

## RAPPORTO TECNICO

### STUDIO IDRODINAMICO E MORFOLOGICO COSTIERO A CORREDO DEL PROGETTO DI AMPLIAMENTO DEL PORTO TURISTICO DI PORTO ROTONDO (OT) MEDIANTE MODELLISTICA NUMERICA. – INTEGRAZIONI ALLO STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE RICHIESTE DAL SAVI A SEGUITO DELLA CONFERENZA ISTRUTTORIA PROT. N° 25712 DEL 3 DICEMBRE 2009



#### SIMULAZIONI EFFETTUATE CON IL CODICE DI CALCOLO

**MIKE21 – NEAR SHORE SPECTRAL WIND-WAVES**

**MIKE21 – PARABOLIC MILD SLOPE WAVES**

**MIKE21 – FLOW MODEL**

**MIKE21 – NON-COHESIVE SEDIMENT TRANSPORT**

**MIKE21 – ADVECTION DISPERSION**

PROGETTAZIONE:



MED INGEGNERIA S.r.l.  
sede legale:  
via Kennedy, 37  
44100 FERRARA  
unità operativa 4:  
via Marche, 22  
09127 CAGLIARI  
tel./fax. +39 070 480309  
www.medingegneria.it

Cagliari, marzo 2010

COMMESSA MED424

REDATTO DA:

**dott. ing. Stefano PONTI**

ORDINE INGEGNERI PROVINCIA DI CAGLIARI N. 4899

VERIFICATO DA:

**dott. ing. Paola LETIZIA**

ORDINE INGEGNERI PROVINCIA DI GENOVA N. 8807A

APPROVATO DA:

**dott. ing. Marco GONELLA**

ORDINE INGEGNERI PROVINCIA DI TORINO N. 7387K



**INDICE**

1. PREMESSA.....	4
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO.....	5
3. DESCRIZIONE DELLE CONFIGURAZIONI PROGETTUALI.....	6
4. RICOSTRUZIONE DEL MOTO ONDOSO.....	8
4.1 Ricostruzione dai dati del modello.....	8
4.2 Ricostruzione del moto ondoso dai dati di vento.....	13
4.2.1 Metodo SMB per la ricostruzione del moto ondoso.....	16
4.2.2 Clima ondoso medio annuo ricostruito.....	19
5. PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO DA LARGO VERSO RIVA.....	21
5.1 Applicazione del modulo NSW.....	21
5.2 Risultati del MIKE21 NSW.....	25
5.3 Determinazione delle onde morfologicamente equivalenti.....	29
6. VALUTAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI E DEL TEMPO DI RITORNO.....	33
6.1 Periodo di ritorno dell'onda di progetto.....	33
6.2 Analisi statistica degli eventi estremi.....	34
6.3 Propagazione degli eventi estremi dal largo a riva.....	37
6.4 Analisi dei risultati degli eventi estremi.....	46
7. PROPAGAZIONE DELLE ONDE MORFOLOGICAMENTE EQUIVALENTI DAL LARGO A RIVA.....	47
7.1 Analisi dei risultati degli della propagazione del moto ondoso.....	48
8. CIRCOLAZIONE IDRAULICA INDOTTA DAL MOTO ONDOSO.....	55
8.1 Applicazione del MIKE 21 HD.....	55
8.2 Analisi dei risultati del modello idrodinamico.....	56
9. TRASPORTO SOLIDO BIDIMENSIONALE.....	66
9.1 Applicazione del MIKE 21 ST.....	66
9.2 Analisi dei risultati del modello Sediment Transport.....	67
10. DETERMINAZIONE DEI CAMPI DI CONCENTRAZIONE DI SOSTANZE INQUINANTI DIFFUSE NELL'AMBIENTE E PROPAGATE DALLE CORRENTI MARINE ...	86
10.1 Applicazione del MIKE 21 AD.....	86
10.2 Analisi dei risultati del modello di dispersione.....	87
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	95
APPENDICE A:.....	98
A. DESCRIZIONE DEL MIKE 21 NSW, PMS, HD, ST E AD.....	99



A.1	MIKE 21 – NSW .....	100
A.2	MIKE 21 – PMS .....	104
A.3	MIKE 21 – HD.....	106
A.4	MIKE21 – ST .....	110
A.5	MIKE21 – AD .....	119



## 1. PREMESSA

In data 17/10/2008 la scrivente Società ha ricevuto l'incarico dalla Società Marina di Porto Rotondo S.r.l. per effettuare uno studio meteo marino tramite modellazione numerica che evidenzi gli eventuali impatti sul trasporto solido derivanti dalla realizzazione delle opere previste in progetto (allungamento di un pennello, allargamento dell'imboccatura del porto, dragaggio e banchinamento) per poterne valutare l'interferenza con la spiagge adiacenti.

A seguito della Conferenza Istruttoria, tenutasi presso l'Assessorato regionale della Difesa Ambientale in data 12/11/2009, il Servizio Sostenibilità ambientale, valutazione impatti o sistemi informativi ambientali (SAVI), ha richiesto delle integrazioni a quanto presentato.

Nella presente relazione si sono esaminati gli aspetti richiesti dal SAVI per quanto di competenza della scrivente.

La metodologia operativa del presente studio prevederà innanzitutto la ricostruzione del moto ondoso nel paraggio a largo del sito oggetto dello studio secondo la metodologia più affidabile e l'utilizzo dei dati più recenti ed il confronto con altre metodologie di ricostruzione. Successivamente verranno individuate le onde morfologicamente equivalenti e saranno esaminati gli eventi estremi relativi al tempo di ritorno scelto. Verrà fatta quindi una stima del moto ondoso sottocosta ed una valutazione delle correnti e del trasporto solido alla luce dei nuovi rilievi batimetrici (febbraio 2010) e sedimentologici (marzo 2010); infine sarà valutata la qualità delle acque nell'area portuale e nell'adiacente spiaggia di Rudalza. Lo studio è stato eseguito per la situazione attuale e per le cinque configurazioni di progetto richieste.

Il codice di calcolo utilizzato per le modellazioni è il MIKE21 sviluppato dal Danish Hydraulic Institute.





## 2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO

Il porto di Porto Rotondo è situato nell'intorno del punto di coordinate geografiche  $41^{\circ}01.1' N$  e  $9^{\circ}32.7' E$ . Si trova nella costa nord-orientale della Sardegna a circa 15 km a Nord di Olbia. È ubicato in una piccola insenatura all'interno del Golfo di Cugnana tra Punta Nuraghe e Punta Volpe (Figura 1) ed è esposto prevalentemente ad eventi provenienti dal primo Quadrante.



Figura 1 – Particolare della carta 1:25'000 del golfo di Congianus



### 3. DESCRIZIONE DELLE CONFIGURAZIONI PROGETTUALI

Al fine di poter valutare l'interferenza che le opere in progetto possono generare nei confronti dell'idro-morfodinamica costiera, influenzando le correnti, il trasporto litoraneo dei sedimenti e la qualità delle acque nelle spiagge adiacenti le zone d'intervento, sono state studiate le 5 configurazioni richieste in fase di procedura di V.I.A. e sono state messe a confronto con la situazione attuale (Figura 2).



Figura 2 – Situazione attuale

Le configurazioni studiate hanno le seguenti caratteristiche:

- configurazione attuale: alternativa di non intervento (Figura 2);
- configurazione 1: alternativa con pennello allungato di 80 m, allargamento dell'imboccatura portuale, banchinamento lato Ovest e dragaggio della zona antistante;
- configurazione 2: alternativa con pennello allungato di 40 m, allargamento dell'imboccatura portuale, banchinamento lato Ovest e dragaggio della zona antistante;
- configurazione 3: alternativa allargamento dell'imboccatura portuale;
- configurazione 4: alternativa con allargamento dell'imboccatura portuale, banchinamento lato Ovest e dragaggio della zona antistante;
- configurazione 5: alternativa con barriera sommersa di 80 m, allargamento dell'imboccatura portuale, banchinamento lato Ovest e dragaggio della zona antistante.

Nelle fotografie successive è rappresentata la zona da banchinare antistante la quale è previsto un dragaggio (Foto 1), il pennello esistente del quale è in progetto l'allungamento (Foto 2) e la spiaggia di Rudalza adiacente il porto lato Ovest (Foto 3).



Foto 1 – Zona da banchinare antistante la Direzione Portuale



Foto 2 – Pennello da prolungare situato a Nord-Est dell'imboccatura portuale



Foto 3 – Vista della spiaggia Rudalza





## 4. RICOSTRUZIONE DEL MOTO ONDOSO

I dati di moto ondoso possono sostanzialmente essere ottenuti in quattro modi differenti:

- con misurazioni delle boe ondametriche;
- con la ricostruzione dai dati di vento;
- con rilevazioni satellitari;
- con ricostruzioni dai modelli numerici.

Fra tutti questi quelli che forniscono una più vasta mole di risultati sono i modelli che operano presso i maggiori centri meteo-oceanografici. Le limitazioni dovute all'accuratezza devono essere compensate mediante la taratura dalle misurazioni dal satellite.

Le ricostruzioni dai dati di vento vengono ormai utilizzate quando non si hanno ulteriori dati a disposizione. Questa metodologia infatti risente fortemente dell'orografia del sito, dell'ampiezza temporale dei dati ed è limitativa per i fetch estesi.

I dati delle boe sono i più precisi ma nella maggior parte dei casi non si ha una boa nel paraggio d'interesse ed inoltre non hanno un funzionamento sufficientemente lungo da garantire un corretto utilizzo dei dati. Nel caso in esame la boa più vicina è quella installata a Capo Comino che ha funzionato esclusivamente tra il 01/01/2004 e il 12/09/2005.

### 4.1 Ricostruzione dai dati del modello

La procedura per calibrare i dati del modello prevede l'utilizzo dei dati delle boe per validare i dati del satellite e successivamente l'utilizzo di questi ultimi per calibrare il modello.

I dati di satellite hanno raggiunto un'accuratezza paragonabile ai dati delle boe (Figura 3). In seguito al confronto dei dati dei satelliti (TOPEX o ESR 1-2) con i risultati ottenuti con il modello di generazione del moto ondoso (WAM), operativo presso il ECMWF (Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Termine), è stata evidenziata la necessità di calibrare i dati del modello, soprattutto nel Mar Mediterraneo (Figura 4).



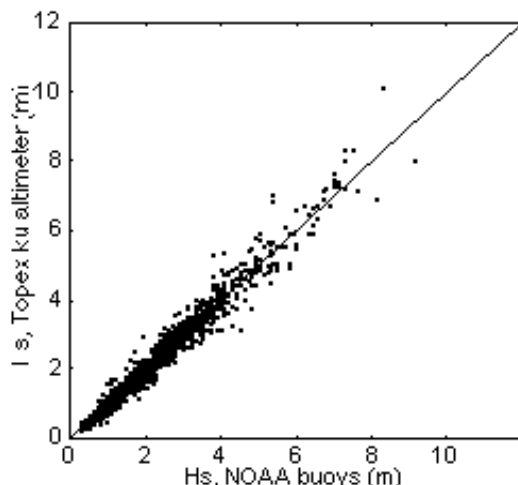


Figura 3 - Confronto delle altezze significative ottenute dal Topex e le boe NOAA per 1.365 eventi concomitanti (da Krogstad and Barstow, 1999)

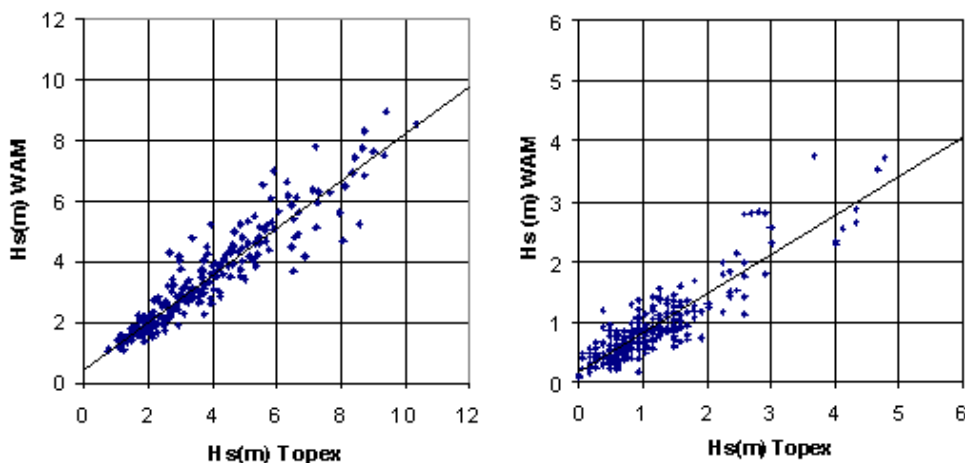


Figura 4 - Confronto tra le altezze significative calcolate dal modello WAM e i dati del satellite TOPEX. A sinistra la costa Ovest dell'Irlanda. A destra un punto del Mediterraneo al largo della Libia (da Mørk and Barstow, 1998a e 1998b)

Nel corso dell'anno 2005 è stata realizzata la pubblicazione "Wind and wave atlas of the Mediterranean Sea" (in seguito, per convenzione, Eurowaves), a cura del Western European Union – Western European Armament Organization Research Cell. Tale lavoro è stato sviluppato da un consorzio di sei compagnie (di nazionalità italiana, francese e greca) su incarico del Western European Union – Western European Armament Organization Research Cell, con il coordinamento della Délégation Générale pour l'Armement (del Ministero della Difesa francese), del Ministero della Difesa italiano e dell'Hellenic Ministry of National Defence / General Secretariat for Economic Planning and Defence Investments (Ministero della Difesa greco).



Lo scopo principale dello studio è quello di conoscere la statistica di vento e di onde, stagionale ed annuale, in diversi punti del Mare Mediterraneo, sulla base di dati osservati di varia origine.

Le fonti dei dati di origine sono:

- Boe ondametriche;
- Osservazioni satellitari;
- Modellazione dei dati di vento (hindcasting).

Le boe ondametriche considerate sono le 8 della Rete Ondametrica Nazionale italiana (La Spezia, Pescara, Monopoli, Crotone, Catania, Mazara del Vallo, Ponza e Alghero), a cui si aggiungono 3 boe ondametriche spagnole (Cabo de Palos, Mahon e Palamos), una cipriota (Cape Arnaoutis) e 3 greche (collocate a Nord di Creta).

Le registrazioni dei dati di moto ondoso sono state utilizzate per validare i dati ricavati dalle analisi satellitari (satelliti Topex, Ers1 e Ers2), che hanno fornito registrazioni di altezze d'onda significativa e stima dell'intensità del vento alla quota di 10 metri.

Infine i dati sono stati confrontati ed implementati attraverso la modellazione dei dati di vento grazie al modello WAM in uso presso l'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), al fine di ricostruire il clima ondoso dai dati di vento.

L'acquisizione dei dati dalle 3 fonti è avvenuta in diversi intervalli di tempo, come si evince dalla Tabella 1:

Tabella 1 – Intervalli di acquisizione dei dati Eurowaves

<b>Fonte</b>	<b>Zona</b>	<b>Inizio registrazione</b>	<b>Fine registrazione</b>
<b>Boe ondametriche</b>	Spagna 1	11/1985	11/1998
	Spagna 2	04/1993	01/1995
	Spagna 3	04/1988	09/1998
	Cipro	03/1993	02/1998
	Nord Creta 1	02/1994	11/1994
	Nord Creta 2	02/1994	11/1994
	Nord Creta 3	02/1994	11/1994
	Italia 1	07/1989	12/1998
	Italia 2	07/1989	12/1998
	Italia 3	07/1989	12/1998
	Italia 4	07/1989	12/1998
	Italia 5	07/1989	12/1998
	Italia 6	07/1989	12/1998
Italia 7	07/1989	12/1998	
Italia 8	07/1989	12/1998	
<b>Satelliti</b>	Mediterraneo	08/1991	06/2002
<b>Dati vento</b>	Mediterraneo	07/1992	



L'atlante, nella sua versione su supporto elettronico, copre un'area geografica relativa a tutto il Mediterraneo, ossia la zona compresa tra longitudine 8°O e 46°E e tra latitudine 29°N e 49°N; i parametri forniti sono i seguenti:

- Parametri di vento: velocità ( $U_w$ ) e direzione ( $\Theta_{wind}$ );
- Parametri di onda: altezza significativa ( $H_s$ ), periodo di picco ( $T_p$ ), direzione ( $\Theta_{wave}$ ), ripidità ( $\beta_p$ ).

Le statistiche finali sono riferite a tutti i 239 punti di estrapolazione dei dati, distribuiti uniformemente sul Mare Mediterraneo, elaborati sia su scala annuale, sia su scala stagionale.



Figura 5 – Distribuzione dei punti di estrapolazione dei dati Eurowaves

I dati si presentano sotto forma di tabelle di frequenze bivariante nelle seguenti coppie di parametri:

- $U_w - \Theta_{wind}$ ;
- $H_s - T_p$ ;
- $H_s - \Theta_{wave}$ ;
- $H_s - U_w$ .

Per il presente studio sono stati utilizzati i dati del modello alla latitudine 41° e longitudine 9°. I risultati sono stati messi a confronto con la ricostruzione effettuata a partire dai dati di vento della stazione di Olbia.



Tabella 2 – Clima ondoso ricostruito con modello numerico alle coordinate 41° lat e 9° long.

Direzioni (°N)	Hs (m)													Totale (%)
	<0.25	≥0.25 = 0.50	≥0.50 = 0.75	≥0.75 = 1.00	≥1.00 = 1.25	≥1.25 = 1.50	≥1.50 = 1.75	≥1.75 = 2.00	≥2.00 = 2.50	≥2.50 = 3.00	≥3.00 = 3.50	≥3.50 = 4.00	≥4.00 = 5.00	
0	0.61	0.61	0.40	0.20	0.10	0.00	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	2.12
15	1.01	1.41	0.81	0.61	0.40	0.30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	5.65
30	0.50	0.91	0.71	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.20	0.20	0.10	0.10	0.00	4.24
45	0.30	0.61	0.40	0.20	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.92
60	0.30	0.50	0.40	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.61
75	0.50	0.50	0.30	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.61
90	0.40	0.50	0.30	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	1.72
105	0.30	0.61	0.30	0.10	0.20	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	1.82
120	0.30	0.61	0.40	0.40	0.30	0.20	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	2.62
135	0.50	0.91	0.91	0.50	0.61	0.40	0.30	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	4.44
150	1.41	3.03	2.62	1.92	1.31	0.81	0.40	0.30	0.40	0.20	0.10	0.00	0.00	12.51
165	1.82	2.93	2.12	1.11	1.01	0.61	0.40	0.20	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00	10.49
180	0.71	1.11	1.11	0.81	0.50	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.64
195	0.30	0.50	0.50	0.30	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.02
210	0.20	0.40	0.50	0.30	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.72
225	0.20	0.30	0.40	0.20	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.51
240	0.20	0.30	0.30	0.20	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.41
255	0.20	0.30	0.40	0.40	0.40	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.12
270	0.40	0.81	0.71	0.61	0.50	0.40	0.20	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	4.04
285	1.11	1.82	2.02	1.61	1.72	1.41	1.11	0.71	0.91	0.40	0.10	0.00	0.00	12.92
300	1.11	2.12	1.61	1.21	0.71	0.40	0.40	0.30	0.30	0.20	0.10	0.10	0.00	8.58
315	0.50	1.01	0.81	0.50	0.40	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	3.63
330	0.40	1.01	0.81	0.40	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.03
345	0.61	1.11	0.81	0.30	0.30	0.20	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	3.63
Totale (%)	13.93	23.92	19.68	12.92	10.19	6.56	4.64	2.72	3.03	1.51	0.50	0.30	0.10	100

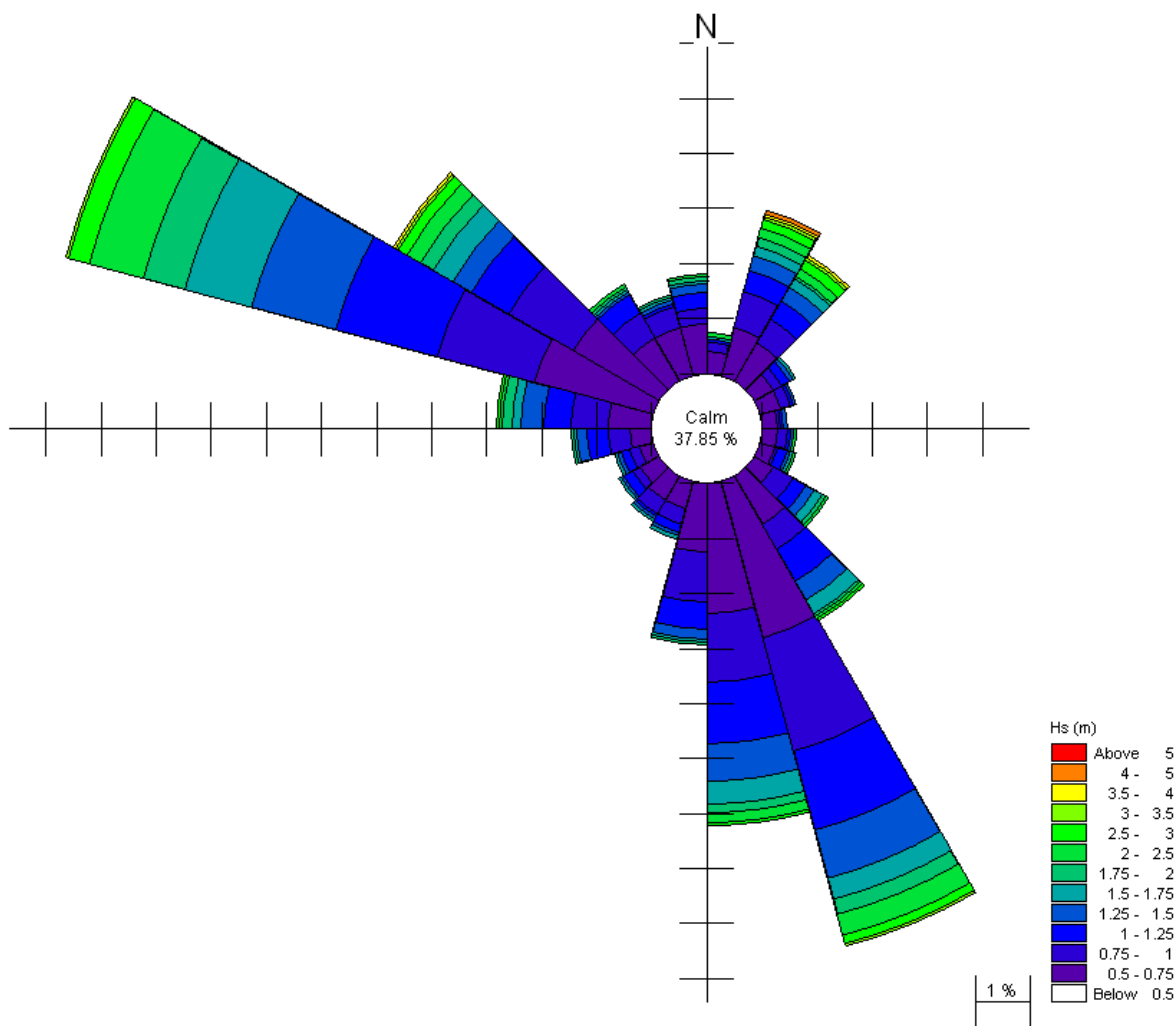


Figura 6 – Rosa del clima ondoso al largo ricostruito con modello numerico (calme  $H_s < 50$  cm).





#### 4.2 Ricostruzione del moto ondoso dai dati di vento

Come scritto nella parte introduttiva del presente capitolo, un altro procedimento per la valutazione del moto ondoso è quella di procedere con la ricostruzione dai dati di vento. In questo caso tale alternativa è l'unica a disposizione e senza dubbio meno affidabile della precedente, ma sicuramente di valido aiuto per una conferma qualitativa delle direzioni e intensità del moto ondoso.

Per conoscere il moto ondoso nel paraggio di interesse si è proceduto alla ricostruzione dei dati a partire dalle registrazioni di vento della stazione anemometrica di Olbia. Il periodo di registrazione preso in considerazione è quello compreso tra Gennaio 1973 e Dicembre 2005; in tale intervallo temporale risultano completamente mancanti le registrazioni relative agli anni 2003 e 2004.

Dalla Figura 7 alla Figura 10 sono riportati i diagrammi polari che rappresentano le frequenze dei venti per gradini di intensità nelle diverse stagioni; nella Figura 11 è rappresentato il clima medio annuale.

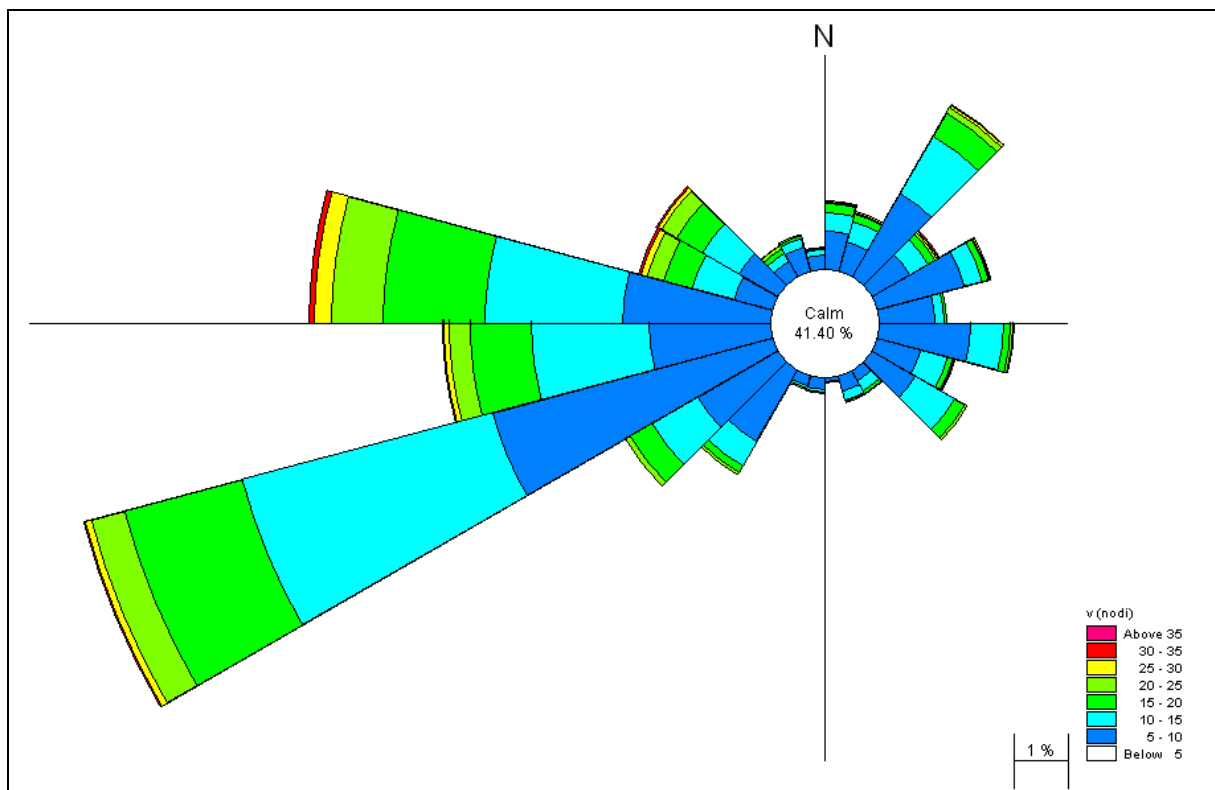


Figura 7 – Clima del vento nella stagione invernale ricavato dai dati registrati dalla Stazione anemometrica di Olbia

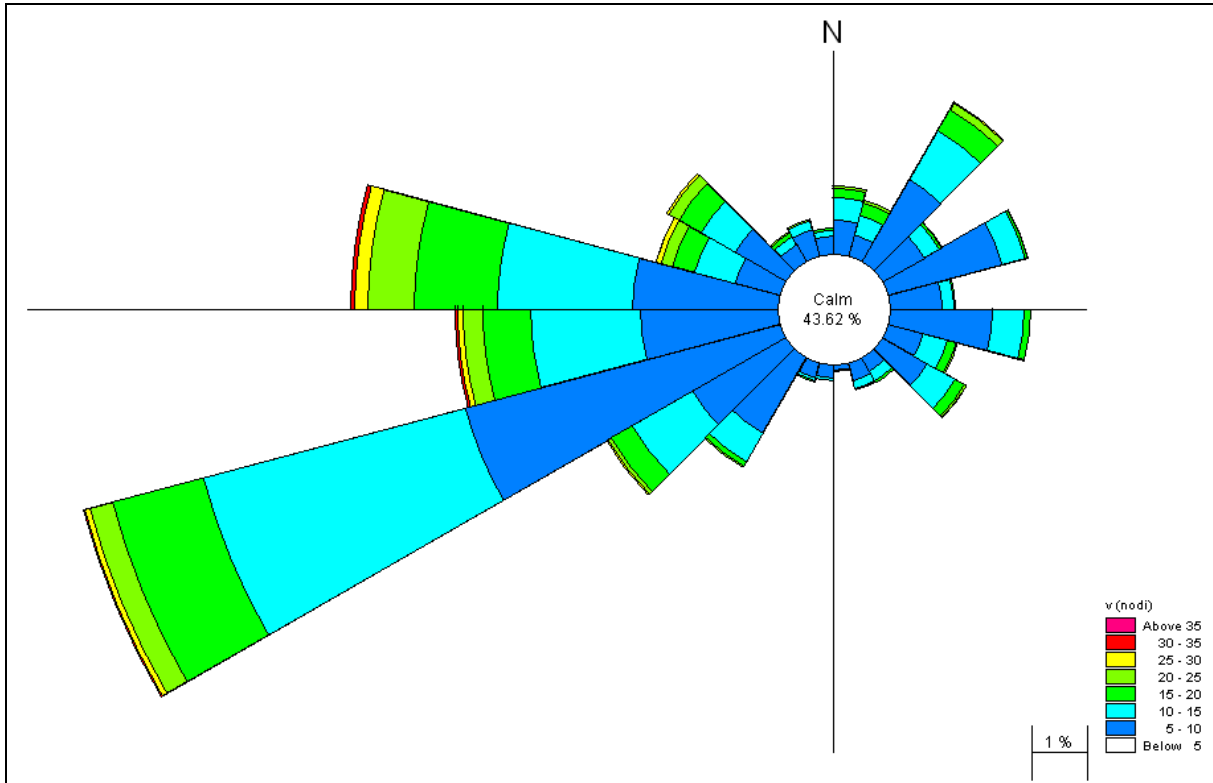


Figura 8 – Clima del vento nella stagione autunnale ricavato dai dati registrati dalla Stazione anemometrica di Olbia

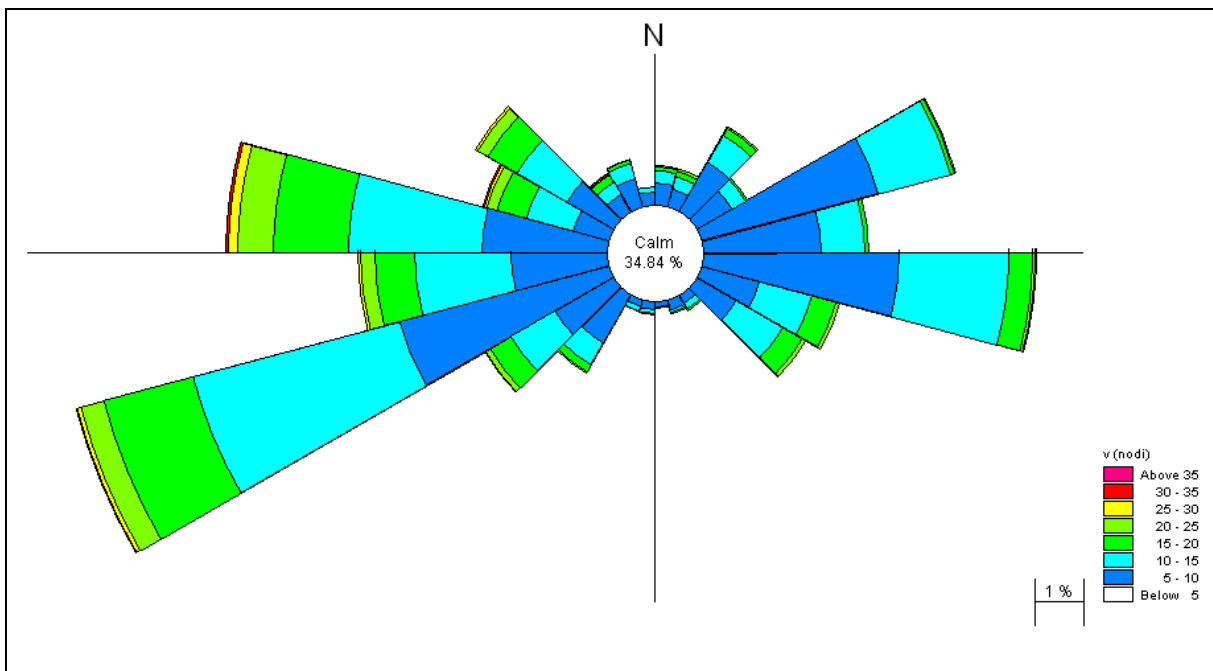


Figura 9 – Clima del vento nella stagione primaverile ricavato dai dati registrati dalla Stazione anemometrica di Olbia

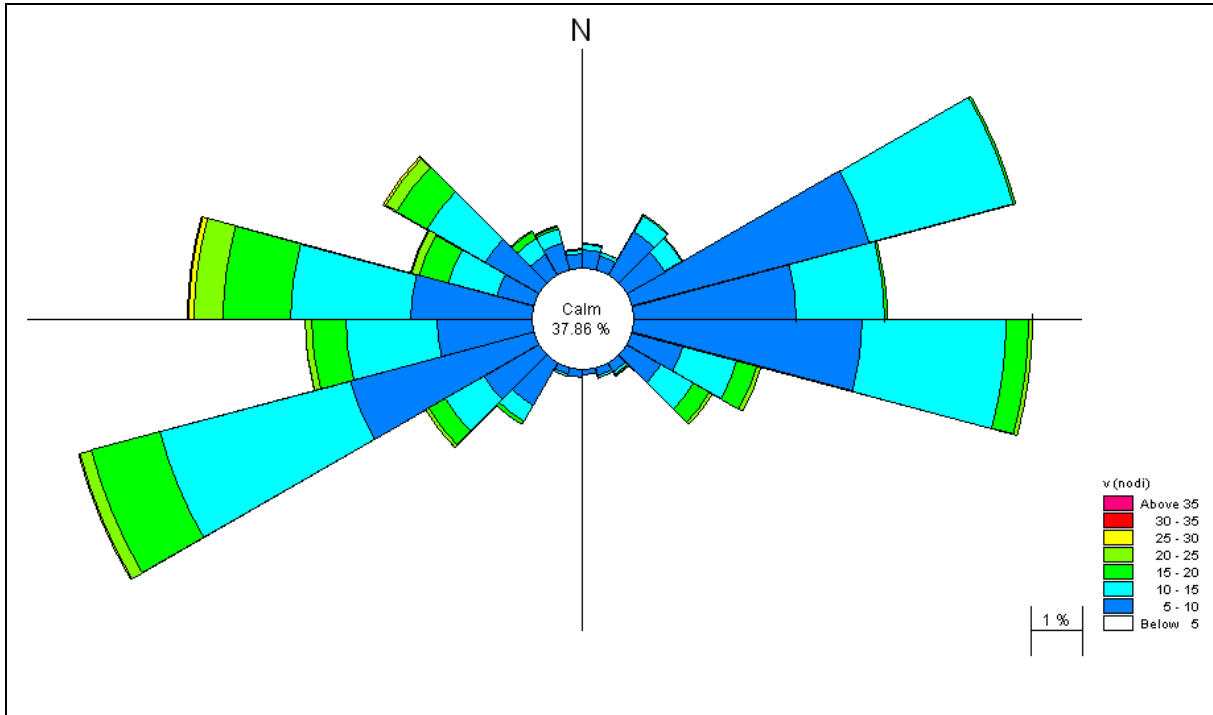


Figura 10 – Clima del vento nella stagione estiva ricavato dai dati registrati dalla Stazione anemometrica di Olbia

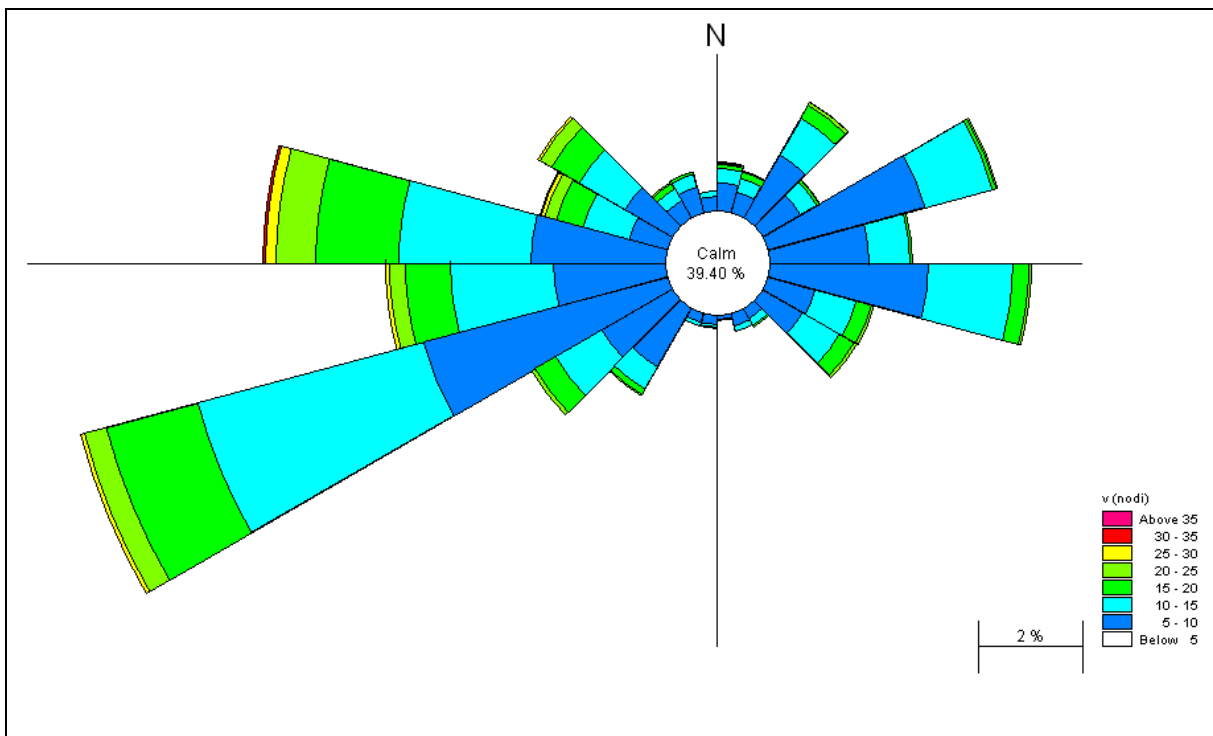


Figura 11 – Clima del vento annuale ricavato dai dati registrati dalla Stazione anemometrica di Olbia



Il settore con le maggiori frequenze di occorrenza è quello del terzo Quadrante, compreso tra  $240^{\circ}\text{N}$  e  $285^{\circ}\text{N}$ . In particolare, con riferimento alla stazione di Olbia, si rileva che la velocità del vento raggiunge i 35 nodi; tale intensità rappresenta, in termini di clima, anche il valore massimo. La seconda componente principale, in termini di frequenza, è rappresentata dai venti provenienti dal primo Quadrante, compreso tra  $60^{\circ}\text{N}$  e  $105^{\circ}\text{N}$ , dove il vento si presenta con una velocità massima di 25 nodi.

Nei settori di Grecale e Scirocco la velocità del vento eccede i 20 nodi, mantenendosi comunque inferiore ai 25 nodi, solo con bassissime frequenze di occorrenza.

In generale la maggiore frequenza di occorrenza del vento si ha per velocità oscillanti tra i 5 e i 15 nodi.

Dall'osservazione dei diagrammi delle frequenze stagionali è possibile evidenziare come il paragorio sia caratterizzato da una generale analogia di comportamento del vento tra estate e primavera e tra autunno ed inverno.

Il settore regnante, in cui cioè il vento risulta essere maggiormente ricorrente, è quello compreso tra  $240^{\circ}\text{N}$  e  $255^{\circ}\text{N}$ ; in tali direzioni la frequenza di occorrenza del vento oscilla tra il 13% in inverno e il 9% d'estate.

Il settore dominante, in cui cioè il vento raggiunge la velocità massima, pari a 35 nodi, è quello compreso tra  $270^{\circ}\text{N}$  e  $315^{\circ}\text{N}$  nel periodo invernale, mentre è molto più ristretto, compreso tra  $270^{\circ}\text{N}$  e  $285^{\circ}\text{N}$ , negli altri periodi dell'anno.

Dall'analisi risulta che mediamente durante l'anno la frequenza delle calme, cioè dei periodi durante il quale il vento è al di sotto della sensibilità dell'anemometro, è pari al 39,40%, corrispondente a circa 144 giorni all'anno. Tale percentuale media annuale viene superata durante le stagioni invernali ed autunnali, mentre risulta essere inferiore durante la primavera e l'estate per la maggiore influenza dei venti di brezza.

#### 4.2.1 Metodo SMB per la ricostruzione del moto ondoso

Il metodo semplificato SMB (Sverdrup, Munk, Bretschneider), nella versione riveduta e aggiornata dallo Shore Protection Manual del 1984, sulla base di relativamente recenti osservazioni sul campo e successivamente riveduto in via teorica da Hudle e Stive (1989), per la ricostruzione del moto ondoso dai dati di vento è particolarmente applicabile nel caso di fetch limitati, fino a circa 100 km, e con velocità di vento non molto variabili per tutta la





durata della tempesta; per fetch estesi e per venti variabili esso risulta meno affidabile. Nel presente caso, in cui i fetch si estendono anche per diverse centinaia di chilometri, i risultati ottenuti dalla sua applicazione presentano una limitata validità e sono da ritenere utili solo per il confronto qualitativo con i risultati dei modelli numerici.

Il metodo SMB, una volta assegnati la lunghezza del fetch efficace, la durata e l'intensità del vento, fornisce il periodo di picco  $T_p$  e l'altezza significativa spettrale  $H_{m0}$ . Nel caso di acque profonde  $H_{m0}$  coincide con l'altezza significativa  $H_s$ . Il metodo permette anche di calcolare la durata minima del vento ( $t_{lim}$ ) per ottenere su tutto il fetch lo stato stazionario, mentre la direzione di propagazione del moto ondoso viene assunta pari a quella del vento misurata dalla stazione anemometrica.

Le formule utilizzate sono le seguenti:

$$\tilde{H}_{m0} = 0.25 \times th(0.6\tilde{d}^{0.75}) \times th^{0.5} \left[ \frac{4.3 \cdot 10^{-5} \times \tilde{F}}{th^2(0.6 \times \tilde{d}^{0.75})} \right]$$

$$\tilde{T}_p = 8.3 \times th(0.76\tilde{d}^{0.375}) \times th^{1/3} \left[ \frac{4.1 \cdot 10^{-5} \times \tilde{F}}{th^2(0.76 \times \tilde{d}^{0.375})} \right]$$

$$t_{lim} = 65.9 \times \tilde{F}^{2/3}$$

I parametri presenti nelle formule con il soprassegno tilde sono grandezze adimensionali. In particolare le lunghezze (altezze, distanze, profondità) sono rese adimensionali mediante il fattore  $\frac{g}{U_A^2}$ , mentre i tempi (durate, periodi) mediante il fattore  $\frac{g}{U_A}$ .

$U_A$  è il coefficiente di trascinamento pari a  $0.71U^{1.23}$ , dove  $U$  è la velocità del vento misurata in m/s in mare aperto alla quota di + 11 m (l. m. m.).

Nel caso in cui la durata  $\tilde{t}$  sia inferiore a  $\tilde{t}_{lim}$  ci si trova nella condizione di crescita limitata dalla durata ed i valori di  $H_{m0}$  e  $T_p$  devono essere calcolati sulla base di una lunghezza  $\tilde{F}'$  del fetch data da:  $\tilde{F}' = \left( \frac{\tilde{t}}{65.9} \right)^{3/2}$ .

Le estensioni del fetch utilizzate per il calcolo sono riportate nella Figura 12.

Dall'esame dei fetch si nota come le distanze maggiori si presentino per il secondo Quadrante con lunghezze maggiori di 300 km per direzioni comprese tra 90 e 170°N. Le



direzioni di Grecale presentano invece lunghezze intorno ai 200 km.

