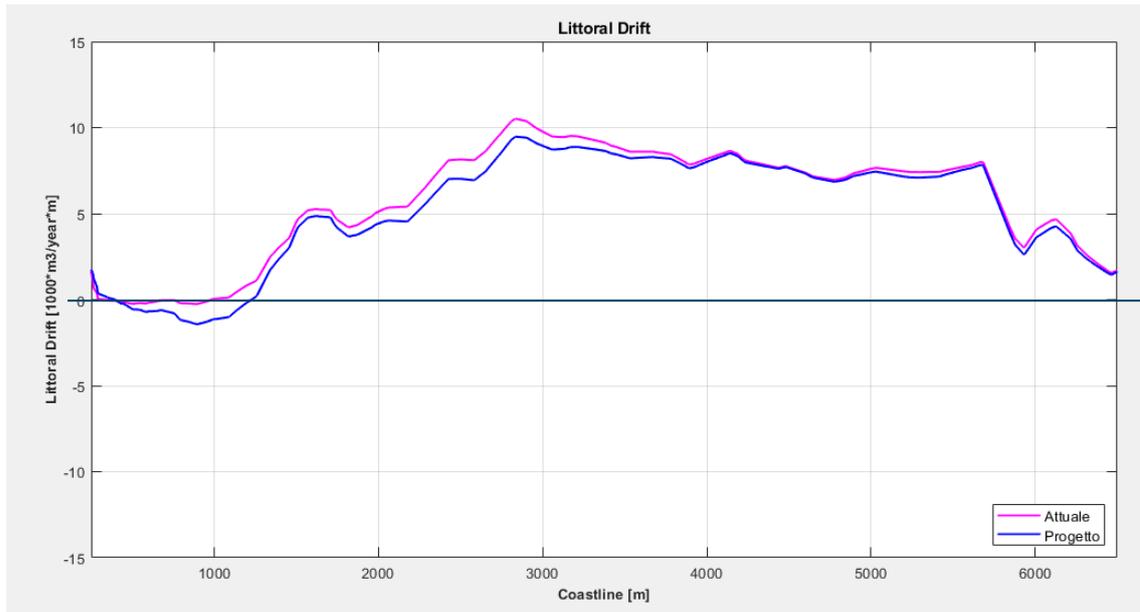


Figura 7-9 Trasporto long-shore in riferimento alla configurazione di stato attuale (linea magenta) e di progetto (linea blu). Valori positivi del trasporto indicano che questo è diretto verso Nord

7.4 Evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva nella configurazione di progetto (layout nuovo)

Il modello LITLINE implementato e calibrato sulla base di quanto dettagliato in precedenza è stato utilizzato anche per la simulazione dell'evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva in riferimento alla configurazione di progetto, con la presenza della Darsena Europa secondo il nuovo layout. Analogamente a quanto visto nella precedente sezione, la simulazione è stata predisposta per un periodo di 10 anni a partire dalla linea di riva di Aprile 2020, nell'ipotesi che il clima meteomarinario di tale periodo coincida con quello degli ultimi 10 anni a disposizione.

In Figura 7-5 è riportato il grafico dell'evoluzione della linea di riva per l'intera area di studio a partire dal 2020 (linea di costa iniziale) per i successivi 10 anni, nelle immagini di Figura 7-6 e Figura 7-7 sono riportati rispettivamente un dettaglio dell'evoluzione della linea di riva (per i tratti di costa dove è previsto il massimo arretramento ed il massimo avanzamento) ed il confronto tra simulazioni di stato attuale e progetto. In Figura 7-8 è invece riportata la differenza tra l'evoluzione della linea di riva nella nuova configurazione di progetto rispetto a quella relativa al vecchio layout ed a quella di stato attuale.

La lettura dei grafici, con particolare riferimento all'evoluzione alla fine del periodo di 10 anni, mostra che le differenze in termini evolutivi tra configurazione di progetto (secondo il nuovo layout della Darsena Europa) e attuale sono apprezzabili per tutto il tratto di costa analizzato, dalla foce dello Scolmatore verso Nord. Nello specifico si può osservare quanto segue:

- come atteso la realizzazione della Darsena Europa determina un effetto di schermatura per il litorale immediatamente a Nord, che si concretizza in un maggiore avanzamento, rispetto alla configurazione di stato attuale, nei primi 1000 m circa a Nord del pennello di foce. L'incremento di tale avanzamento risulta essere pari a circa 2 m, 6 m e 9 m rispettivamente dopo 1 anno, 5 anni e 10 anni.
- il tratto di costa da circa 1000 m a circa 3000 m a Nord del pennello di foce risulta viceversa caratterizzato da un arretramento maggiore rispetto alla configurazione attuale: dopo 1 anno

le differenze non risultano apprezzabili, mentre la variazione è quantificabile fino ad un massimo di 2 m dopo 5 anni e di 3 m dopo 10 anni;

- proseguendo ulteriormente verso Nord, il litorale risulta invece caratterizzato da un'alternanza di tratti in cui la linea di costa nella configurazione di progetto è più avanzata rispetto a quella di stato attuale e viceversa. Tali oscillazioni sono comunque comprese tra +1 m e -1 m dopo 10 anni di simulazione.

Le elaborazioni numeriche con riferimento alla configurazione di progetto hanno inoltre evidenziato che il bilancio complessivo sedimentario, tra volumi accumulati nel tratto in accrescimento e persi in quello in arretramento, non subisce variazioni apprezzabili rispetto alla configurazione di stato attuale.

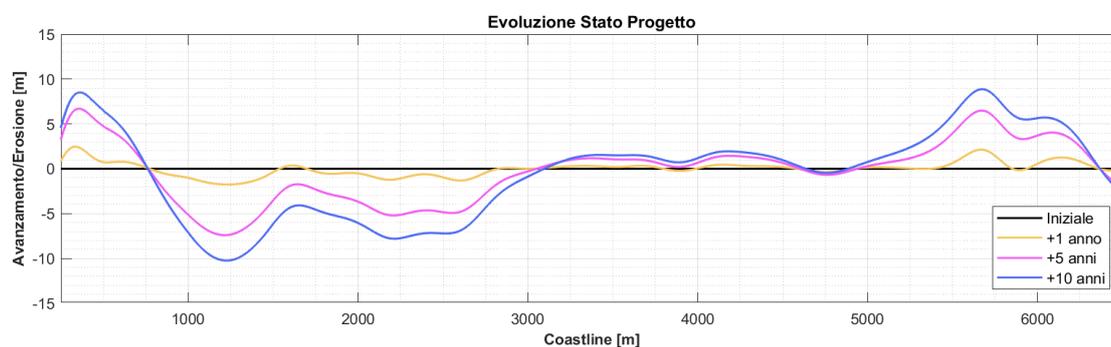


Figura 7-10 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione di progetto “layout nuovo”



Figura 7-11 Evoluzione della linea di riva nel tratto di maggiore arretramento (sopra) e maggiore avanzamento (sotto) con riferimento alla configurazione di progetto "layout nuovo"