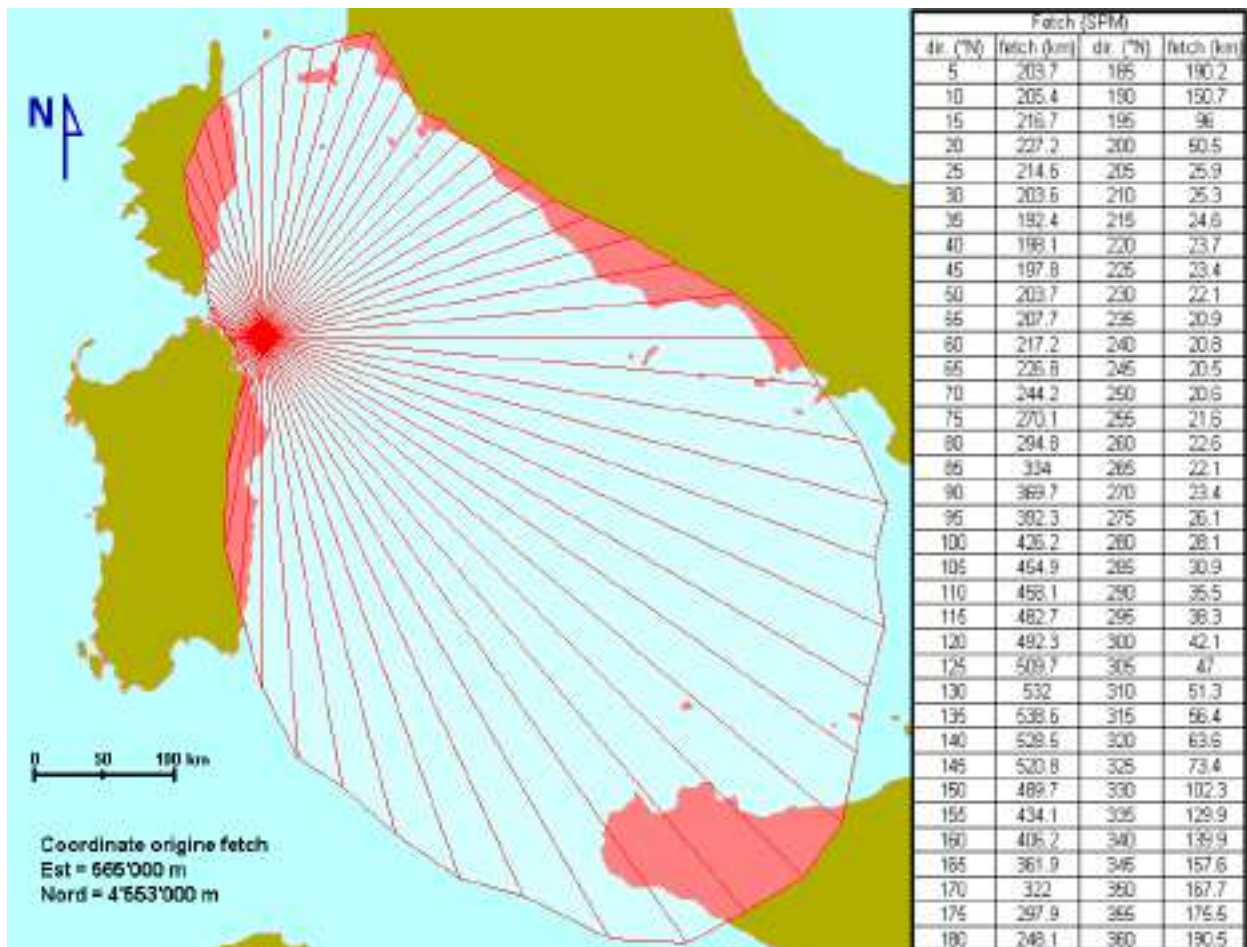


Figura 12 – Estensione del fetch (SPM) efficace.

Per passare dai dati di vento registrati dalla stazione anemometrica al mare aperto, il metodo SMB, richiede le seguenti correzioni:

- correzione di quota;
- correzione di durata;
- correzione di stabilità;
- correzione di localizzazione.

I dati anemometrici assunti per la ricostruzione del moto ondoso al largo del paraggio di Porto Rotondo sono, come si è detto, quelli osservati con frequenza oraria presso la stazione di Olbia, il cui anemometro è ubicato alla quota di +11.0 m (l. m. m.), dall'1 gennaio 1973 al 7 settembre 1994, dal 5 febbraio 1995 al 12 luglio 2001 e dal 21 luglio 2005 al 31 dicembre



2005, per un numero totale di osservazioni valide di 155'281 per ciascuna delle quali è stato ricostruito il moto ondoso che pertanto contiene la stessa numerosità.

#### 4.2.2 Clima ondoso medio annuo ricostruito

Il metodo applicato ha permesso di ricostruire il clima ondoso nel punto di origine del fetch (profondità -200 m l.m.m.), mostrato in Figura 12. La Tabella 3 mostra le percentuali di apparizione delle onde suddivise per settori di 15° e gradini di altezza d'onda di 0.25 m fino a 2.0 m, 0.50 m da 2.0 a 4.0 m e di 1 m per altezze superiori a 4 m.

Dalla tabella si può notare come le calme ( $H_s < 0.5$  m) hanno una percentuale del 24.12%, corrispondente a circa 88 giorni all'anno. La percentuale di onde superiori a 1.50 m è dell'11.16%. Le altezze maggiori si verificano nel settore compreso tra 0 e 135°N.

Tabella 3 – Percentuali di occorrenza delle onde ricostruite nel punto di origine del fetch

	Hs (m)												Totale (%)	
	<0.25	≥0.25 ÷ 0.50	≥0.50 ÷ 0.75	≥0.75 ÷ 1.00	≥1.00 ÷ 1.25	≥1.25 ÷ 1.50	≥1.50 ÷ 1.75	≥1.75 ÷ 2.00	≥2.00 ÷ 2.50	≥2.50 ÷ 3.00	≥3.00 ÷ 3.50	≥3.50 ÷ 4.00		≥4.00 ÷ 5.00
0	0.09	0.11	0.10	0.05	0.07	0.05	0.06	0.04	0.08	0.08	0.03	0.02	0.00	0.77
15	0.15	0.20	0.26	0.17	0.20	0.12	0.14	0.11	0.24	0.20	0.20	0.13	0.03	2.13
30	0.40	0.43	0.45	0.24	0.29	0.17	0.23	0.18	0.33	0.32	0.12	0.07	0.04	3.27
45	0.33	0.43	0.58	0.37	0.45	0.21	0.25	0.10	0.15	0.12	0.04	0.01	0.03	3.06
60	0.75	1.11	1.37	0.89	1.06	0.57	0.57	0.14	0.13	0.03	0.04	0.02	0.00	6.68
75	0.44	0.97	1.48	1.01	1.43	0.76	0.75	0.26	0.25	0.08	0.04	0.01	0.01	7.49
90	0.61	0.87	0.91	0.60	0.82	0.48	0.61	0.28	0.45	0.23	0.19	0.07	0.04	6.18
105	0.17	0.29	0.42	0.26	0.40	0.24	0.35	0.20	0.48	0.34	0.17	0.08	0.06	3.43
120	0.18	0.24	0.25	0.14	0.19	0.12	0.15	0.10	0.18	0.13	0.11	0.10	0.05	1.94
135	0.06	0.10	0.10	0.06	0.06	0.04	0.03	0.03	0.06	0.02	0.01	0.00	0.02	0.58
150	0.15	0.09	0.06	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.39
165	0.09	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18
180	0.27	0.08	0.05	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44
195	0.42	0.19	0.14	0.06	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88
210	1.53	1.03	0.64	0.23	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.53
225	1.63	1.88	2.35	1.63	0.58	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.08
240	1.86	2.15	4.99	5.16	2.34	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.59
255	0.69	0.90	3.54	5.52	4.97	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.02
270	0.63	0.60	1.46	2.28	4.40	0.81	0.15	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.34
285	0.21	0.24	0.44	0.54	1.53	0.77	0.30	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.06
300	0.29	0.27	0.25	0.19	0.36	0.21	0.12	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.71
315	0.17	0.14	0.15	0.08	0.15	0.06	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84
330	0.22	0.17	0.13	0.07	0.05	0.03	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.74
345	0.14	0.14	0.13	0.06	0.06	0.04	0.04	0.02	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.68
Totale (%)	11.47	12.65	20.27	19.64	19.61	5.20	3.87	1.53	2.44	1.56	0.96	0.52	0.28	100

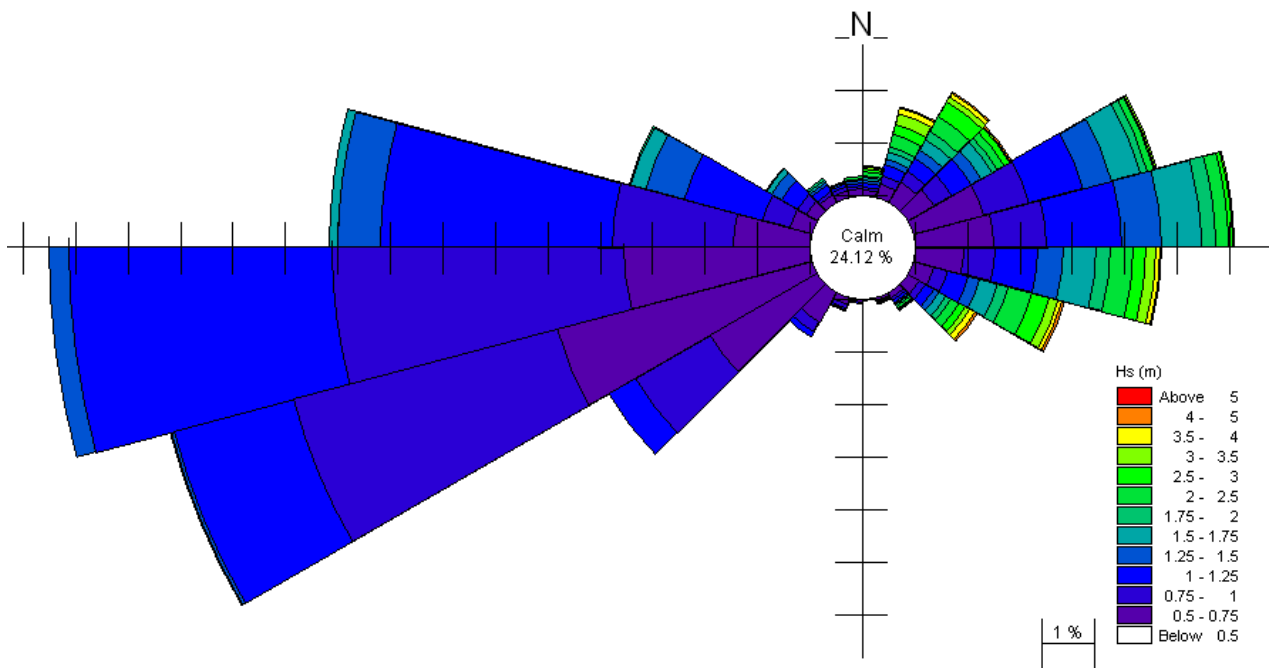


Figura 13 – Clima ondoso medio annuo nel punto di origine del fetch ricostruito dai dati di vento

I risultati ottenuti con i due modelli (numerico e SMB) sono raffrontabili ad eccezione di alcune differenze dovute perlopiù al fatto che la ricostruzione dai dati di vento è calcolata più vicino a costa, quindi con fetch più ridotti nel terzo e quarto Quadrante, che tuttavia non riguardano il presente studio.

In entrambi i climi gli eventi più intensi sono quelli di Grecale e di Scirocco.





## 5. PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSI DA LARGO VERSO RIVA

Nel propagarsi dal largo verso riva, il moto ondoso, a seguito dei fenomeni di rifrazione, shoaling, frangimento e resistenza del fondo, subisce trasformazioni energetiche che ne alterano l'altezza, e la direzione di propagazione.

Il modello numerico utilizzato per la determinazione di queste trasformazioni è il modulo NSW del codice di calcolo del MIKE21. Esso è basato sullo spettro energetico del moto ondoso e tiene anche conto del contributo energetico del vento nella zona di trasformazione alla quale si applica. La descrizione dettagliata con le equazioni che stanno alla base del modello è inserita in Appendice.

### 5.1 Applicazione del modulo NSW

Come dati di input del modello sono state utilizzate le grandezze caratteristiche delle onde ricostruite con modello numerico dal CNR. Il modello, oltre all'altezza significativa, il periodo e la direzione media del moto ondoso al largo richiede l'indice di dispersione direzionale, il coefficiente di attrito sul fondo ed i parametri del frangimento.

Per quanto riguarda la perdita di energia per attrito sul fondo si è utilizzato il coefficiente di Nikuradse che è stato posto uguale a 0.002 m per l'intero dominio di calcolo.

L'applicazione dell'NSW (Near-shore Spectral Wind-Waves) richiede la costruzione di un dominio di calcolo che comprenda un'ampia zona di mare e di costa del paraggio in studio, inoltre il contorno offshore deve essere posizionato in acque profonde in cui il moto ondoso non subisce fenomeni di interazione con il fondale.

Per il sito in studio si sono realizzate quattro griglie di calcolo (Figura 14). La prima (Griglia 1) ha origine nel punto di coordinate UTM 32 E = 551'502 m N = 4'579'738 m, con l'asse x di 40 km e l'asse y di 25 km inclinato di 112.5° rispetto alla direzione Nord. Le celle di calcolo sono 1'333x277 e hanno dimensione di 30x90 m. (Figura 15).

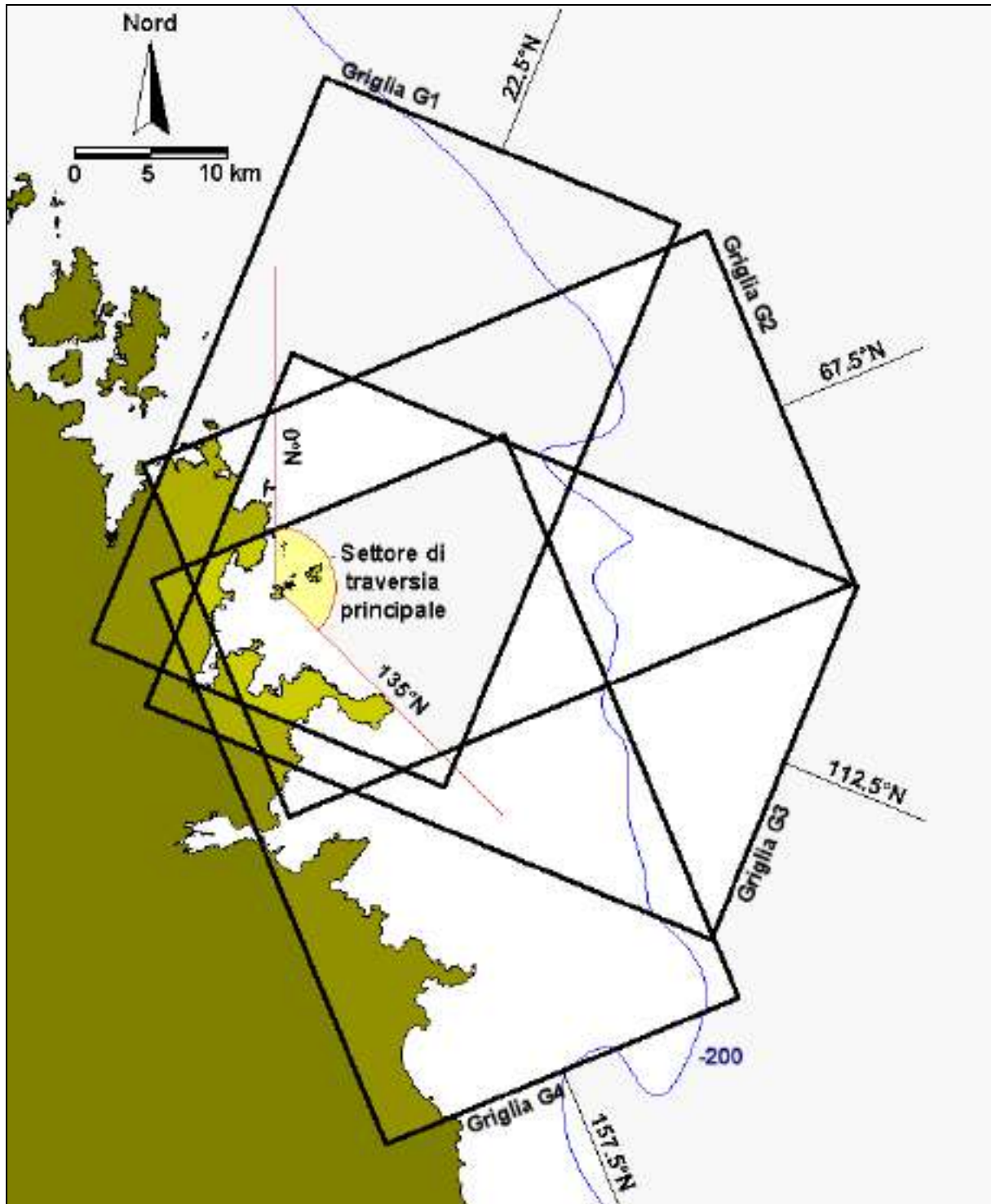


Figura 14 – Griglie di calcolo utilizzate per il modello NSW

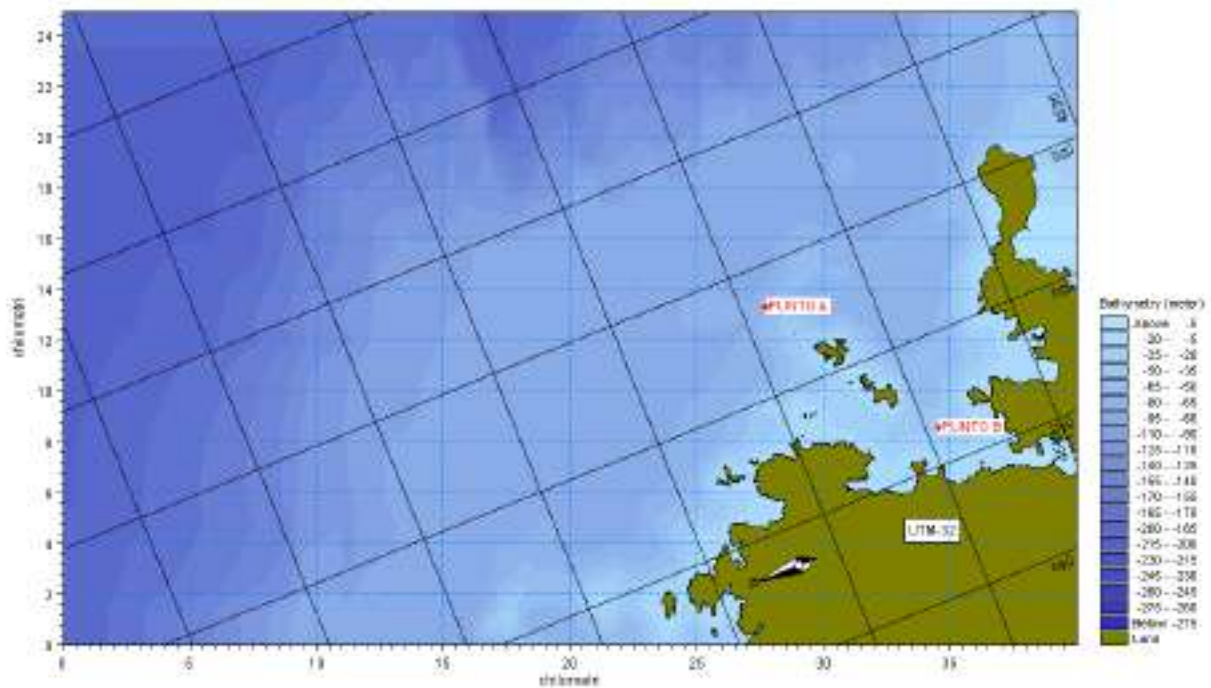


Figura 15 – Griglia 1

La seconda (Griglia 2) ha origine nel punto di coordinate UTM 32 E = 576'544 m N = 4'569'707 m, con l'asse x di 40 km e l'asse y di 25 km inclinato di 157.5° rispetto alla direzione Nord. Le celle di calcolo sono 1'333x277 e hanno dimensione di 30x90 m. (Figura 16).

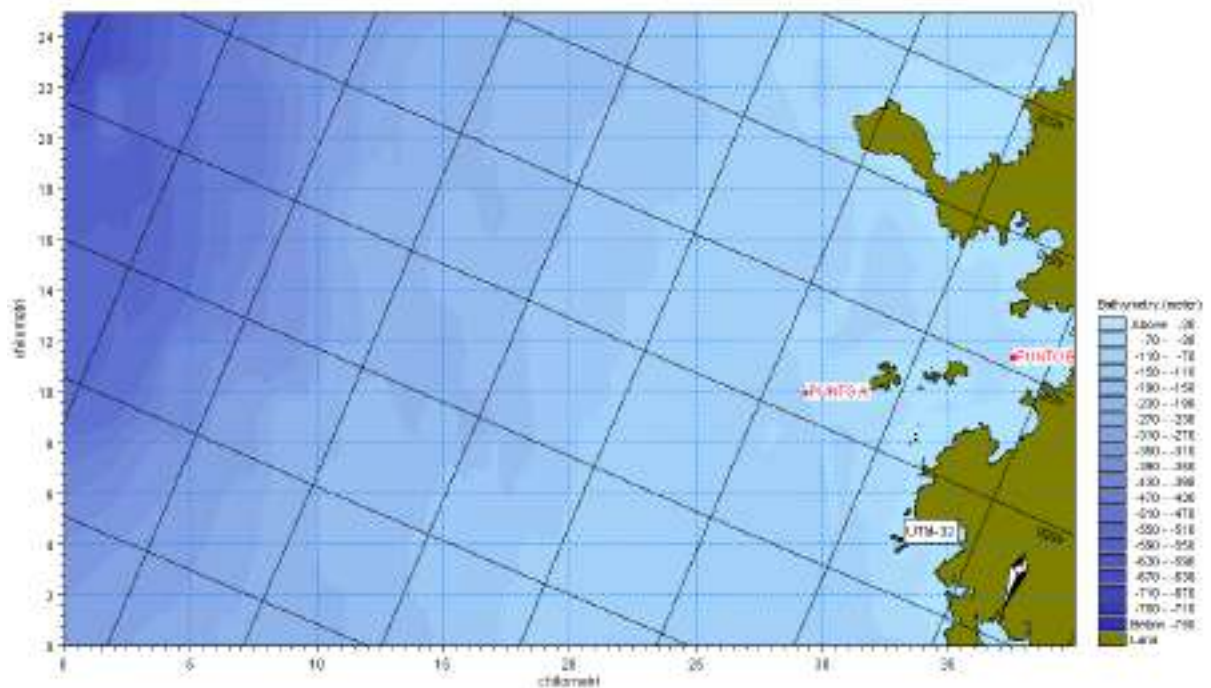




Figura 16 – Griglia 2

La terza (Griglia 3) ha origine nel punto di coordinate UTM 32 E = 586'314 m N = 4'546'377 m, con l'asse x di 40 km e l'asse y di 25 km inclinato di 202.5° rispetto alla direzione Nord. Le celle di calcolo sono 1'333x277 e hanno dimensione di 30x90 m. (Figura 17).

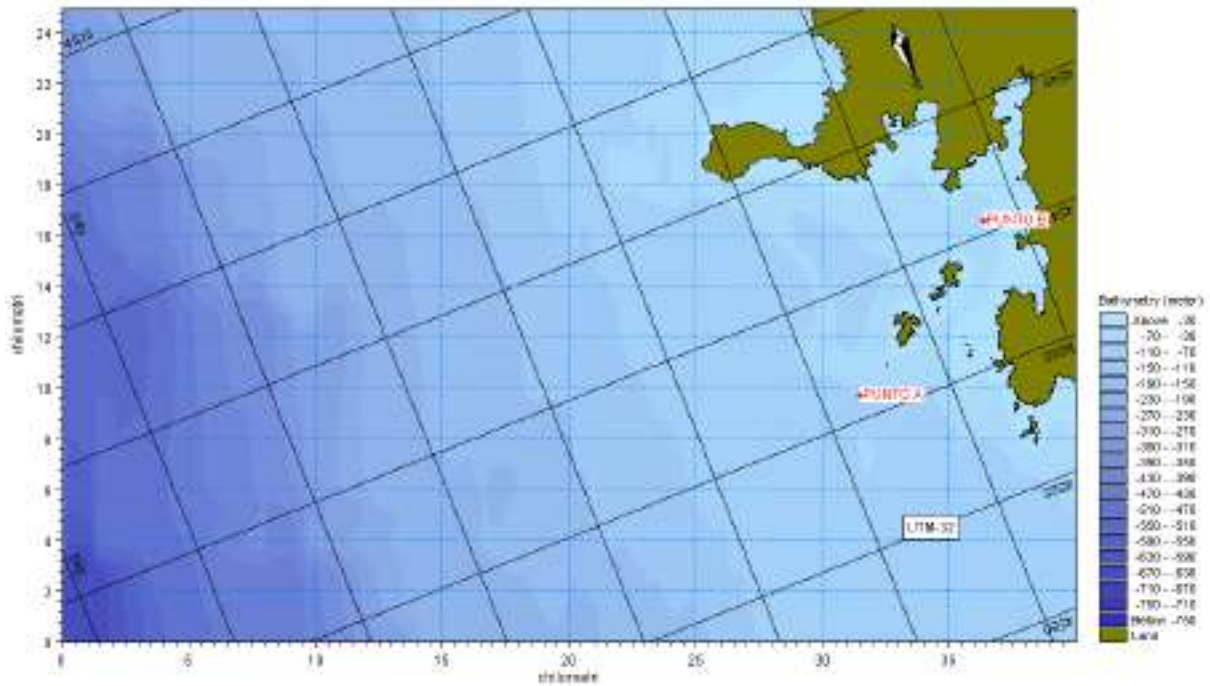


Figura 17 – Griglia 3

La quarta (Griglia 4) ha origine nel punto di coordinate UTM 32 E = 578'588 m N = 4'519'404 m, con l'asse x di 40 km e l'asse y di 25 km inclinato di 247.5° rispetto alla direzione Nord. Le celle di calcolo sono 1'333x277 e hanno dimensione di 30x90 m (Figura 18).



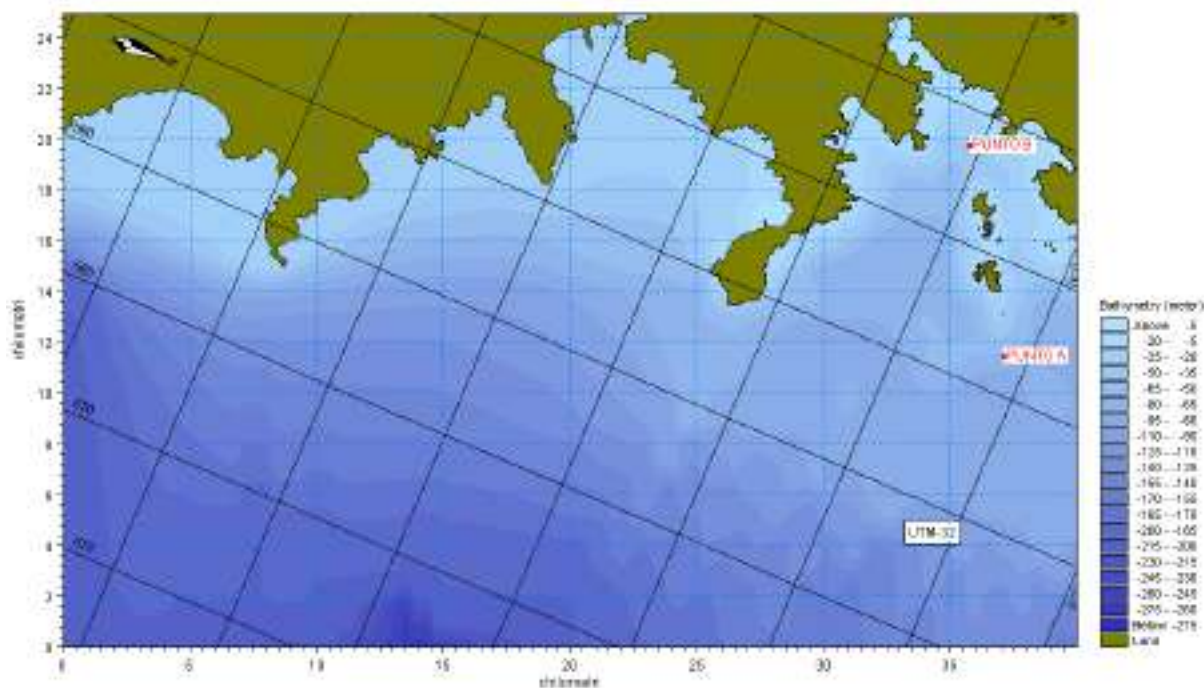


Figura 18 – Griglia 4

## 5.2 Risultati del MIKE21 NSW

Nella Tabella 4 sono riportati i risultati ottenuti con il modello NSW. Le onde sono state estratte nel punto A corrispondente ad una profondità di 70 m sotto il livello medio del mare e nel punto B corrispondente ad una profondità di 30 m. Le due estrazioni permettono di valutare meglio le trasformazioni che il moto ondoso subisce nel propagarsi dal largo verso riva, tuttavia per la trasformazione locale del moto ondoso (Capitolo 7) sono state utilizzate le onde estratte nel punto B più vicino alla costa.

Si nota come le onde, nel propagarsi verso riva, subiscano una diminuzione dell'altezza significativa ( $H_s$ ), soprattutto per le onde più alte, e mutino la direzione media di propagazione (mwd) che tende a orientarsi verso la perpendicolare a riva. A causa della protezione offerta dalla costa il settore di traversia si riduce notevolmente passando dal largo ai punti A e B. Le onde simulate al largo provengono da un settore di  $180^\circ$ , nel punto A il settore si restringe a  $160^\circ$  per divenire  $100^\circ$  circa nel punto B. Nella Tabella 4 è rappresentata la frequenza di apparizione dei singoli eventi, le caratteristiche delle onde al largo e le caratteristiche delle stesse onde una volta trasferite nei punti di interesse (A con profondità del fondale di 70 m e B di 30 m).



Tabella 4 - Onde trasferite dal largo ai punti A e B con il modello MIKE21-NSW

Frequenza %	LARGO				TRASFERITE punto A (-70m)		TRASFERITE punto B (-30 m)	
	Hs (m)	Tm (s)	Direzione (°N)	DSD (°)	Hs (m)	Direzione (°N)	Hs (m)	Direzione (°N)
1.21	0.25	1.9	7.5	30	0.25	7.5	0.13	26.2
0.61	0.75	3.3	7.5	30	0.75	7.5	0.40	26.2
0.10	1.25	4.2	7.5	30	1.25	7.5	0.67	26.4
0.10	1.75	5.0	7.5	30	1.75	7.5	0.89	26.8
0.10	2.25	5.6	7.5	30	2.25	7.5	1.05	27.4
2.42	0.25	1.9	22.5	30	0.25	22.5	0.17	29.8
1.41	0.75	3.3	22.5	30	0.75	22.5	0.51	29.8
0.71	1.25	4.2	22.5	30	1.25	22.5	0.83	29.4
0.40	1.75	5.0	22.5	30	1.75	22.5	1.07	29.1
0.20	2.25	5.6	22.5	30	2.25	22.5	1.22	29.3
0.20	2.75	6.2	22.5	30	2.75	22.5	1.28	30.2
0.10	3.25	6.8	22.5	30	3.25	22.5	1.28	31.8
0.10	3.75	7.3	22.5	30	3.75	22.5	1.29	33.8
0.10	4.25	7.8	22.5	30	4.25	22.4	1.29	36.4
1.41	0.25	1.9	37.5	30	0.25	37.5	0.17	32.7
1.21	0.75	3.3	37.5	30	0.75	37.5	0.52	32.7
0.71	1.25	4.2	37.5	30	1.25	37.5	0.84	32.4
0.30	1.75	5.0	37.5	30	1.75	37.5	1.07	32.2
0.20	2.25	5.6	37.5	30	2.25	37.5	1.21	32.7
0.20	2.75	6.2	37.5	30	2.75	37.5	1.28	34.2
0.10	3.25	6.8	37.5	30	3.25	37.5	1.32	36.8
0.10	3.75	7.3	37.5	30	3.75	37.5	1.36	39.8
0.91	0.25	1.9	52.5	30	0.25	52.5	0.19	54.3
0.61	0.75	3.3	52.5	30	0.75	52.5	0.57	54.5
0.30	1.25	4.2	52.5	30	1.25	52.5	0.92	55.4
0.10	1.75	5.0	52.5	30	1.75	52.5	1.17	56.1
0.81	0.25	1.9	67.5	30	0.25	67.5	0.21	74.1
0.61	0.75	3.3	67.5	30	0.75	67.5	0.62	74.1
0.20	1.25	4.2	67.5	30	1.25	67.5	1.03	74.0
1.01	0.25	1.9	82.5	30	0.25	82.5	0.23	86.1
0.40	0.75	3.3	82.5	30	0.75	82.5	0.70	86.0
0.20	1.25	4.2	82.5	30	1.25	82.5	1.17	85.9
0.91	0.25	1.9	97.5	30	0.25	97.5	0.24	95.4
0.50	0.75	3.3	97.5	30	0.75	97.5	0.71	95.4
0.20	1.25	4.2	97.5	30	1.25	97.5	1.18	95.4
0.10	2.25	5.6	97.5	30	2.25	97.5	2.09	95.8
0.91	0.25	1.9	112.5	30	0.25	112.5	0.20	103.5
0.40	0.75	3.3	112.5	30	0.75	112.5	0.61	103.5
0.30	1.25	4.2	112.5	30	1.25	112.5	1.01	103.5
0.10	1.75	5.0	112.5	30	1.75	112.5	1.42	103.5
0.10	2.25	5.6	112.5	30	2.25	112.5	1.81	103.4
0.91	0.25	1.9	127.5	30	0.25	127.5	0.15	110.6
0.81	0.75	3.3	127.5	30	0.75	127.5	0.45	110.6



Frequenza %	LARGO				TRASFERITE punto A (-70m)		TRASFERITE punto B (-30 m)	
	Hs (m)	Tm (s)	Direzione (°N)	DSD (°)	Hs (m)	Direzione (°N)	Hs (m)	Direzione (°N)
0.50	1.25	4.2	127.5	30	1.25	127.5	0.75	110.6
0.30	1.75	5.0	127.5	30	1.75	127.5	1.04	110.5
0.10	2.25	5.6	127.5	30	2.25	127.5	1.33	110.4
1.41	0.25	1.9	142.5	30	0.23	139.0	0.09	117.7
1.41	0.75	3.3	142.5	30	0.70	139.0	0.26	117.7
1.01	1.25	4.2	142.5	30	1.17	139.0	0.43	117.7
0.40	1.75	5.0	142.5	30	1.64	139.0	0.59	117.7
0.10	2.25	5.6	142.5	30	2.11	139.0	0.75	117.7
0.10	2.75	6.2	142.5	30	2.57	138.9	0.89	117.6
4.44	0.25	1.9	157.5	30	0.19	146.8	0.01	127.5
4.54	0.75	3.3	157.5	30	0.58	146.8	0.02	127.5
2.12	1.25	4.2	157.5	30	0.97	146.8	0.04	127.5
0.71	1.75	5.0	157.5	30	1.36	146.8	0.05	126.9
0.40	2.25	5.6	157.5	30	1.75	146.8	0.07	124.8
0.20	2.75	6.2	157.5	30	2.14	146.8	0.11	121.6
0.10	3.75	7.3	157.5	30	2.92	146.8	0.25	117.9
4.74	0.25	1.9	172.5	20	0.12	157.6	-	-
3.23	0.75	3.3	172.5	20	0.36	157.6	-	-
1.61	1.25	4.2	172.5	20	0.60	157.6	-	-
0.61	1.75	5.0	172.5	20	0.85	157.6	-	-
0.20	2.25	5.6	172.5	20	1.09	157.6	-	-
0.10	2.75	6.2	172.5	20	1.33	157.6	-	-

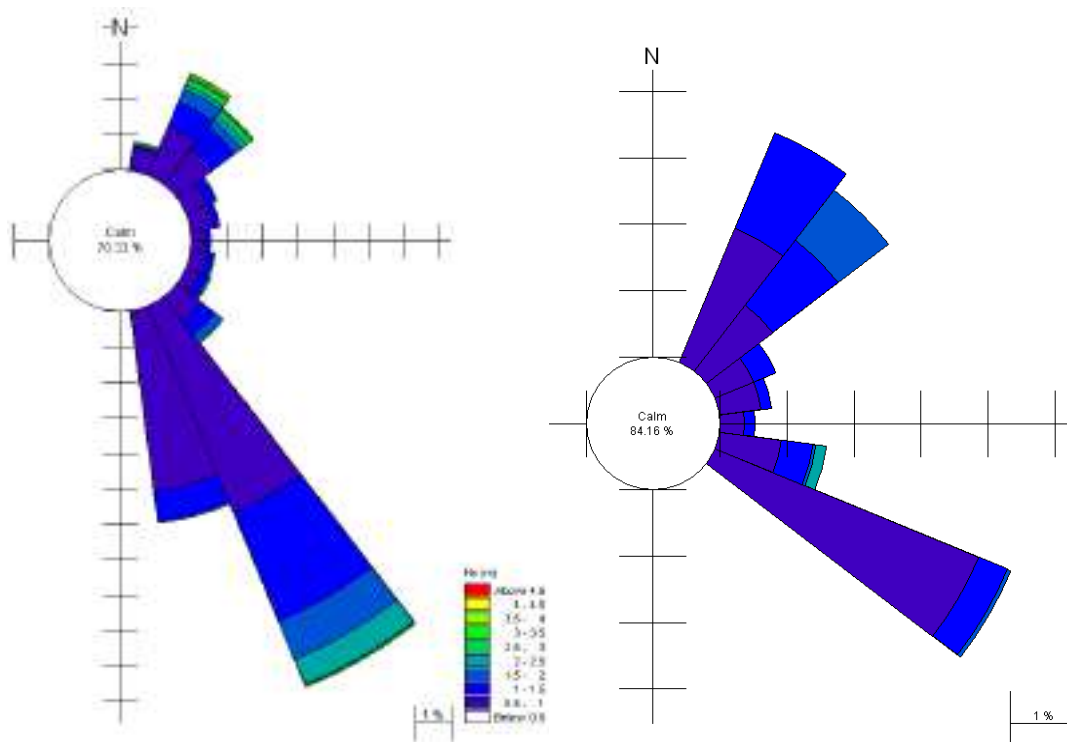


Figura 19 – Clima ondoso medio annuo nel punto A (figura a sinistra) e B (figura a destra)

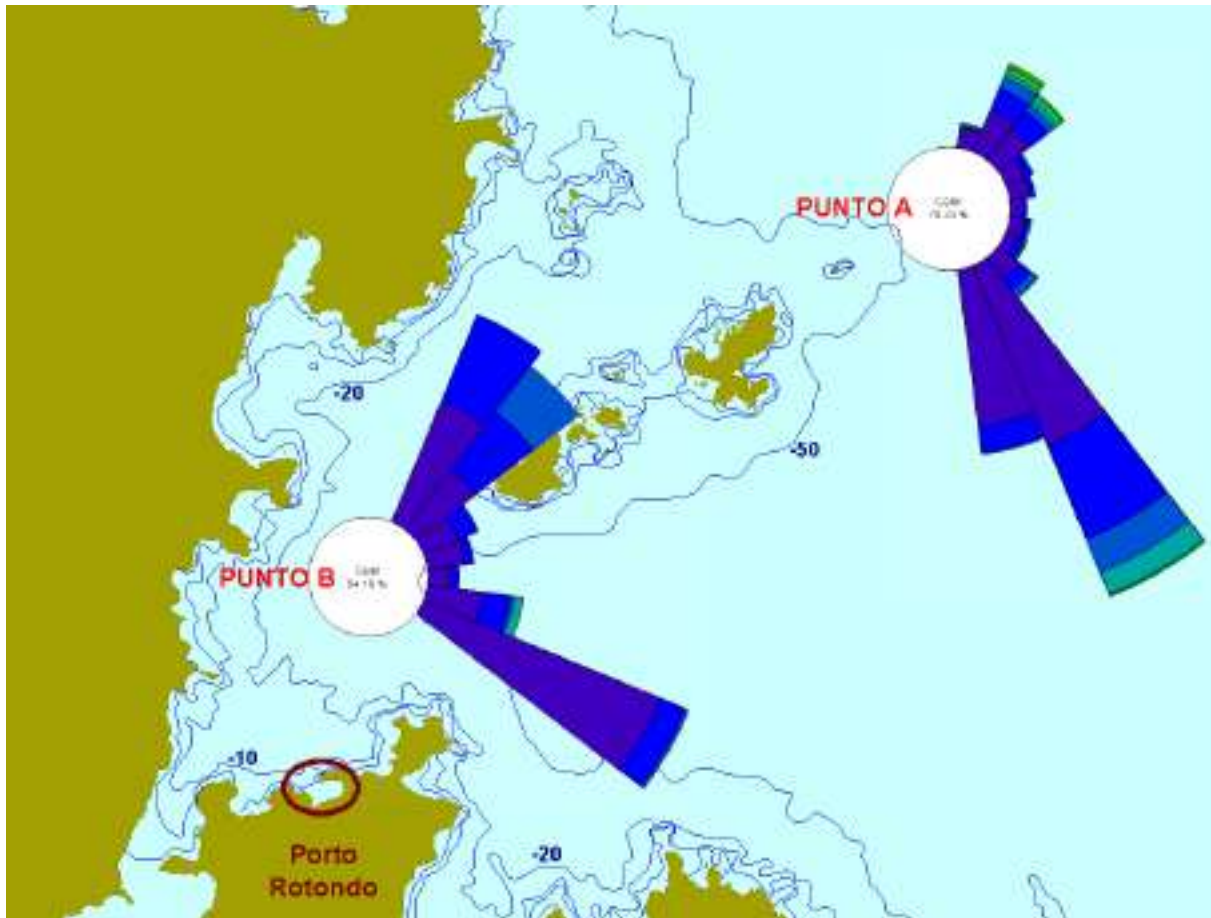


Figura 20 – Rose del clima ondoso medio annuo nei punti A e B

Come era lecito aspettarsi e com'è evidente dalle elaborazioni grafiche delle rose del clima ondoso, oltre che una concentrazione delle onde verso le direzioni di Levante, nel passaggio dal largo verso riva si ha un incremento delle percentuali di calme ed un abbassamento delle altezze massime di moto ondoso.

LARGO: calme + fuori settore: 37.85%;  $H_s$  max = 4.25 m;

PUNTO A: calme + fuori settore: 70.33%;  $H_s$  max = 4.25 m;

PUNTO B: calme + fuori settore: 84.16%;  $H_s$  max = 2.09 m;



Tabella 5 – Clima ondoso nel punto A (-70 m)

PUNTO A		Direzione media (°N)										
		7.5	22.5	37.5	52.5	67.5	82.5	97.5	112.5	127.5	142.5	157.5
Hs (m)	0.25	1.21%	2.42%	1.41%	0.91%	0.81%	1.01%	0.91%	0.91%	0.91%	5.85%	4.74%
	0.75	0.61%	1.41%	1.21%	0.61%	0.61%	0.40%	0.50%	0.40%	0.81%	5.95%	4.84%
	1.25	0.10%	0.71%	0.71%	0.30%	0.20%	0.20%	0.20%	0.30%	0.50%	3.13%	0.81%
	1.75	0.00%	0.40%	0.30%	0.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%	0.30%	1.11%	0.10%
	2.25	0.10%	0.20%	0.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%	0.10%	0.10%	0.71%	0.00%
	2.75	0.10%	0.20%	0.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%	0.00%
	3.25	0.00%	0.10%	0.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%	0.00%
	3.75	0.00%	0.10%	0.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	4.25	0.00%	0.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Calme 21.09%

Fuori settore 49.24%

Totale 70.33%

Tabella 6 – Clima ondoso nel punto B (-30 m)

PUNTO B		Direzione media (°N)										
		7.5	22.5	37.5	52.5	67.5	82.5	97.5	112.5	127.5	142.5	157.5
Hs (m)	0.25	0.00%	3.63%	1.41%	0.91%	0.81%	1.01%	1.82%	2.42%	12.51%	0.00%	0.00%
	0.75	0.00%	2.12%	1.21%	0.61%	0.61%	0.40%	0.91%	4.14%	0.00%	0.00%	0.00%
	1.25	0.00%	1.51%	1.21%	0.40%	0.20%	0.20%	0.50%	0.50%	0.00%	0.00%	0.00%
	1.75	0.00%	0.00%	0.91%	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%	0.10%	0.00%	0.00%	0.00%
	2.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	3.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	3.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	4.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Calme 24.52%

Fuori settore 59.64%

Totale 84.16%

### 5.3 Determinazione delle onde morfologicamente equivalenti

Al fine di rappresentare correttamente l'intero clima ondoso dal punto di vista sedimentologico sono possibili tre principali tipi di approccio:

- utilizzare l'intera serie storica rilevata, o ricostruita dai dati rilevati, con la frequenza di campionamento propria dello strumento di misura;
- utilizzare l'intera rosa ottenuta dal raggruppamento delle onde per classi di altezza e per settori di provenienza, in cui ogni onda viene dotata di un peso pari alla percentuale di occorrenza della classe e del settore di appartenenza;
- considerare un numero limitato di onde che siano rappresentative dell'intera serie in termini di capacità di trasporto solido litoraneo.



Il primo caso è apparentemente il più completo in quanto in teoria permette di valutare correttamente tutti i fenomeni dinamici indotti dal moto ondoso, tuttavia in pratica esso è molto complesso, senza garantire una precisione superiore a quella ottenibile con gli altri due metodi. Infatti, sarebbe necessario considerare un numero di onde molto grande la cui elaborazione richiederebbe un tempo di calcolo esuberante rispetto alle capacità computazionali degli elaboratori disponibili senza che a ciò possa corrispondere un puntuale risultato pienamente rappresentativo dell'ondosità del paraggio.

Il secondo metodo è più facilmente applicabile in quanto consente di accorpare in un'unica onda le onde ricadenti in uno dei settori in cui è suddivisa la rosa aventi altezze ricadenti in un dato gradino con frequenze di apparizione pari alla somma delle frequenze di apparizione di tutte le onde accorpate in quella classe. Questo metodo viene utilizzato, ad esempio, nel caso in cui le elaborazioni non necessitino di eccessivi e gravosi passaggi per ottenere la risoluzione diretta del fenomeno che si sta studiando, come ad esempio, nelle applicazioni dei modelli ad una linea.

L'ultimo caso, ovvero quello che considera un numero molto ristretto di onde, è quello più adeguato allorché si abbia la necessità di applicare modelli molto più complessi e completi del modello ad una linea, per i quali è necessario ridurre il numero di onde da simulare. Un tipico esempio è il caso dell'applicazione del MIKE21 ST per il calcolo del trasporto solido litoraneo che richiede i dati di moto ondoso sotto riva (MIKE21 PMS), e quelli delle correnti marine da esso indotte (MIKE 21 HD).

Dovendosi determinare il trasporto solido litoraneo mediante l'applicazione del modulo ST, si rende necessario ricorrere al calcolo del moto ondoso morfologicamente equivalente.