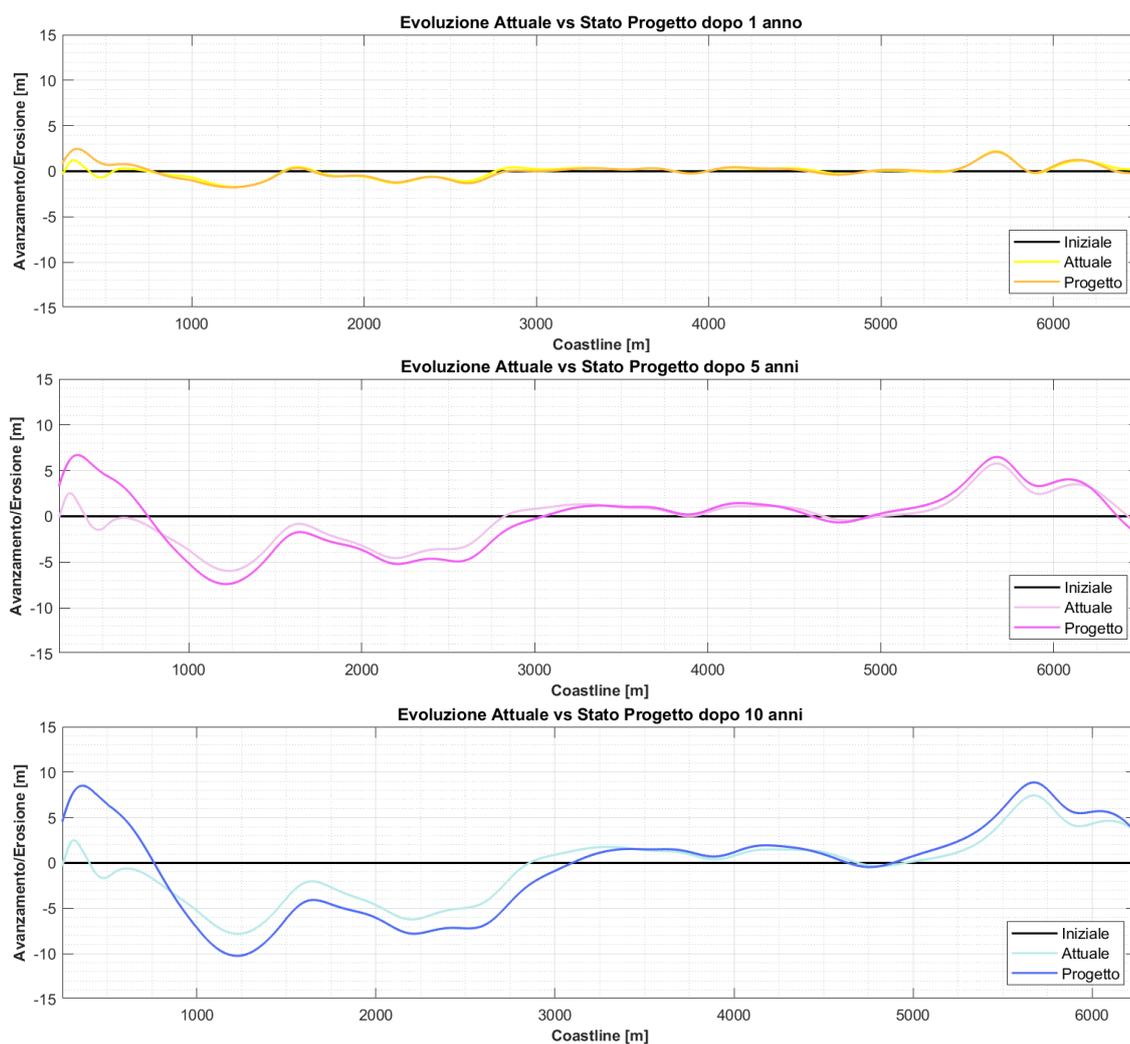


Figura 7-12 Confronto dell'evoluzione della linea di riva tra configurazione attuale e di progetto "layout nuovo" dopo 1 anno, 5 anni e 10 anni

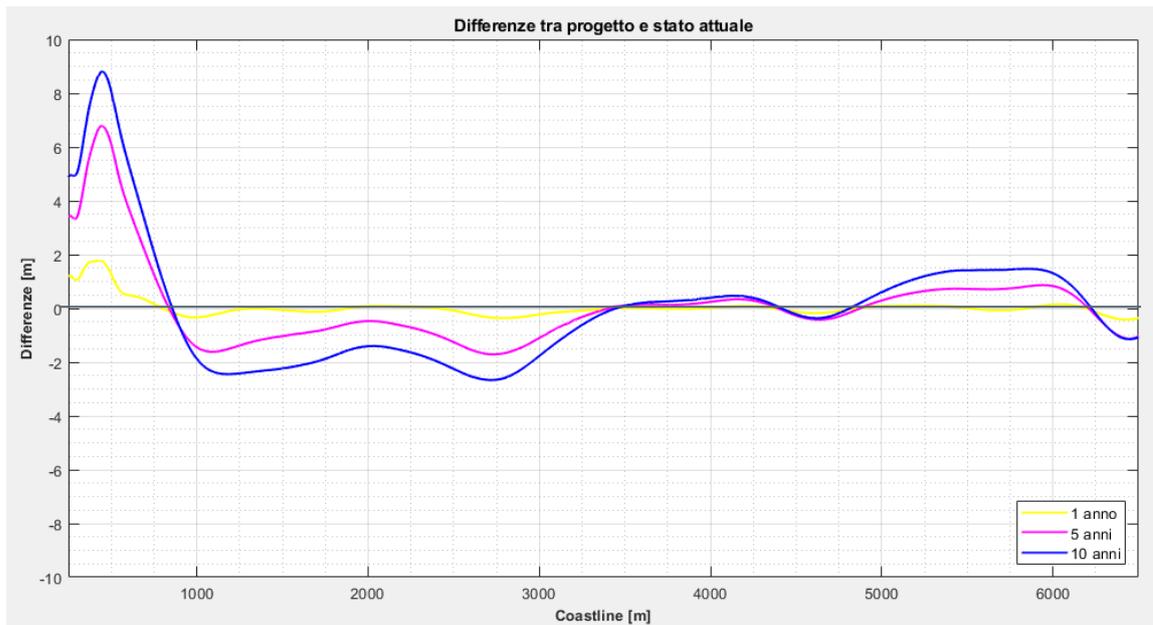


Figura 7-13 Differenze tra evoluzione della linea di riva nella configurazione di progetto "layout nuovo" ed in quella di stato attuale

In Figura 7-9 è riportato l'andamento del trasporto litoraneo per l'intero tratto di costa interessato con riferimento sia alla configurazione di stato attuale, già trattato alla sezione 7.2, sia a quella di progetto nella configurazione con il nuovo layout (valori positivi del trasporto indicano che questo è diretto verso Nord).

Si può affermare che nella configurazione di progetto, relativa al nuovo layout, l'andamento del trasporto risulta molto simile a quello in configurazione attuale. Le differenze si apprezzano fino a circa 4000 m a Nord della foce dello Scolmatore. Nello specifico, l'effetto di schermatura dal moto ondoso dovuto alla presenza della Darsena Europa, nella nuova configurazione progettuale, determina una riduzione dei valori del trasporto, che progressivamente tende ad annullarsi procedendo verso Nord. Nel tratto compreso tra la foce e circa 1500 m a Nord i valori del trasporto nella configurazione di progetto risultano negativi, ovvero tale tratto è caratterizzato da un trasporto diretto verso Sud. L'impatto risulta sicuramente maggiore in caso di realizzazione della Darsena Europa secondo il nuovo layout proposto rispetto a quanto visto per il layout vecchio.

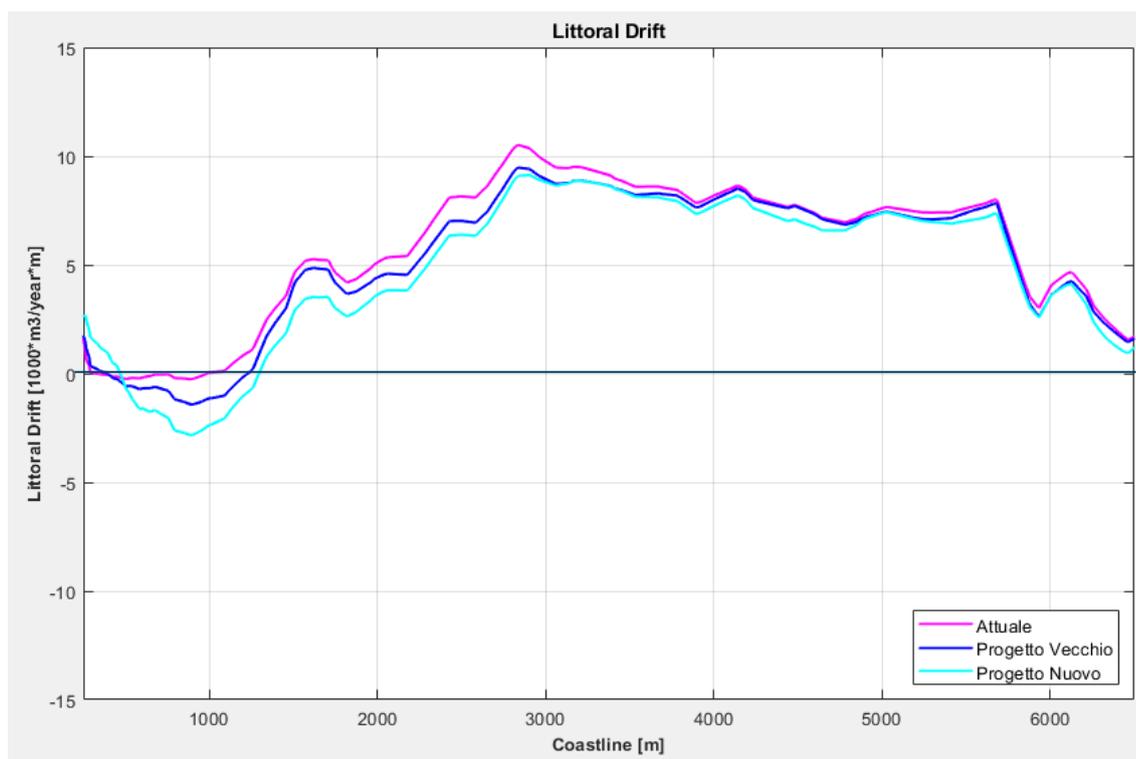


Figura 7-14 Trasporto long-shore in riferimento alla configurazione di stato attuale (linea magenta) e di progetto (linee blu). Valori positivi del trasporto indicano che questo è diretto verso Nord

8 Sintesi dello studio e conclusioni

L'elaborato si pone l'obiettivo di illustrare l'aggiornamento dei modelli numerici e delle analisi condotte nelle precedenti Fasi 1 e 2 in relazione alla nuova configurazione di progetto della Darsena Europa. Tale configurazione, presentata nell'ambito di una revisione del Progetto Definitivo (Ottobre 2022) e resasi necessaria a seguito dei risultati della caratterizzazione dei sedimenti, risulta significativamente diversa rispetto a quella analizzata nei precedenti studi di DHI.

Nello specifico, si è proceduto all'aggiornamento del modello di propagazione del moto ondoso largo-costa ed alla conseguente quantificazione delle differenze nel clima ondoso tra configurazione attuale e di progetto (sia in riferimento al vecchio che al nuovo layout). Tale attività, che ha riguardato il calcolo delle caratteristiche energetiche del moto ondoso in sette punti (C1-C7) lungo il tratto di costa in riferimento al nuovo layout ha permesso di concludere quanto segue:

- la realizzazione delle opere in progetto determina una riduzione non trascurabile dell'energia associata alle ondate provenienti da Sud-Ovest limitatamente ai punti C1 e C2 immediatamente a nord dello scolmatore;
- 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° per la configurazione nuova e pari a circa 12° per quella vecchia;
- il clima ondoso nel punto C2 risulta solo lievemente influenzato dalla realizzazione delle opere di progetto. La differenza tra le direzioni della risultante energetica di stato attuale e progetto è inferiore a 2° per la configurazione vecchia e di poco superiore ai 2° per la configurazione nuova;

- il clima ondoso nei punti C3-C7 non risulta influenzato significativamente dalle opere di progetto (sia in riferimento allo scenario nuovo che a quello vecchio) in quanto la differenza tra le direzioni della risultante energetica (tra stato attuale e progetto) è pressoché nulla.

Successivamente è stato condotto l'aggiornamento del modello per il calcolo del trasporto litoraneo in riferimento al clima ondoso relativo al nuovo layout di progetto e limitatamente ai punti C1-C2. I risultati ottenuti dalle simulazioni hanno permesso di stimare l'andamento del trasporto longshore medio annuo (lordo, netto) lungo i profili analizzati e di confrontarlo con i risultati relativi allo stato attuale e al layout vecchio. Le risultanze di tale attività possono essere così sintetizzate:

- 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.
- In riferimento allo scenario di progetto, nella configurazione di layout vecchio, 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.
- In riferimento allo scenario di progetto, nella configurazione di layout nuovo, il trasporto netto medio annuo risulta diretto debolmente verso sud (15'100 m³/anno) nel punto C1, mentre risulta diretto verso nord (21'100 m³/anno) nel punto 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 2 km 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. L'impatto risulta sicuramente maggiore in caso di realizzazione della Darsena Europa secondo il nuovo Layout proposto rispetto a quanto osservato per il layout vecchio.

In ultimo si è proceduto con l'aggiornamento del modello di evoluzione della linea di riva in riferimento al clima ondoso relativo al nuovo layout di progetto. Le risultanze di tale analisi sono riportate di seguito:

- la realizzazione della Darsena Europa determina un effetto di schermatura per il litorale immediatamente a Nord, che si concretizza in un maggiore avanzamento, rispetto alla configurazione di stato attuale, nei primi 1000 m circa a Nord del pennello di foce. L'incremento di tale avanzamento risulta essere pari a circa 2 m, 6 m e 9 m rispettivamente dopo 1 anno, 5 anni e 10 anni;
- il tratto di costa da circa 1000 m a circa 3000 m a Nord del pennello di foce risulta viceversa caratterizzato da un arretramento maggiore rispetto alla configurazione attuale: dopo 1 anno le differenze non risultano apprezzabili, mentre la variazione è quantificabile fino ad un massimo di 2 m dopo 5 anni e di 3 m dopo 10 anni;
- proseguendo ulteriormente verso Nord, il litorale risulta invece caratterizzato da un'alternanza di tratti in cui la linea di costa nella configurazione di progetto è più avanzata rispetto a quella di stato attuale e viceversa. Tali oscillazioni sono comunque comprese tra +1 m e -1 m dopo 10 anni di simulazione.

L'analisi dell'evoluzione della linea di riva ha dimostrato che la realizzazione della Darsena Europa nella nuova configurazione di progetto determina un impatto sicuramente maggiore rispetto a quanto osservato per il vecchio layout.

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.

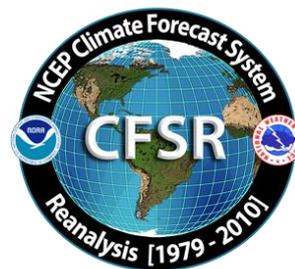


Figure A.1

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° 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.

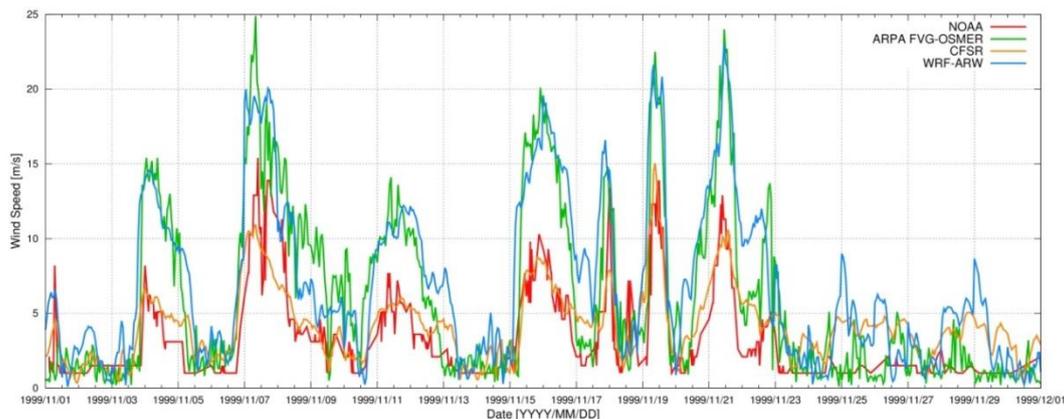


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(<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:

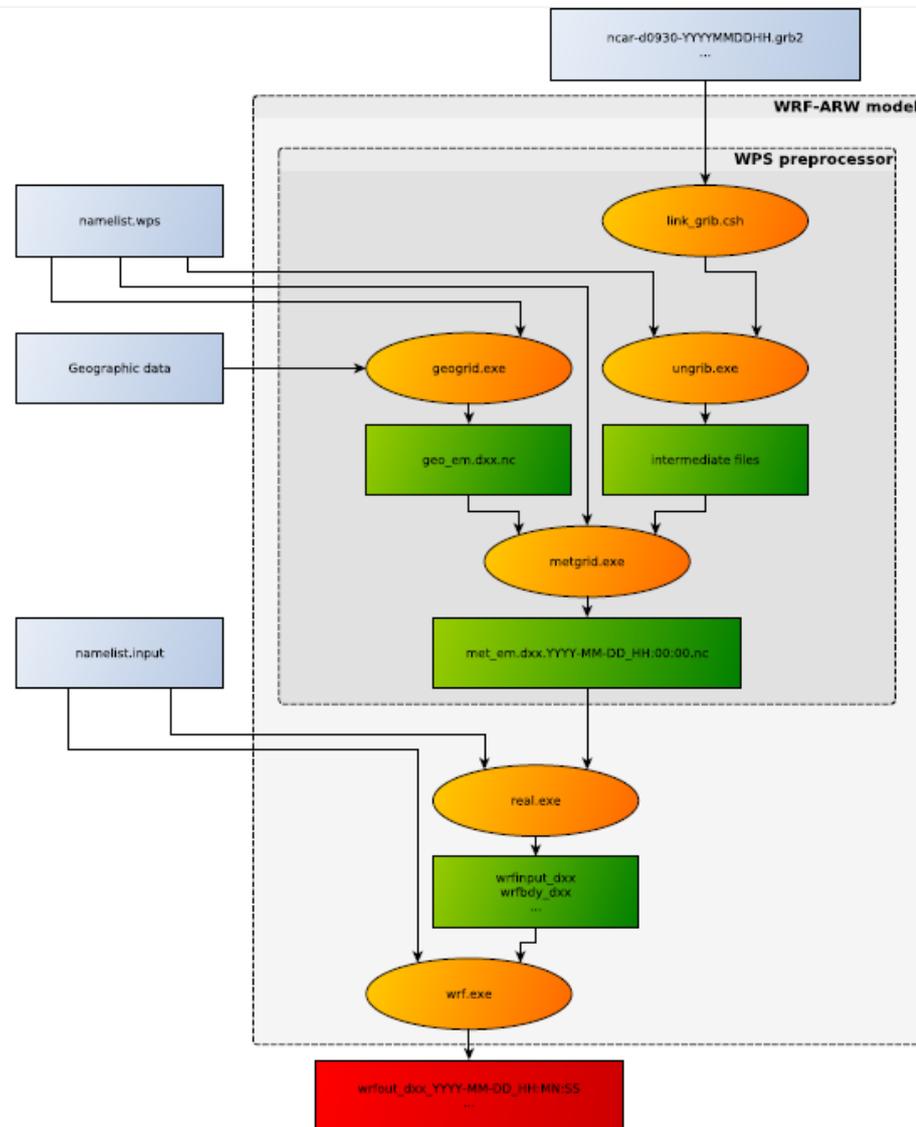


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

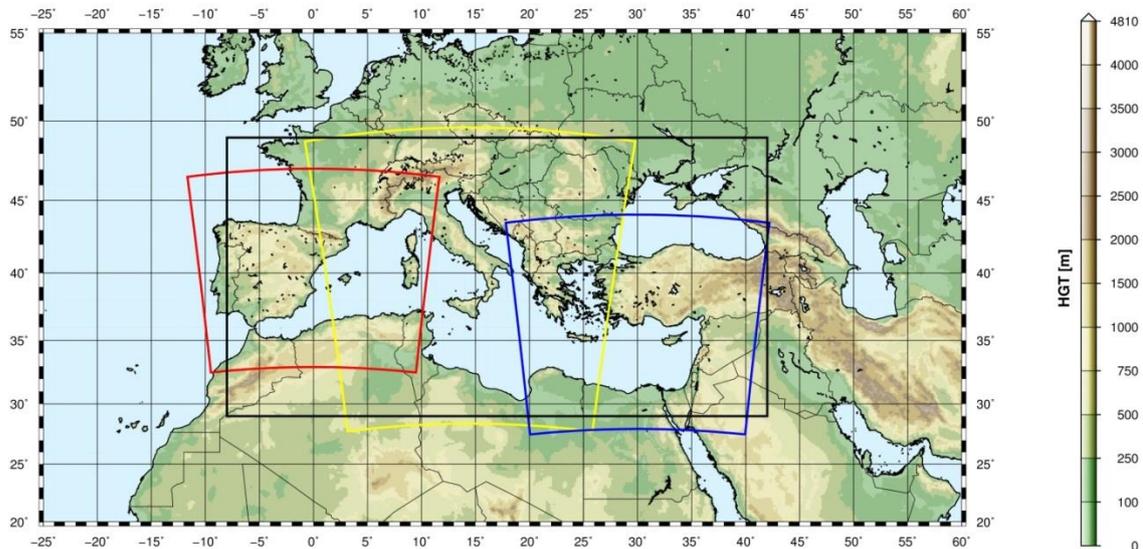


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

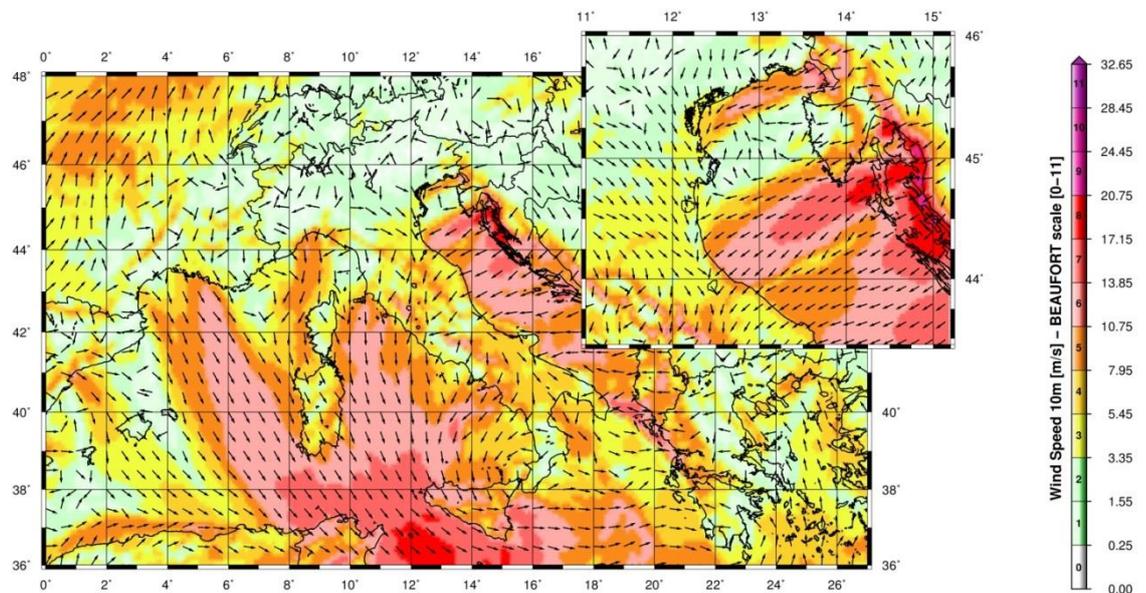


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

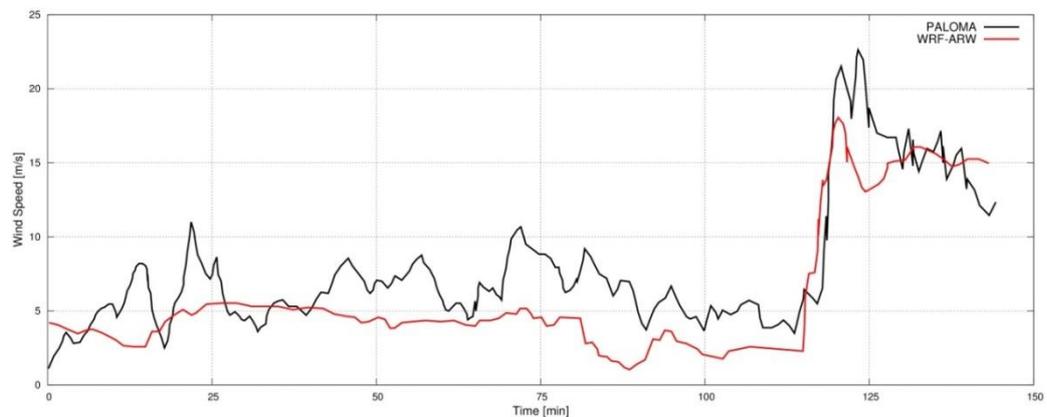


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black 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 U10 and V10, (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° , when approaching the coast the spatial resolution increases up to around 0.03° .

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.

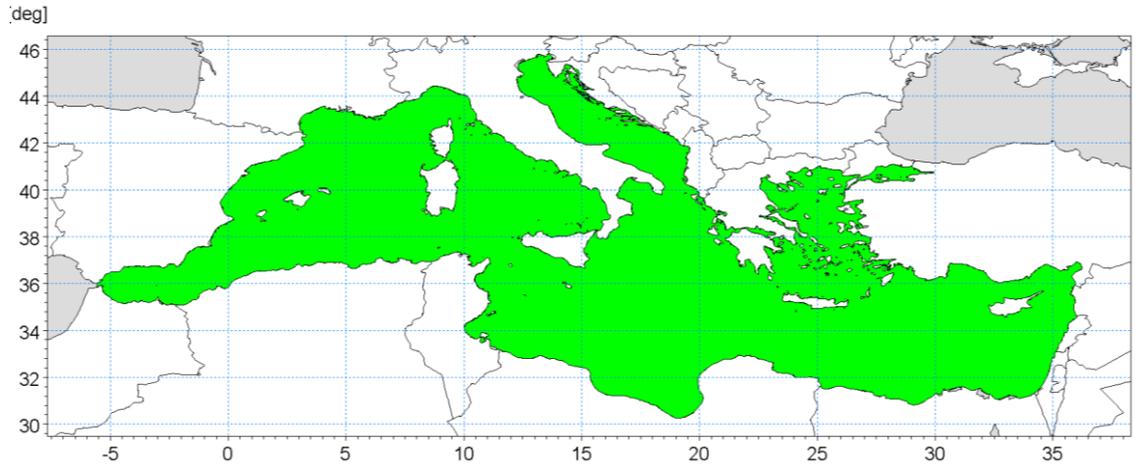


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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° (about 10 Km) is used for offshore areas;
- a finer resolution of 0.03° (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.