Il metodo può essere così riassunto:

- 1) Raggruppamento delle onde per settori di provenienza. Nel caso specifico, si scelgono due settori di  $15^\circ$  ciascuno che rappresentano l'intera traversia del sito:

- a) primo settore da 0 a  $60^\circ$ N
- b) secondo settore da  $60^\circ$  a  $180^\circ$ N





- 2) Calcolo del contributo del parametro di flusso di energia del moto ondoso  $P$  per ogni evento. Tale parametro, che è proporzionale alla portata media annua potenziale del trasporto solido longitudinale dei sedimenti, dipende dall'altezza, dal periodo dell'onda e dalla sua direzione di incidenza sulla linea di riva. Con riferimento alle caratteristiche dell'onda al largo esso assume la forma:

$$P_i = H_i^2 T_i \sqrt{\cos(Dir_i - Dir_N)} \cdot \sin(2(Dir_i - Dir_N)) \cdot freq,$$

dove  $H_i$  è l'altezza d'onda significativa a largo in metri;

$T_i$  è il periodo medio in secondi;

$Dir_i$  è la direzione dell'onda incidente al largo in gradi rispetto al Nord;

$Dir_N$  è la direzione della normale alla linea media di riva che nel caso di cui trattasi viene posta pari a  $61^\circ N$ ;

$freq$  è la frequenza di occorrenza dell'onda.

Il parametro flusso di energia dell'intero anno è dato dalla sommatoria dei flussi istantanei:

$$\sum P_i.$$

- 3) Calcolo dell'altezza d'onda pesata  $H_{rep}$  con peso il flusso di energia  $P$ :

$$H_{rep} = \frac{\int H P dH}{\int P dH} \cong \frac{\Delta H \sum H_i P_i}{\Delta H \sum P_i} = \frac{\sum H_i P_i}{\sum P_i},$$

- 4) Scelta, tra le onde osservate, di quella con l'altezza più prossima all'onda  $H_{rep}$ . Se tale altezza si presenta con differenti periodi e direzioni si sceglie quella che determina il maggior contributo in termini di  $P$ .

- 5) Calcolo della frequenza di occorrenza equivalente per dare alla singola onda scelta lo stesso  $P_{is}$  di tutto il gruppo di onde rappresentato:

$$f_{rep} = \frac{\sum P_i}{H_{rep}^2 T_{rep} \sin(2(Dir_{rep} - Dir_N))},$$

Nel caso dello studio, utilizzando la procedura sopraesposta a partire dai dati di moto ondoso estratti nel punto B, si ottengono le due onde morfologicamente equivalenti che, agendo con



la frequenza fittizia  $f_{rep}$ , rappresentano il clima in grado di riprodurre lo stesso trasporto solido del clima reale (Tabella 7).

Tabella 7 – Clima medio annuo morfologicamente equivalente

Evento	Settore rappresentato	Hs	Tm (s)	Tp (s)	MWD (°N)	$f_{rep}$ (%)	Giorni all'anno
<b>ONDA L</b>	0°-60°	1.07	5.0	5.7	29.1	4.39	16.01
<b>ONDA R</b>	60°-180°	1.18	4.2	4.8	65.4	3.30	12.03

Le due onde sono simili per quanto riguarda l'altezza d'onda e la frequenza. L'onda R, pur essendo maggiore in altezza di circa 10 cm, ha un periodo di picco e medio inferiore di circa un secondo rispetto all'onda L.



## 6. VALUTAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI E DEL TEMPO DI RITORNO

### 6.1 Periodo di ritorno dell'onda di progetto

Il periodo di ritorno dell'evento di moto ondoso da assumere per il dimensionamento di un'opera di difesa è funzione della vita minima di progetto dell'opera ( $V_P$ ) e della massima probabilità di danneggiamento ammissibile  $P(T_R, V_P)$  nel periodo di vita operativa dell'opera.

Per la scelta di  $V_P$  e di  $P(T_R, V_P)$  ci si è avvalsi delle "Istruzioni Tecniche per la Progettazione delle Dighe Frangiflutti" del Ministero dei Lavori Pubblici che raccolgono in due tabelle i valori utili per la determinazione dei suddetti parametri. Tali tabelle sono riportate di seguito.

Tabella 8 – Vita minima di progetto (anni) per opere o strutture di carattere definitivo

Tipo di infrastruttura	Livello di sicurezza		
	1	2	3
Uso generale	25	50	100
Uso specifico	15	25	50

Per infrastrutture di uso generale si intendono opere di difesa di complessi civili o industriali, che non siano destinati ad uno specifico scopo e per i quali non è chiaramente identificabile il termine della vita funzionale dell'opera. Per infrastrutture ad uso specifico si intendono le opere di difesa di singole installazioni industriali, di porti industriali, di depositi o piattaforme di carico e scarico, di piattaforme petrolifere, ecc.

"Il livello di sicurezza 1 si riferisce ad opere o installazioni di interesse locale ed ausiliario, comportanti un rischio minimo di perdita di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso della stessa (difese costiere, opere di porti minori o marina, scarichi a mare, strade litoranee ecc.)"

"Il livello di sicurezza 2 si riferisce ad opere o installazioni di interesse generale, comportanti un moderato rischio di perdita di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso della stessa (opere di grandi porti minori, scarichi a mare di grandi città, ecc.)"

"Il livello di sicurezza 3 si riferisce ad opere o installazioni per la protezione dall'inondazione o di interesse sopranazionale, comportanti un elevato rischio di perdita di vite umane o di danno ambientale in caso di collasso della stessa (difese di centri urbani o industriali ecc.)".



Il valore della vita di progetto scelto è 25 anni e corrisponde ad una infrastruttura di uso specifico con livello di sicurezza 1 e livello di sicurezza 1.

Tabella 9 – Massima probabilità di danneggiamento ammissibile  $P(T_R, V_P)$  nel periodo di vita operativa dell'opera

Tipo di danneggiamento	Ripercussione economica	Rischio per la vita umana	
		Limitato	Elevato
Danneggiamento incipiente	Bassa	0.50	0.30
	Media	0.30	0.20
	Alta	0.25	0.15
Distruzione totale	Bassa	0.20	0.15
	Media	0.15	0.10
	Alta	0.10	0.05

Il valore della massima probabilità di danneggiamento scelto è 0.50, corrispondente ad un tipo di danneggiamento incipiente, plausibile per opere di protezione in scogliera che, pur subendo dei danni durante una tempesta, conservano la loro funzione protettiva e possono essere riparate in tempo breve dal danno, ripercussione economica bassa e rischio per la vita umana limitato.

Sulla base di questi valori è stato possibile calcolare il tempo di ritorno utilizzando la relazione:

$$T_R = \frac{V_P}{-\ln[1 - P(T_R, V_P)]} \tag{1}$$

Introducendo i valori di  $V_P$  e  $P(T_R, V_P)$  scelti, la (1) fornisce un periodo di ritorno  $T_R = 36$  anni. Questo significa che l'onda di progetto, sulla quale si basa il dimensionamento delle opere, dovrà essere prodotta da un evento che mediamente si verifica una volta ogni 36 anni.

## 6.2 Analisi statistica degli eventi estremi

I dati d'onda disponibili per il paraggio in esame sono quelli relativi alla pubblicazione "Wind and wave atlas of the Mediterranean Sea", che fornisce tali dati in forma di tabella di frequenza bivariata, su scala annuale e stagionale.

Seguendo la metodologia classica di analisi statistica, la determinazione degli eventi estremi avviene tramite l'applicazione di una distribuzione di probabilità cumulata di non



superamento su una serie storica di dati; siccome in questo caso tale serie non è disponibile, si è proceduti seguendo una tecnica alternativa.

Lo studio MedAtlas fornisce la statistica di vento e di onde, in diversi punti del Mare Mediterraneo, sulla base di dati di varia origine osservati tra il 1989 ed il 1998, quindi in un periodo di tempo di circa 10 anni. A partire dalla tabella di frequenza bivariata fornita da questo Atlante è stata ricavata una serie limitata inferiormente (Tabella 10) avente un numero di valori pari alla numerosità del campione. Le altezze d'onda, comprese in un certo intervallo, sono state determinate utilizzando la funzione casuale.

In particolare questo studio è stato svolto per due settori direzionali delle onde, facendo riferimento al settore di traversia che è stato determinato con lo studio meteomarinico svolto per questo paraggio. Questo settore, compreso tra le direzioni di  $0^\circ\text{N}$  e  $135^\circ\text{N}$ , è stato distinto in un sottosectore principale, che considera gli eventi di Grecale, ossia con direzione di provenienza  $0-65^\circ\text{N}$ , e uno secondario, che comprende le direzioni tra  $65^\circ\text{N}$  e  $135^\circ\text{N}$ .

Tabella 10 - Serie limitata inferiormente per due settori direzionali

	0-65°N	65-135°N
Numero	Hs [m]	Hs [m]
1	4.500	2.750
2	3.861	2.151
3	3.632	2.189
4	3.055	2.333
5	3.483	2.461
6	2.521	1.805
7	2.688	1.892
8	2.835	1.603
9	2.757	1.633
10	2.250	1.715

Sulla base della serie riportata in Tabella 10, è stato effettuato lo studio sugli eventi estremi, ossia sono state definite le altezze d'onda significative  $H_T$  relative a determinati periodi di ritorno  $T_R$ . Il tempo di ritorno è definito come l'intervallo di tempo medio tra due eventi ondosi consecutivi caratterizzati da stati di mare con altezze significative da porre a base per la determinazione dell'onda di progetto. Per la determinazione del tempo di ritorno occorre conoscere l'arco temporale di vita della sovrastruttura  $V_p$ , detta anche vita di progetto, e la



probabilità,  $P(T_R, V_p)$ , o il rischio, che l'evento critico si possa verificare durante tale arco temporale.

L'evento può essere rappresentato nella semplice equazione generale di seguito proposta, ossia come la somma del valore medio  $\mu$  e la deviazione standard  $\sigma$  della distribuzione moltiplicato per fattore frequenza  $K_T$ , che è funzione del tempo di ritorno e del tipo di distribuzione:

$$H_T = \mu + K_T \sigma$$

Alla serie di dati limitata inferiormente viene applicata la distribuzione di probabilità che meglio si adatta a questi ultimi; tra le funzioni continue, nelle costruzioni marittime è molto usata quella di Gumbel. Questa distribuzione rappresenta la forma asintotica di una distribuzione di tipo esponenziale, quale, ad esempio, la distribuzione Normale o Lognormale. La sua forma è:

$$H = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln \left( -\ln \left( 1 - \frac{1}{T_R} \right) \right)$$

dove  $T_R$  è il periodo di ritorno e  $\alpha$  e  $\beta$  sono due parametri funzione del valore medio  $\mu$  e della deviazione standard  $\sigma$  della distribuzione, ottenuti dalle seguenti relazioni:

$$\alpha = \frac{1.2825}{\sigma}$$

$$\beta = \mu - 0.45 \cdot \sigma$$

Dunque, nel caso di distribuzione di tipo Gumbel il fattore frequenza  $K_T$  è dato dall'espressione:

$$K_T = - \left[ 0.45 + 0.7797 \ln \left( -\ln \frac{T_R - 1}{T_R} \right) \right]$$

Sulla base di queste considerazioni, sono state determinate le altezze d'onda per diversi periodi di ritorno, come riportato in Tabella 11.

Tabella 11 – Fattore di frequenza  $K_T$  e Altezza d'onda significativa  $H_T$  per diversi periodi di ritorno  $T_R$

$T_R$ [anni]	0-65°N		65-135°N	
	$K_T$	$H_T$ [m]	$K_T$	$H_T$ [m]
1	-1.132	2.37	-1.132	1.62
5	0.720	3.66	0.720	2.33
10	1.305	4.07	1.305	2.56
20	1.866	4.46	1.866	2.77
50	2.592	4.96	2.592	3.05
100	3.137	5.34	3.137	3.26
200	3.679	5.72	3.679	3.47





Nel presente studio è stato determinato che l'altezza di massima intensità cui l'infrastruttura in progetto potrà essere esposta nell'arco temporale del suo esercizio è quella relativa a un tempo di ritorno di 36 anni, che corrisponde ad un'altezza di 4.78 m per il settore di Grecale e di 2.95 m per il settore di Levante.

### 6.3 Propagazione degli eventi estremi dal largo a riva

Le onde relative al tempo di ritorno scelto sono state trasferite dal largo verso riva prima mediante l'utilizzo del modulo MIKE21-NSW, che tiene conto delle trasformazioni che le onde subiscono nel propagarsi verso riva dovute a fenomeni di rifrazione, shoaling, frangimento e resistenza del fondo, e successivamente, per i fondali più bassi, mediante l'applicazione del modulo MIKE21-PMS, che consente di rappresentare i fenomeni di rifrazione, interazione con il fondo, diffrazione e riflessione per onde lineari che si propagano su un fondo con batimetria gradualmente variabile.

Per la costruzione della griglia di input dei modelli è stato utilizzato il rilievo batimetrico effettuato nel Golfo antistante il porto di Porto Rotondo nel febbraio 2010. Il rilievo si estende da Punta Nuraghe a Punta Volpe ed ha maglie di 5, 50, 100 e 200 metri. Per le zone non coperte dal rilievo sono state utilizzate le carte nautiche.

Nella Tabella 12 sono rappresentate trasformazioni che subiscono gli eventi estremi (da Grecale e da Levante) nel propagarsi con il modulo NSW.

Tabella 12 – Trasformazioni del modello NSW

Griglia NSW	LARGO		Tp (s)	Tm (s)	cella estrazione risultati	SOTTOCOSTA	
	Hs (m)	Dir (°N)				Hs (m)	Dir (°N)
G2	4.78	45	10.4	8.2	1120-140	4.23	50
G3	2.95	90	8.2	6.5	1160-182	2.93	90

Le trasformazioni che gli eventi subiscono nel propagarsi su fondali più bassi sono rappresentate graficamente (dalla Figura 21 alla Figura 34) e riassunte nei grafici di Figura 35, per gli eventi di Grecale, e Figura 36, per gli eventi di Levante. I punti indicati con le lettere "A", "B" e "C" rappresentano i punti nei quali è stata effettuata un'estrazione del risultato ottenuto. Nel dettaglio il punto A è di fronte all'imboccatura del porto, il punto B è situato al limite della nuova area d'ormeggio e il punto C si trova di fronte alla spiaggia Rudalza.

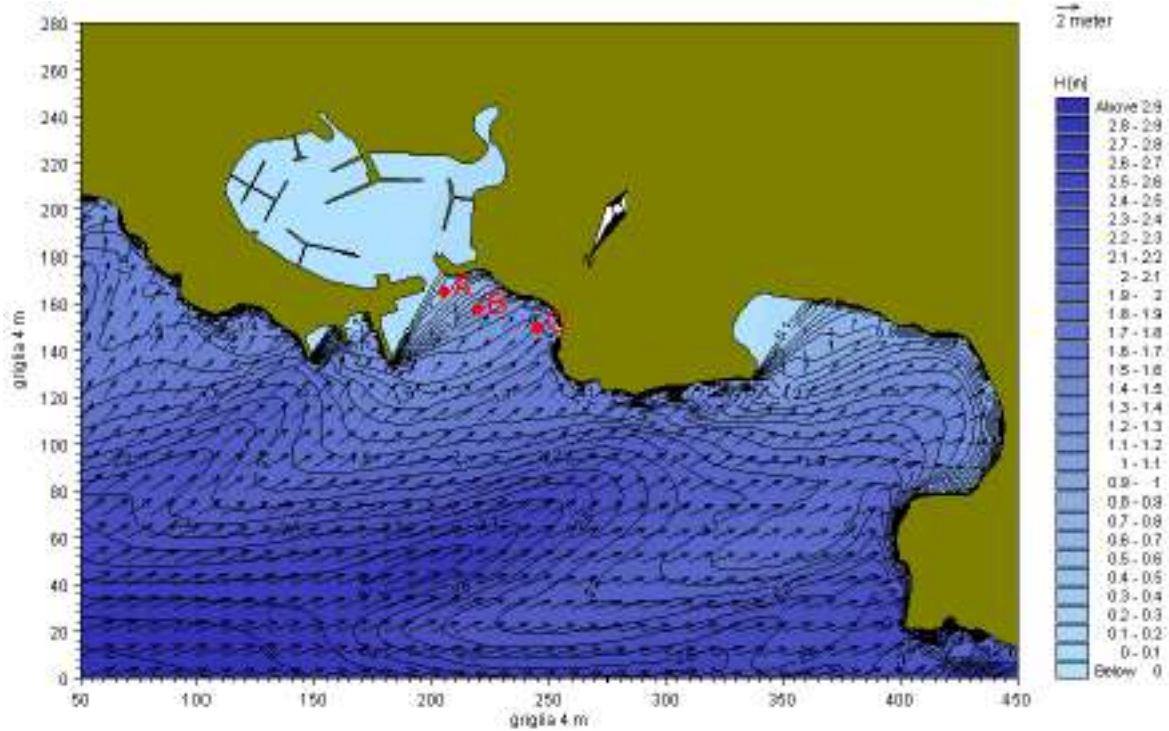


Figura 21 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Grecale

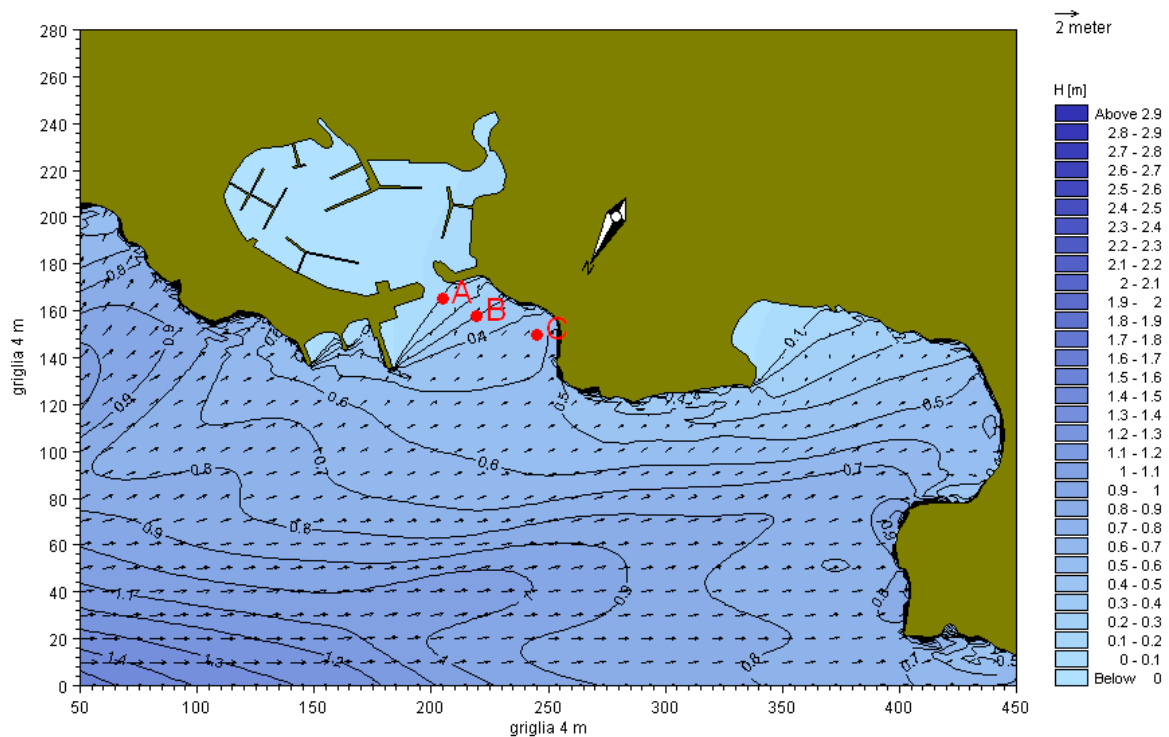


Figura 22 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Levante

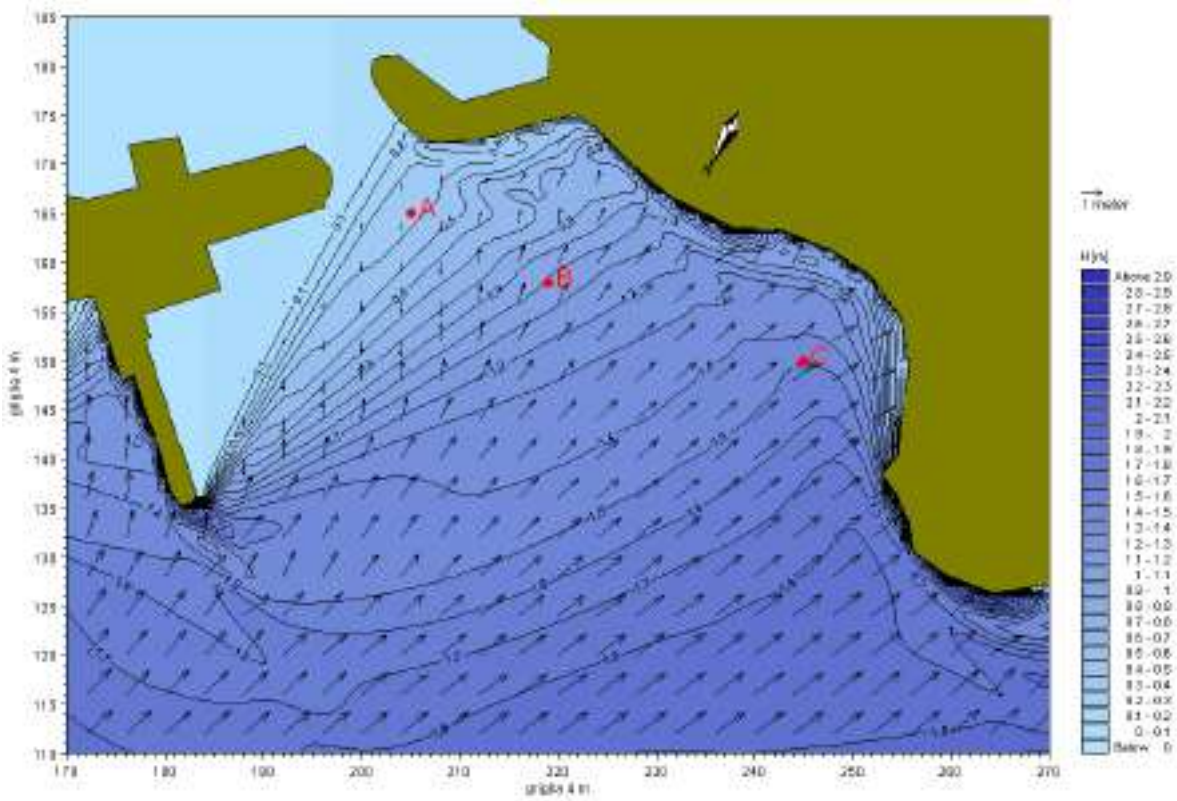


Figura 23 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Grecale nel layout attuale

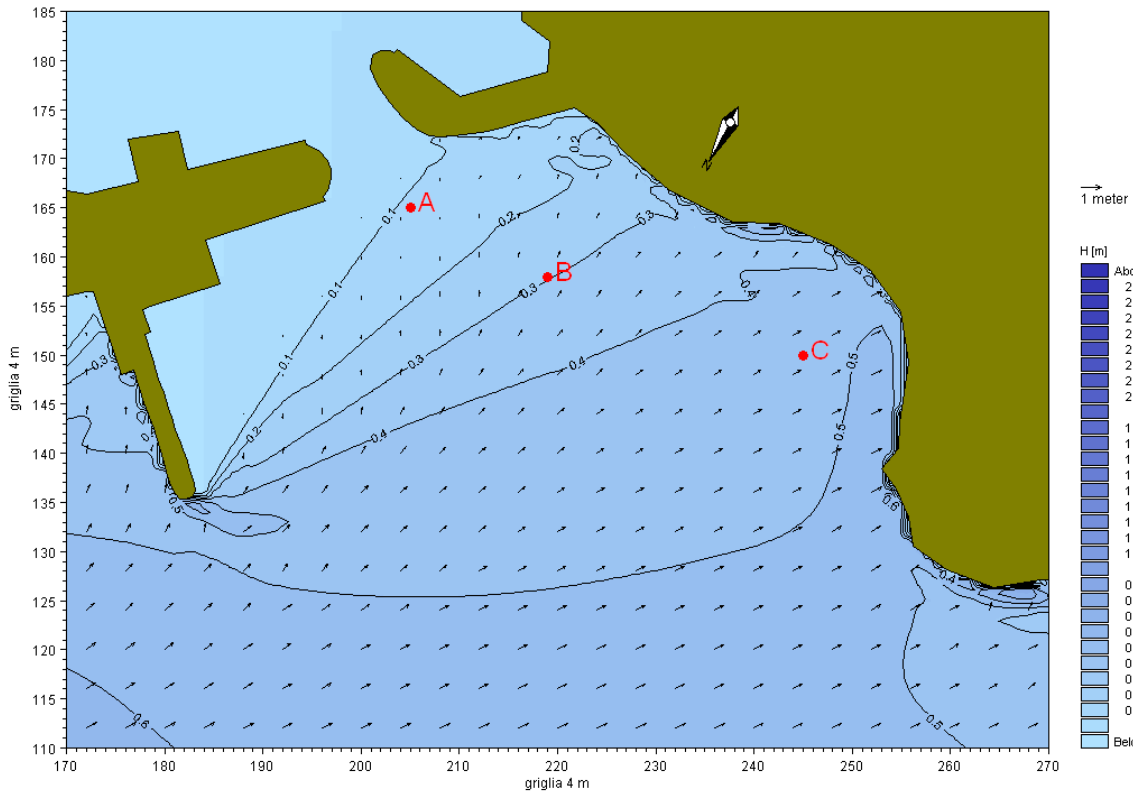


Figura 24 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Levante nel layout attuale



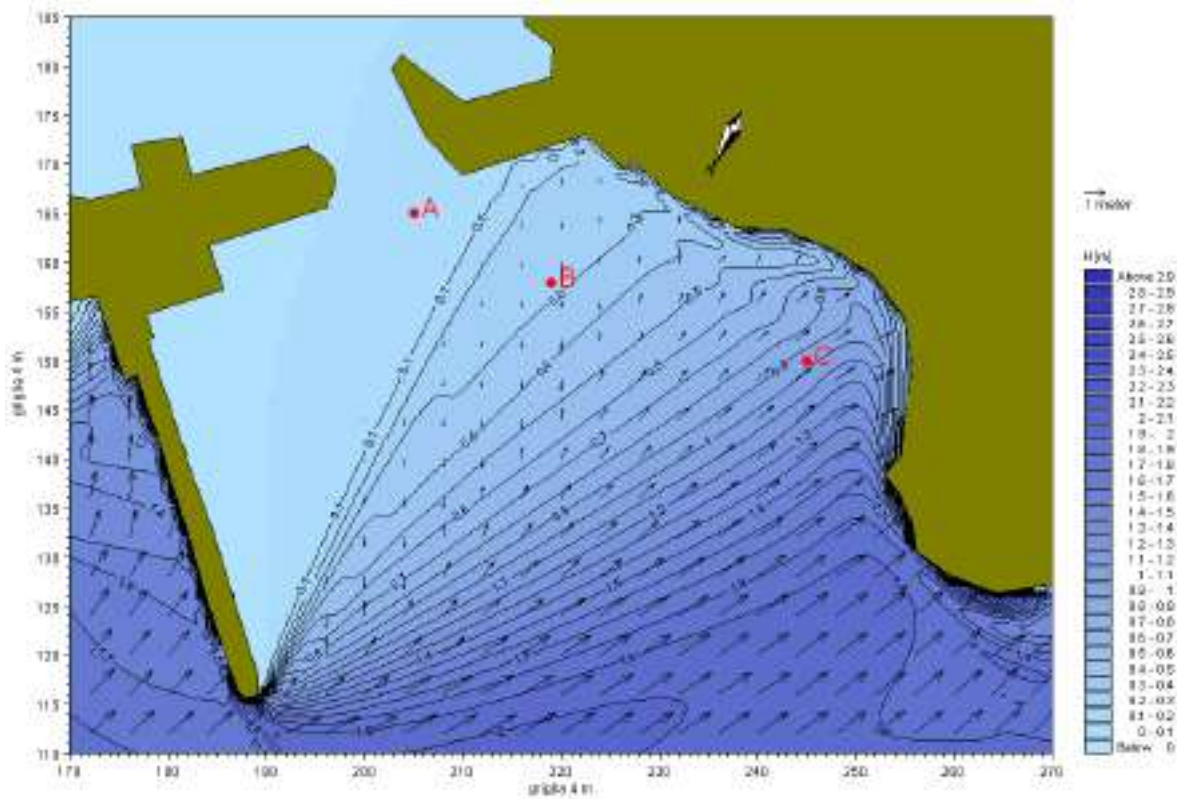


Figura 25 – Propagazione locale dell'onda con  $Tr = 36$  anni proveniente da Grecale nel layout 1

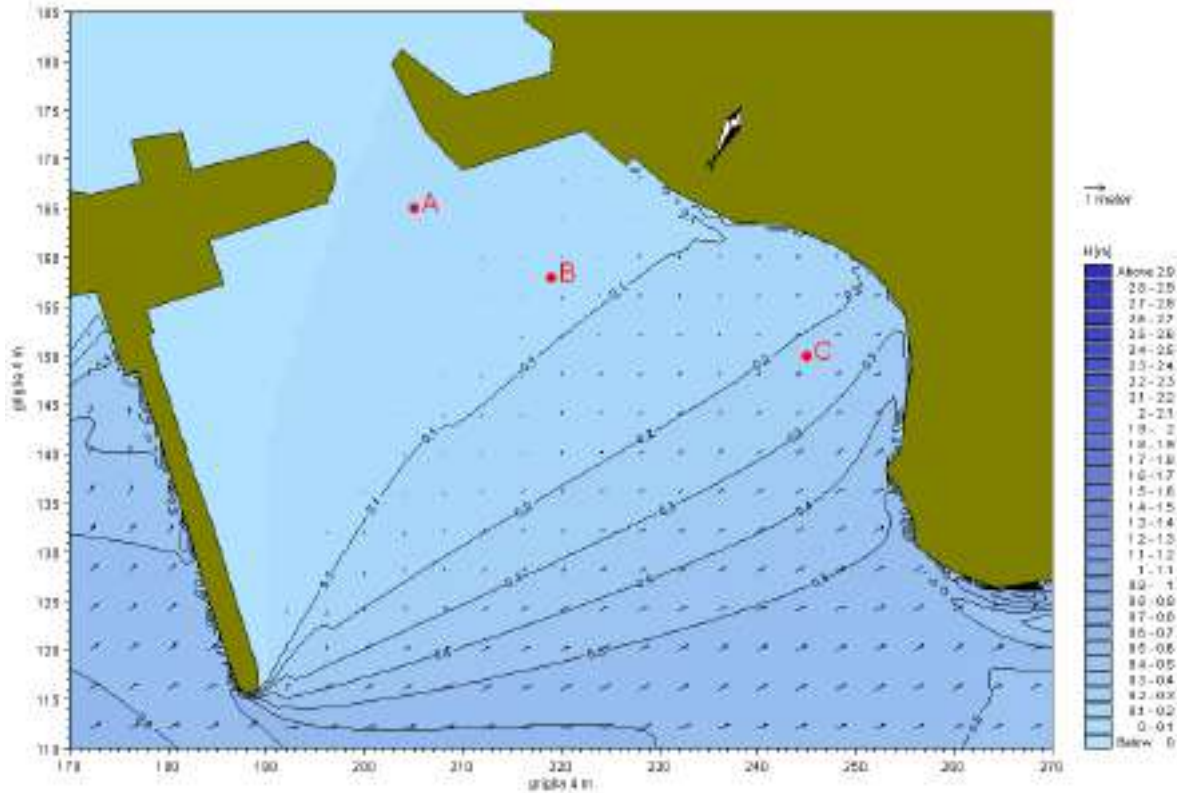


Figura 26 – Propagazione locale dell'onda con  $Tr = 36$  anni proveniente da Levante nel layout 1

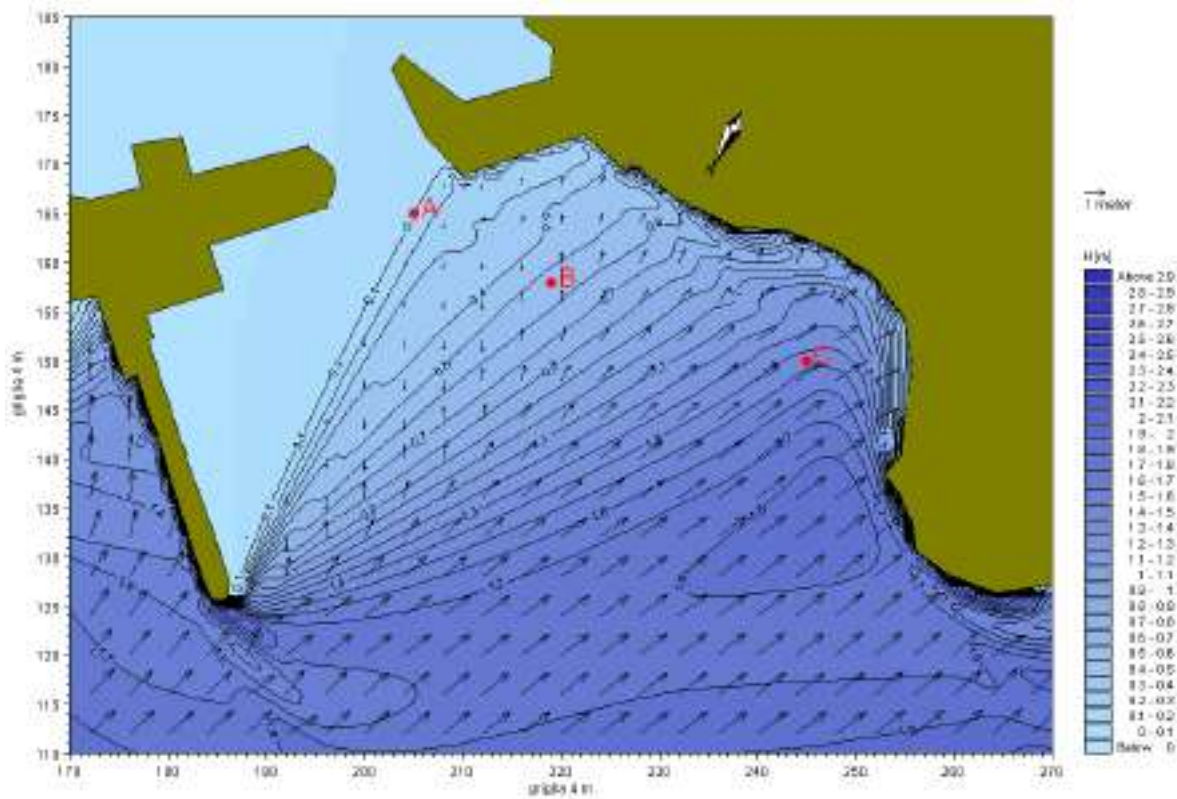


Figura 27 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Grecale nel layout 2

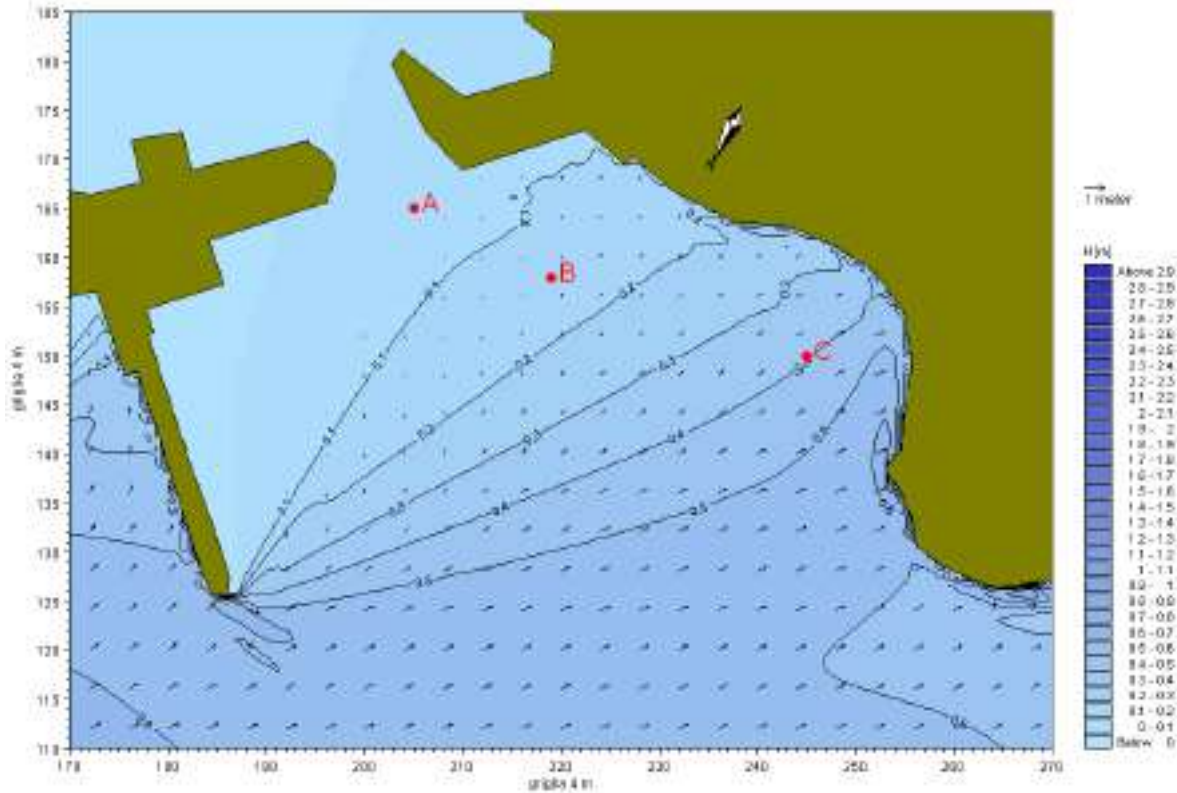


Figura 28 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Levante nel layout 2



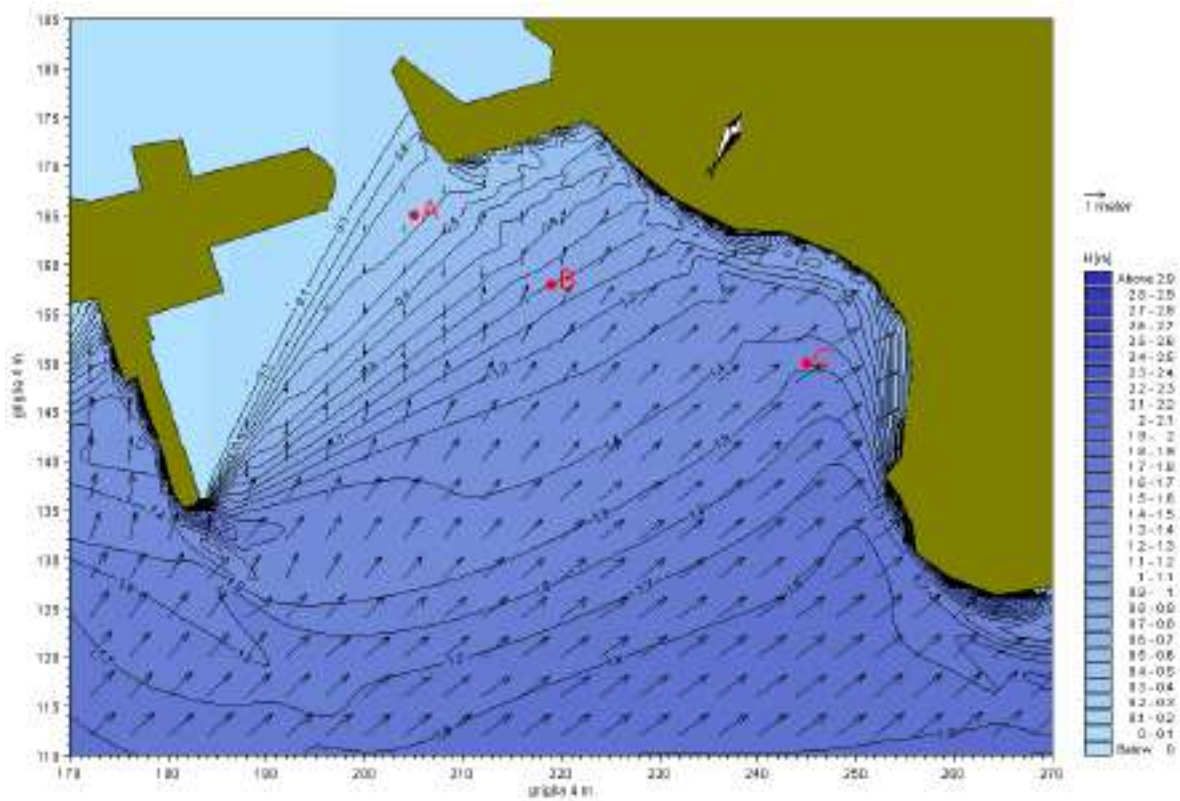


Figura 29 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Grecale nel layout 3

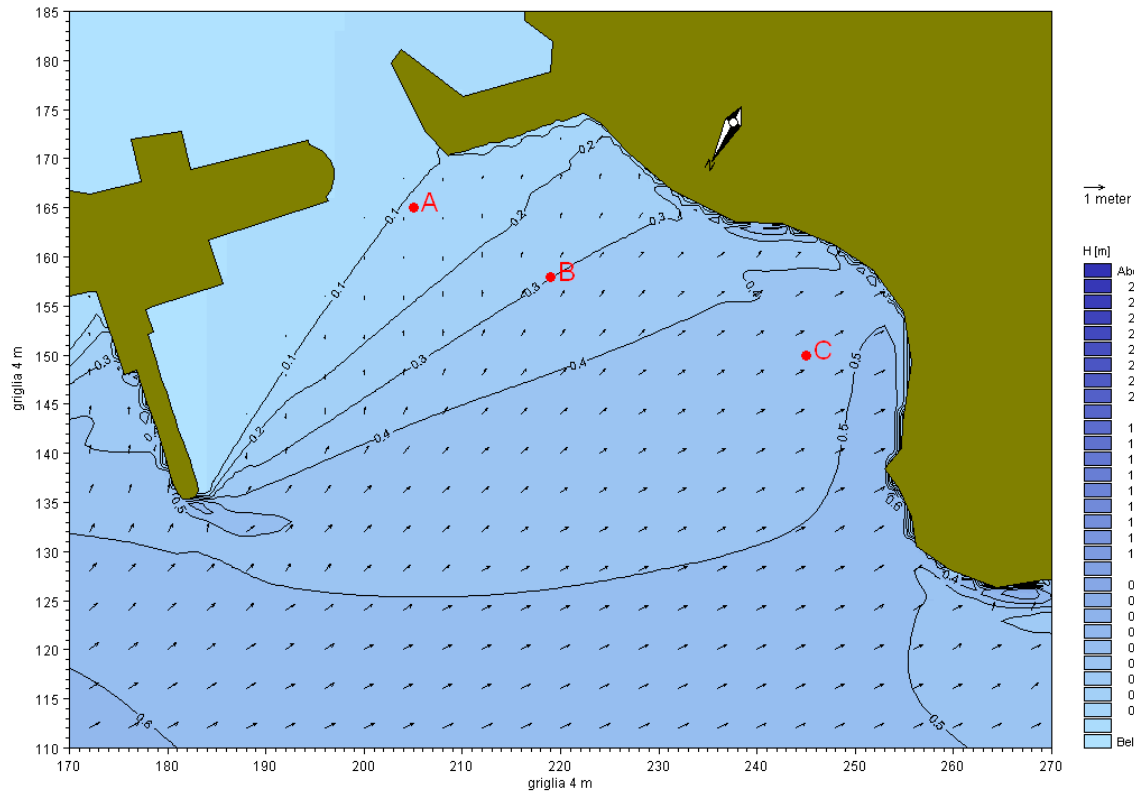


Figura 30 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Levante nel layout 3



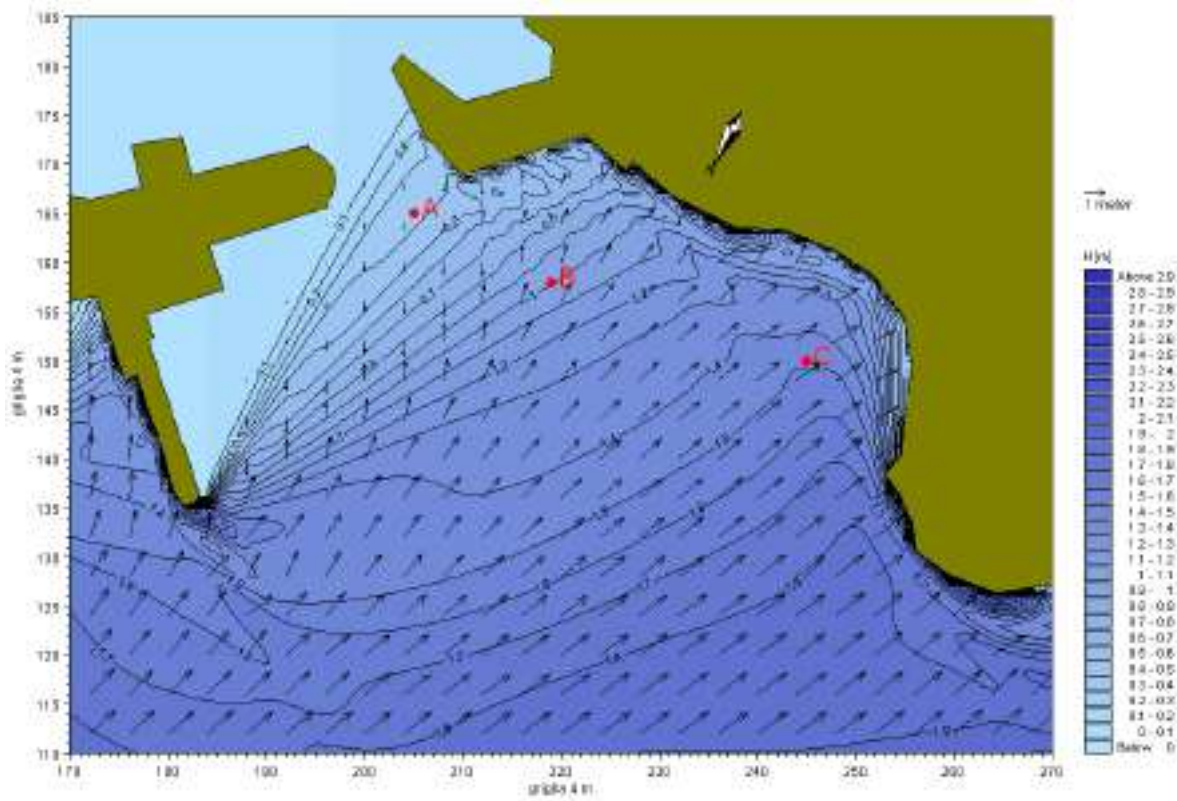


Figura 31 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Grecale nel layout 4