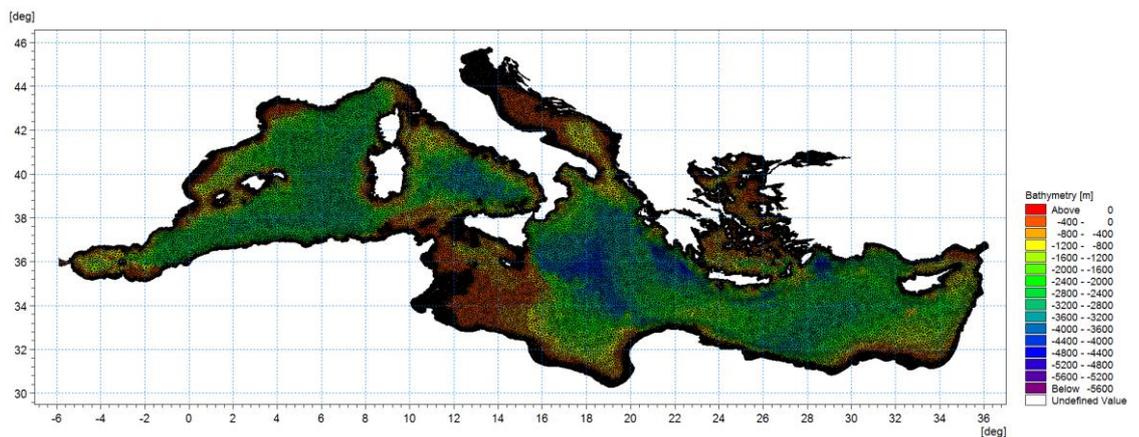


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

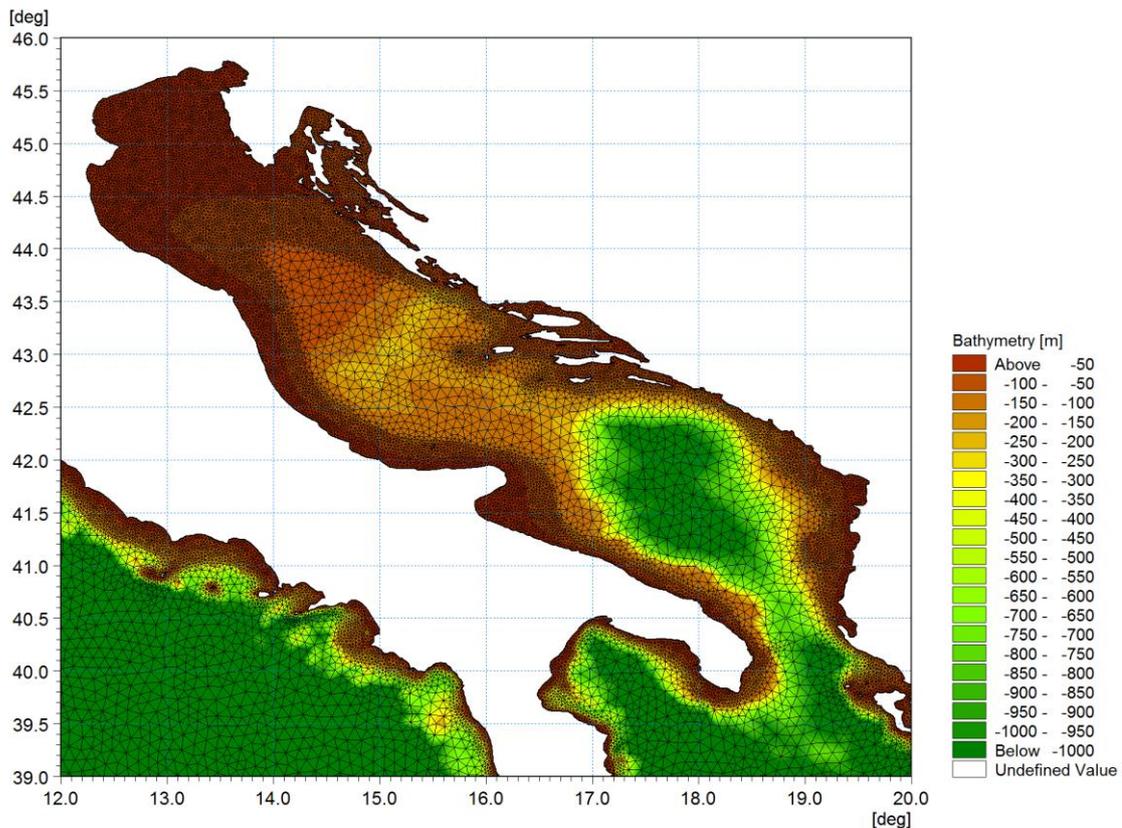


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

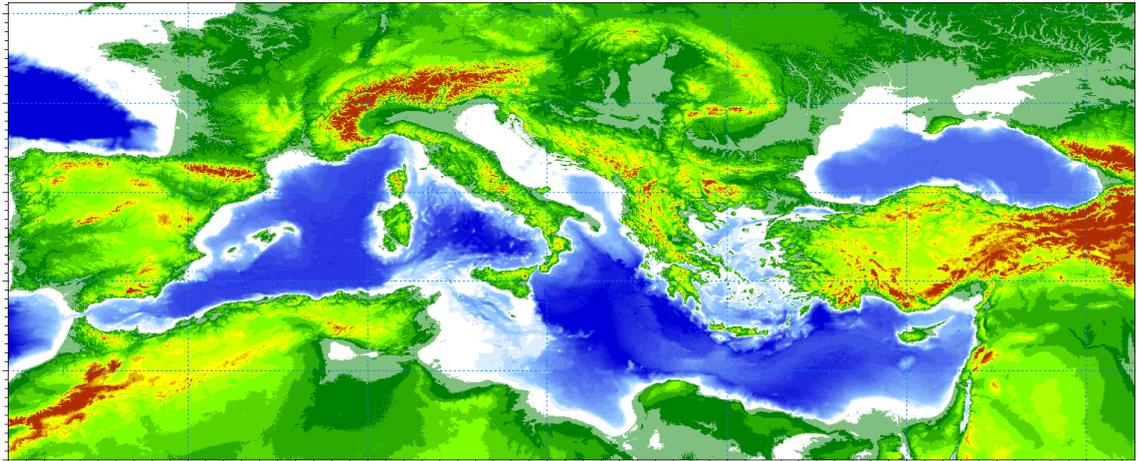


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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 $360^\circ/24 = 15^\circ$

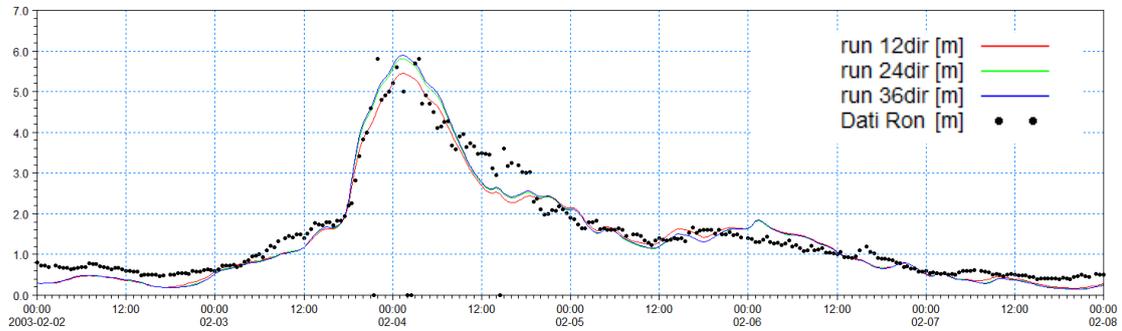


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

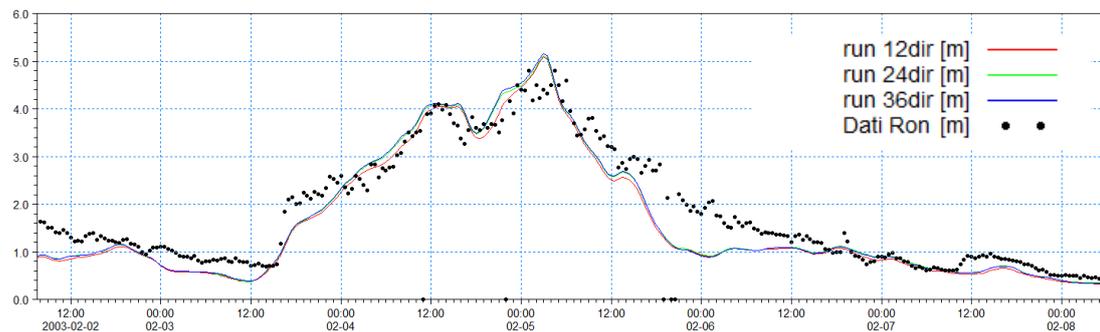


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

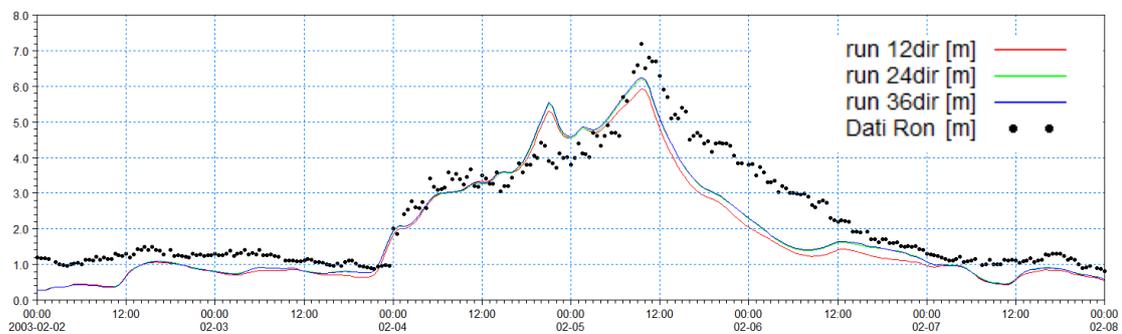


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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° .

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.