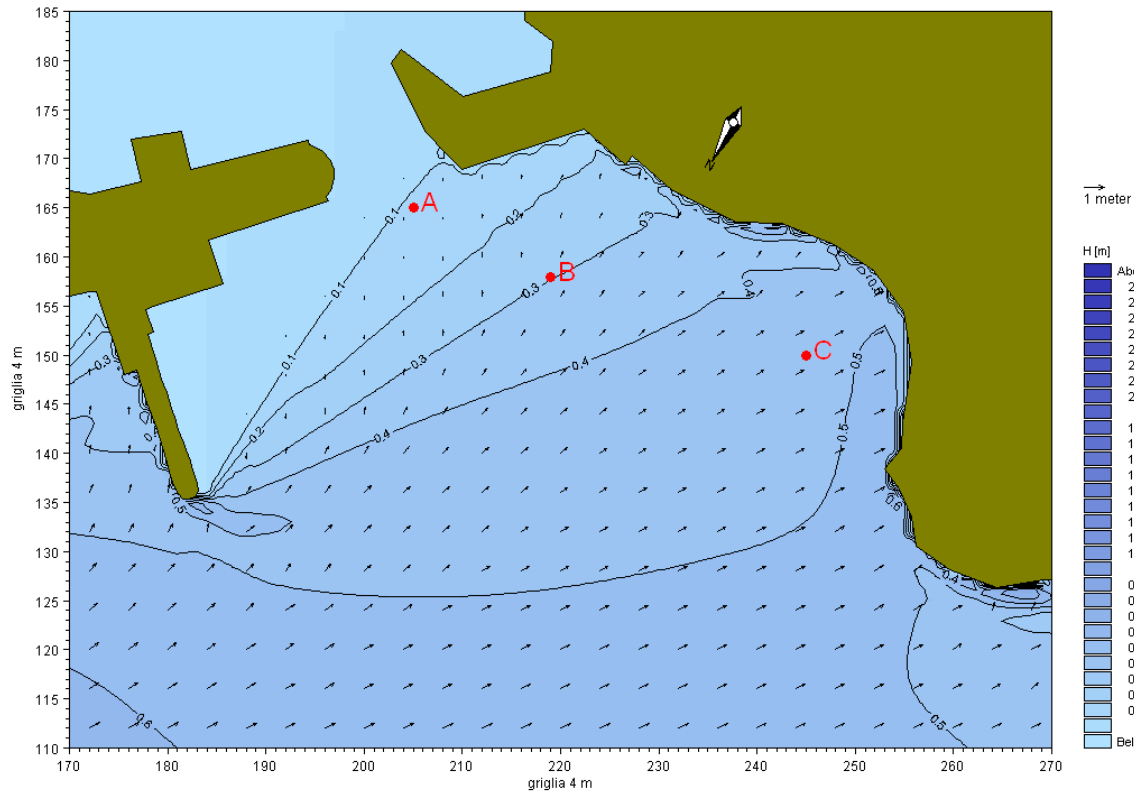


Figura 32 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Levante nel layout 4

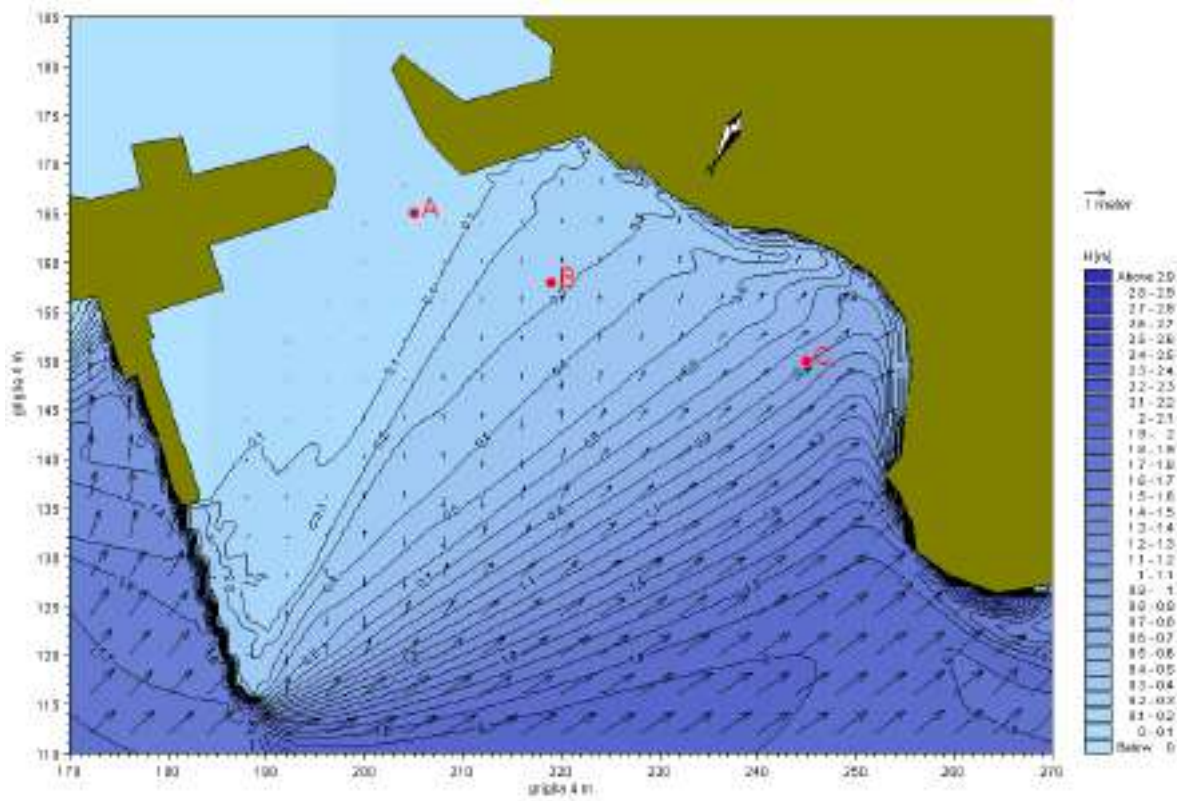


Figura 33 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Grecale nel layout 5

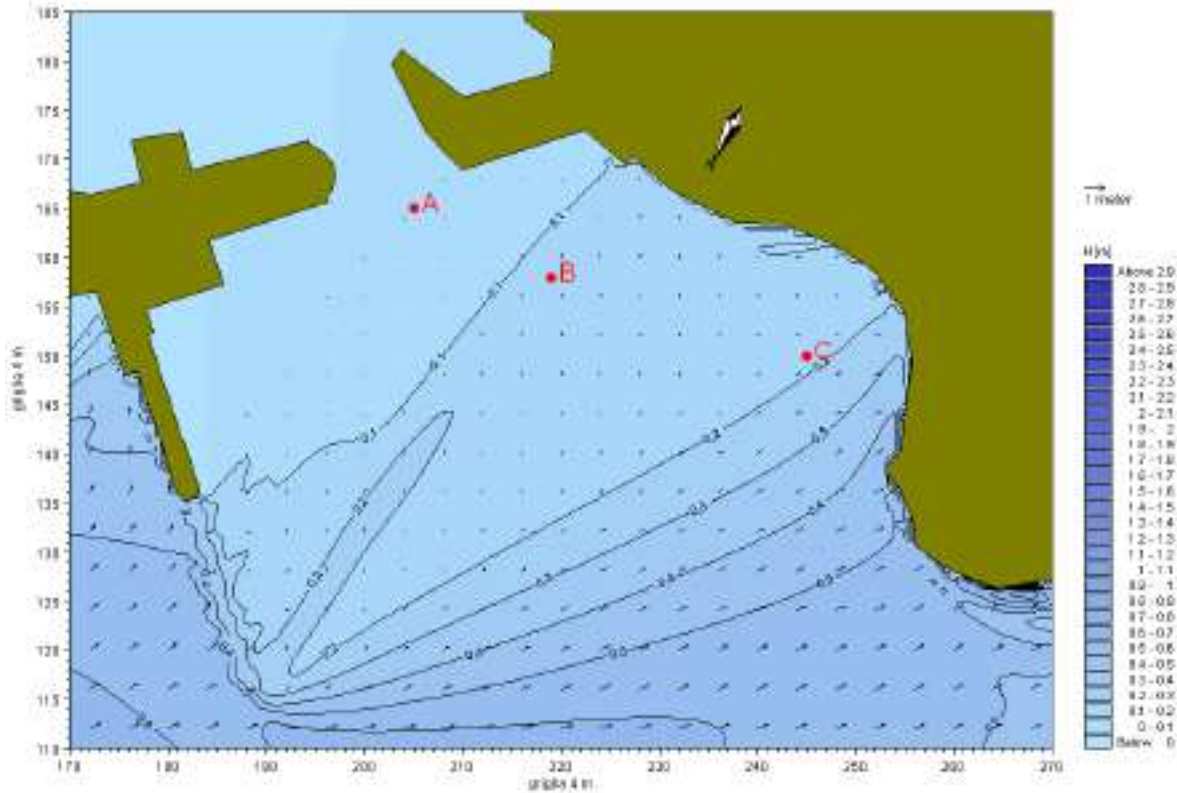


Figura 34 – Propagazione locale dell'onda con  $T_r = 36$  anni proveniente da Levante nel layout 5

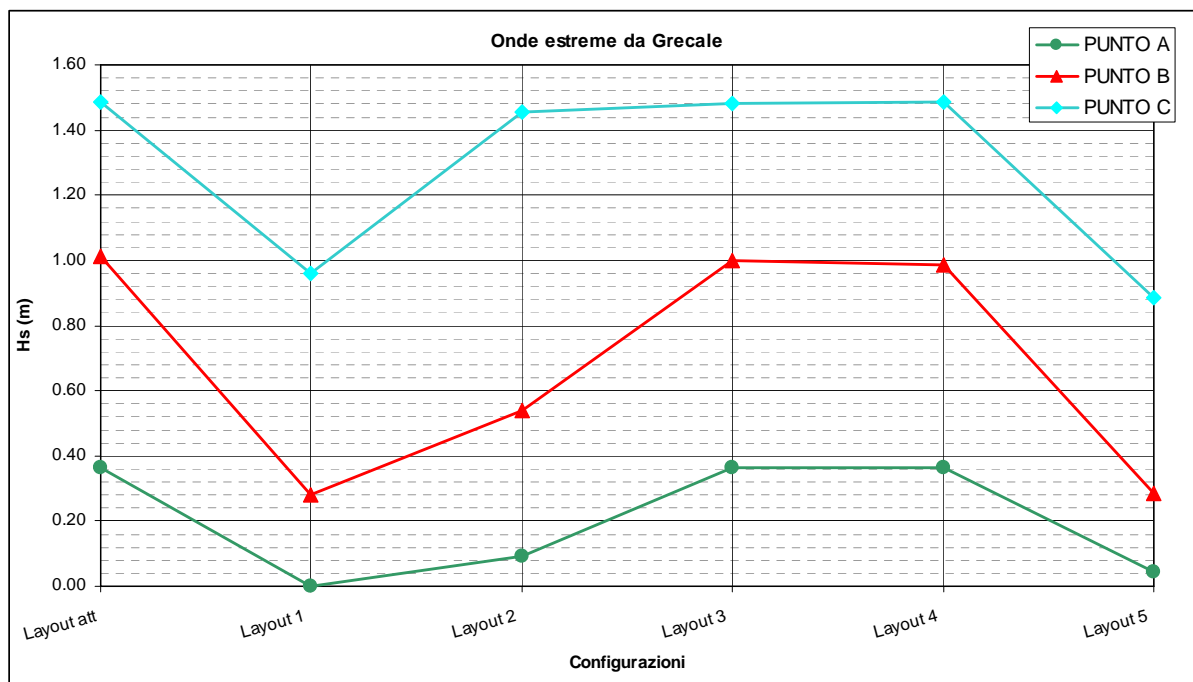


Figura 35 – Valori delle altezze d’onda nei punti A, B e C nel caso di onde con  $T_r = 36$  anni prodotte da eventi di Grecale per ciascuna configurazione

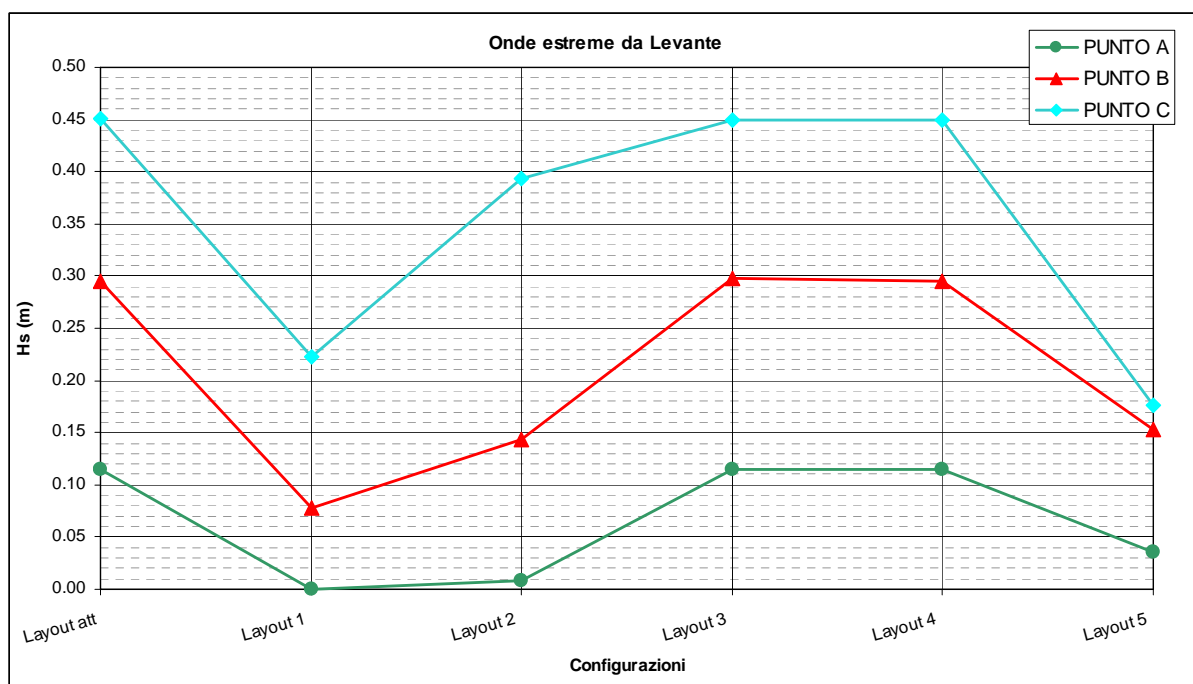


Figura 36 – Valori delle altezze d’onda nei punti A, B e C nel caso di onde con  $T_r = 36$  anni prodotte da eventi di Levante per ciascuna configurazione



#### **6.4 Analisi dei risultati degli eventi estremi**

Dall'osservazione dei risultati risulta evidente come gli eventi estremi di Grecale producano una maggiore agitazione in prossimità del porto. Le altezze d'onda prodotte da eventi estremi di Levante sono sensibilmente ridotte.

Dall'osservazione dei risultati non si nota una sostanziale modifica dei valori di moto ondoso nelle configurazioni 3 e 4. La configurazione 1 è quella che garantisce maggiori riduzioni delle altezze d'onda in tutti i punti.

Nel punto A, presso l'imboccatura del porto, le configurazioni 1, 2 e 5 garantiscono un'ottima riduzione del moto ondoso rendendo più sicura la navigazione in queste situazioni. Le configurazioni 3 e 4 non garantiscono invece alcuna riduzione del moto ondoso, anzi al più si potrebbero generare pericolosi fenomeni di riflessione di difficile valutazione e previsione.

Nel punto B, all'estremità dei nuovi ormeggi previsti, si ha una riduzione dell'agitazione ondosa del 72% circa per la configurazione 1 (con altezze di 0.28 m) e del 47% per la configurazione 2 (con altezze di 0.54 m) per gli eventi da Grecale a fronte di un'altezza di 1.01 m nella situazione attuale.

Nel punto C, in prossimità della spiaggia di Rudalza, la situazione attuale si mantiene pressoché invariata nelle configurazioni 2, 3 e 4 mentre si hanno sensibili riduzioni del moto ondoso nelle configurazioni 1 e 5.

Per quanto riguarda l'agitazione ondosa, i risultati ottenuti nella configurazione 5, con barriera sommersa, sono paragonabili a quelli ottenuti per la configurazione 1.



## 7. PROPAGAZIONE DELLE ONDE MORFOLOGICAMENTE EQUIVALENTI DAL LARGO A RIVA

Come per gli eventi estremi anche le onde morfologicamente equivalenti sono state trasferite dal largo verso riva utilizzando il modulo MIKE21-PMS. Le simulazioni sono state eseguite nella configurazione attuale e nelle 5 configurazioni di progetto.

L'applicazione di tale modulo ha permesso di calcolare le condizioni al contorno, in termini di flussi e di livelli, e interne al dominio, in termini di radiation-stress, necessarie per l'applicazione del modello idrodinamico e quindi per lo studio delle correnti indotte dal moto ondoso.

Per l'applicazione del modello MIKE21-PMS sono state usate come onde di input quelle rappresentate in Tabella 13 relative al clima medio annuo morfologicamente equivalente.

Tabella 13 – Onde utilizzate per l'applicazione del modello PMS

nome onda	Direzione	H (m)	Tp (s)	Tm (s)
L	29.1°N	1.07	5.7	5.0
R	65.4°N	1.18	4.8	4.2

Il dominio di calcolo è stato scelto con il contorno off-shore posto su isobate di – 50 m, con l'asse delle y orientato per 151°N. L'origine degli assi è nel punto di coordinate UTM 32 WGS84 E = 546'507 m; N = 4'546'746 m. La maglia è composta da 1'325 celle lungo la direzione x e 1'325 celle lungo la direzione y, per un totale di 1'755'625 celle di calcolo. La dimensione delle celle di calcolo è di 4 x 4 m.

La resistenza al moto prodotta dal fondo è stata introdotta mediante la scabrezza di Nikuradse pari a 2 mm.

A partire dalla Figura 38 fino alla Figura 43 sono rappresentati i risultati del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda L, successivamente, dalla Figura 44 alla Figura 49, i risultati per l'onda R.

Per ciascun layout si è rappresentato il campo di moto ondoso con le linee di uguale altezza d'onda e le direzioni associate al moto ondoso in ogni punto.



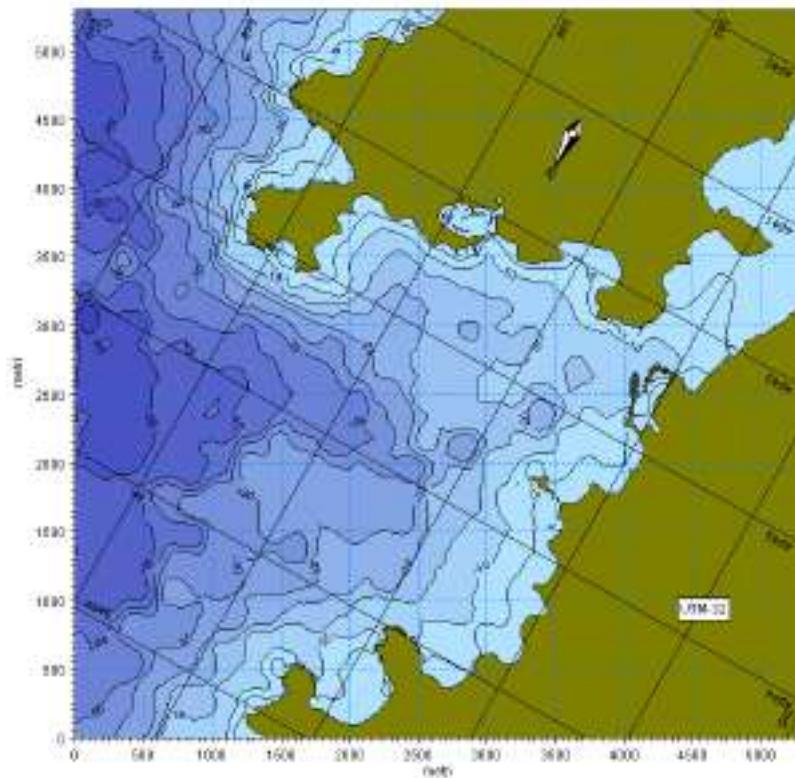


Figura 37 – Dominio di calcolo dei moduli MIKE21-PMS e MIKE21-HD

### 7.1 Analisi dei risultati degli della propagazione del moto ondoso

Dai risultati del moto ondoso generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) si nota come le onde vengano diffratte dal pennello esistente nella parte Nord-Est dell'imboccatura del porto. Tuttavia le onde mantengono una certa importanza anche a ridosso del molo Ovest dell'imboccatura (Figura 38). L'area dell'imboccatura portuale è soggetta solo ad onde diffratte per effetto del cono d'ombra generato dal pennello esistente. Le configurazioni 1 (prolungamento pennello di 80 m, Figura 39) e la 5 (con barriera sommersa, Figura 43) sono quelle che garantiscono la maggiore attenuazione del moto ondoso con interessamento anche della spiaggia Rudalza. Le configurazioni 3 e 4 (Figura 41 e Figura 42) non influenzano il regime di moto ondoso. La configurazione 2 (prolungamento pennello di 40 m, Figura 40) attenua il moto ondoso nell'imboccatura del porto senza tuttavia interessare significativamente la spiaggia Rudalza.

In tutte le configurazioni nelle spiagge ad Ovest (Ira e Rudargia) e ad Est del porto non si hanno modificazioni del regime ondoso rispetto alla situazione attuale.

Il moto ondoso generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) da origine ad una situazione simile a quella generata dall'onda L, ma con altezze d'onda decisamente inferiori.



**Risultati del modello di propagazione del moto ondoso:**  
**onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ )**

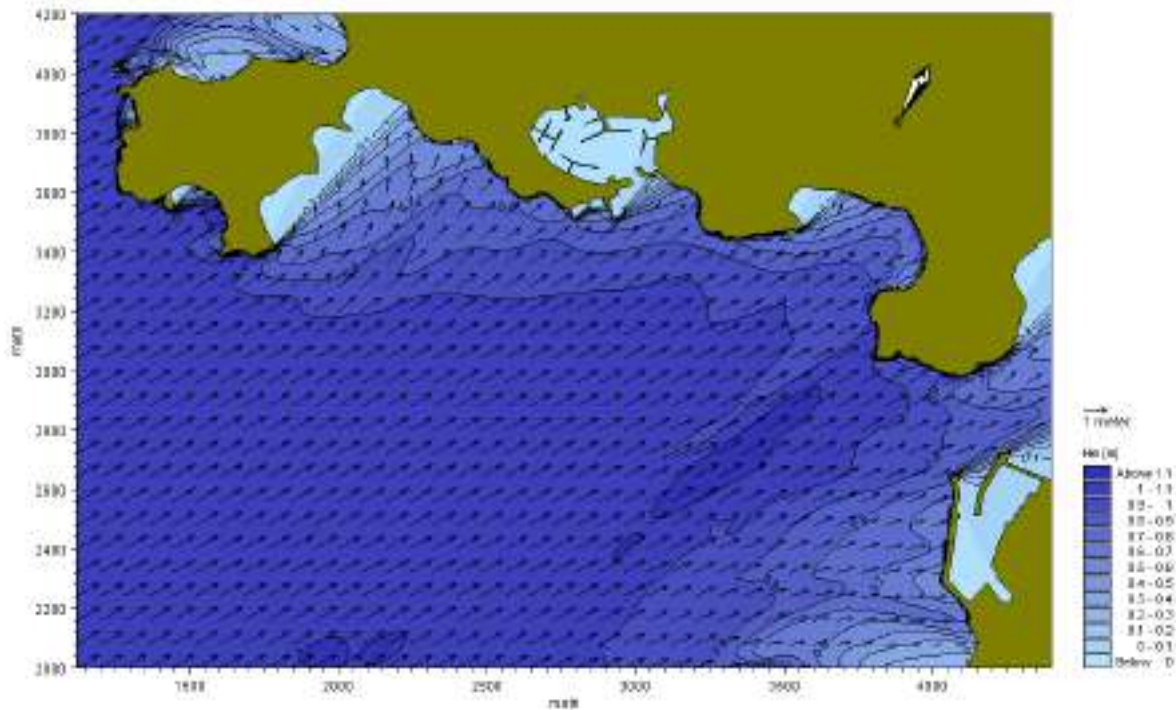


Figura 38 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nella configurazione attuale

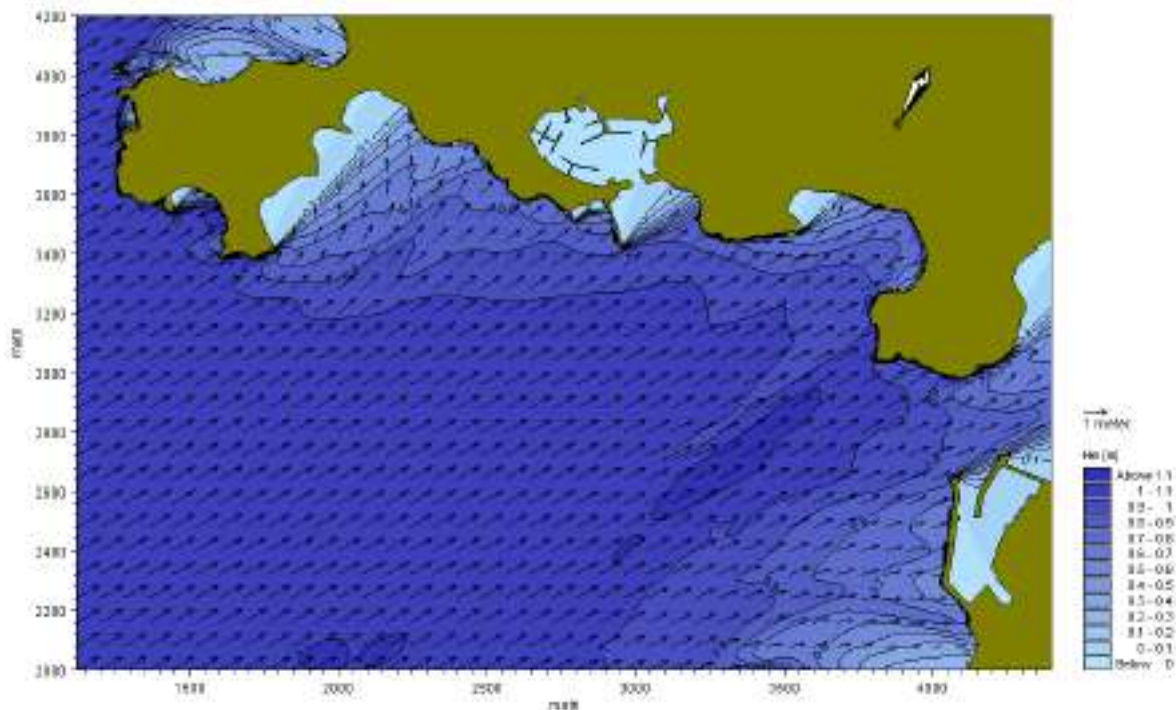


Figura 39 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nella configurazione 1



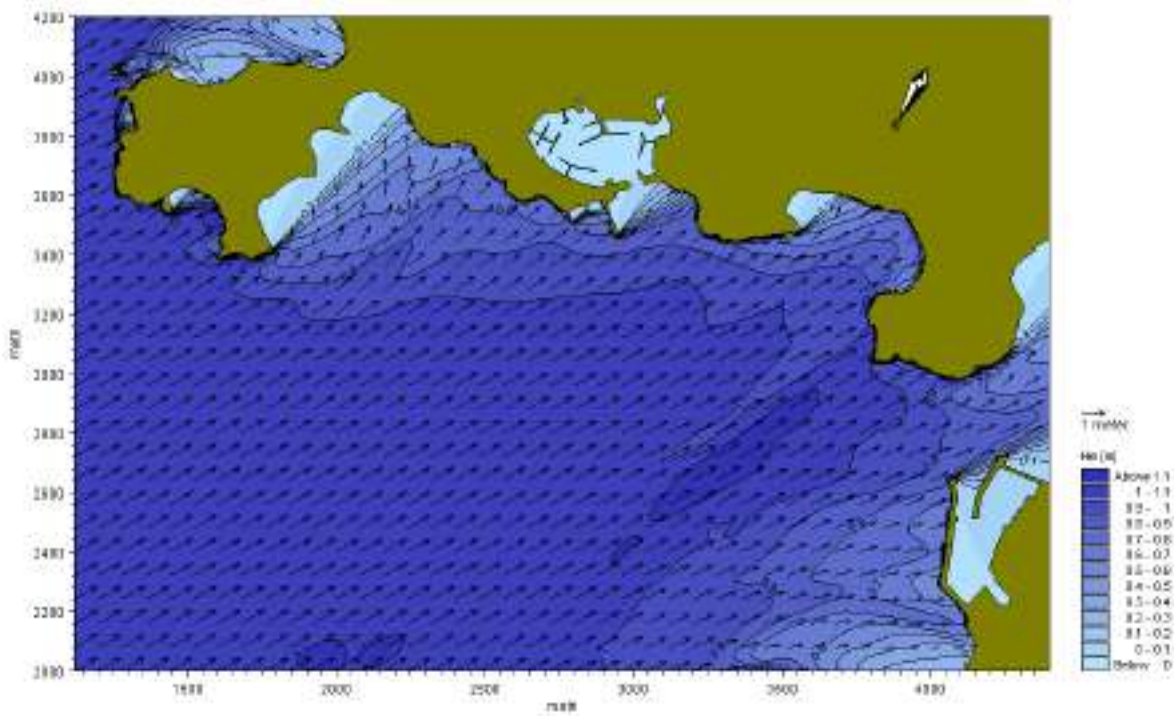


Figura 40 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda L (Hs=1.07 m; Tp=5.7 s; dir=29.1°N) nella configurazione 2

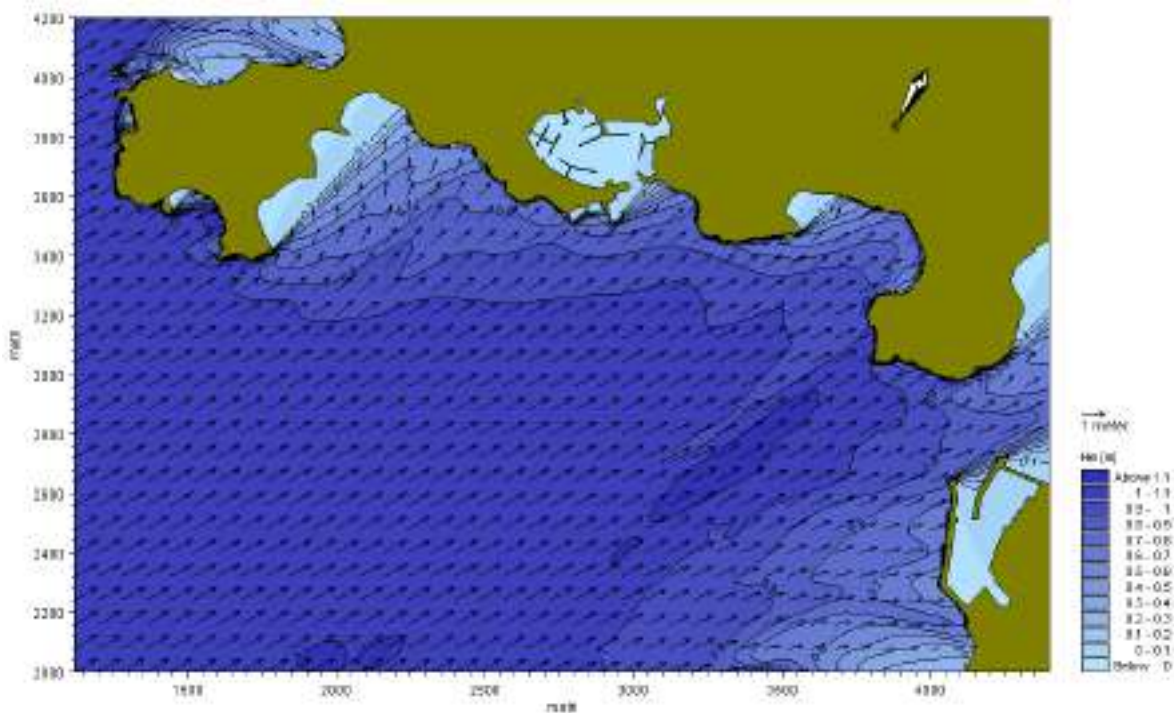


Figura 41 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda L (Hs=1.07 m; Tp=5.7 s; dir=29.1°N) nella configurazione 3

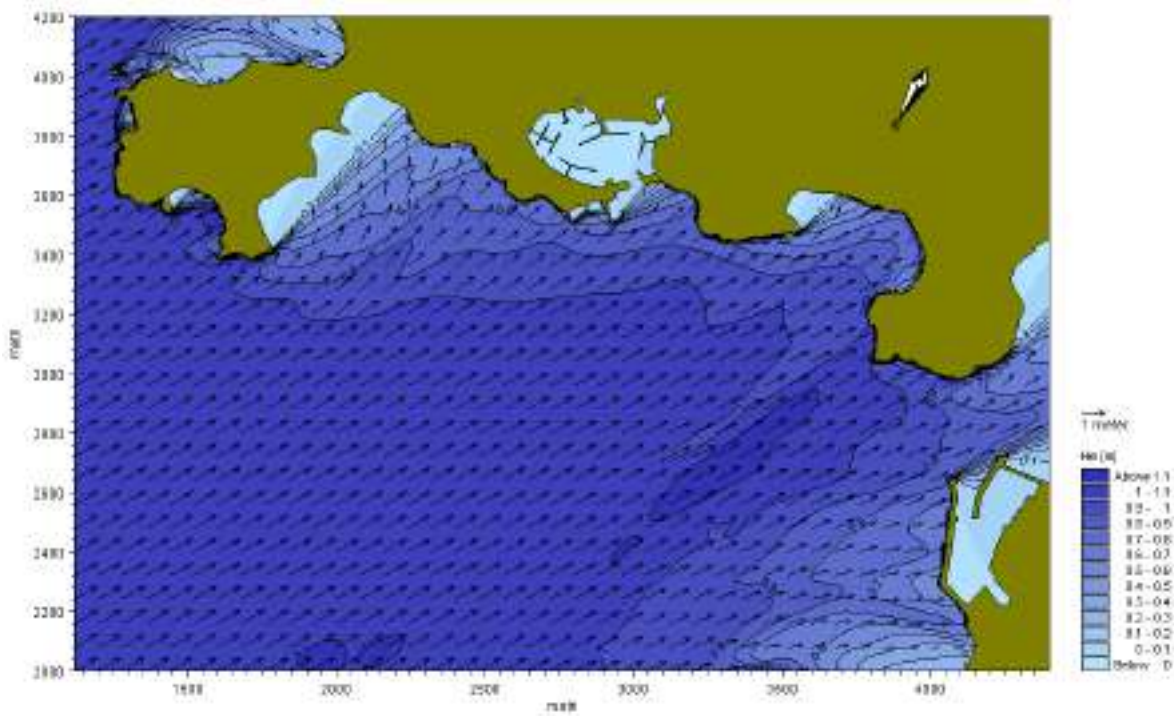


Figura 42 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda L (Hs=1.07 m; Tp=5.7 s; dir= 9.1°N) nella configurazione 4

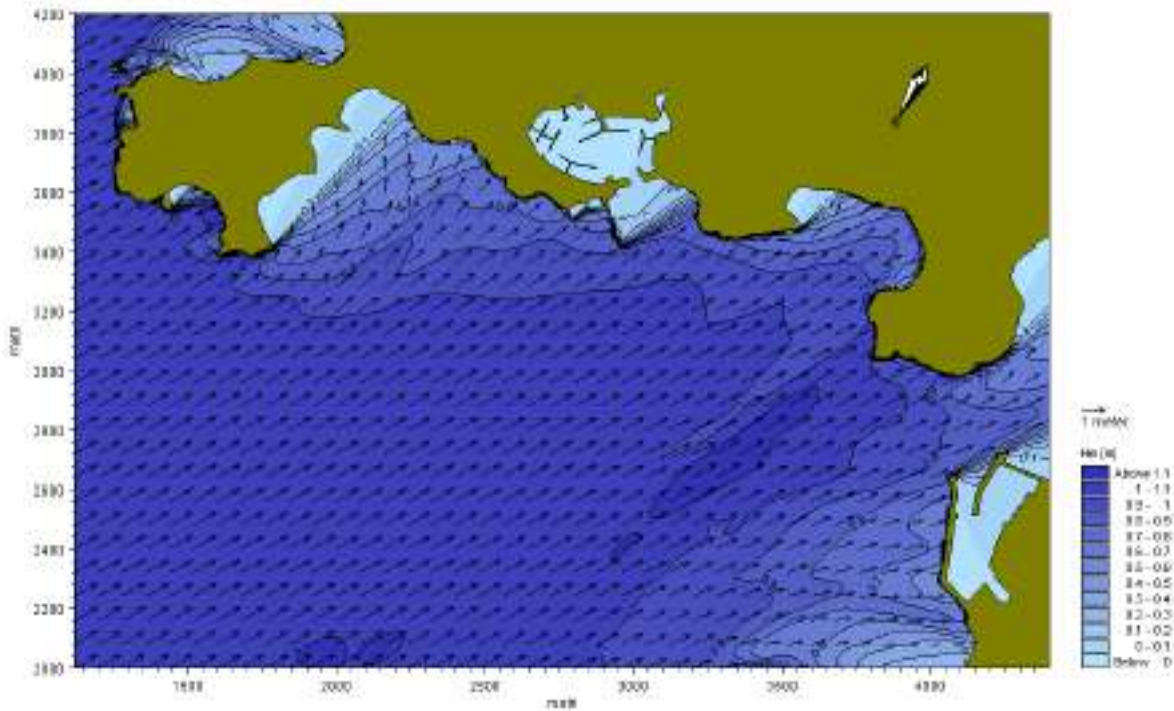


Figura 43 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda L (Hs=1.07 m; Tp=5.7 s; dir=29.1°N) nella configurazione 5





**Risultati del modello di propagazione del moto ondoso:**  
**onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ )**

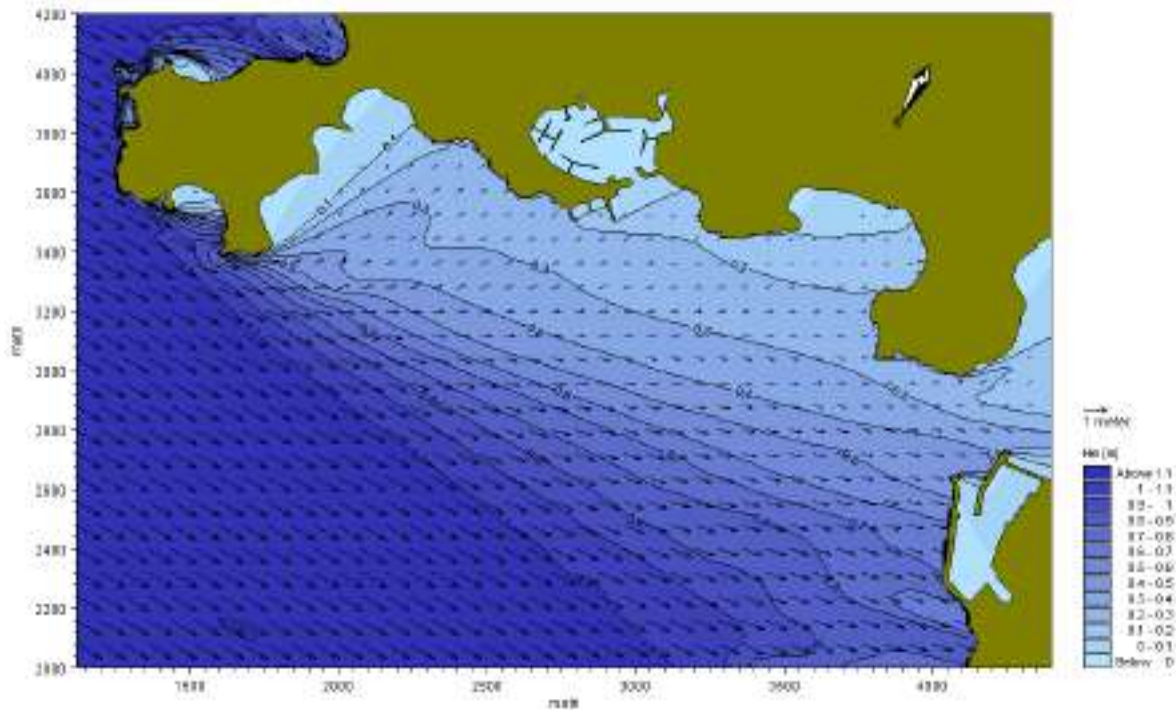


Figura 44 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda R ( $H_s=1.18$ m;  $T_p=4.8$ s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nella configurazione attuale

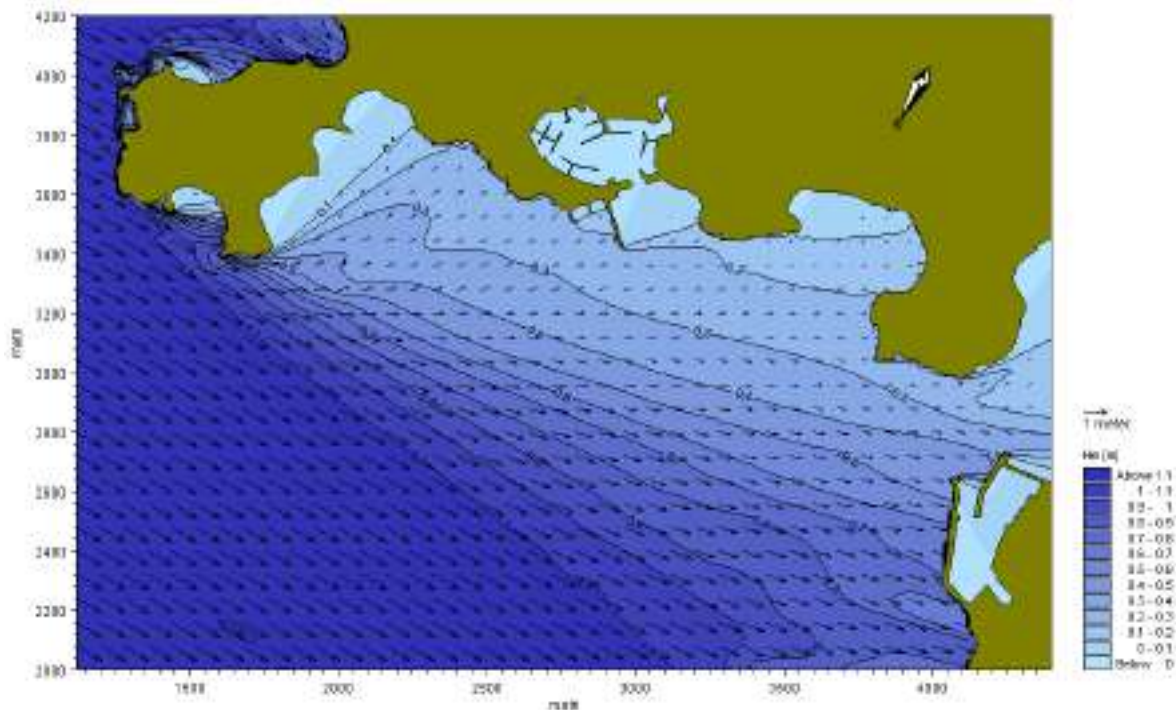


Figura 45 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nella configurazione 1

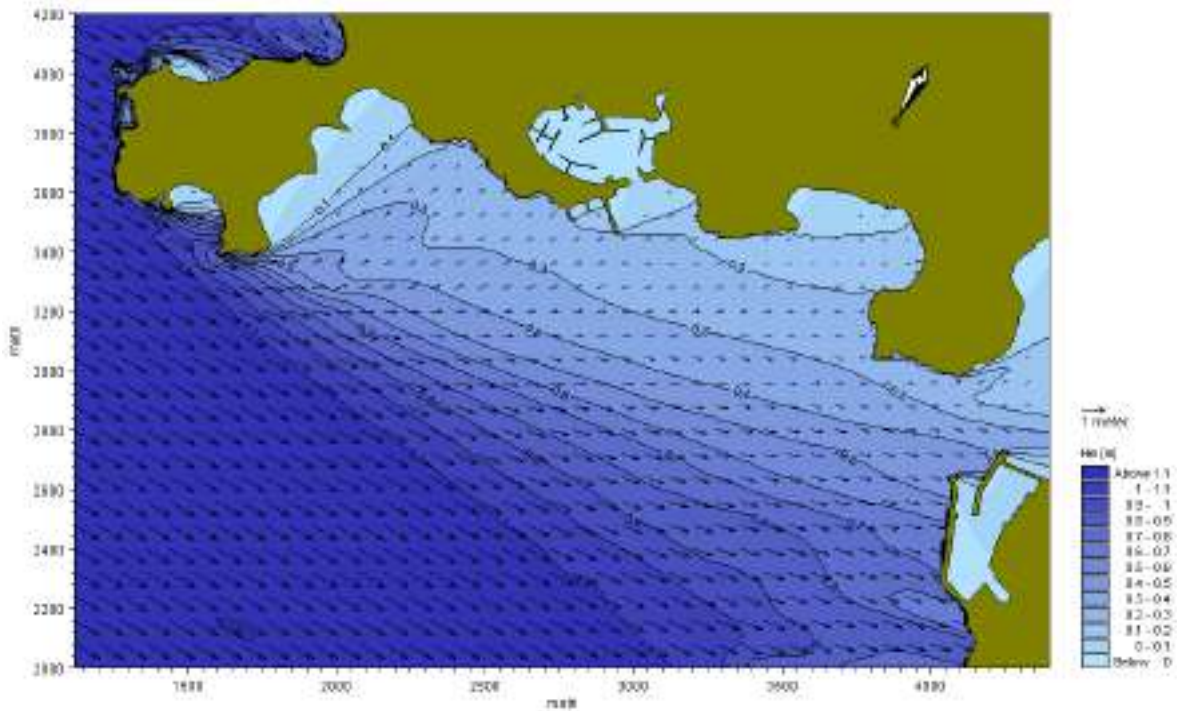


Figura 46 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nella configurazione 2

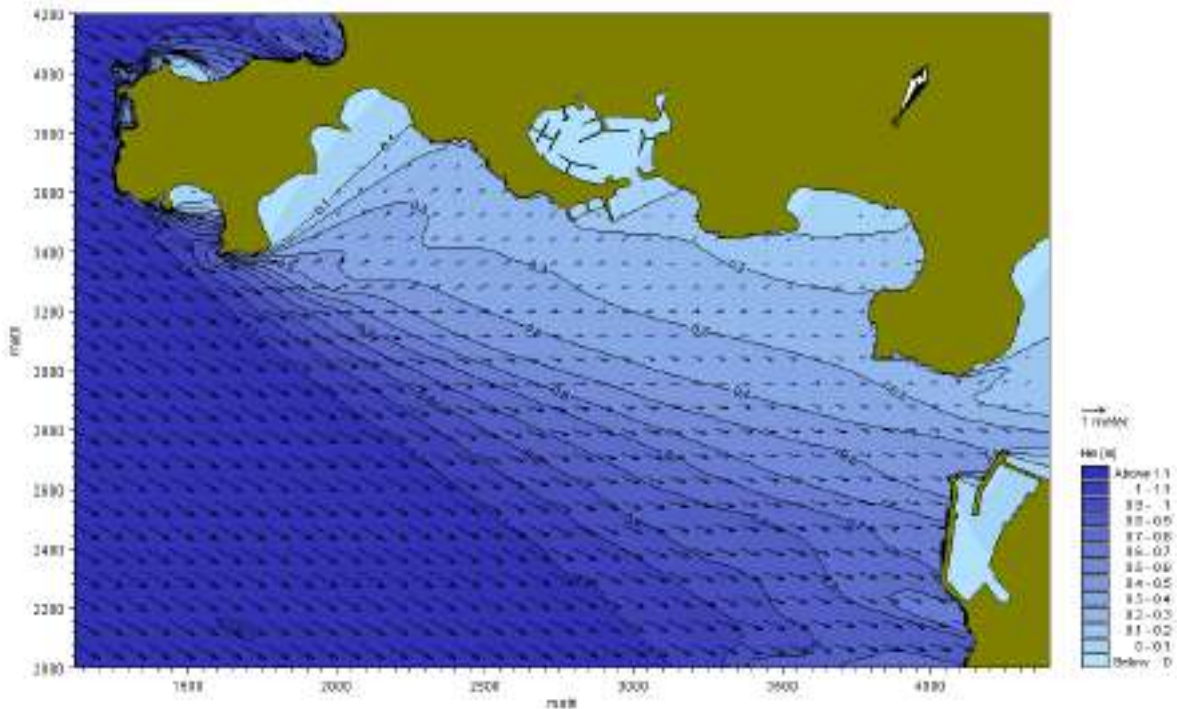


Figura 47 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nella configurazione 3



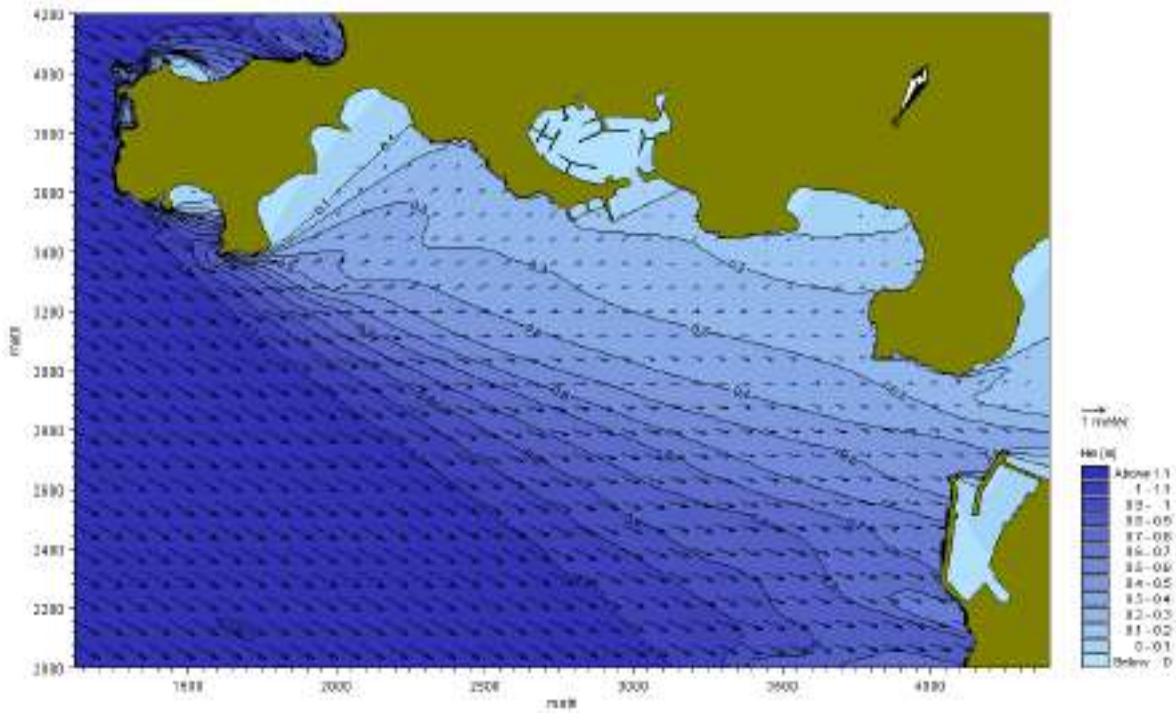


Figura 48 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda R (Hs=1.18 m; Tp=4.8 s; dir=65.4°N) nella configurazione 4

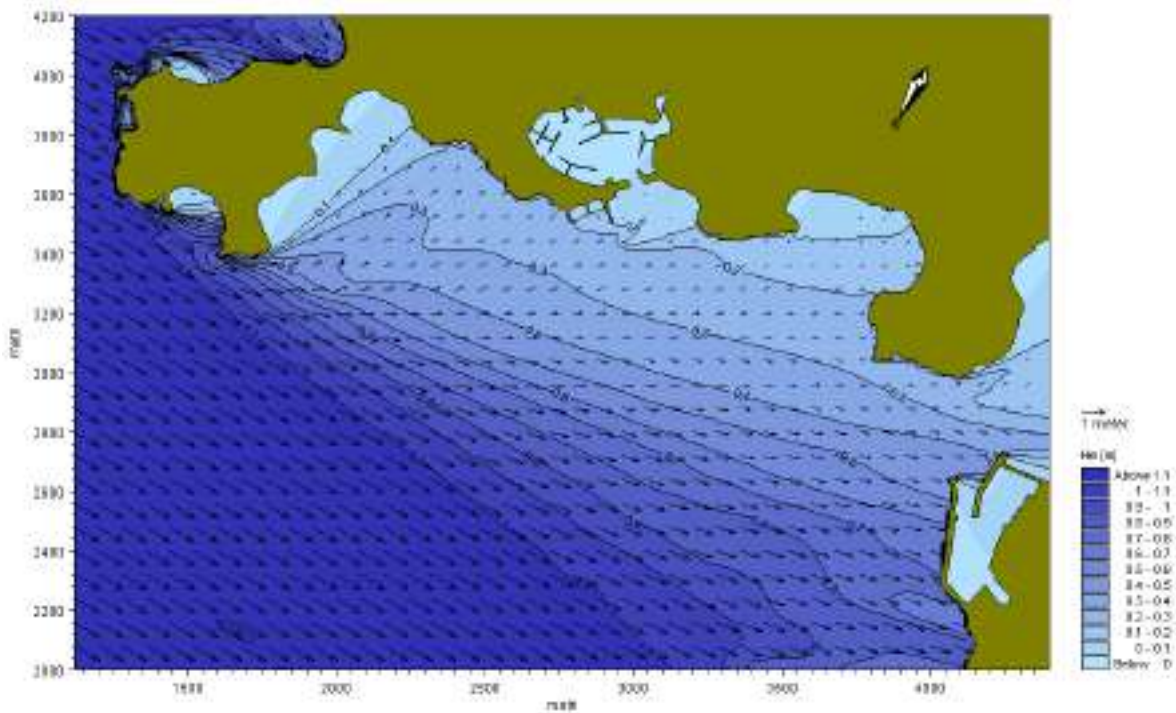


Figura 49 – Risultato del modello di propagazione del moto ondoso per l'onda R (Hs=1.18 m; Tp=4.8 s; dir=65.4°N) nella configurazione 5



## 8. CIRCOLAZIONE IDRAULICA INDOTTA DAL MOTO ONDOSO

Sottocosta, nelle fasce di mareggiata, ossia in quelle zone comprese tra la riva ed il limite più esterno dei frangenti, il moto ondoso subisce trasformazioni energetiche complesse che alimentano correnti e innalzamenti di livello, oltre che dissipazioni per turbolenza.

### 8.1 Applicazione del MIKE 21 HD

Per la circolazione idraulica è stato applicato il modulo HD del codice di calcolo MIKE21. Tale modulo permette di calcolare le correnti costiere indotte dalla forzante generata da moto ondoso, vento, marea e da eventuali immissioni di portata.

Come descritto nel paragrafo precedente, le condizioni interne e al contorno introdotte nel modulo MIKE21-HD sono ricavate dai dati di output del modulo MIKE21-PMS. In particolare per le condizioni interne sono stati utilizzati i campi di radiation-stress indotti dalle onde mentre per le condizioni al contorno laterali sono stati imposti i flussi e i livelli dedotti dagli stessi campi di radiation-stress nelle zone di confine del dominio di calcolo. Infine nel contorno off-shore è stato imposto un livello pari a zero ed i flussi liberi di rispettare la continuità imposta dal modello.

La dimensione delle celle di calcolo è di 8 x 8 m. Tale dimensione, al fine di ridurre i tempi di calcolo, ma senza inficiare i risultati, è stata ottenuta incrementando di 2 volte la dimensione delle celle utilizzate nel modulo MIKE21-PMS.

Nella Figura 37 è rappresentata l'estensione della griglia di calcolo utilizzata per lo studio della circolazione idrodinamica.

La circolazione indotta dal moto ondoso è stata valutata nella configurazione attuale e nelle cinque configurazioni di progetto. Le onde utilizzate per lo studio delle correnti (Tabella 14) sono le stesse utilizzate nel modulo MIKE21-PMS ossia le onde morfologicamente equivalenti.

Tabella 14 – Onde utilizzate per l'applicazione del modello MIKE21-HD

nome onda	direzione	H (m)	Tp (s)	Tm (s)
L	29.1°N	1.07	5.7	5.0
R	65.4°N	1.18	4.8	4.2



## 8.2 Analisi dei risultati del modello idrodinamico

Di seguito sono riportati i risultati del modello idrodinamico suddivisi per onde. Dalla Figura 50 alla Figura 61 sono rappresentati i risultati per l'onda L e dalla Figura 62 alla Figura 67 i risultati per l'onda R nelle sei configurazioni.

L'onda L genera un flusso con direzione prevalente da Est verso Ovest con velocità che al largo della spiaggia dei Sassi è di circa 0.25 m/s mentre raggiunge 0.3 m/s nella spiaggia Ira. Nella spiaggia Rudargia si ha un'inversione della corrente che genera una circolazione ciclonica.

Le configurazioni di progetto presentano delle correnti del tutto simili alla situazione attuale. Le uniche differenze interessano la spiaggia Rudalza la quale è caratterizzata da un vortice ciclonico che si sviluppa tra la spiaggia e il molo Est esistente ( $d=60$  m). Il vortice tende ad aumentare il raggio con l'aumentare della zona di calma, quindi si presenta con un'ampiezza maggiore per le configurazioni 1 e 5 ( $d=280$  m) mentre nella configurazione 2 ha una dimensione intermedia tra la situazione attuale e quella che prevede l'allungamento del pennello di 80 m. Le velocità che si sviluppano sono identiche nelle differenti configurazioni (comprese tra 0.05 e 0.45 m/s) anche se con l'ampliarsi del vortice sono distribuite su una superficie più ampia.

Le configurazioni 3 e 4 danno un contributo che, rispetto alla situazione attuale, non è quantificabile dal punto di vista della circolazione idraulica.

L'onda R genera una corrente di intensità inferiore a quella generata dall'onda L; in questo caso il flusso è diretto da Est verso Ovest nella parte più vicina alla costa, presso la spiaggia dei Sassi, mentre è diretta da Ovest verso Est più al largo, dando così origine ad una circolazione anticiclonica nel Golfo di Cugnana.

Le velocità delle correnti sono ora notevolmente attenuate con valori che rimangono inferiori a 0.1 m/s sottocosta.





**Risultati del modello idrodinamico: onda L ( $H_s=1.07\text{ m}$ ;  $T_p=5.7\text{ s}$ ;  $dir=29.1^\circ\text{N}$ )**

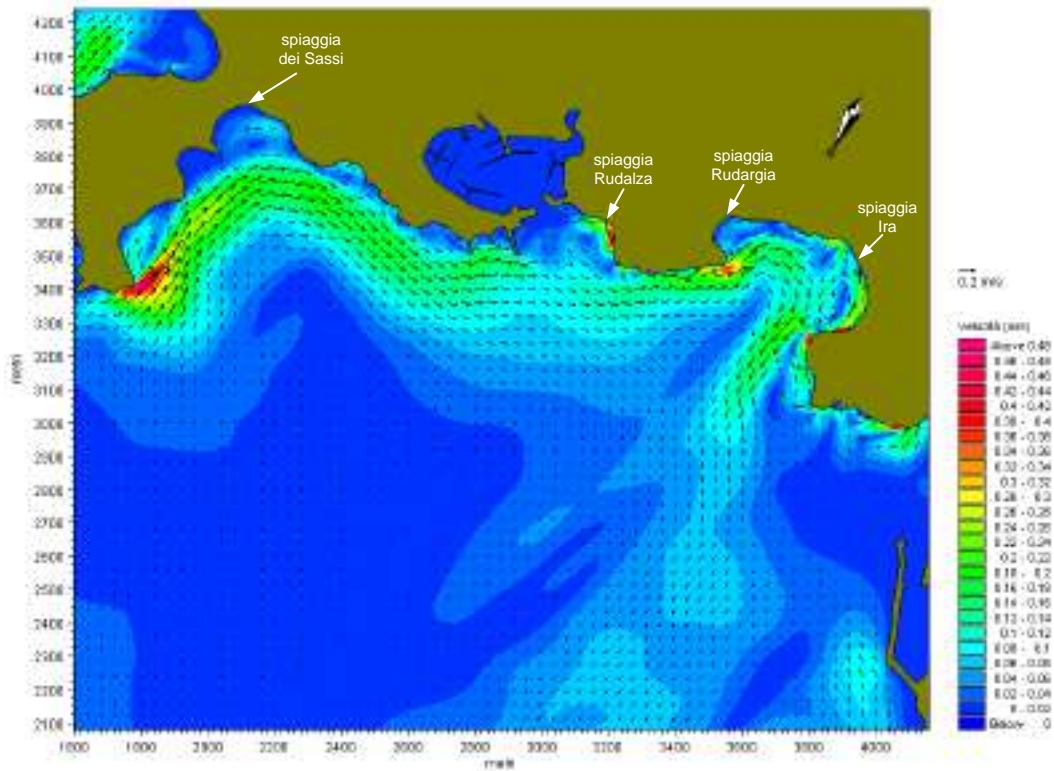


Figura 50 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione attuale

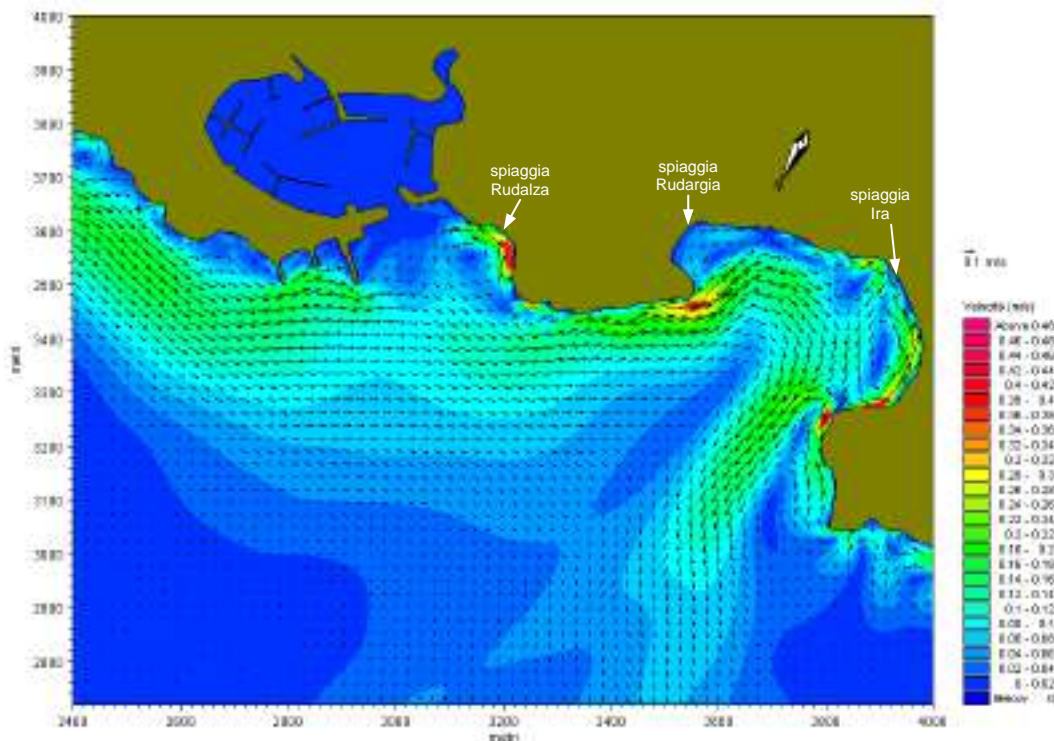


Figura 51 – Particolare tra la zona portuale e la spiaggia di Ira della circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione attuale

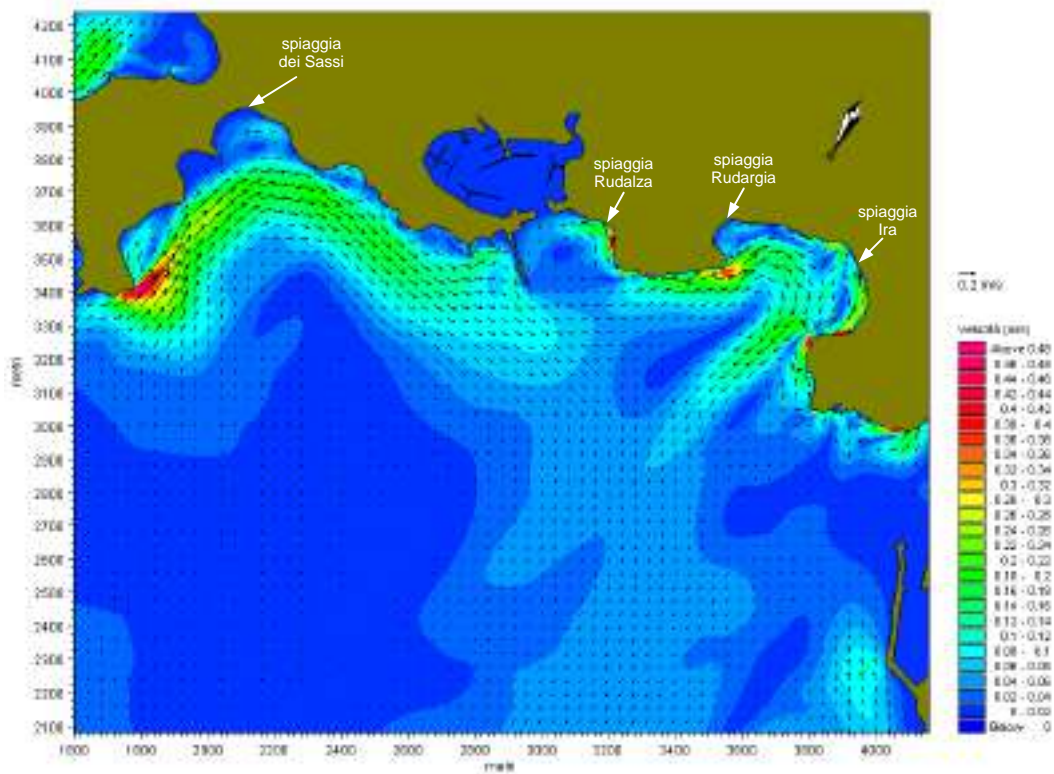


Figura 52 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 1

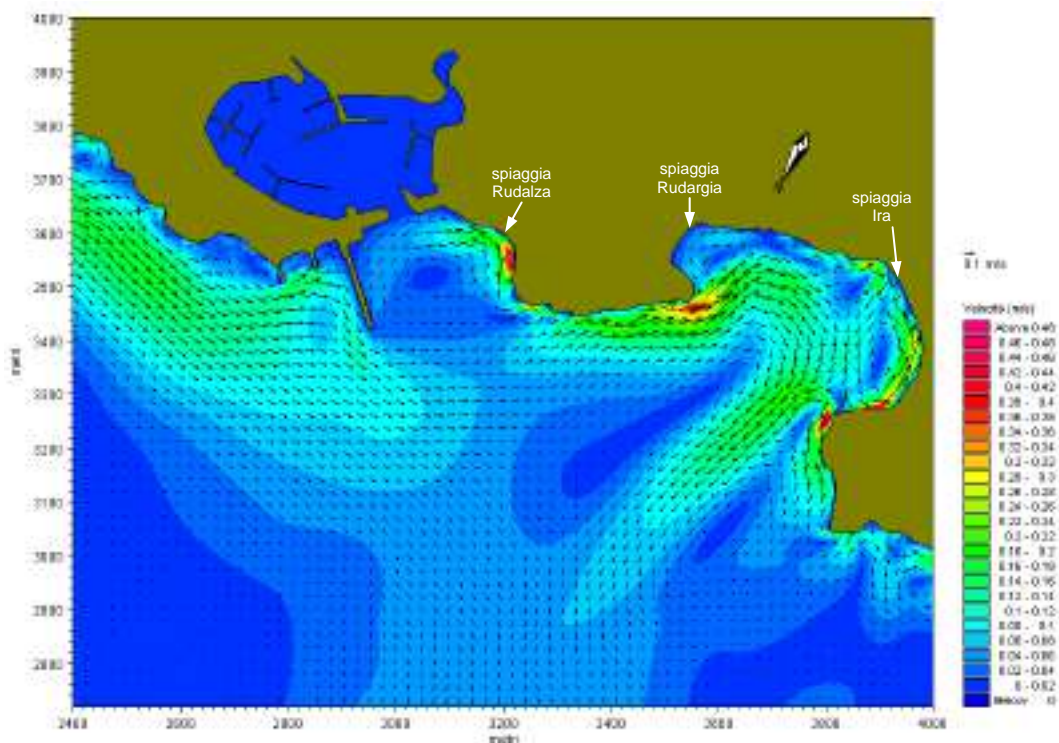


Figura 53 – Particolare tra la zona portuale e la spiaggia di Ira della circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 1



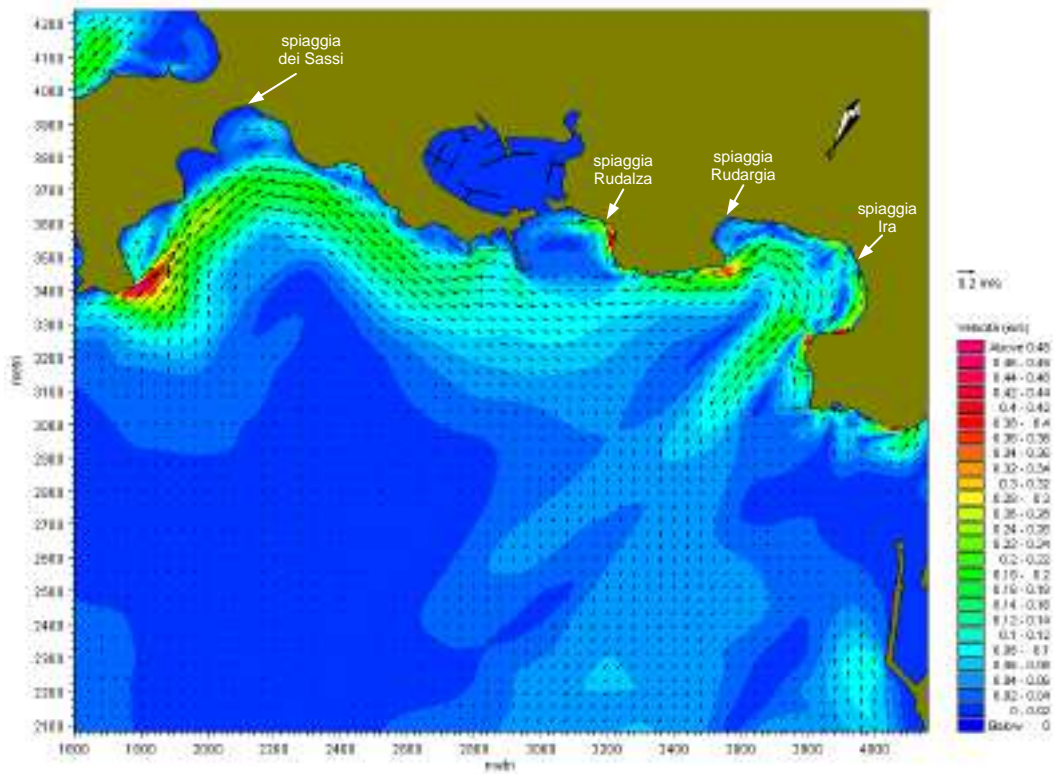


Figura 54 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 2

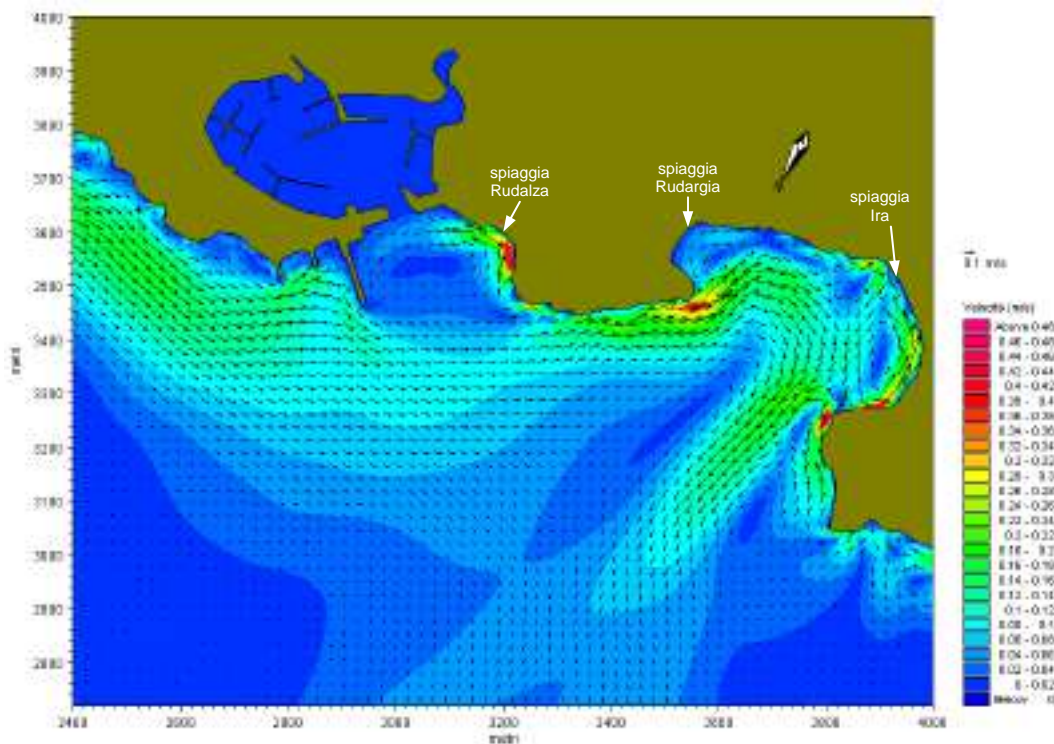


Figura 55 – Particolare tra la zona portuale e la spiaggia di Ira della circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 2



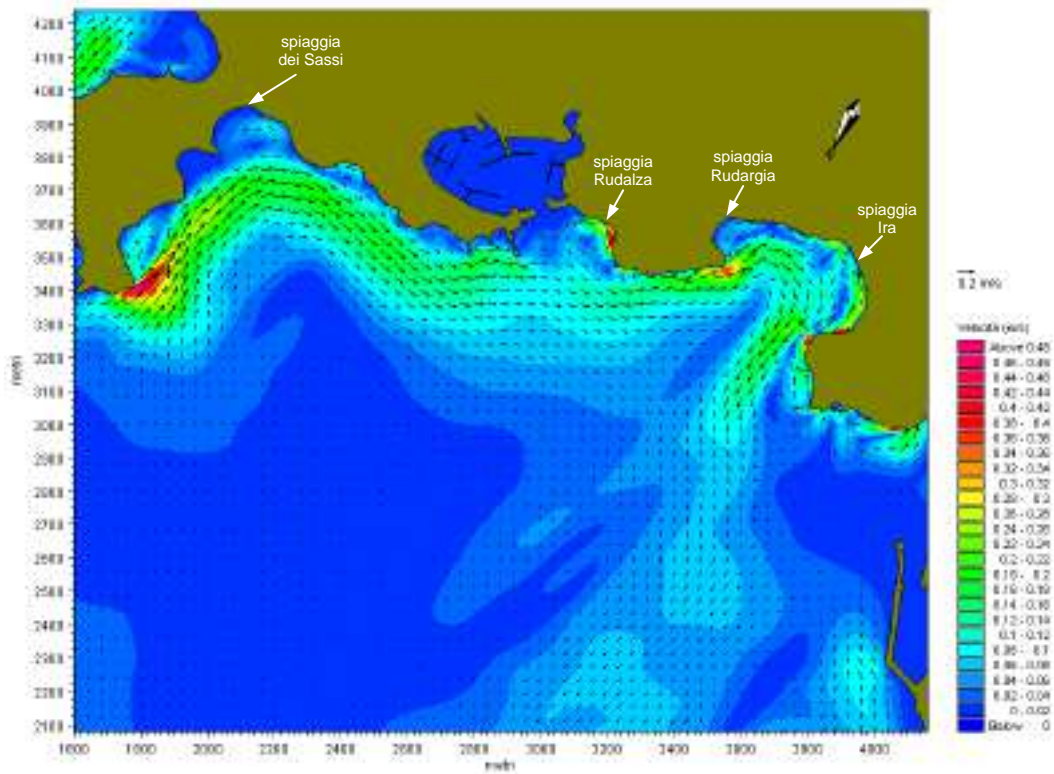


Figura 56 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 3

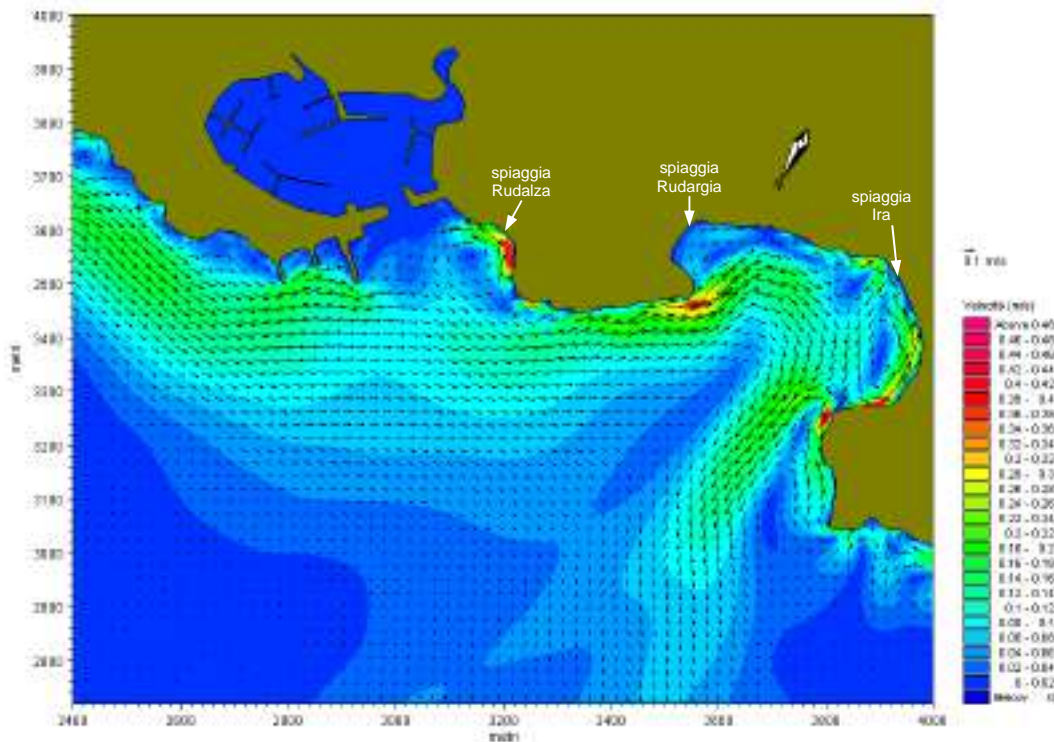


Figura 57 – Particolare tra la zona portuale e la spiaggia di Ira della circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 3

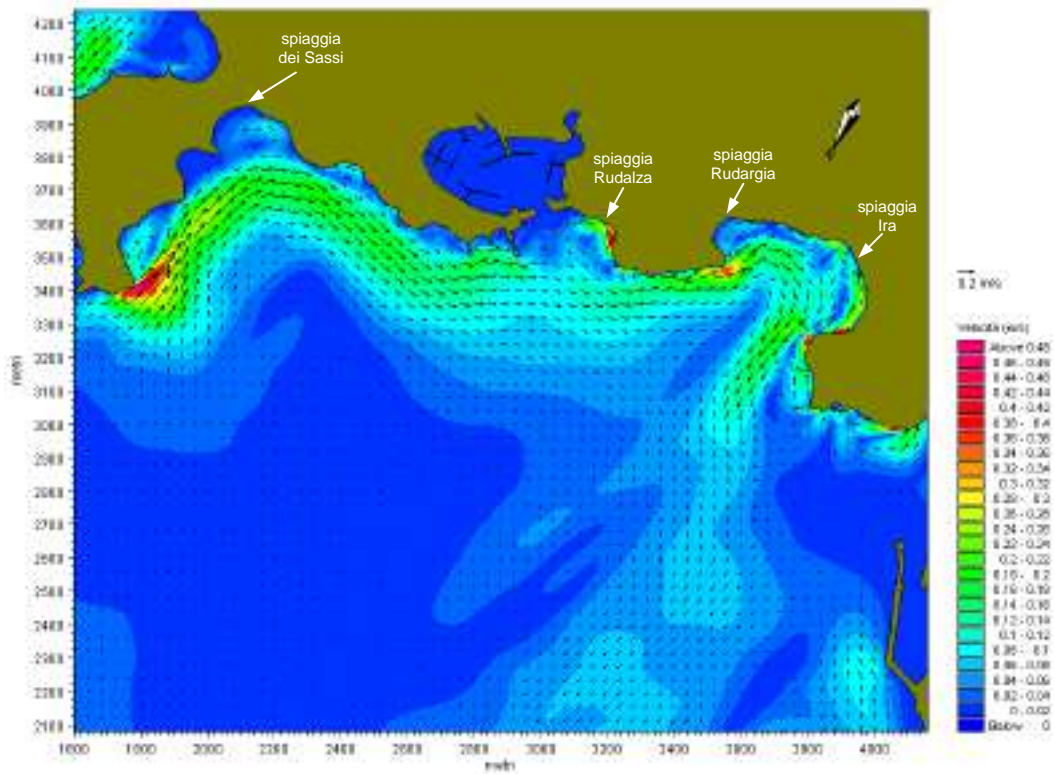


Figura 58 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 4

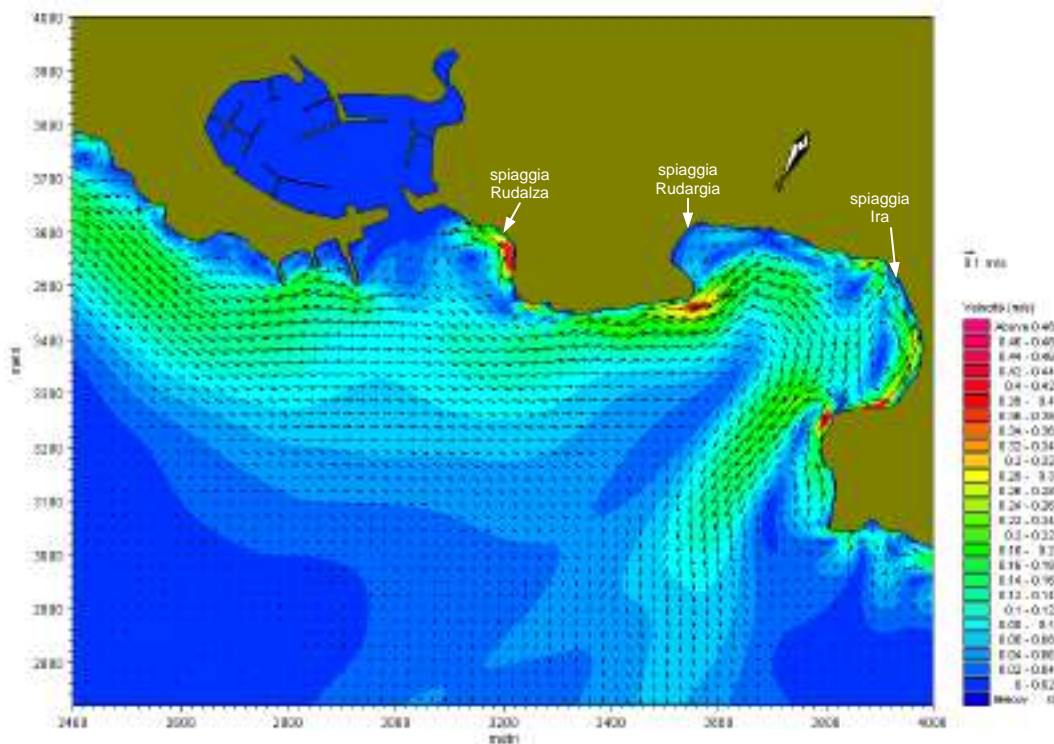


Figura 59 – Particolare tra la zona portuale e la spiaggia di Ira della circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 4



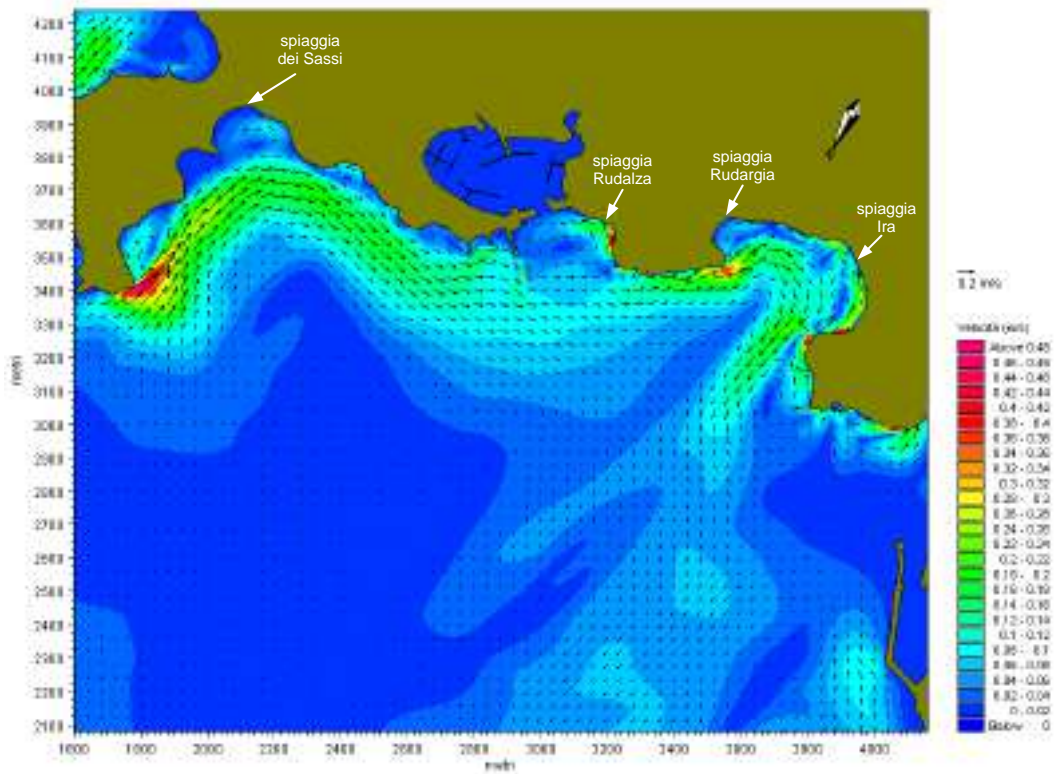


Figura 60 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 5

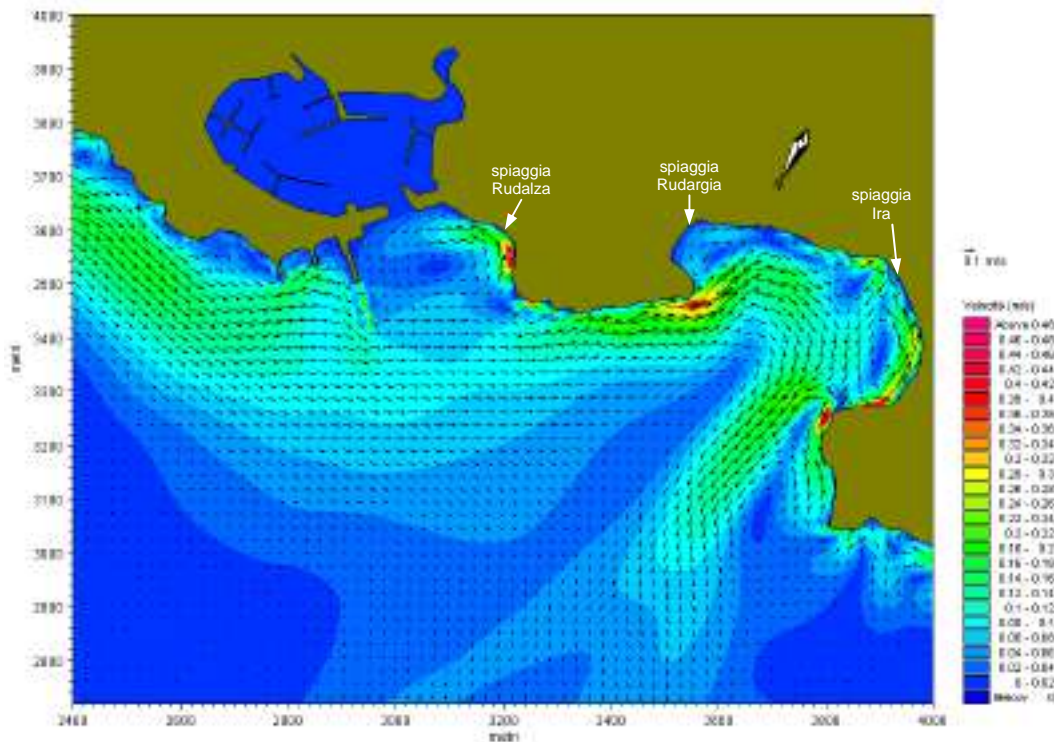


Figura 61 – Particolare tra la zona portuale e la spiaggia di Ira della circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 5