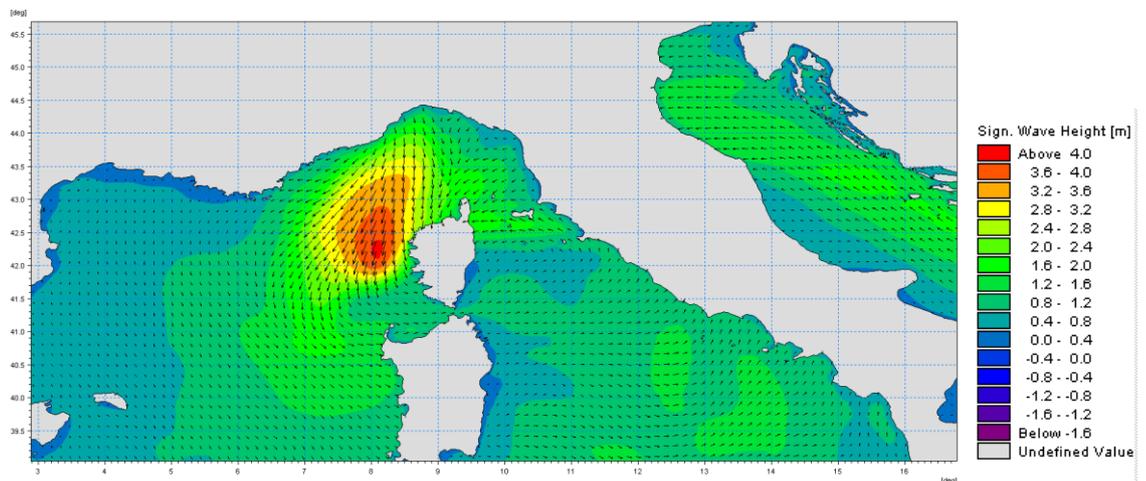


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

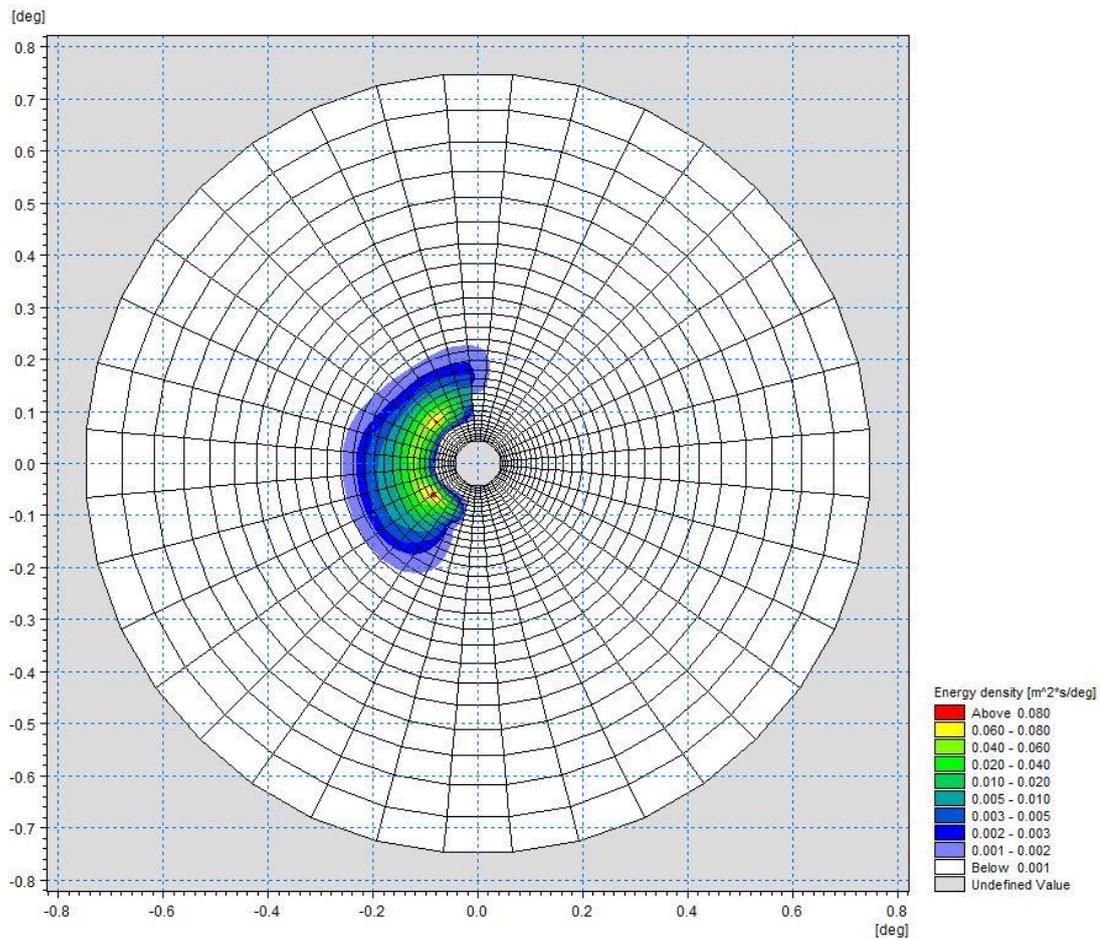


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

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, 16th 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 21th 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.

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 9th 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 11th 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/), 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

Queffeuou, P., 2009, Altimeter Wave Height Measurements - Validation of Long Time Series. Poster: Ocean Surface Topography Science Team meeting, Seattle, Washington, USA. (<http://www.aviso.oceanobs.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 29th 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

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 29th 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

CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - 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:

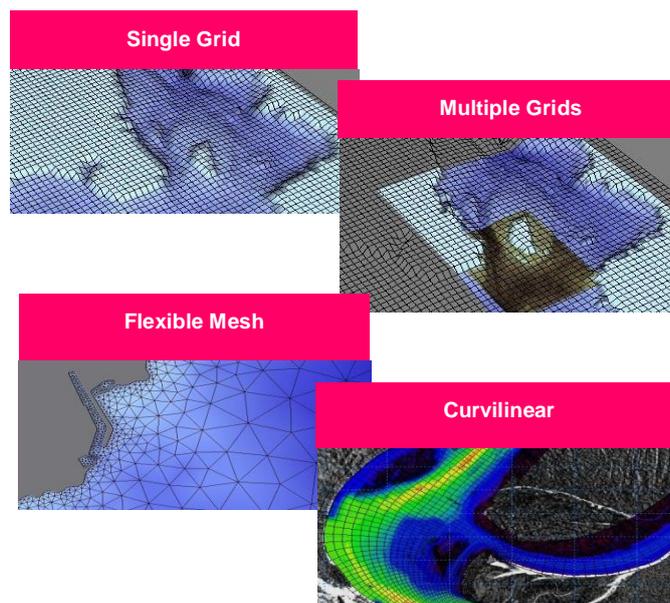
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo 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.

Breve descrizione dei moduli MIKE 21	
Modulo	Descrizione
PP (Pre and Post Processing)	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.
HD (Hydrodynamics)	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.
AD (Advection – Dispersion)	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.
ST (Sand Transport)	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.
MT (Mud Transport)	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.
SM (Shoreline Morphology)	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.
OS (Oil Spill)	Simula la dispersione ed il trasporto di sostanze oleose in corpi idrici, considerandone i processi di trasformazione e decadimento.
PA/PT (Particle Tracking)	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.
SW (Spectral Waves)	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.
BW (Boussinesq Wave)	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.
MA (Mooring Analysis)	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.
ECOLab (Ecological Modelling)	Modulo avanzato per lo studio della qualità delle acque ed idro - ecologia in presenza di reazioni, decadimenti complessi, eutrofizzazione e trasporto di metalli pesanti.
ABMLab	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.

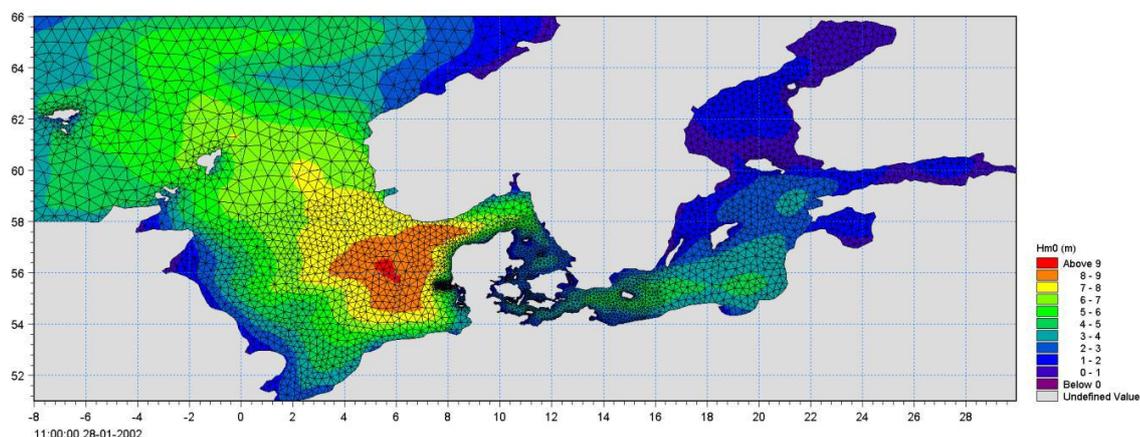
Il modello, nella formulazione “fully spectral”, include i seguenti fenomeni fisici:

- 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, θ, σ) . 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 θ , 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” (Holthuijsen 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:

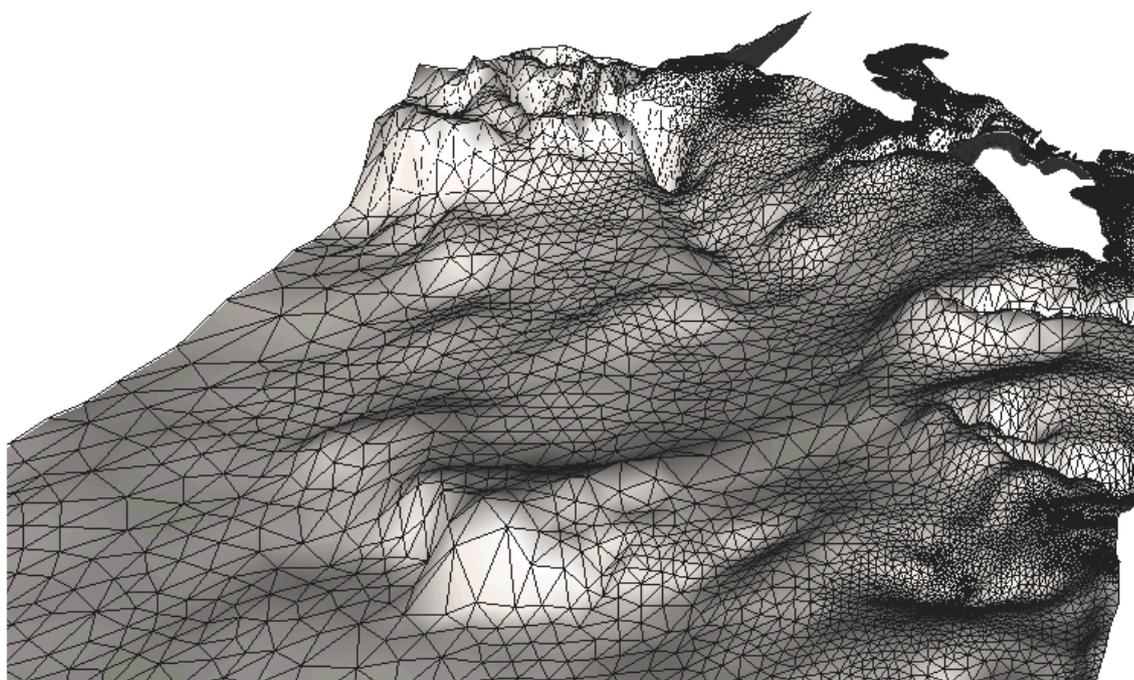
$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega$$

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.

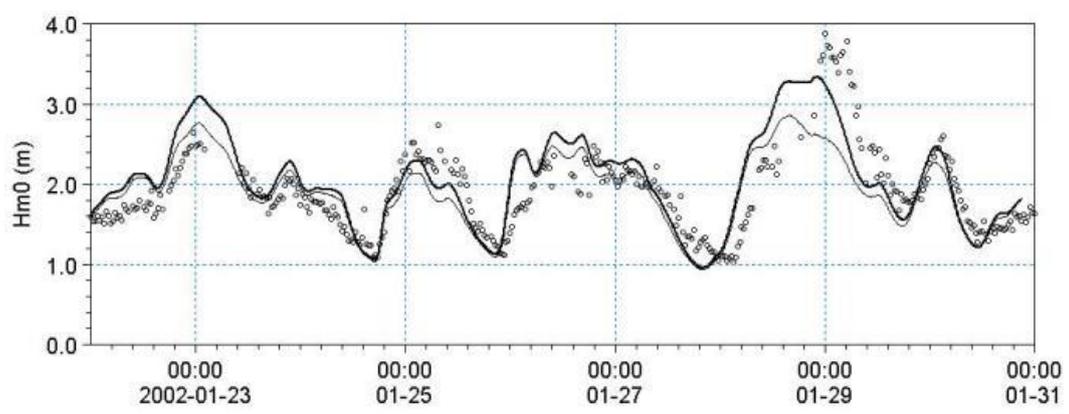
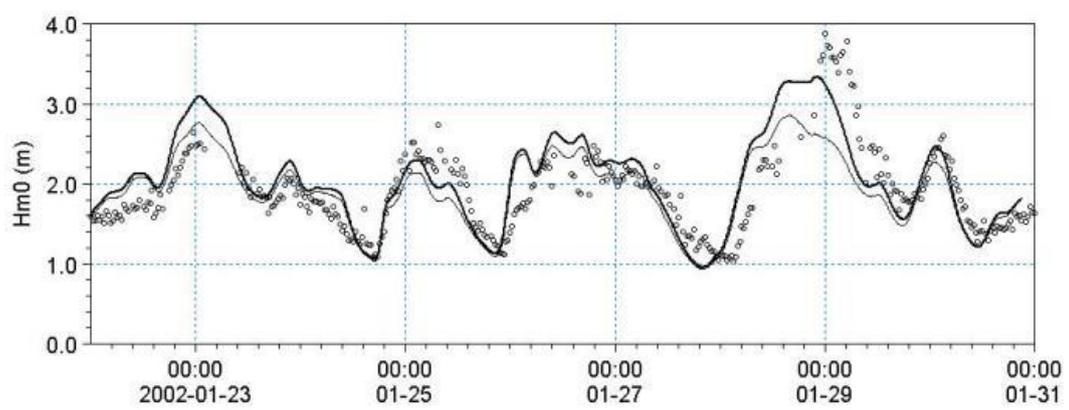
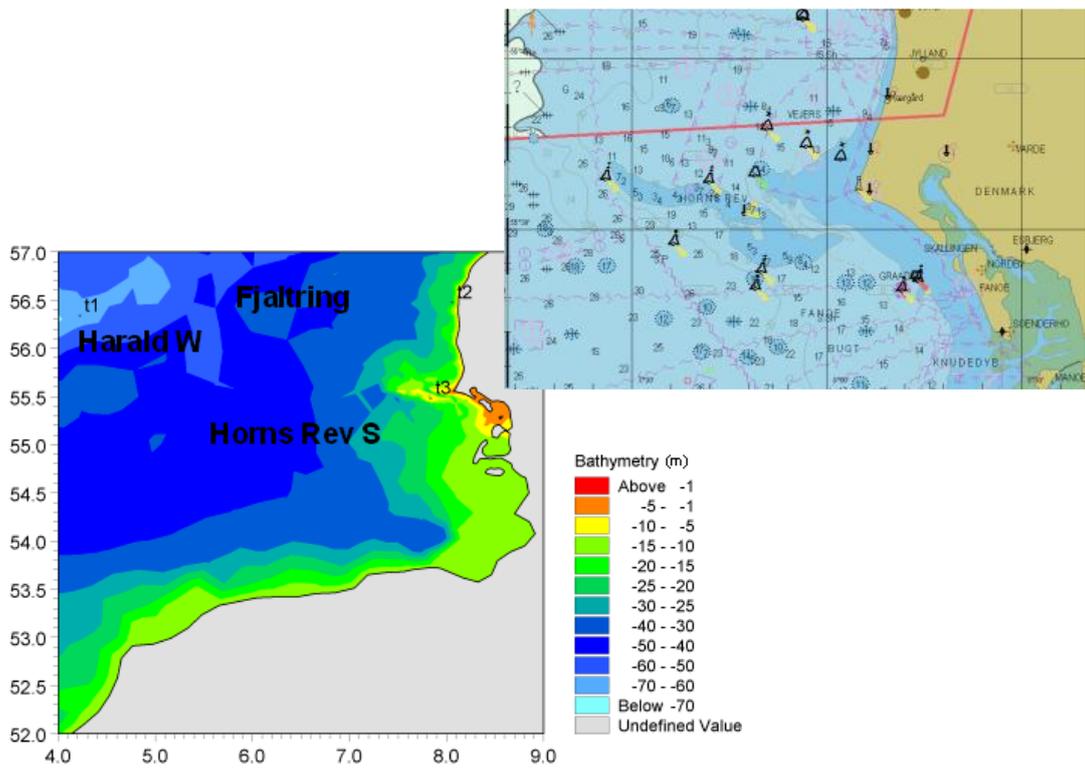
La discretizzazione nel dominio temporale è fatta mediante time-steps, la propagazione della "wave action" è fatta attraverso un metodo esplicito in multi frequenza.