**Risultati del modello idrodinamico: onda R ( $H_s=1.18\text{ m}$ ;  $T_p=4.8\text{ s}$ ;  $dir=65.4^\circ\text{N}$ )**

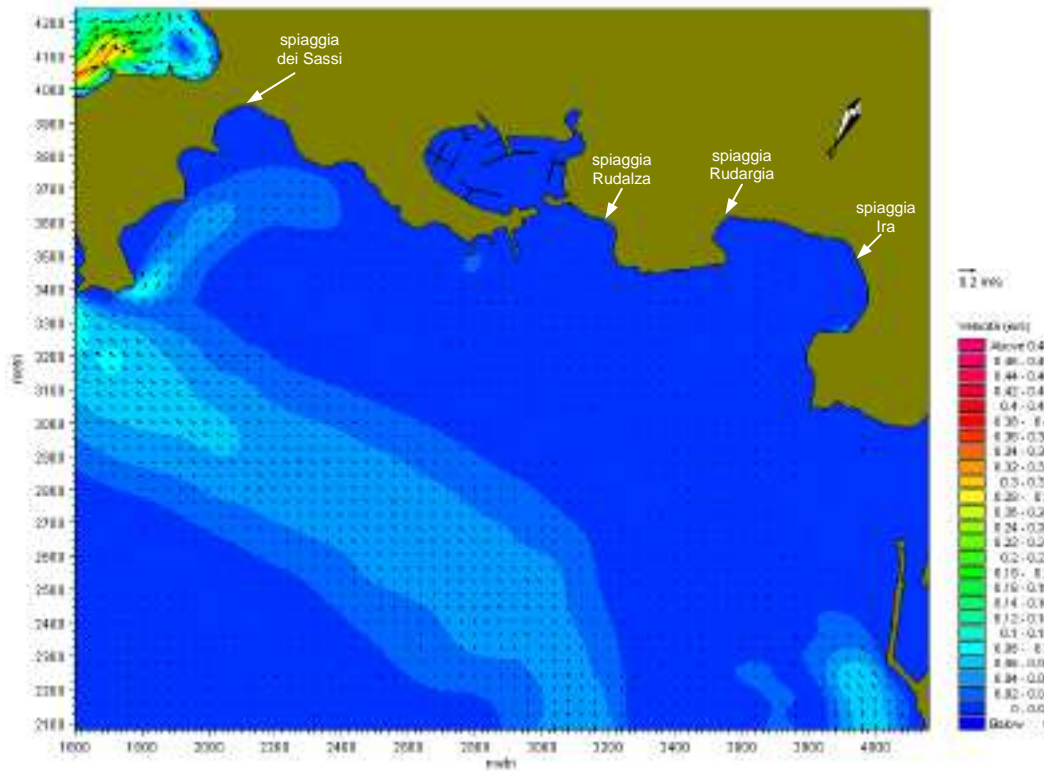


Figura 62 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione attuale

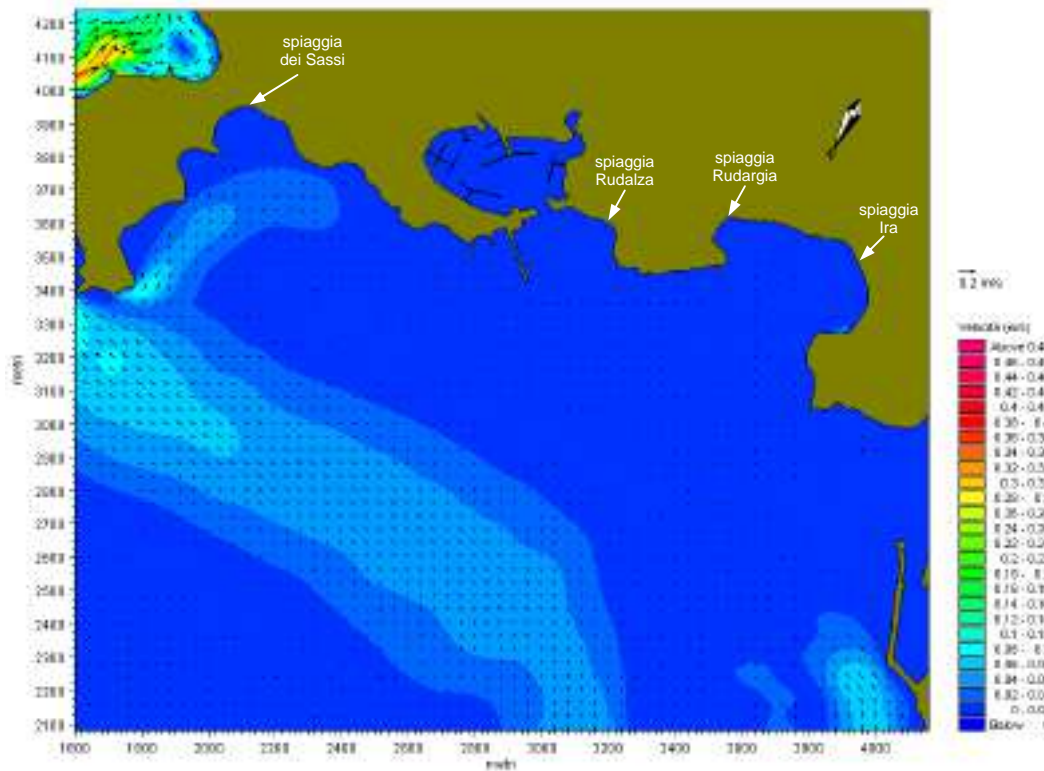


Figura 63 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 1



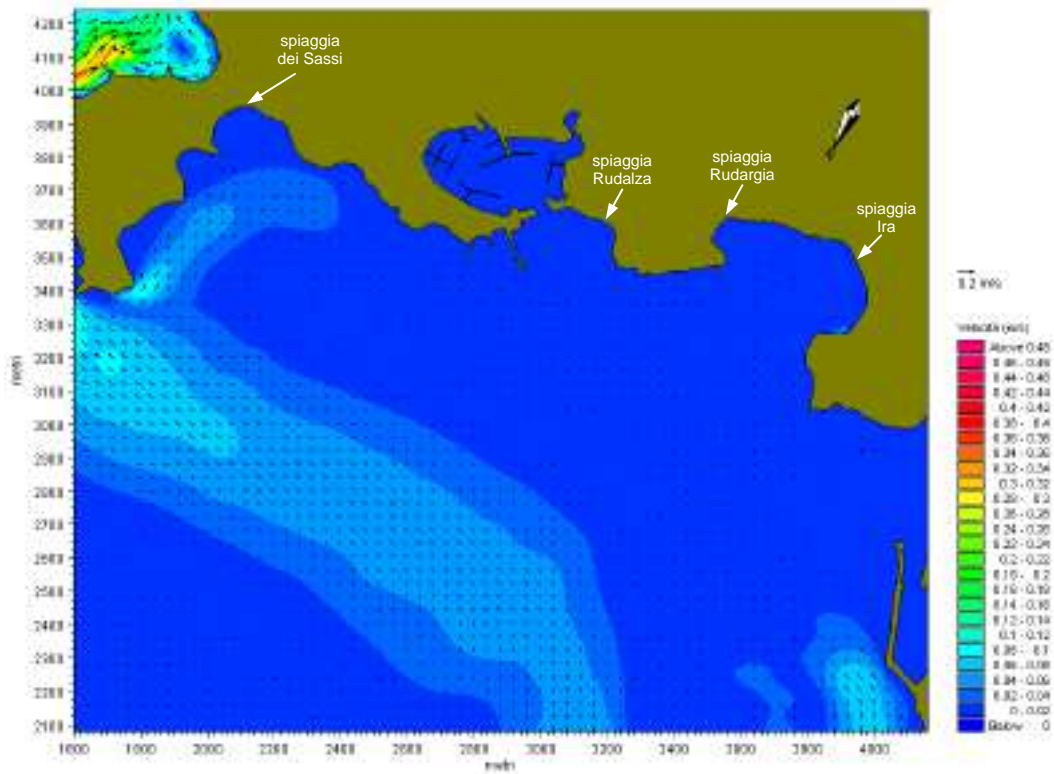


Figura 64 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 2

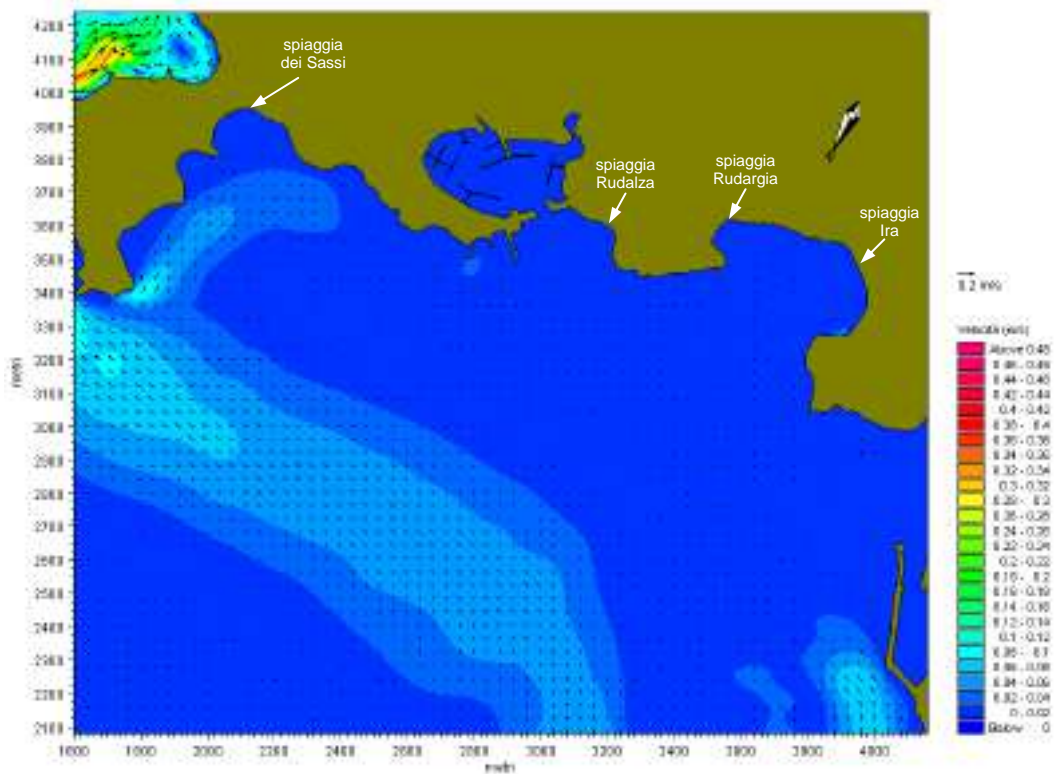


Figura 65 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 3

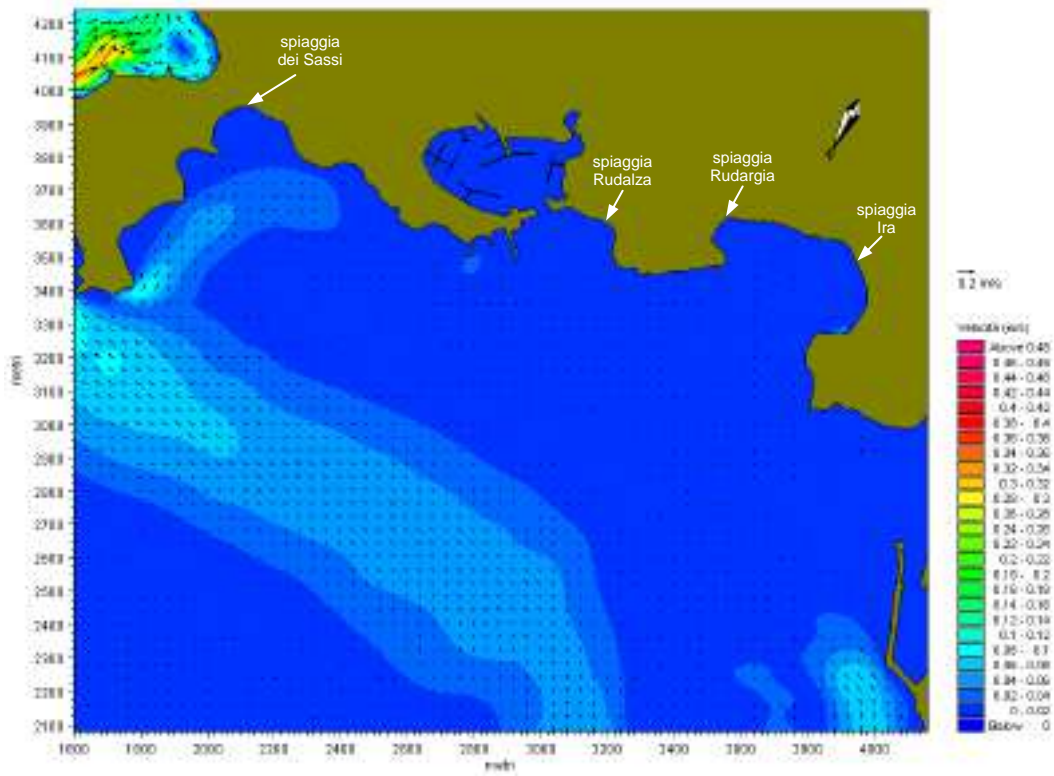


Figura 66 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 4

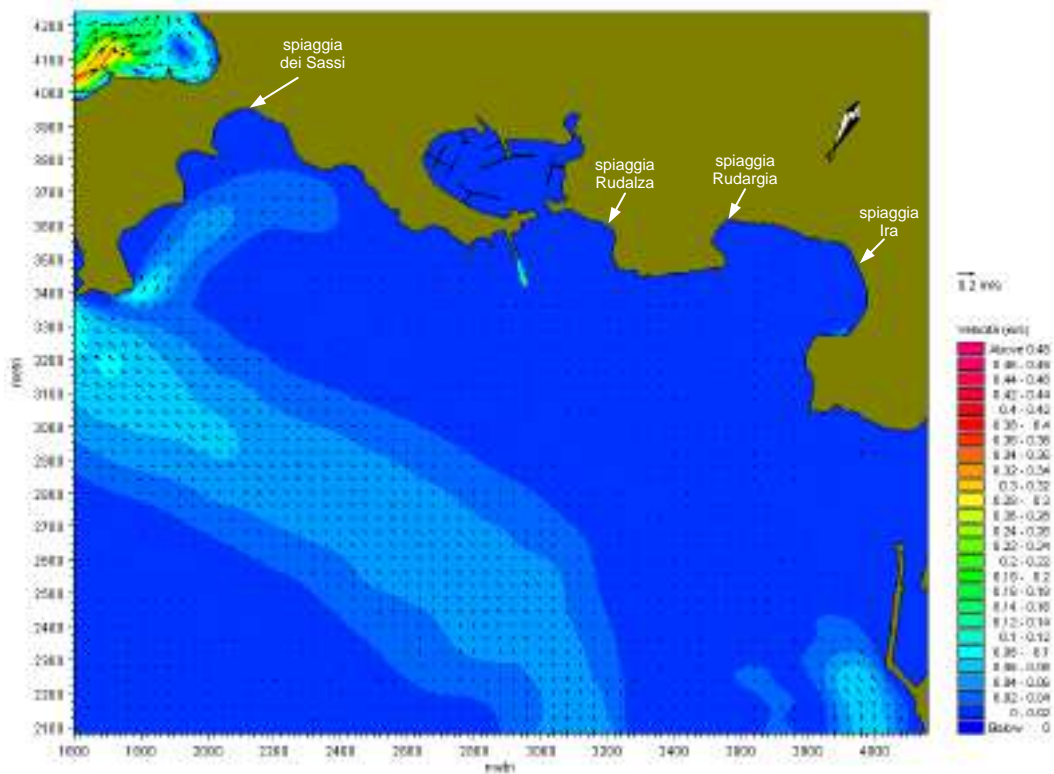


Figura 67 – Circolazione idrodinamica generata dal moto ondoso nella configurazione 5





## 9. TRASPORTO SOLIDO BIDIMENSIONALE

Mediante il modello di trasporto solido ST (Sediment Transport) del codice di calcolo MIKE21, è possibile definire la capacità del trasporto solido dei materiali non coesivi basata sulle correnti litoranee indotte dalle onde e sulla sospensione dei materiali causata dalle stesse onde.

### 9.1 Applicazione del MIKE 21 ST

L'applicazione del modulo MIKE21-ST utilizza i risultati del modulo idrodinamico (MIKE21-HD) e del modulo di propagazione del moto ondoso (MIKE21-PMS) ottenuti per le due onde morfologicamente equivalenti al regime reale.

Per determinare il relativo trasporto litoraneo medio annuo, le due onde sono state simulate per tempi proporzionali alle percentuali di accadimento nell'arco temporale di un anno, riportate nella Tabella 7. Le caratteristiche principali dei granuli di sabbia utilizzate sono il diametro mediano  $d_{50}$ , la gradation  $\sigma_g$  data da  $(d_{84}/d_{16})^{0.5}$ , e la porosità  $n$ .

Il diametro mediano e la gradation sono stati ricavati dai risultati dei rilievi sedimentologici effettuati in data 03/03/2010 ed elaborati dal dott. geologo Giacomo Deiana ed inseriti puntualmente nel modello. Nelle zone in cui non è presente trasporto solido, per la presenza di fondali rocciosi o ricoperti da prateria di posidonia secondo la carta geomorfologica del paraggio elaborata anch'essa dal dott. geologo Giacomo Deiana, è stata impostata la condizione di non-trasporto. La porosità  $n$  ( $V_V/V_T$ ), non esistendo un metodo standardizzato per la sua determinazione, è stata impostata secondo quanto la letteratura specializzata consiglia in queste situazioni, ossia pari a 0.4 (Shore Protection Manual 1984 e Coastal Engineering Manual 2006).

Nella spiaggia di Ira si sono rilevati i seguenti valori:

$d_{50} = 0.185 \div 0.55$  con valore medio di 0.22 mm;

$\sigma_g = 1.3 \div 2.6$  con valore medio di 1.5.

Nei fondali a ridosso del porto si sono rilevati i seguenti valori:

$d_{50} = 0.2 \div 0.35$  con valore medio di 0.27 mm;

$\sigma_g = 2.4 \div 2.6$  con valore medio di 2.5.

Le griglie di calcolo sono quelle definite per l'applicazione del modello idrodinamico.



## 9.2 Analisi dei risultati del modello Sediment Transport

I risultati che mostrano il trasporto solido sono suddivisi per onde e per zone:

- spiaggia Ira (dalla Figura 68 alla Figura 79);
- da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza (dalla Figura 80 alla Figura 92);
- spiaggia ad Est del porto di Porto Rotondo (dalla Figura 93 alla Figura 103).

Le zone colorate mostrano la tendenza del fondale all'accumulo sabbioso (rosso) o all'erosione (blu).

Da tutti i risultati non si nota alcuna variazione del potenziale trasporto dei sedimenti fra le varie configurazioni ad eccezione della spiaggia adiacente il porto (Rudalza) che, nelle configurazioni di progetto, presenta una variazione delle correnti e del moto ondoso. Le simulazioni mostrano che nella zona della spiaggia Rudalza tende a diminuire la capacità di trasporto solido in presenza del pennello allungato di 80 m (configurazione 1) con il conseguente possibile accumulo di sedimento lungo la spiaggia. La configurazione 2 (con il prolungamento del pennello di 40 m) mostra ridottissime variazioni della capacità di trasporto rispetto alla condizione attuale anche nella spiaggia di Rudalza.

Le configurazioni 3 e 4, come nel modello idrodinamico, non si discostano dalla situazione attuale. La configurazione 5, dal punto di vista del trasporto solido, si presenta come la configurazione 1.



**Risultati del modello di trasporto solido: spiaggia di Ira**

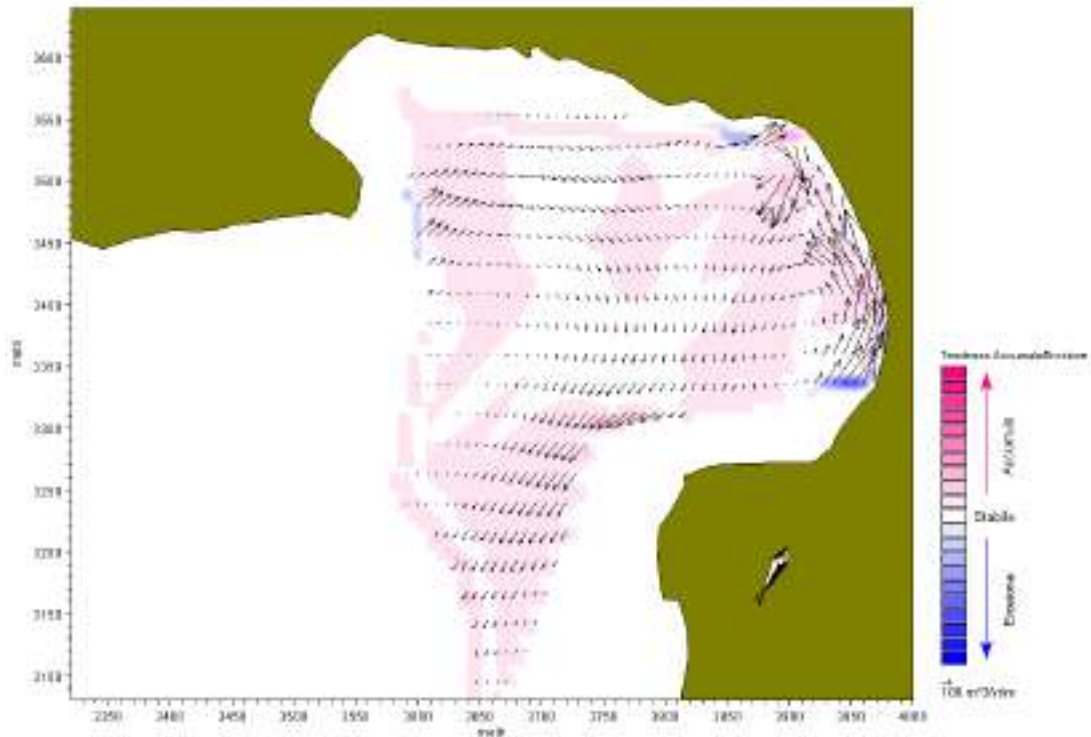


Figura 68 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione attuale

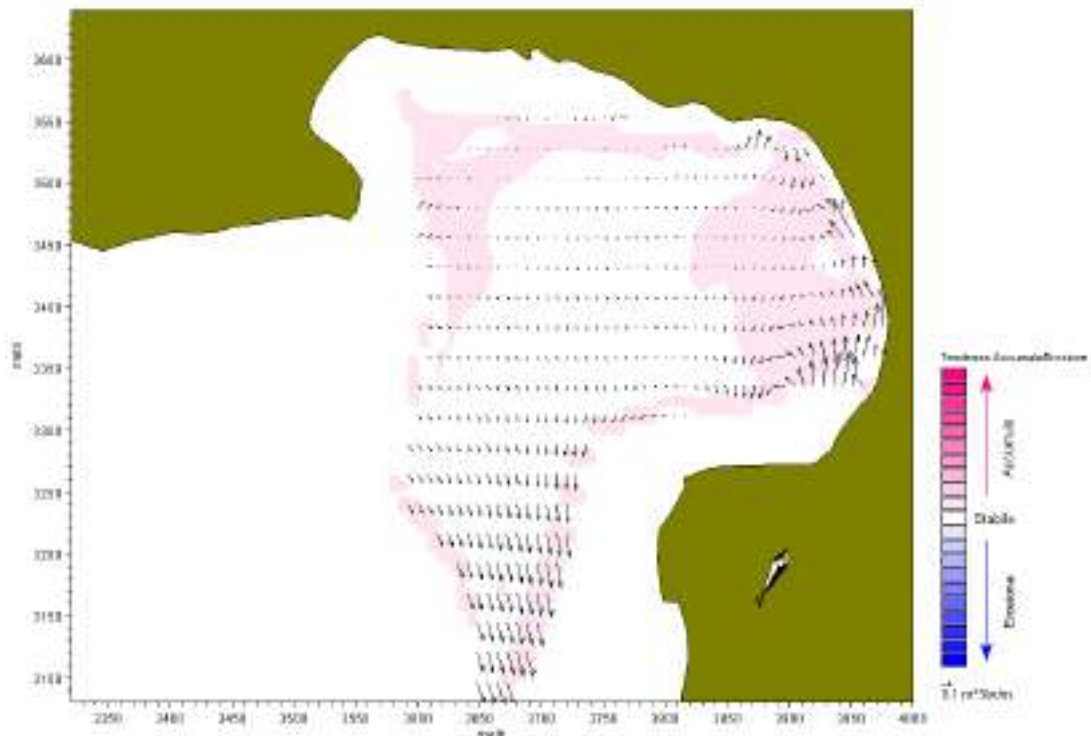


Figura 69 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione attuale

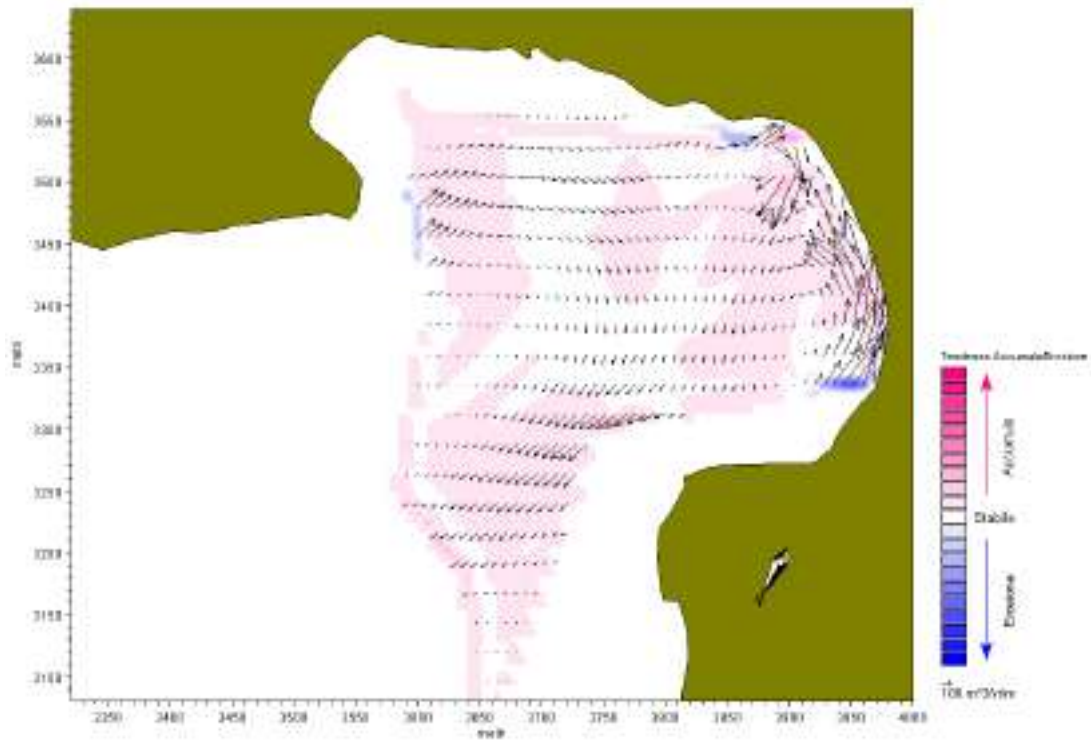


Figura 70 – Trasporto solido medio annuo generato dall’onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione 1

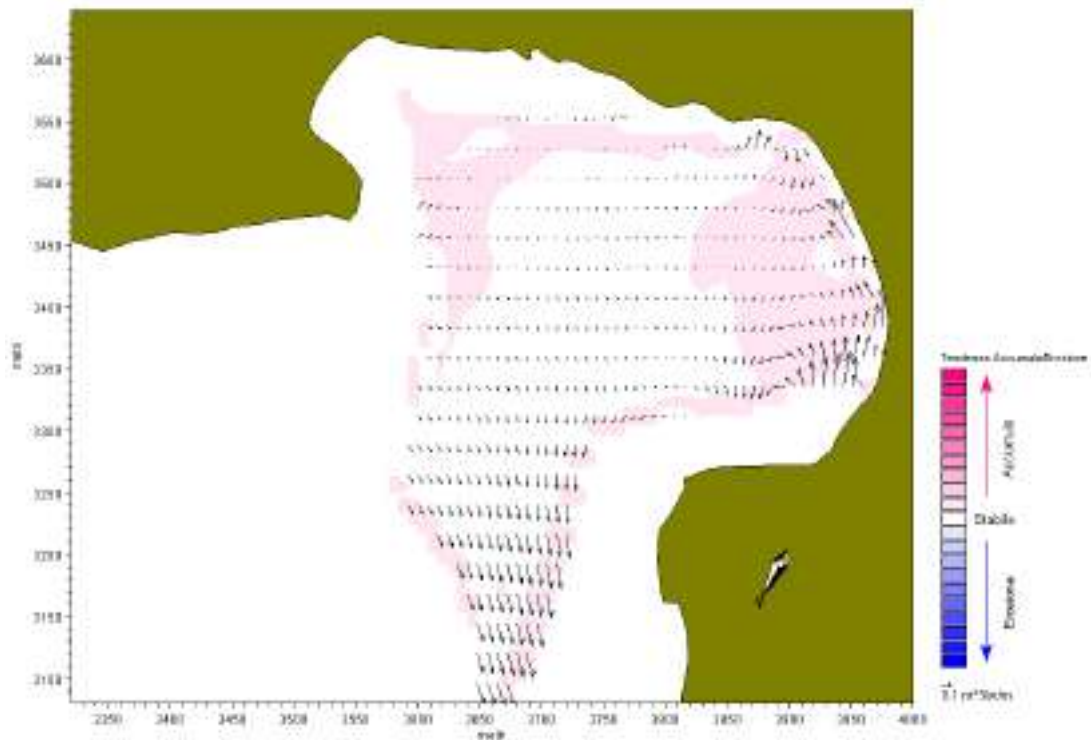


Figura 71 – Trasporto solido medio annuo generato dall’onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione 1

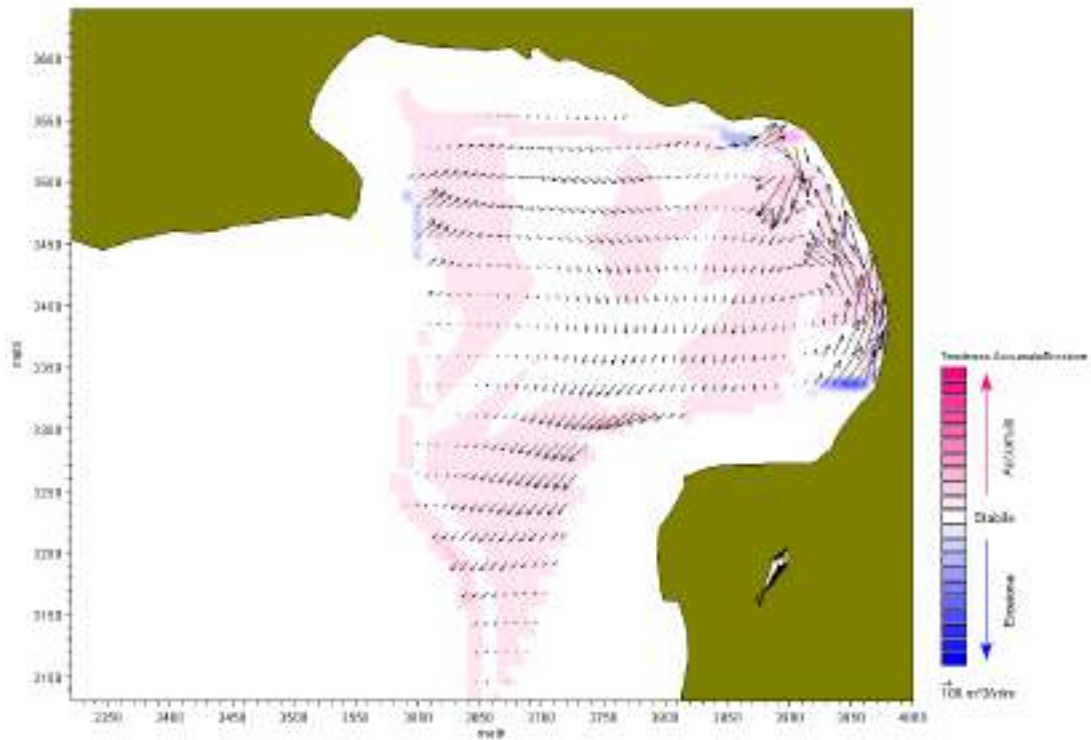


Figura 72 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione 2

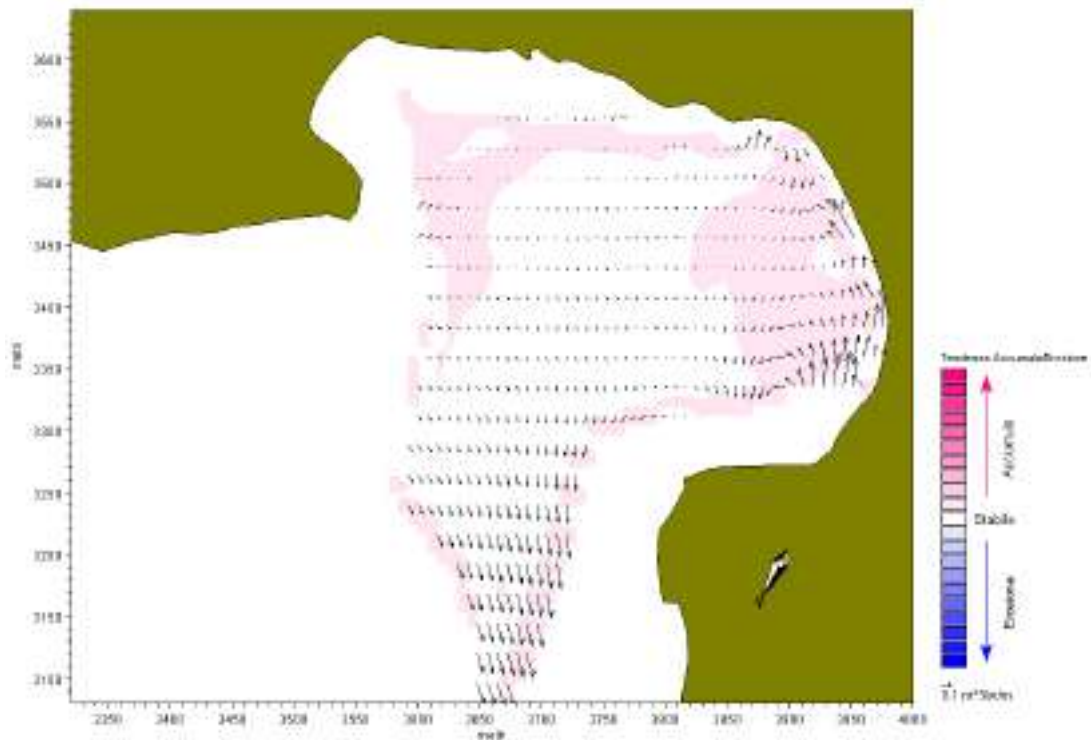


Figura 73 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione 2



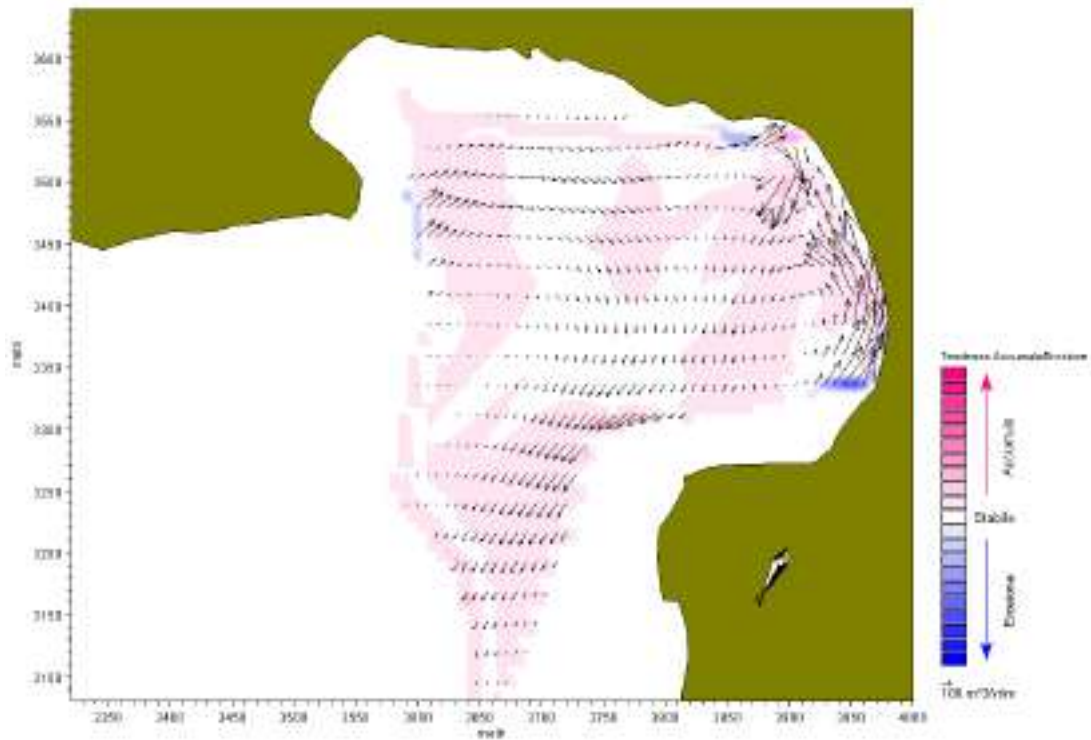


Figura 74 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione 3

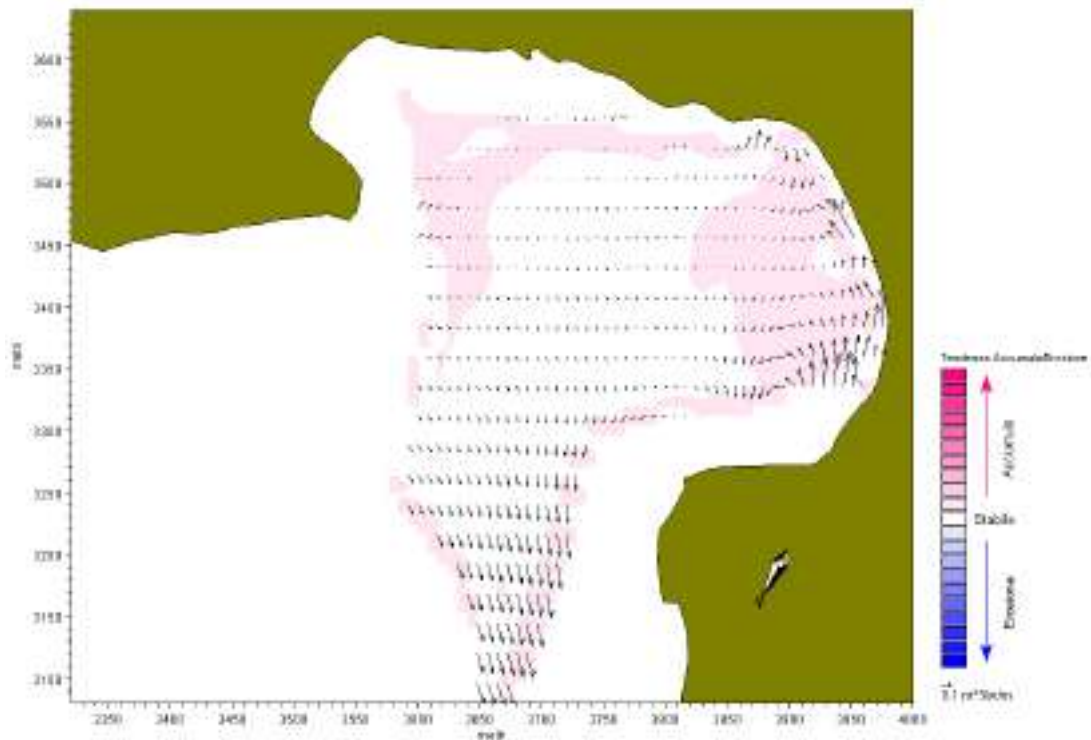


Figura 75 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione 3

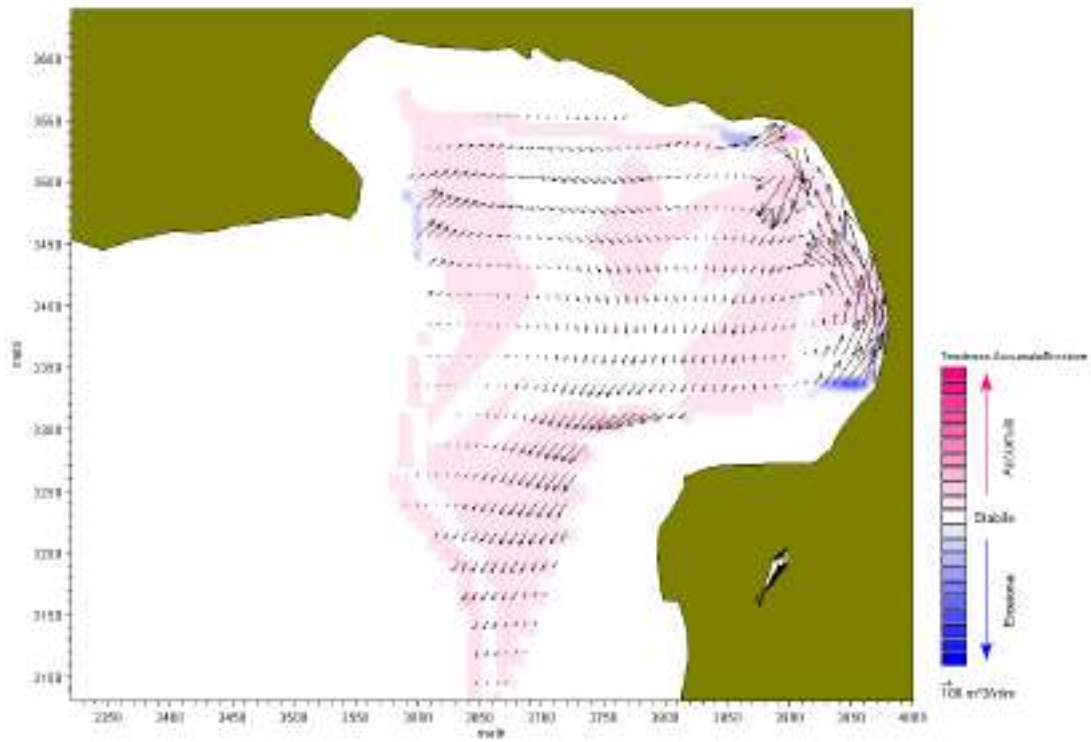


Figura 76 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione 4

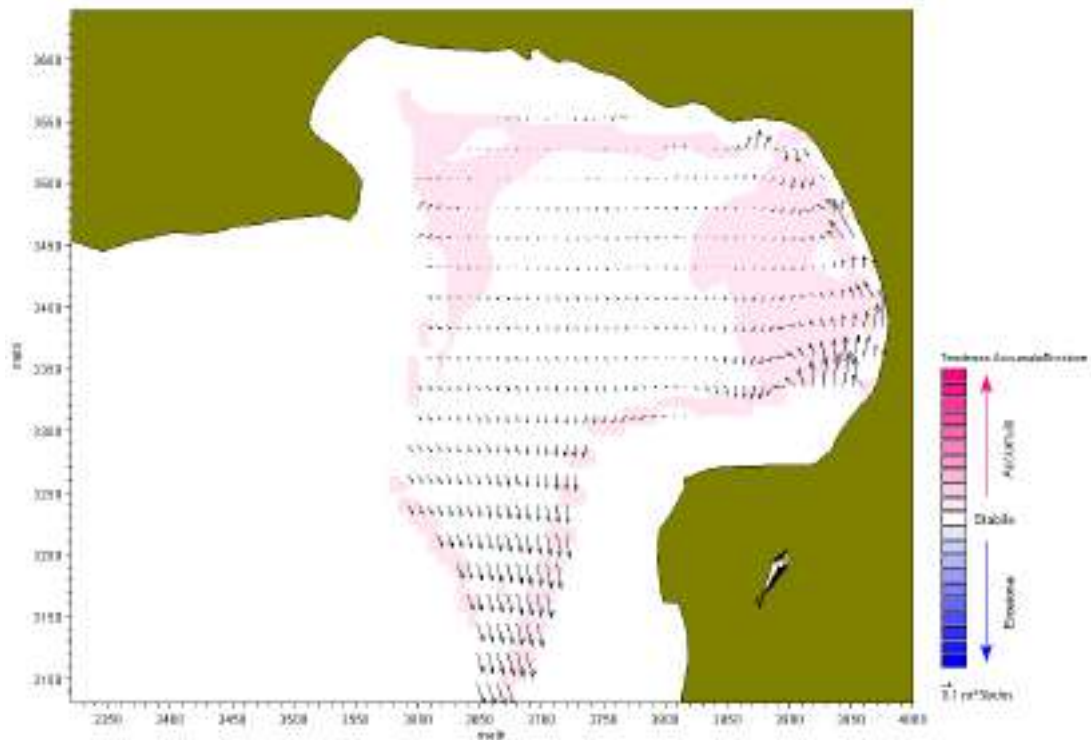


Figura 77 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione 4

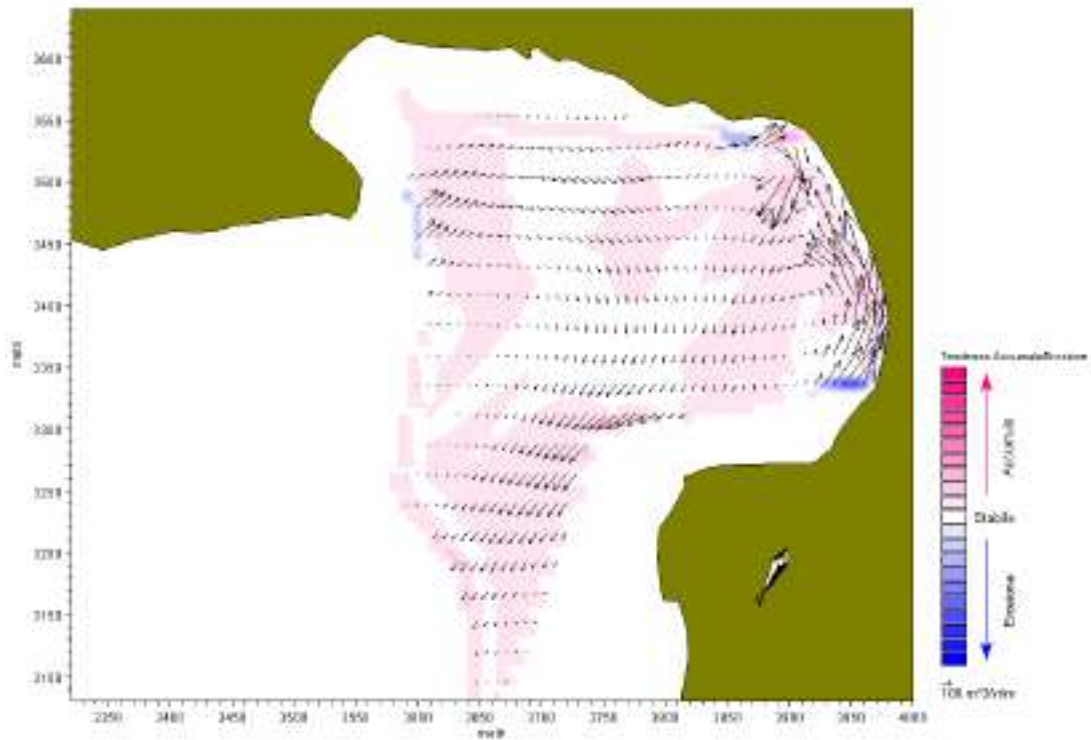


Figura 78 – Trasporto solido medio annuo generato dall’onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione 5