INPUT AL MODELLO

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

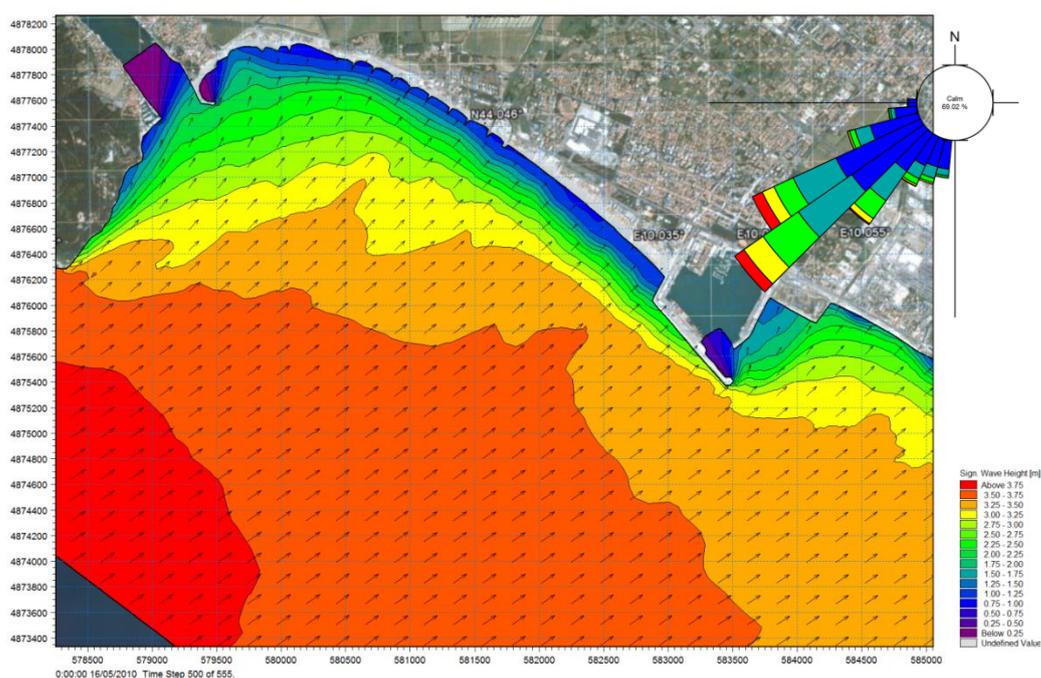
- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- scelta del tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, white-capping, attrito al fondo);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



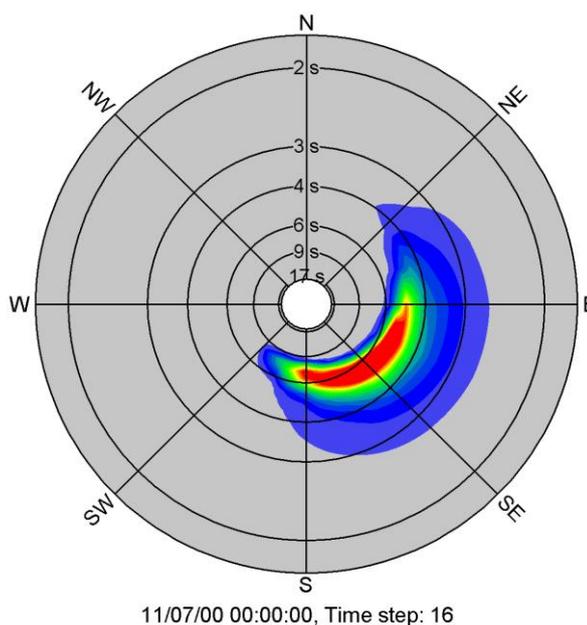
OUTPUT DEL MODELLO

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 σ , 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
Littoral Process
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
4	LITLINE	5

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.

Breve descrizione dei moduli LITPACK	
Modulo	Descrizione
PP (Pre and Post Processing)	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.
STP	E' il modulo di base per il calcolo puntuale della capacità di trasporto solido di materiale non coesivo per effetto di onde e correnti.
LITDRIFT	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.
LITLINE	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, θ . 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

ε_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 ε 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

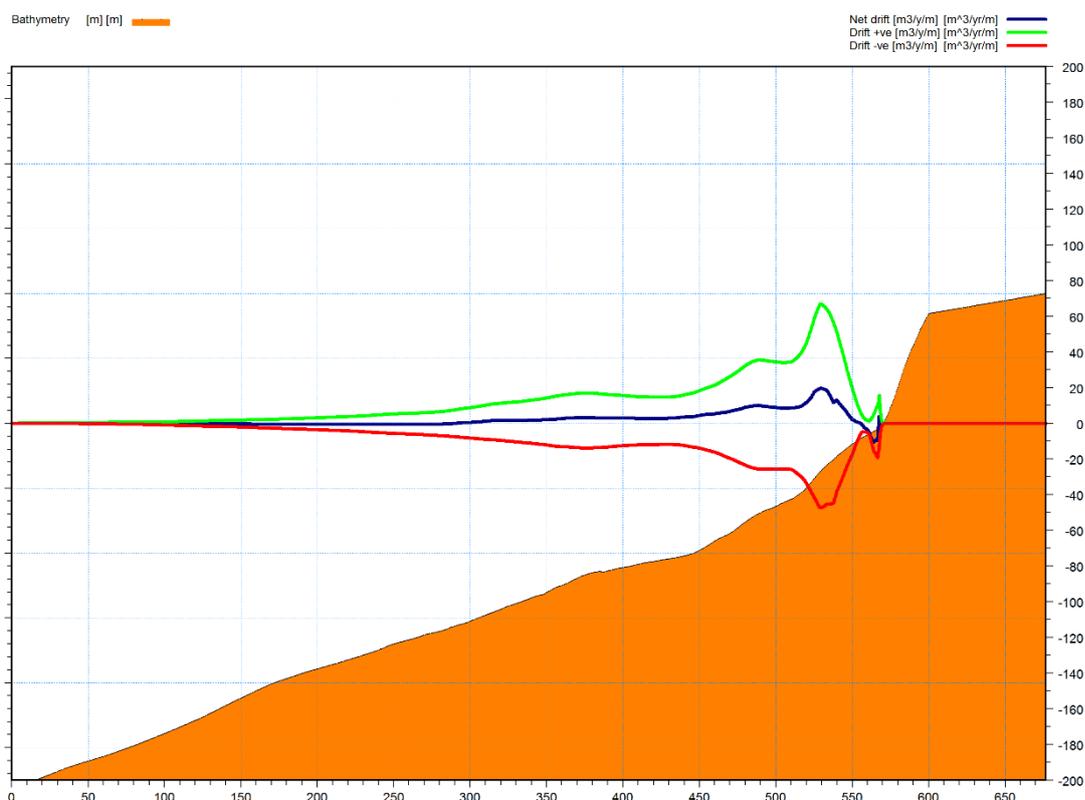
LITDRIFT è un modello numerico per il calcolo deterministico del trasporto solido long-shore lungo un profilo di costa trasversale, si compone essenzialmente di due parti:

- 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

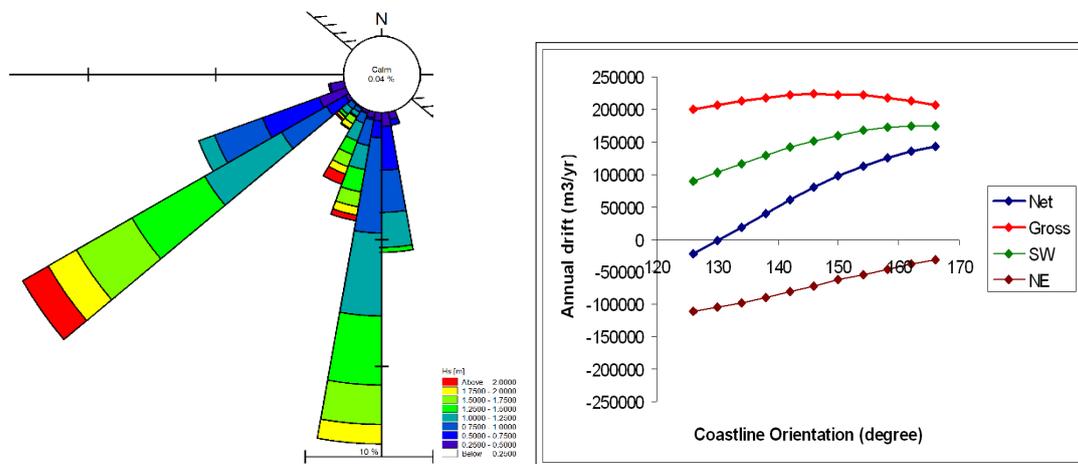
Il modello richiede in input:

- 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.



4 LITLINE

LITLINE è il modulo per lo studio dell'evoluzione della linea di costa sul lungo periodo e rappresenta uno strumento particolarmente utile per il supporto alla progettazione e l'ottimizzazione di diverse opere costiere.

Sulla base dei risultati di LITDRIFT, calcolati in diverse sezioni, LITLINE simula gli effetti sulla costa dei gradienti del trasporto solido litoraneo. L'evoluzione della linea di costa viene calcolata risolvendo l'equazione di continuità dei sedimenti.

$$\frac{\partial y_c}{\partial t} = -\frac{1}{h_{act}} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{Q_{sou}}{h_{act} \Delta x}$$

dove:

y_c = distanza dalla *baseline*;

h_{act} =profondità di chiusura;

Q = trasporto *long-shore* espresso in volume;

x = posizione nella direzione *long-shore*;

Q_{sou} = termine legato agli eventuali apporti puntuali o distribuiti di sedimento.

L'equazione viene risolta utilizzando la tecnica delle differenze finite. LITLINE permette di introdurre nel calcolo sia l'effetto di strutture (come ad esempio: pennelli, rivestimenti e scogliere) sia l'effetto di eventuali apporti puntuali o distribuiti di sedimento.

INPUT DEL MODELLO

Il modello richiede in input:

- posizione della linea di costa rispetto alla *baseline* con informazioni relative alla profondità di chiusura, posizioni di eventuali dune etc.
- profili trasversali di batimetria;
- clima ondoso: altezza, periodo e direzione dell'onda;
- livelli e eventuali correnti di marea;
- posizione e dimensioni di eventuali strutture.

OUTPUT DEL MODELLO

Il modello fornisce in output la posizione della linea di riva ad ogni istante, i tassi di trasporto solido longshore ed i volumi di bypass o depositati.