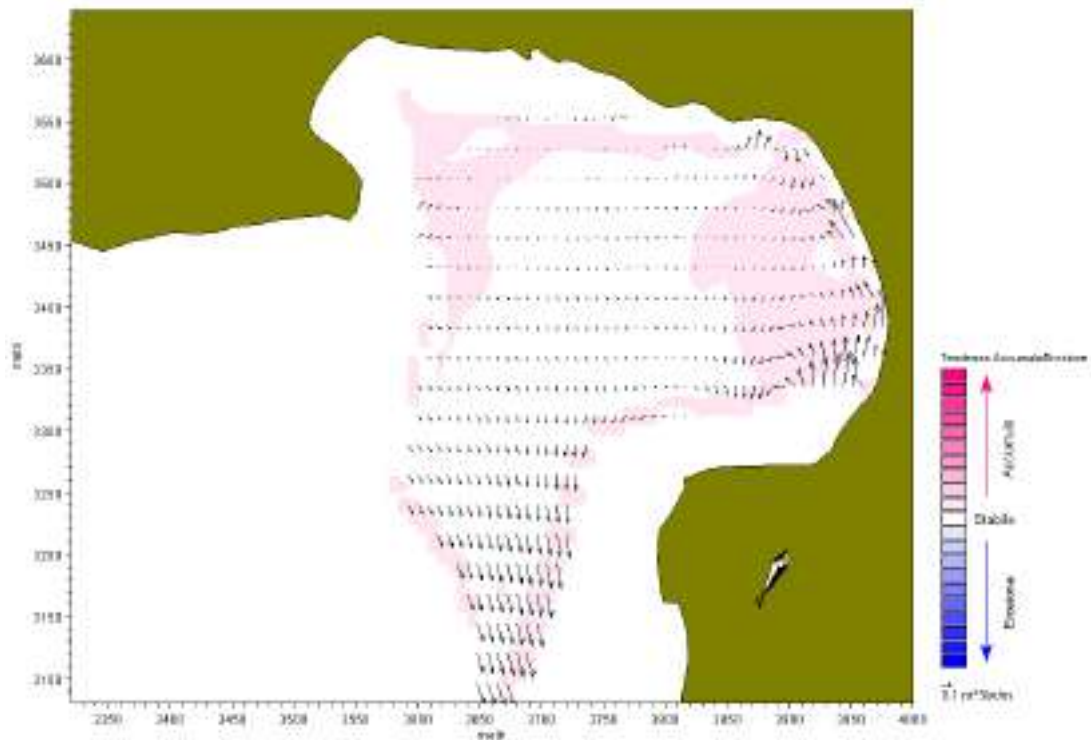


Figura 79 – Trasporto solido medio annuo generato dall’onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nella spiaggia Ira nella configurazione 5



**Risultati del modello di trasporto solido: da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza**

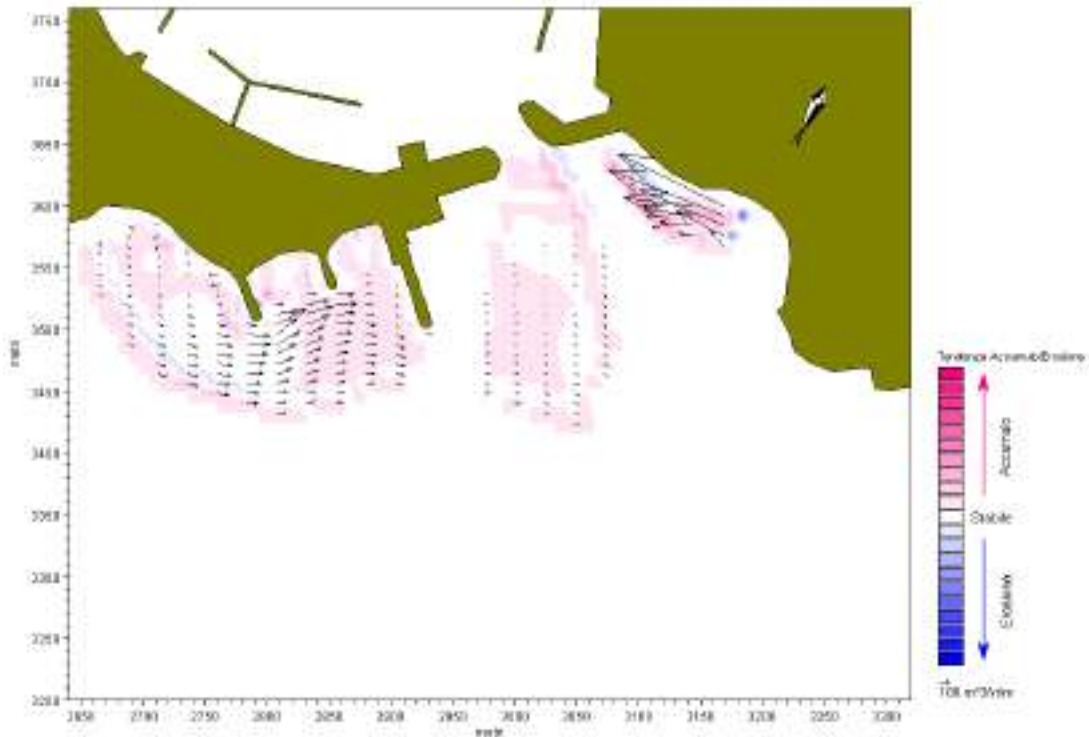


Figura 80 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione attuale

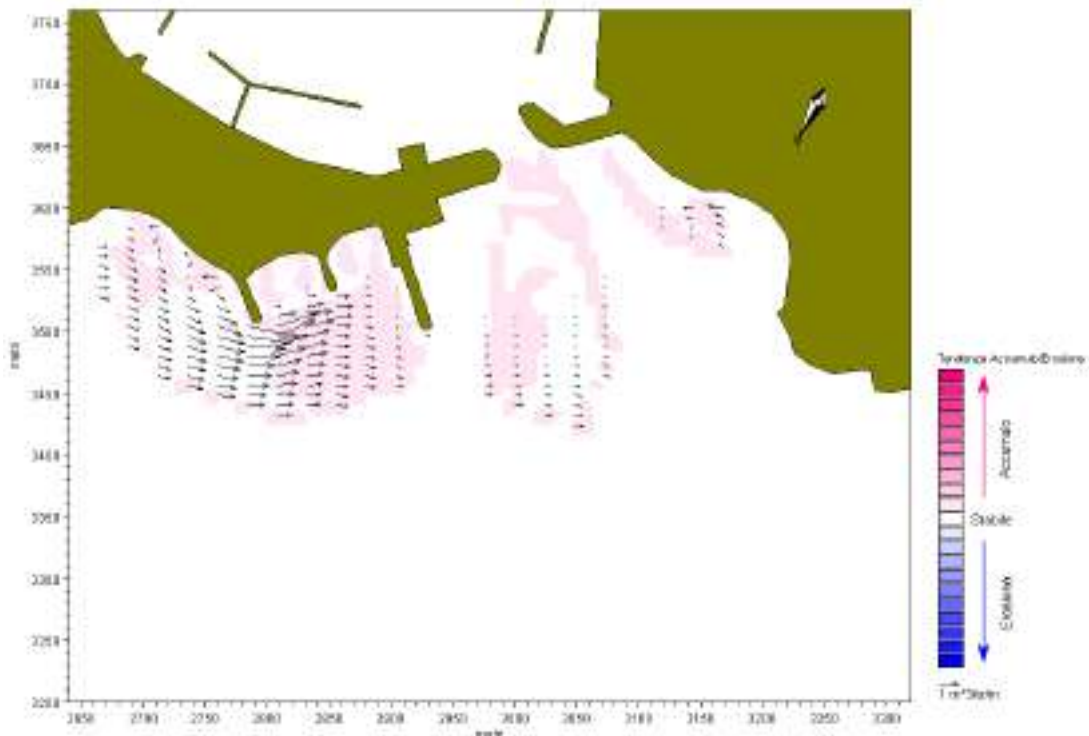


Figura 81 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione attuale



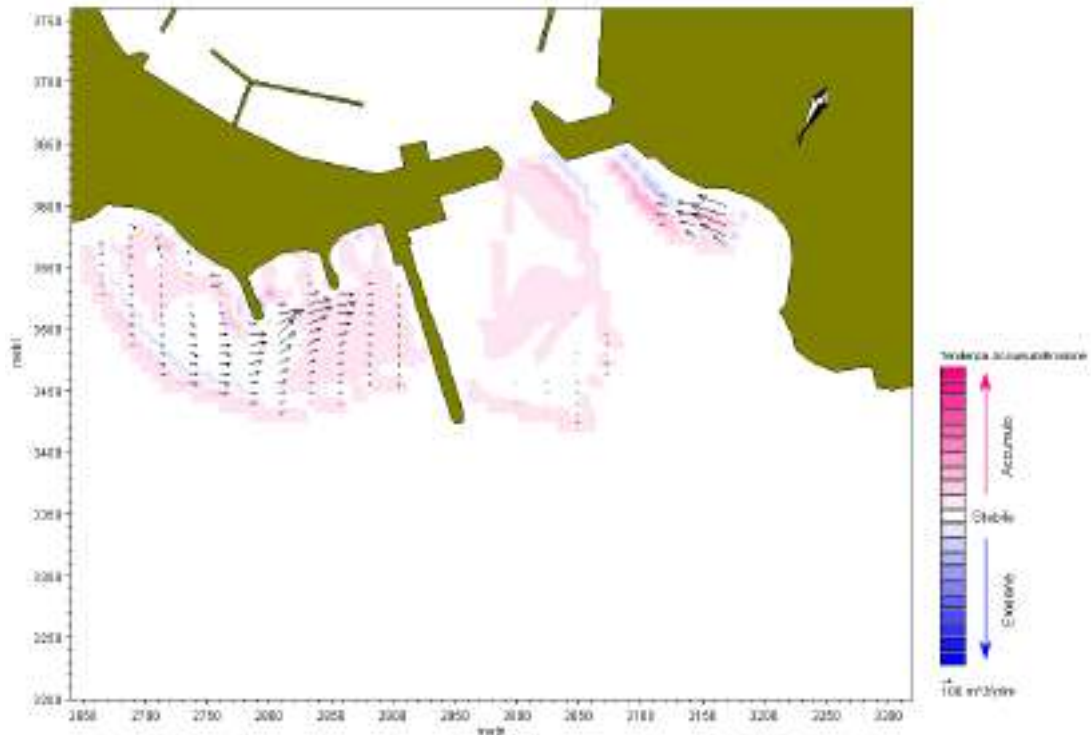


Figura 82 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione 1

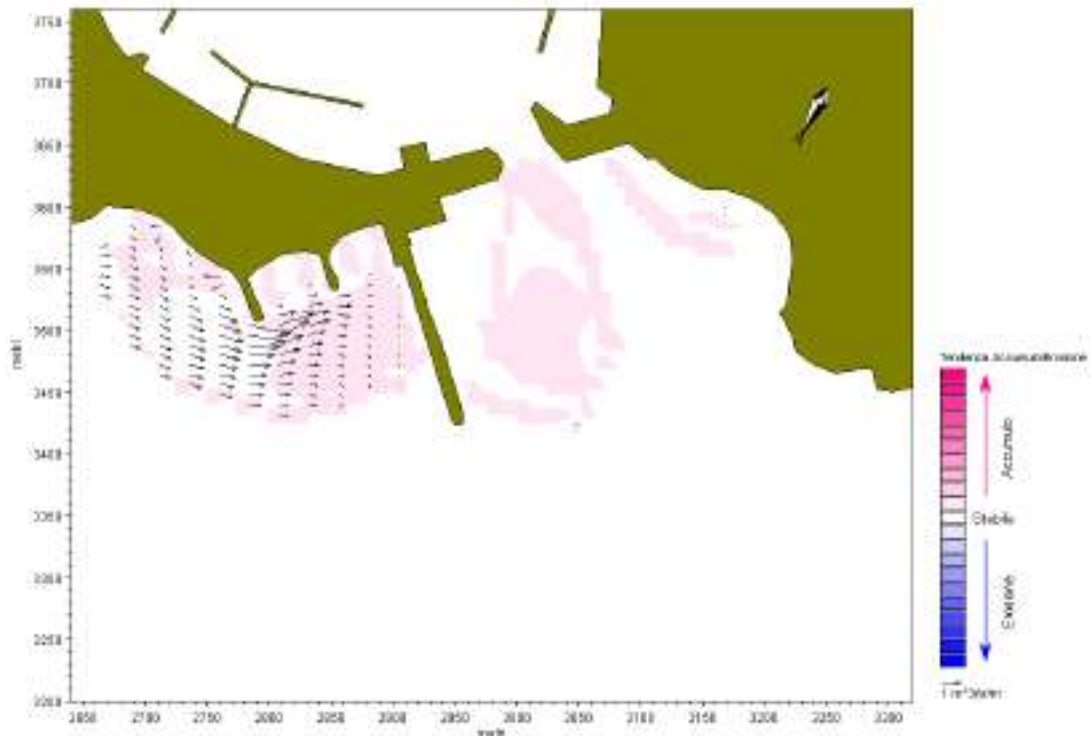


Figura 83 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione 1



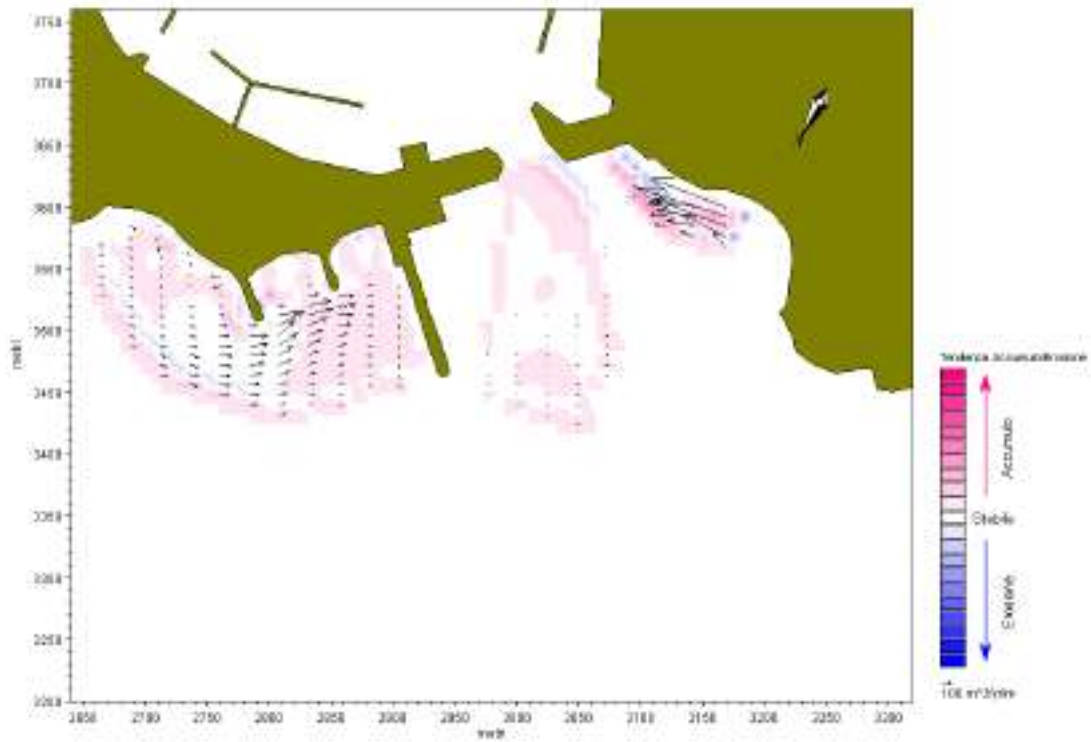


Figura 84 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione 2

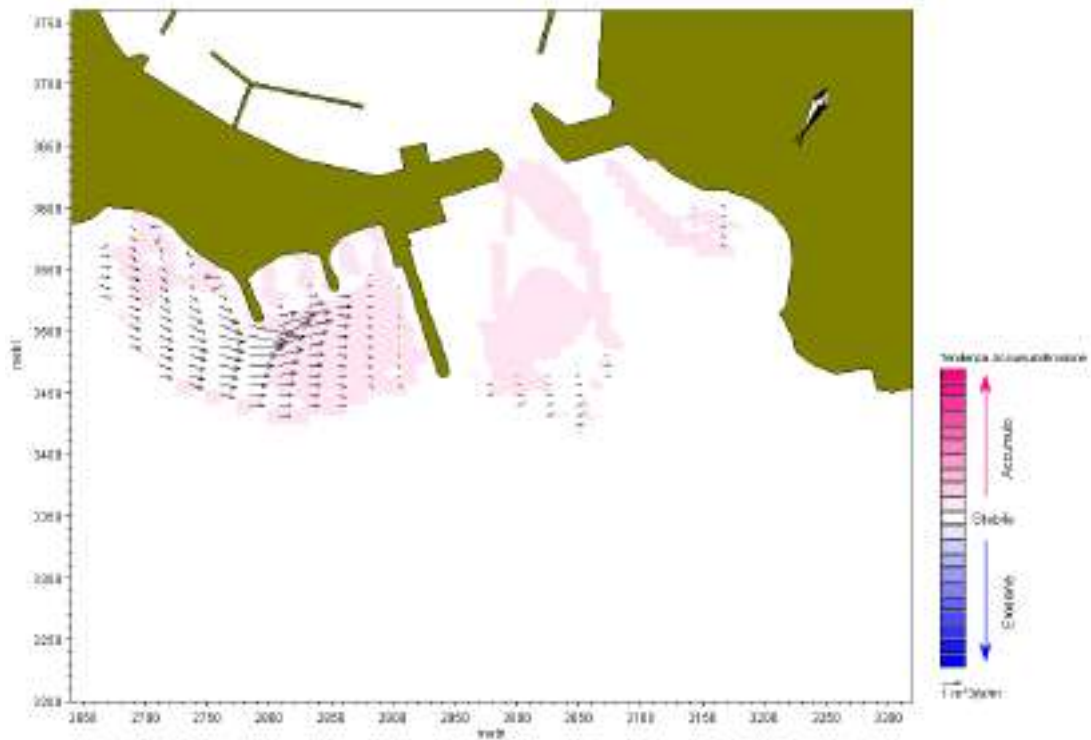


Figura 85 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione 2

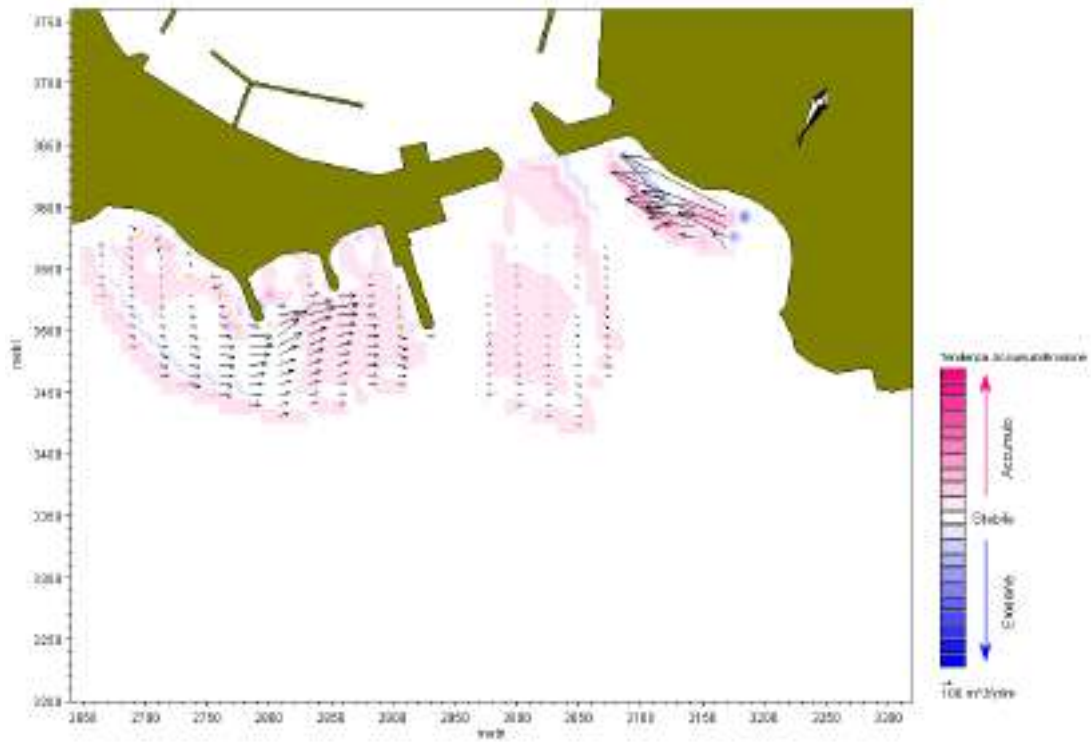


Figura 86 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione 3

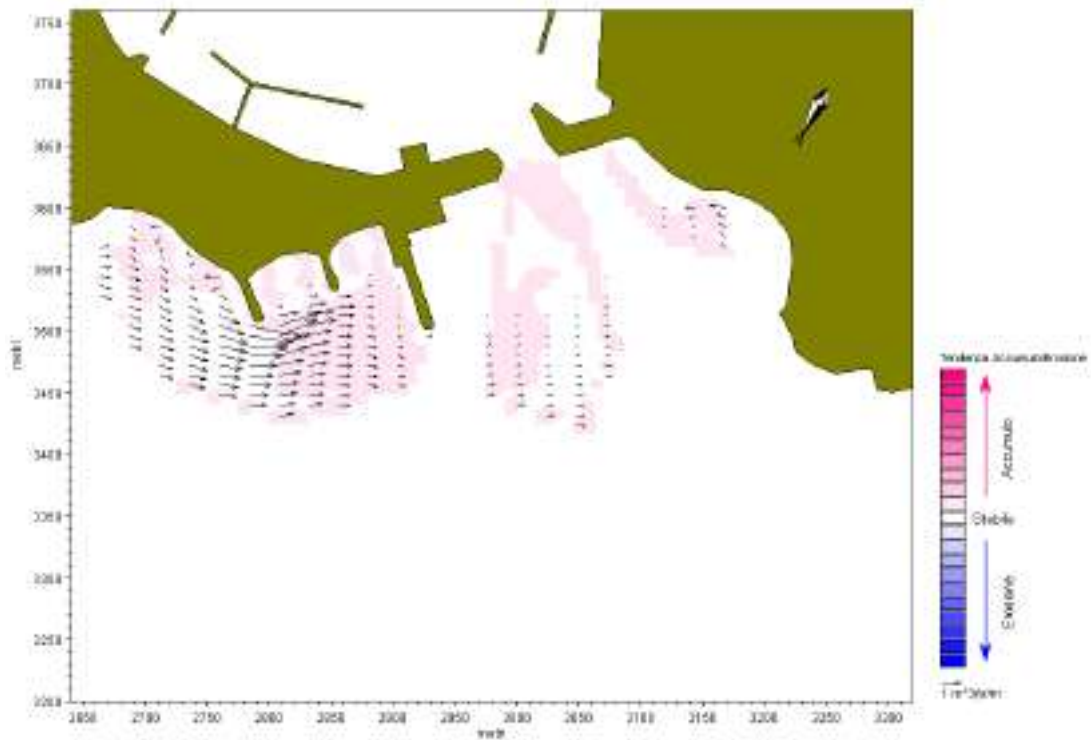


Figura 87 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione 3

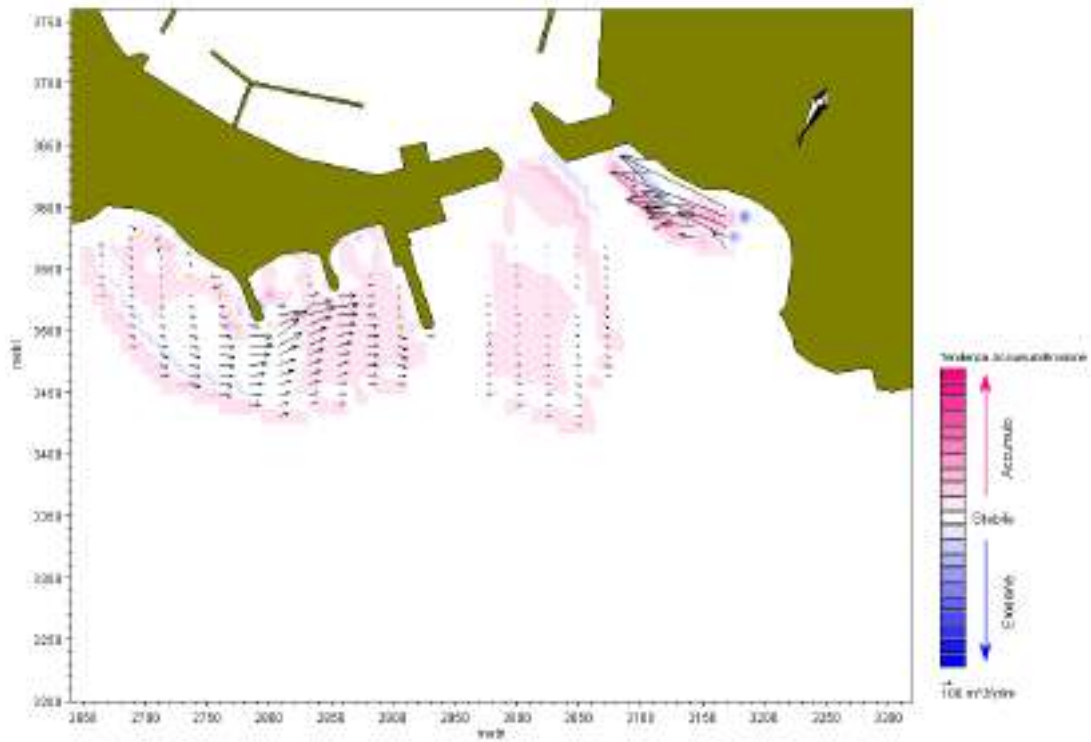


Figura 88 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione 4

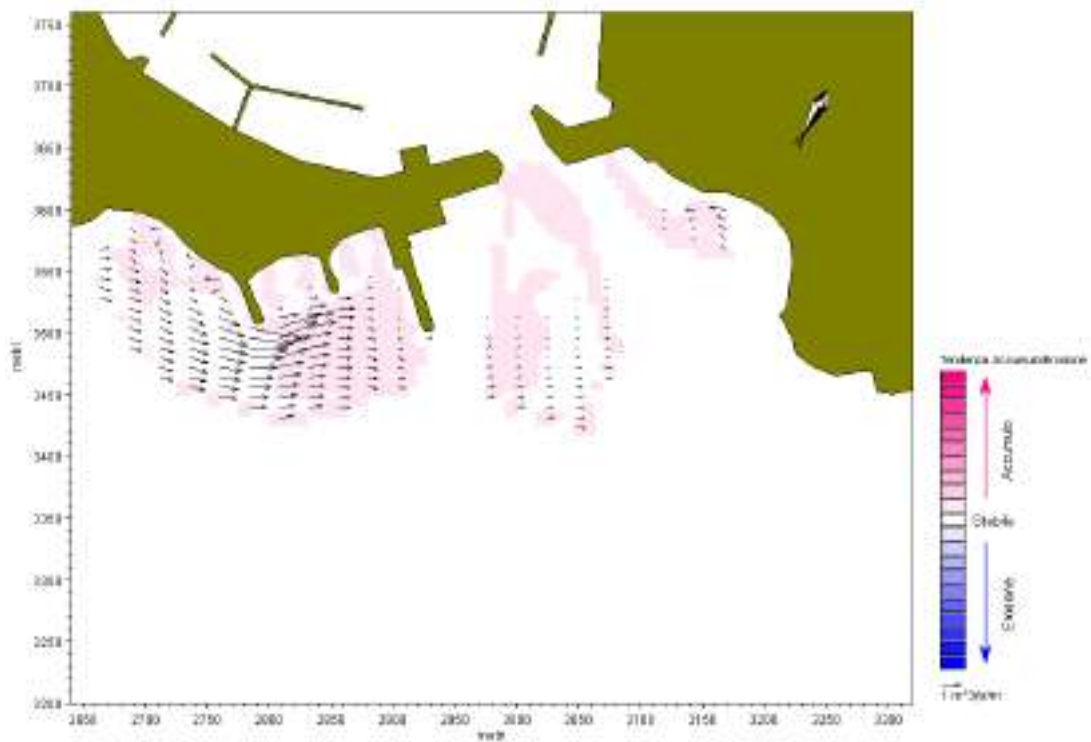


Figura 89 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione 4

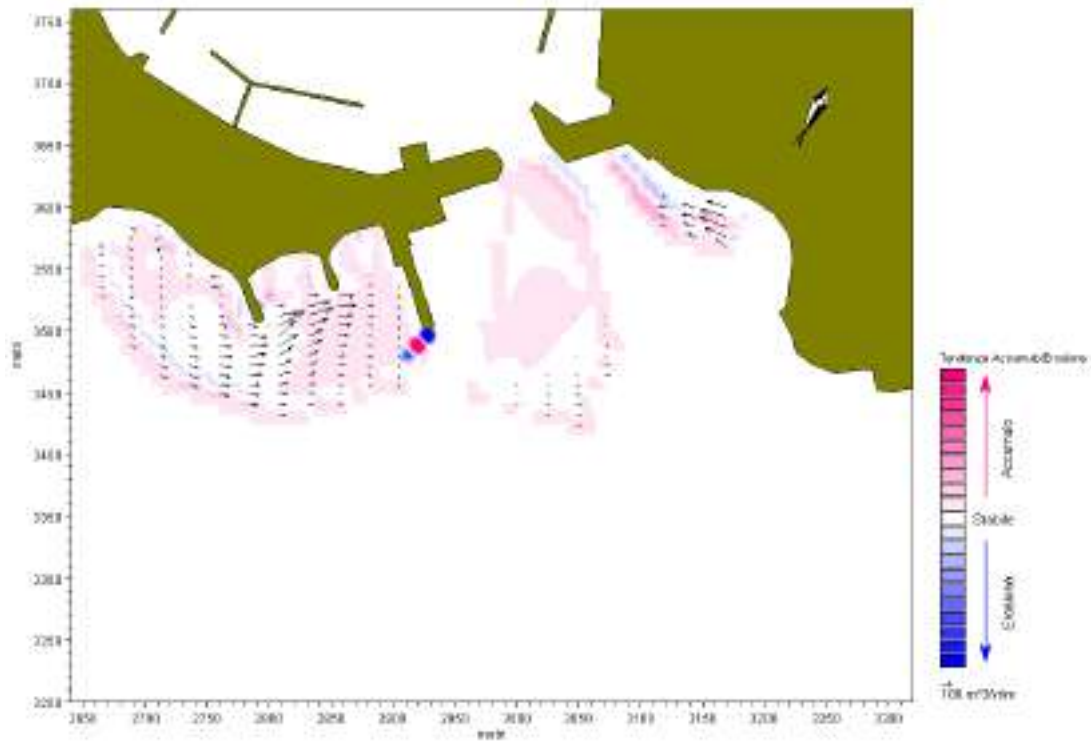


Figura 90 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione 5

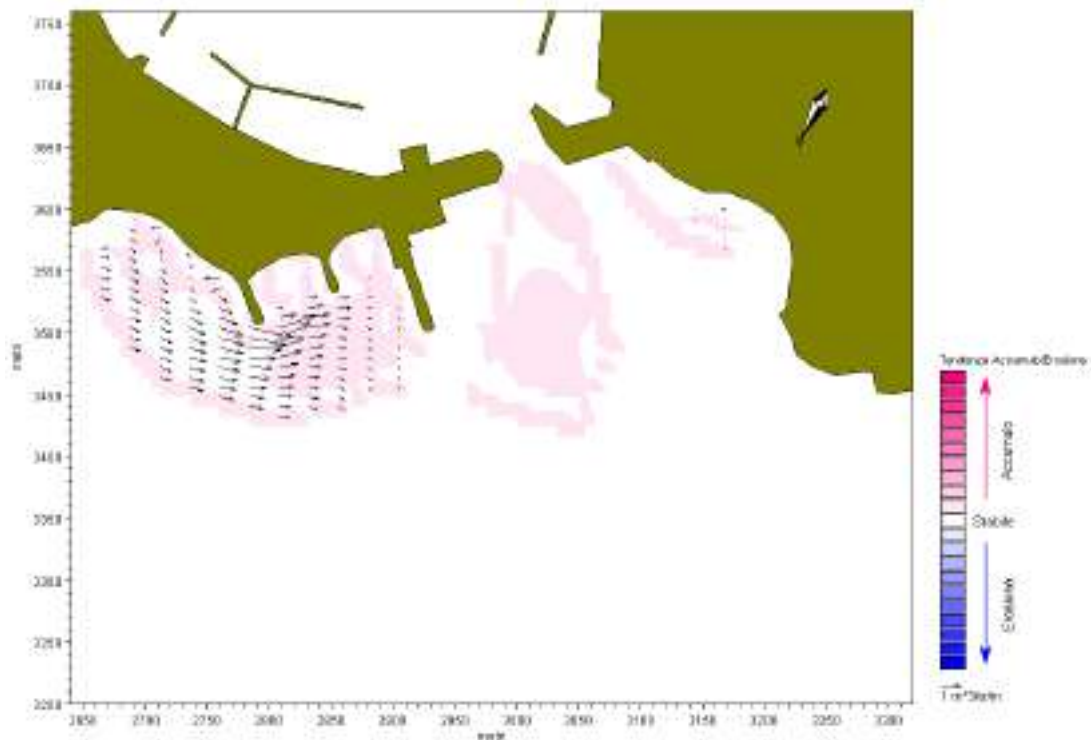


Figura 91 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) da Punta Lepre alla spiaggia Rudalza nella configurazione 5





**Risultati del modello di trasporto solido: spiagge ad Est del porto**

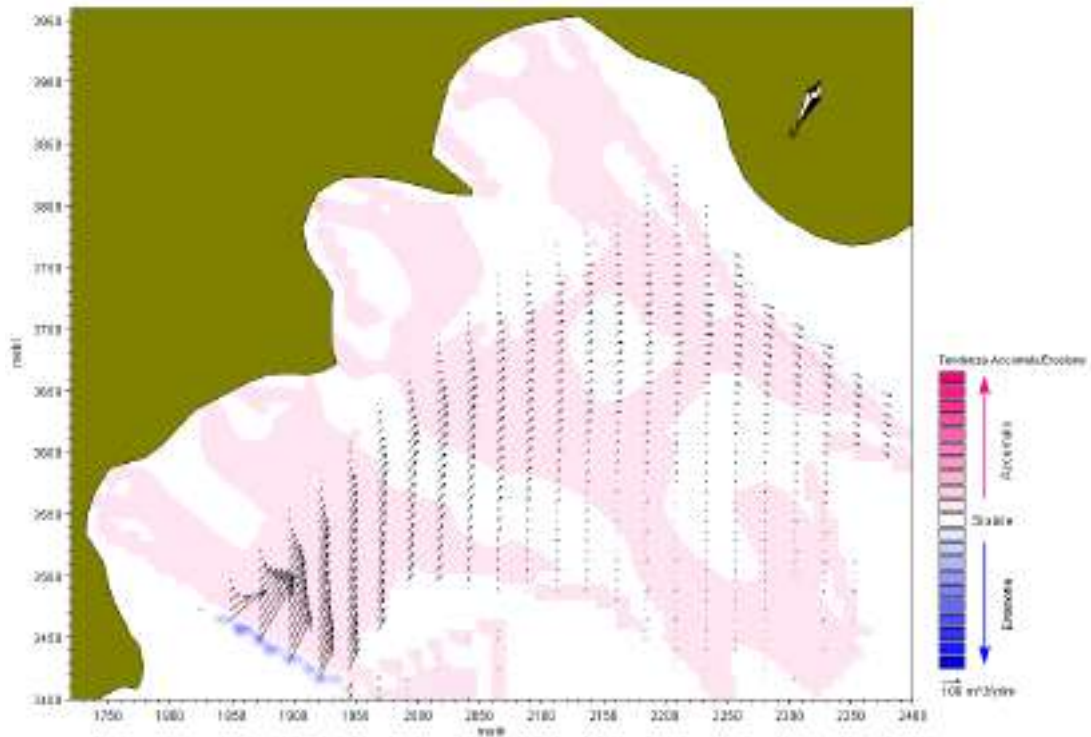


Figura 92 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione attuale

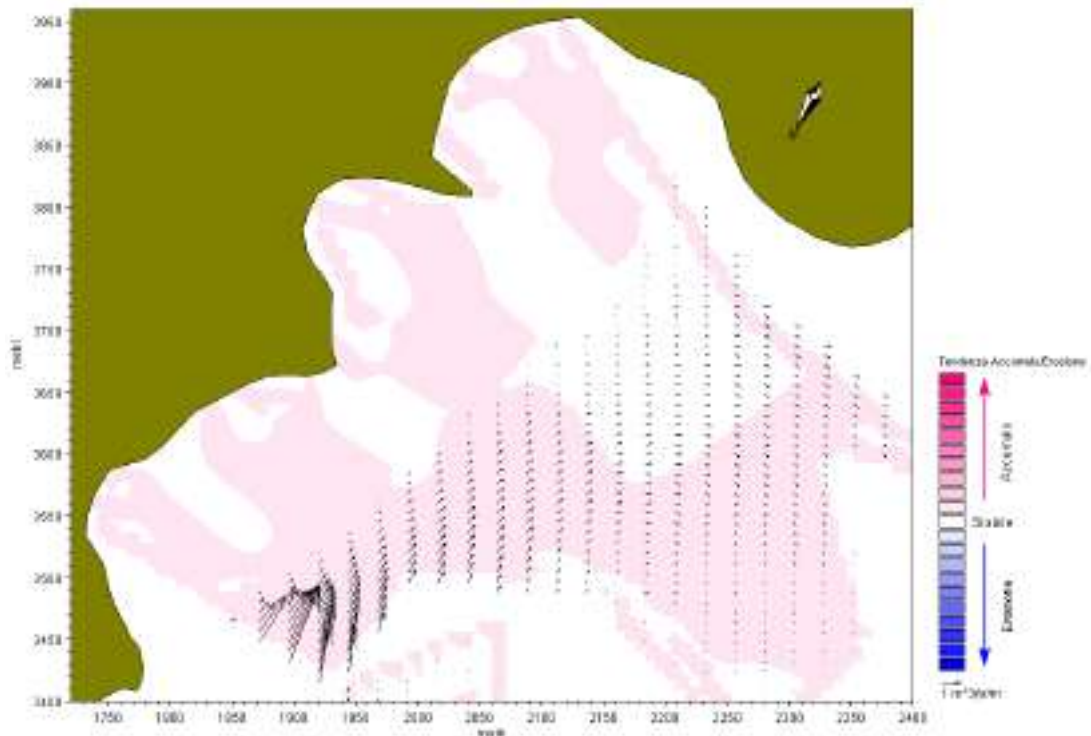


Figura 93 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione attuale

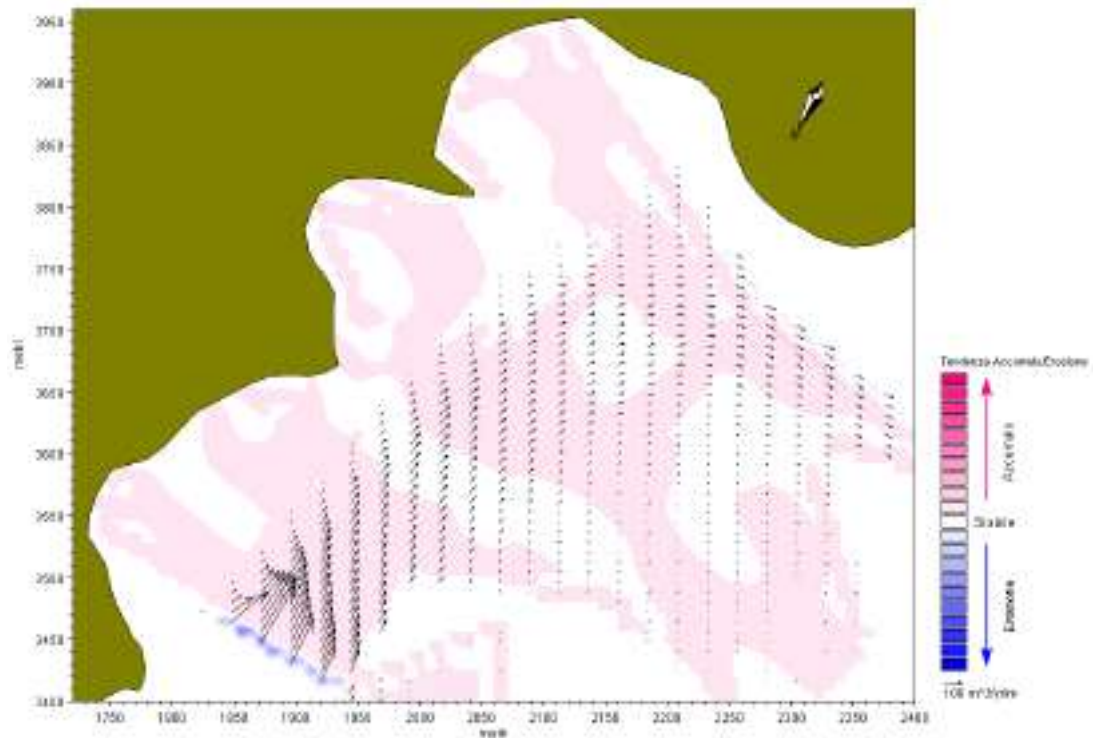


Figura 94 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione 1

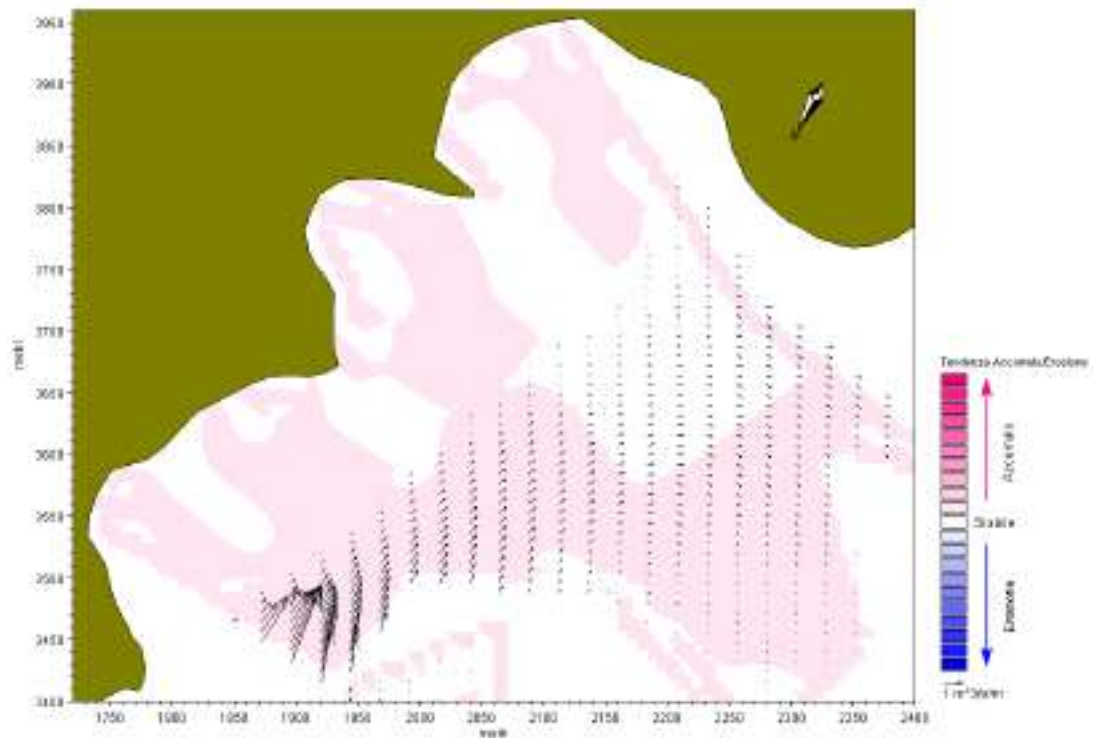


Figura 95 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione 1

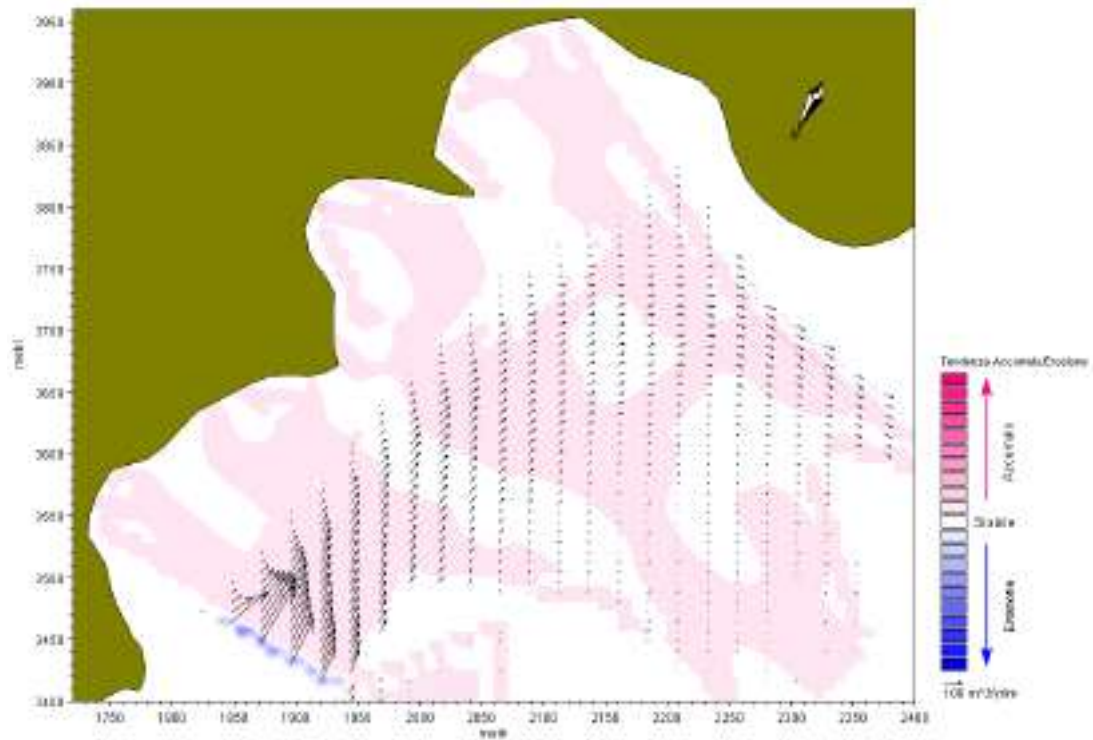


Figura 96 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione 2

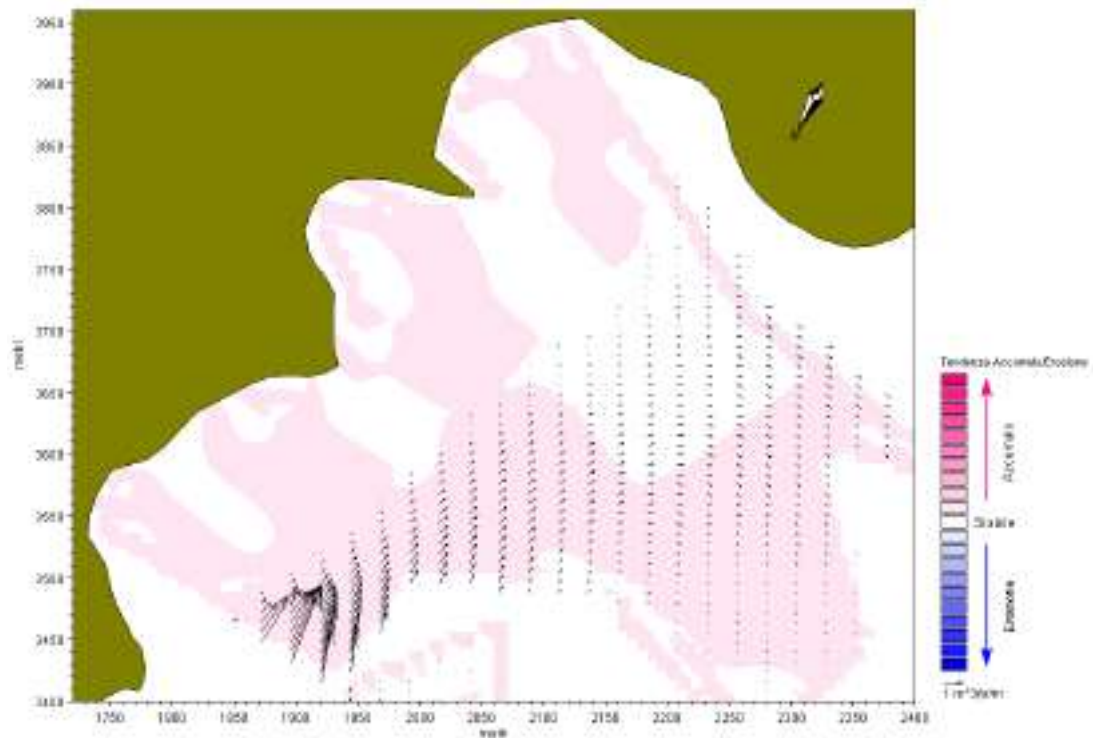


Figura 97 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione 2



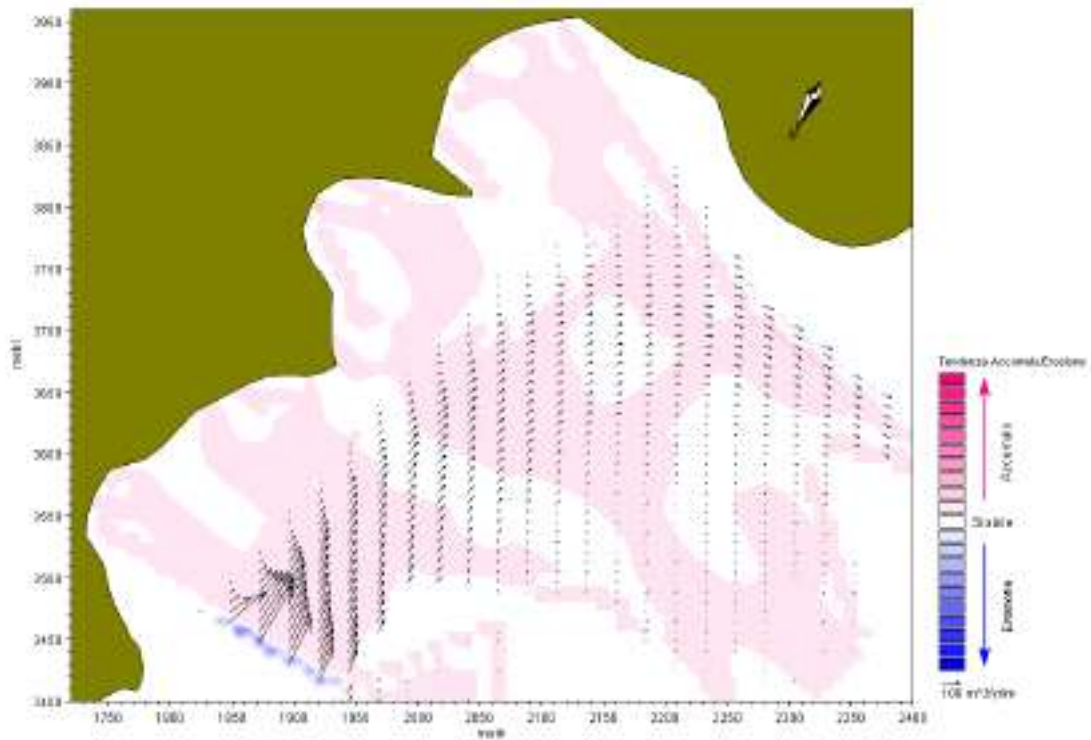


Figura 98 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione 3

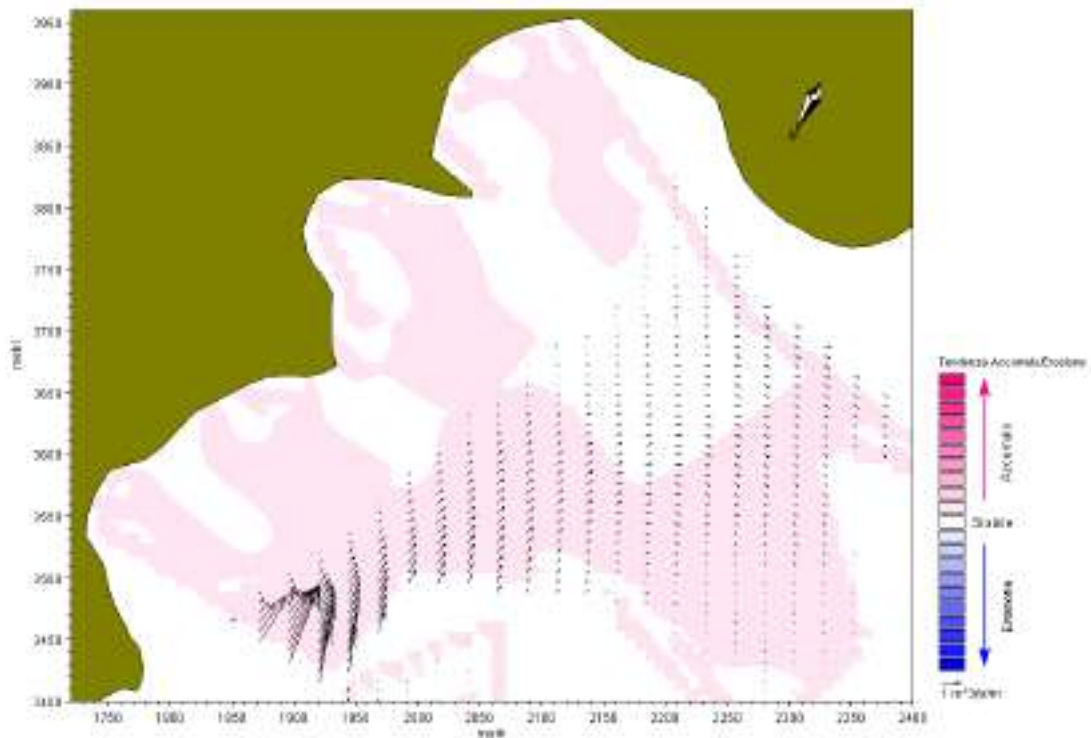


Figura 99 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione 3



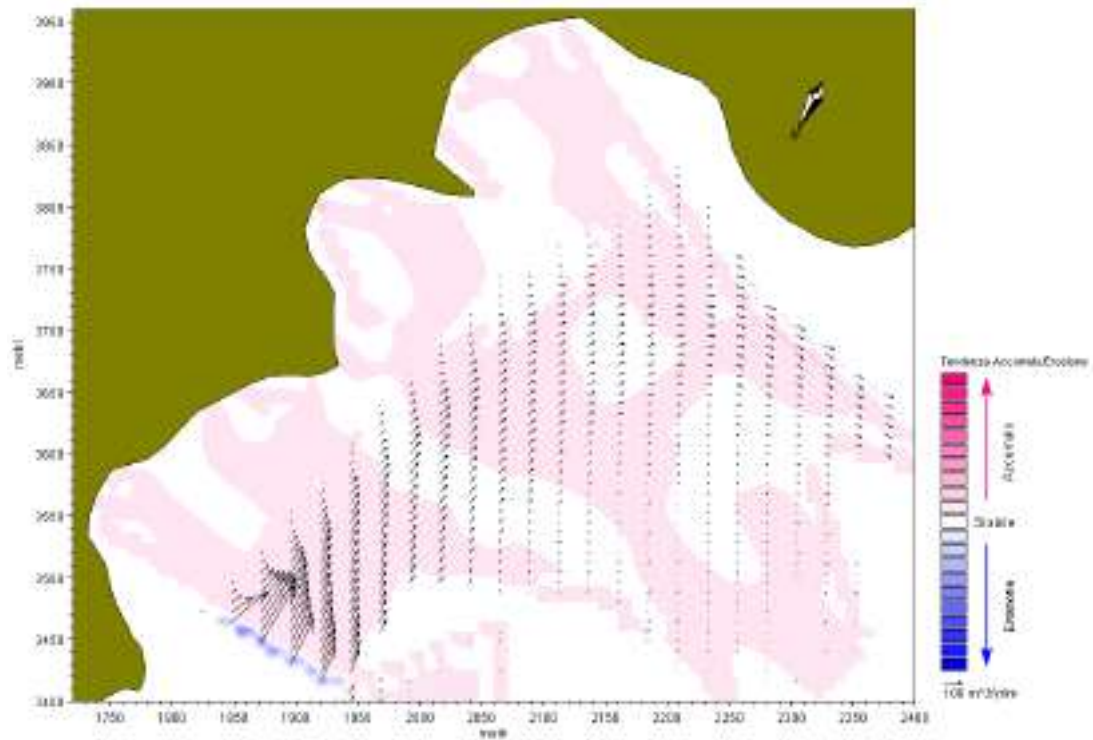


Figura 100 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s ;  $dir=29.1^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione 4

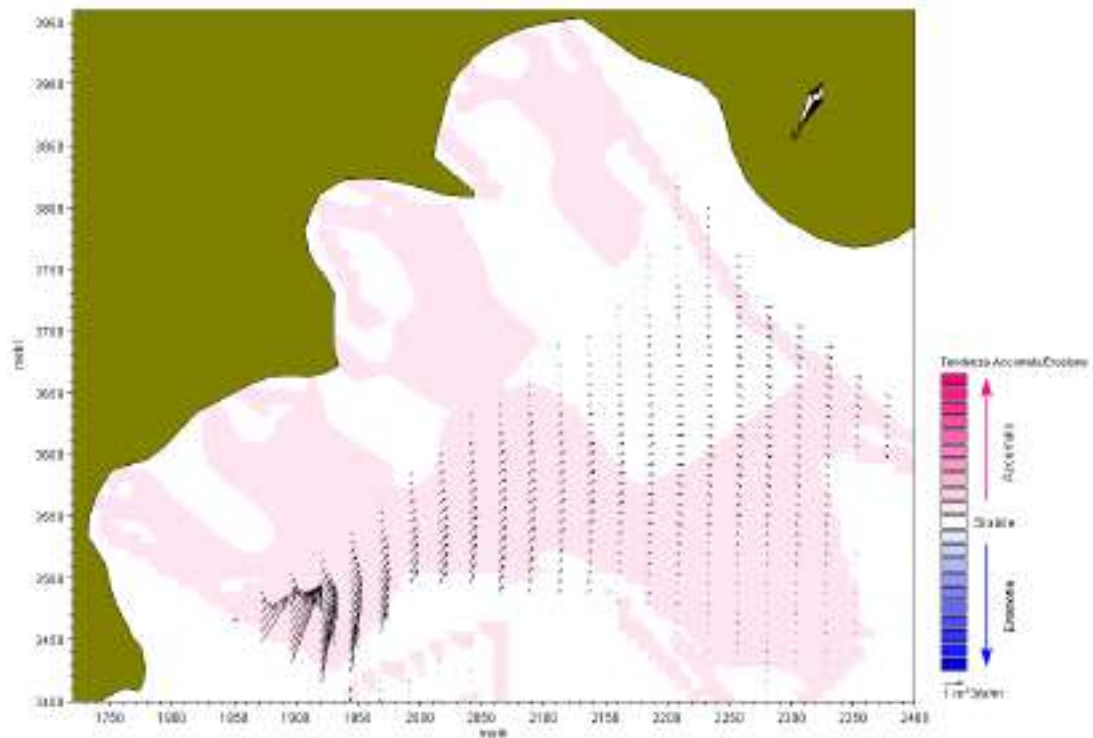


Figura 101 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s ;  $dir=65.4^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione 4

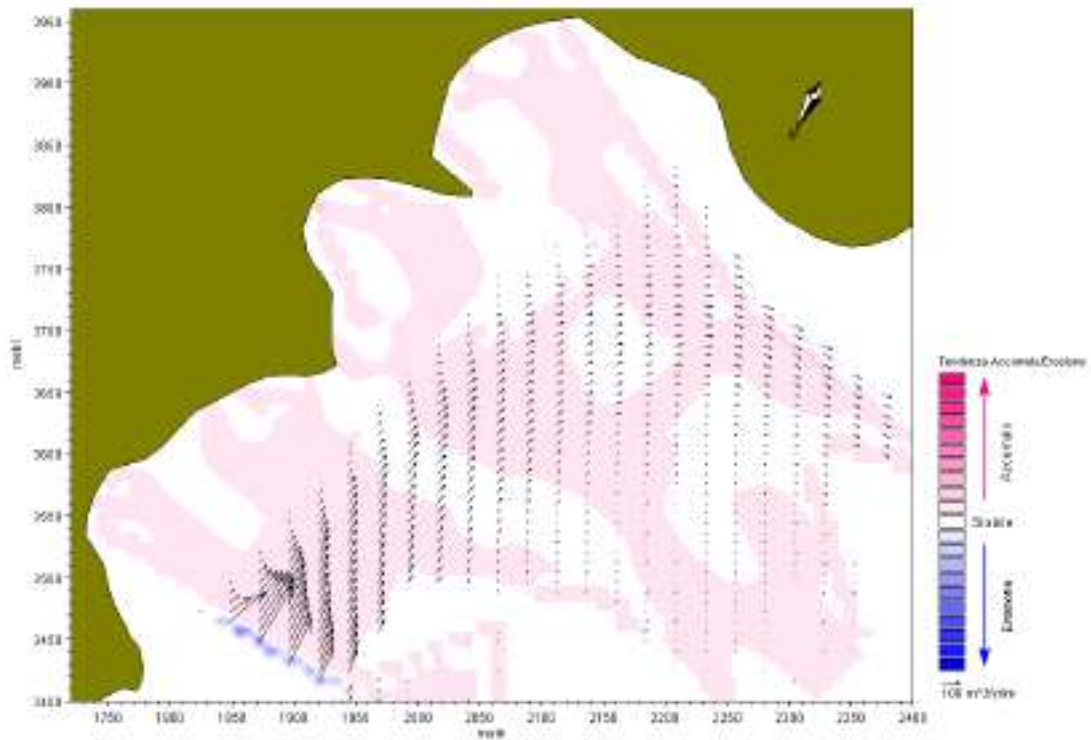


Figura 102 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda L ( $H_s=1.07$  m;  $T_p=5.7$  s;  $dir=29.1^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione 5

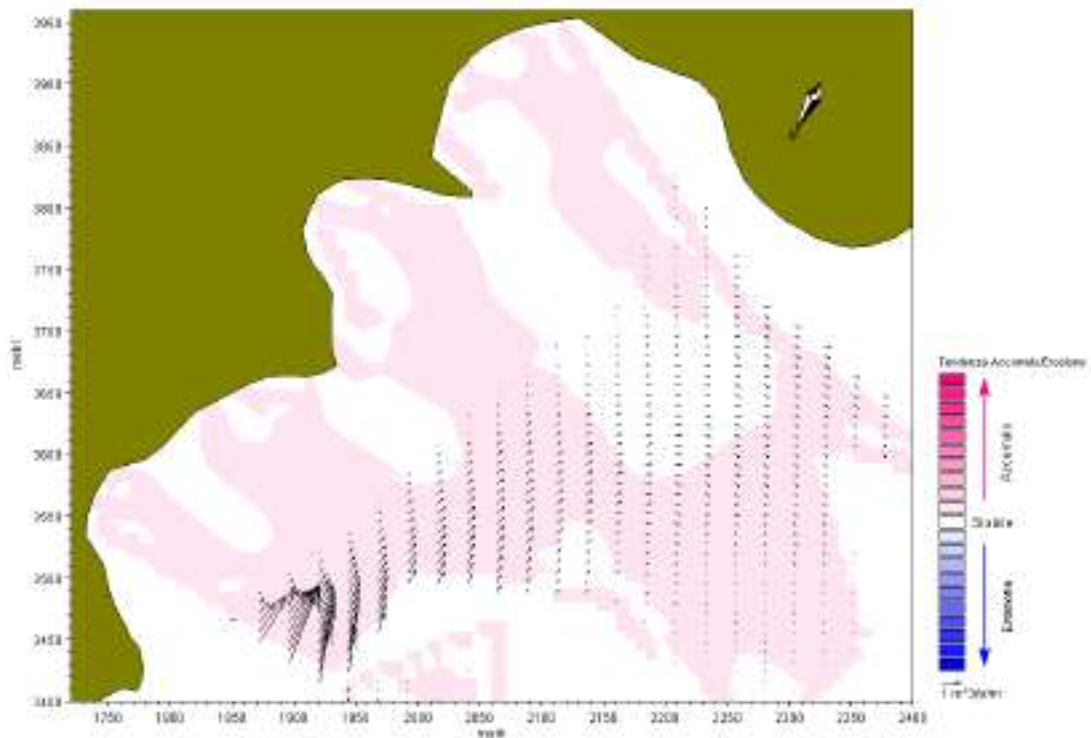


Figura 103 – Trasporto solido medio annuo generato dall'onda R ( $H_s=1.18$  m;  $T_p=4.8$  s;  $dir=65.4^\circ N$ ) nelle spiagge ad Est del porto nella configurazione 5



## 10. DETERMINAZIONE DEI CAMPI DI CONCENTRAZIONE DI SOSTANZE INQUINANTI DIFFUSE NELL'AMBIENTE E PROPAGATE DALLE CORRENTI MARINE

Il modulo MIKE21 AD risolve le equazioni di avvezione-dispersione di dissolvenza o di sostanze in sospensione nelle due dimensioni, in particolare risolve l'equazione di continuità della massa. Nel presente studio sono state assegnate le portate, i loro punti di immissione e le loro concentrazioni ed è stata imposta la condizione di decadimento nullo delle sostanze immesse. Il dominio di calcolo scelto è lo stesso utilizzato per le simulazioni del MIKE21-PMS e dell'idrodinamico.

Nell'Appendice è riportata la descrizione teorica del modello.

### 10.1 Applicazione del MIKE 21 AD

L'applicazione del modello è stata caratterizzata dall'assunzione delle sorgenti di immissione degli inquinanti. Partendo dal presupposto che l'inquinamento prodotto è proporzionale al numero delle imbarcazioni ormeggiate, dalla loro posizione e dimensione, si è assegnato un numero di sorgenti proporzionale ai metri quadri in concessione per gli ormeggi. Sono state quindi assunte 15 sorgenti (nella situazione attuale) ognuna relativa a 2'000 m<sup>2</sup> di concessione, le parti non intere sono state debitamente frazionate.

Tabella 15 – metri quadri dei posti barca (della Marina di P.R., in transito, privati e stagionali)

Categoria	m <sup>2</sup> posto barca	Posti barca	m <sup>2</sup> totali
0	10	35	350.0
I <sup>^</sup>	17.5	156	2'730.0
II <sup>^</sup>	27.9	173	4'826.7
III <sup>^</sup>	41.8	148	6'186.4
III <sup>^</sup> B	34.1	12	409.2
IV <sup>^</sup>	64.4	62	3'992.8
V <sup>^</sup>	85.5	22	1'881.0
VI <sup>^</sup>	104	18	1'872.0
VII <sup>^</sup>	142.5	13	1'852.5
VIII <sup>^</sup>	210	6	1'260.0
VIII <sup>^</sup> B	171	1	171.0
IX	320	3	960.0
X	500	5 (esterni)	2'500.0
	<b>Totali</b>	<b>654</b>	<b>28'991.6</b>
X	400	4 (esterni)	2'000.0

di progetto



Dai risultati delle simulazioni è possibile ricostruire il grado di concentrazione di inquinante in ciascun punto del dominio di calcolo a partire dai valori di un campionamento delle acque, come ad esempio quello effettuato all'interno del porto (cella 380, 463 del modello MIKE21-AD), dal dott. Augusto Navone secondo la seguente relazione:

$$\alpha_x = C \cdot \alpha_p$$

In cui il coefficiente C è dato da:

$$C = \frac{C_x}{C_p}$$

dove:  $C_x$  è la percentuale di concentrazione nel punto di interesse;

$C_p$  è la concentrazione nel punto di prelievo;

$\alpha_p$  è la quantità di sostanza inquinante nel punto P.

## 10.2 Analisi dei risultati del modello di dispersione

Dal modello di dispersione degli inquinanti si nota, come era lecito aspettarsi, che la configurazione 3, con sistemazione dell'ingresso del porto, ma senza banchinamento lato Ovest e quindi senza il conseguente ormeggio delle imbarcazioni, sia quella più simile a quella attuale. In ogni caso le variazioni dovute all'allungamento del pennello di 80 o 40 m, del dragaggio, del banchinamento e della barriera soffolta non influiscono per valori superiori al 4% su base annua nella spiaggia Rudalza come si può vedere dal grafico di Figura 116. Tali variazioni si possono ritenere del tutto tollerabili in una logica di qualità delle acque adibite alla balneazione.

Per quanto riguarda le restanti spiagge ad Est (di Punta Lepre, dei Sassi, Bassey e Hruska) e ad Ovest del porto (Ira e Rudargia) non si ha alcuna variazione quantificabile della qualità delle acque dovuta alla realizzazione delle opere in progetto per ciascuna configurazione.



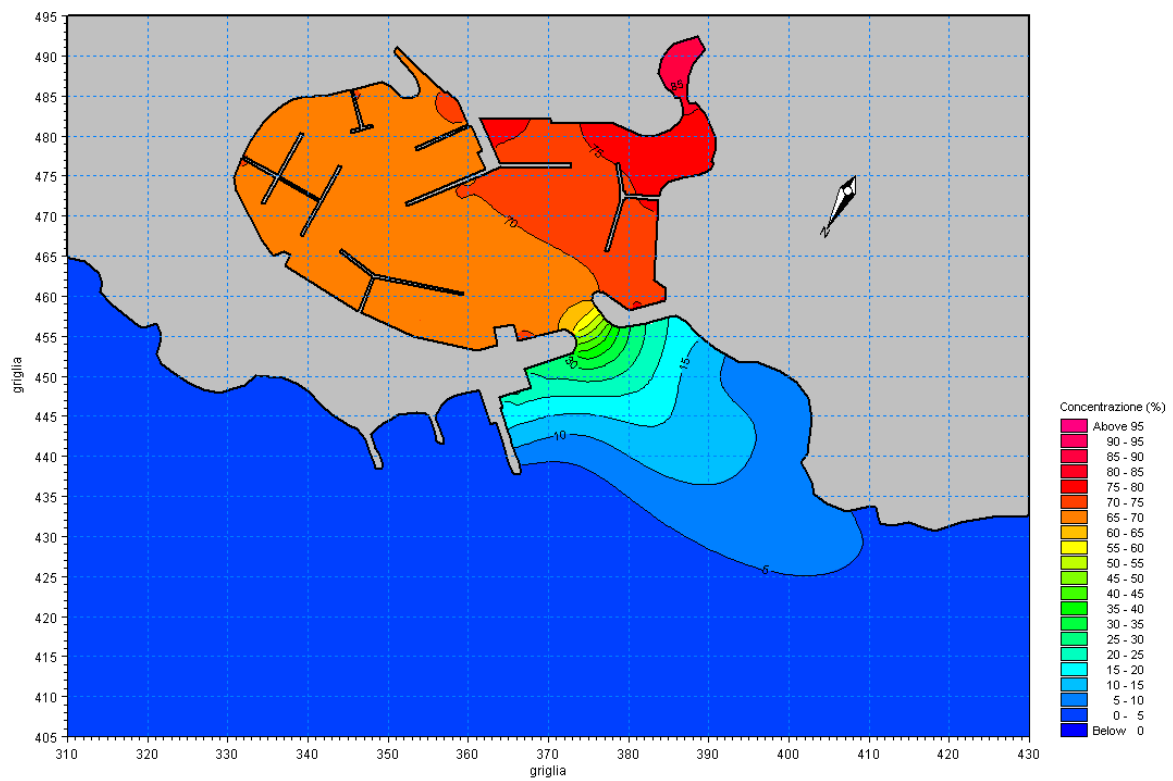


Figura 104 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda L ( $H_s=1.07m$ ;  $T_p=5.7s$ ;  $dir = 29.1^\circ N$ ) nella configurazione attuale

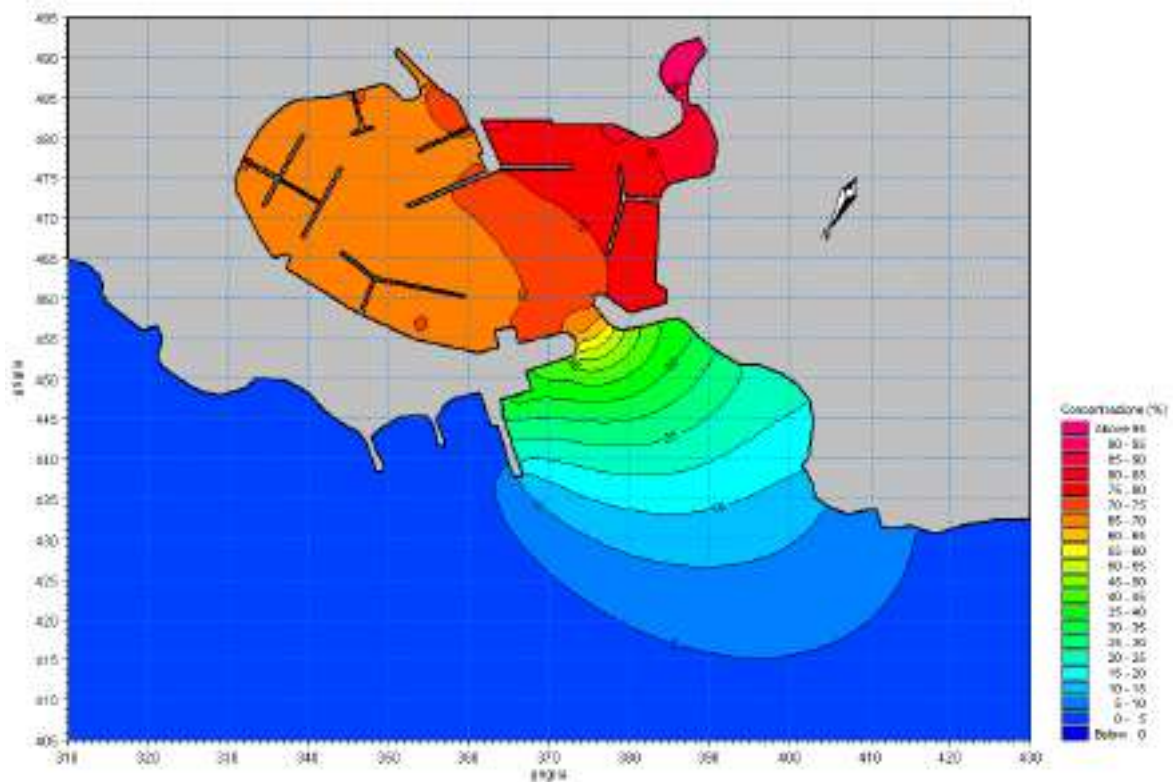


Figura 105 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda R ( $H_s=1.18m$ ;  $T_p=4.8s$ ;  $dir = 65.4^\circ N$ ) nella configurazione attuale

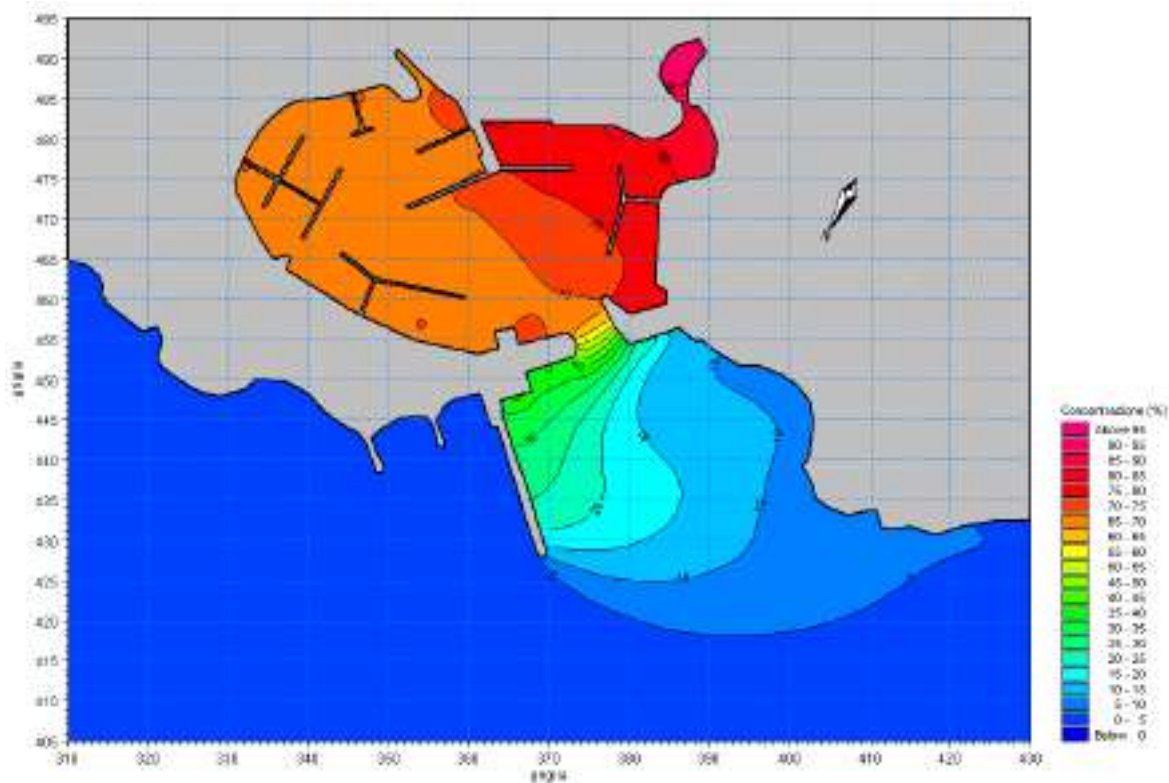


Figura 106 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda L ( $H_s=1.07m$ ;  $T_p=5.7s$ ;  $dir = 29.1^\circ N$ ) nella configurazione 1

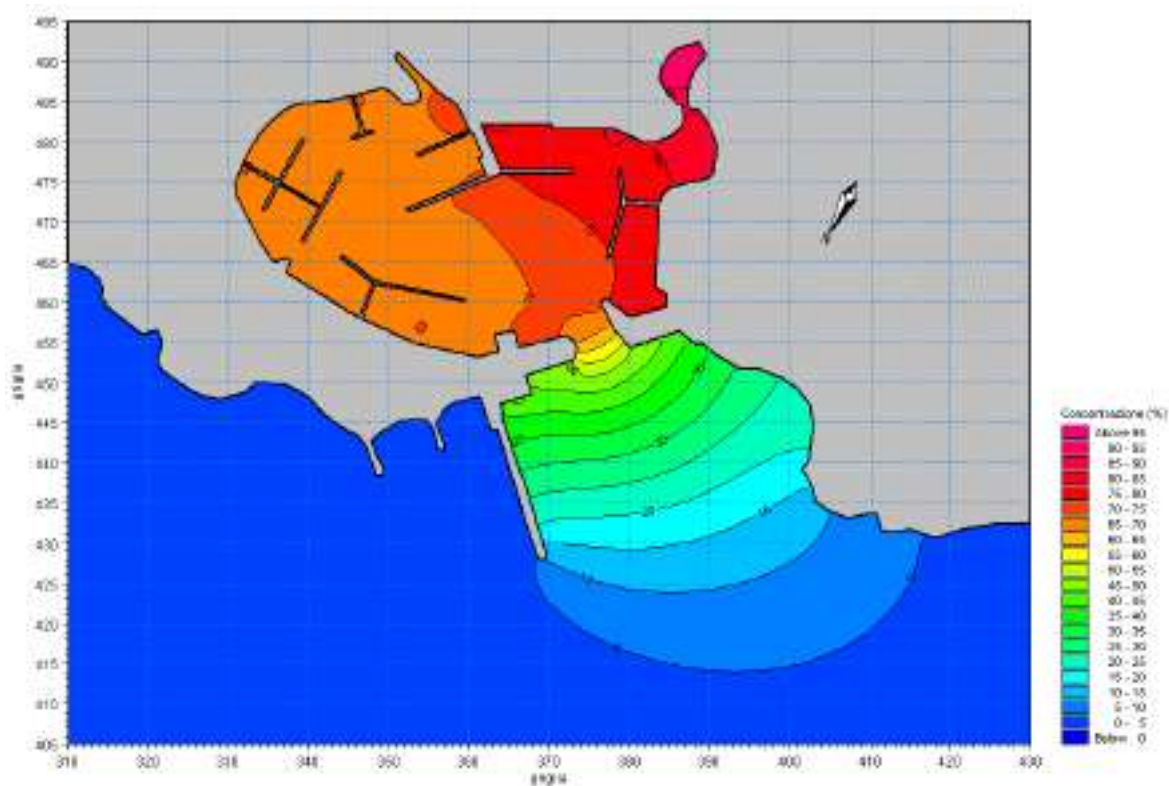


Figura 107 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda R ( $H_s=1.18m$ ;  $T_p=4.8s$ ;  $dir = 65.4^\circ N$ ) nella configurazione 1

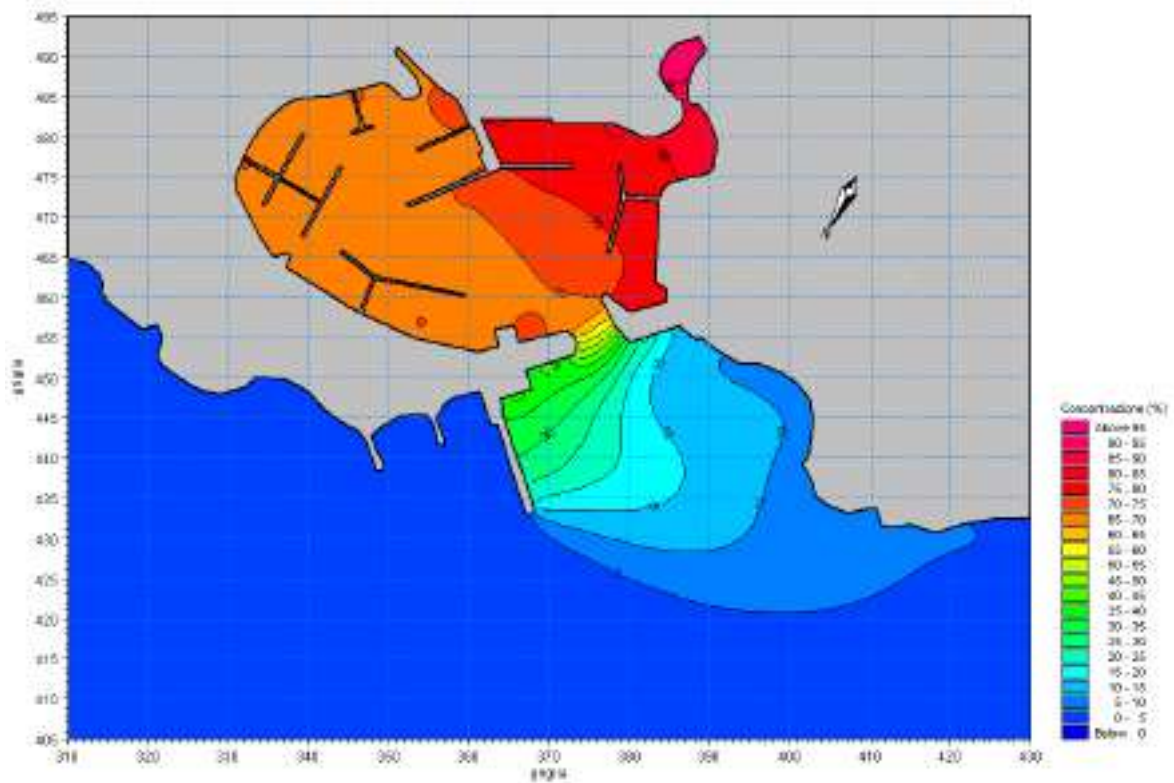


Figura 108 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda L ( $H_s=1.07m$ ;  $T_p=5.7s$ ;  $dir = 29.1^\circ N$ ) nella configurazione 2

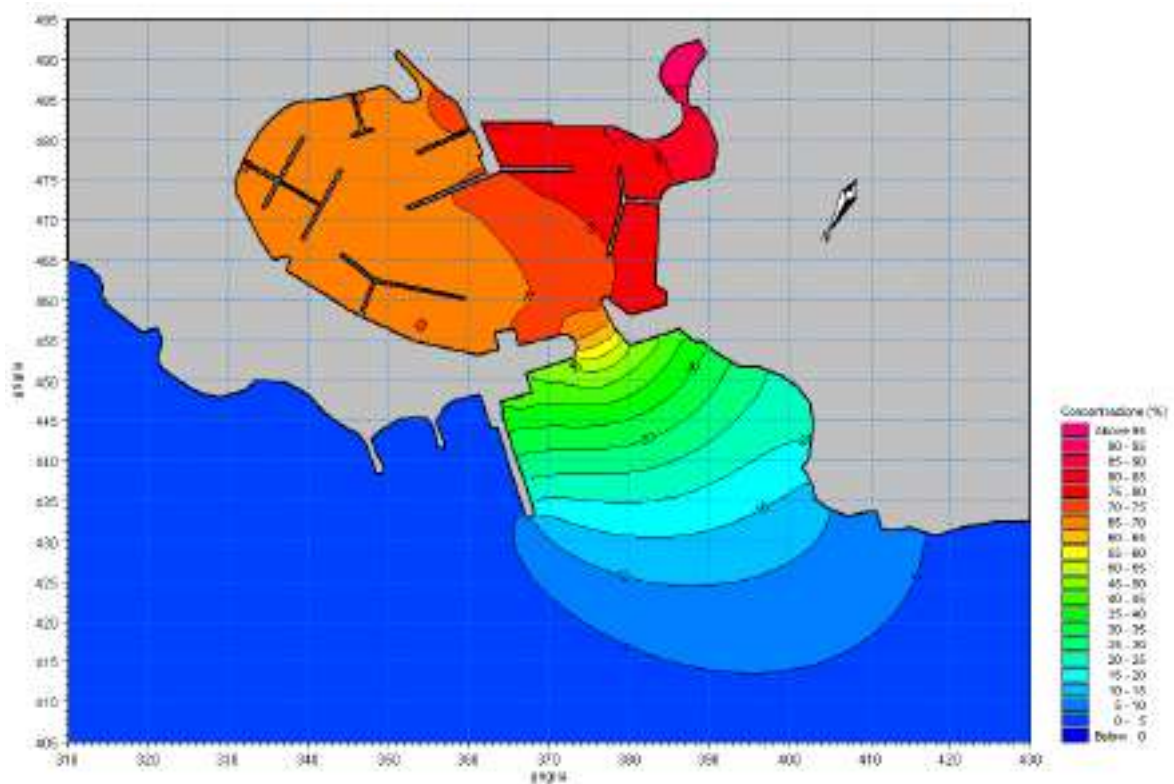


Figura 109 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda R ( $H_s=1.18m$ ;  $T_p=4.8s$ ;  $dir = 65.4^\circ N$ ) nella configurazione 2



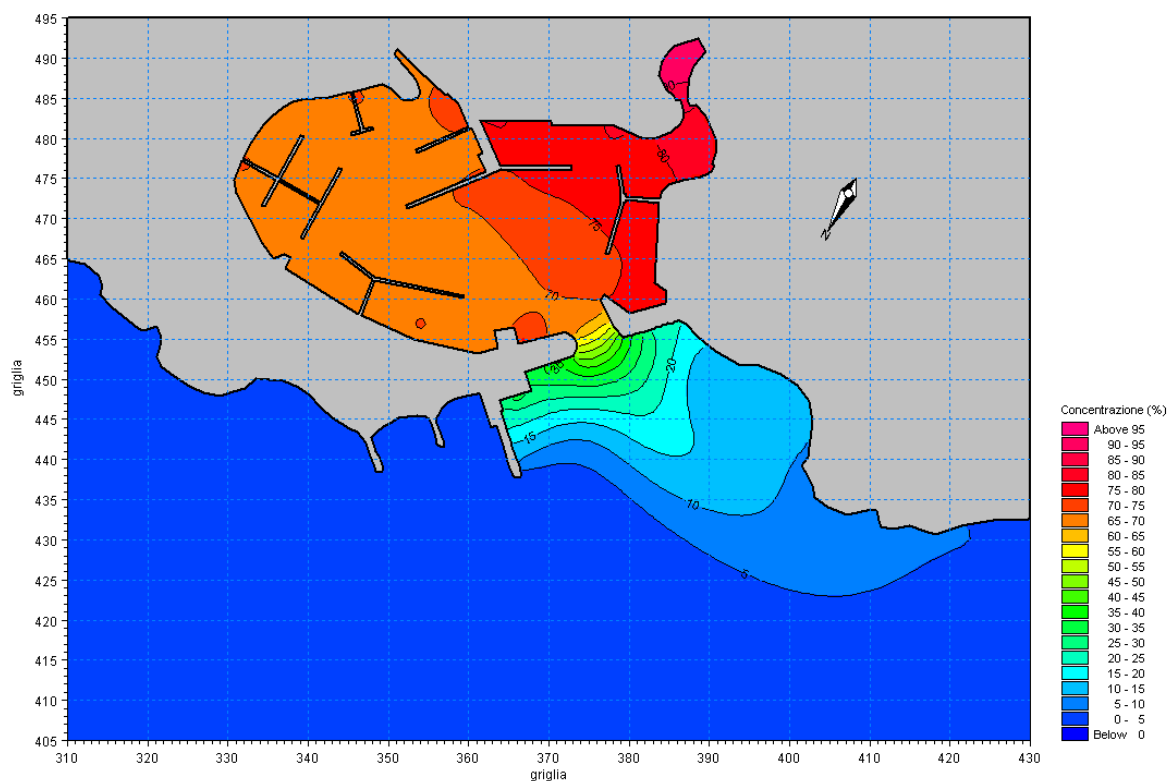


Figura 110 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda L ( $H_s=1.07m$ ;  $T_p=5.7s$ ;  $dir = 29.1^\circ N$ ) nella configurazione 3

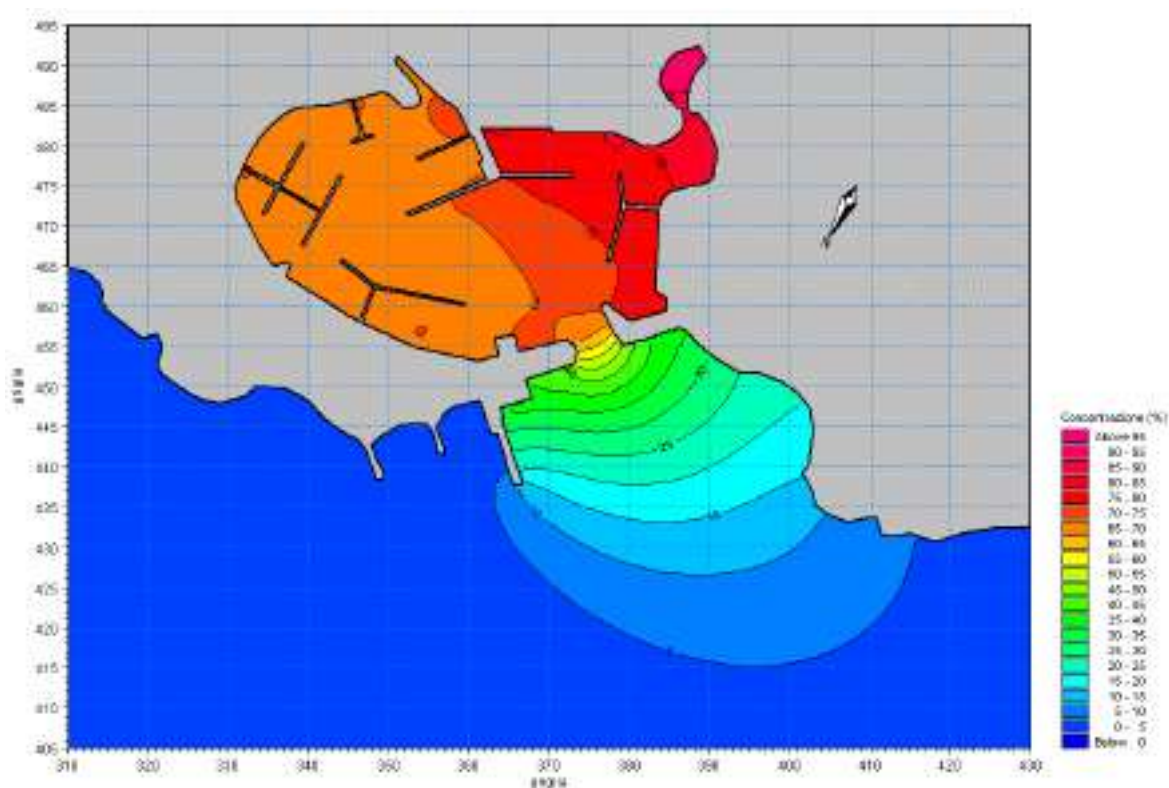


Figura 111 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda R ( $H_s=1.18m$ ;  $T_p=4.8s$ ;  $dir = 65.4^\circ N$ ) nella configurazione 3



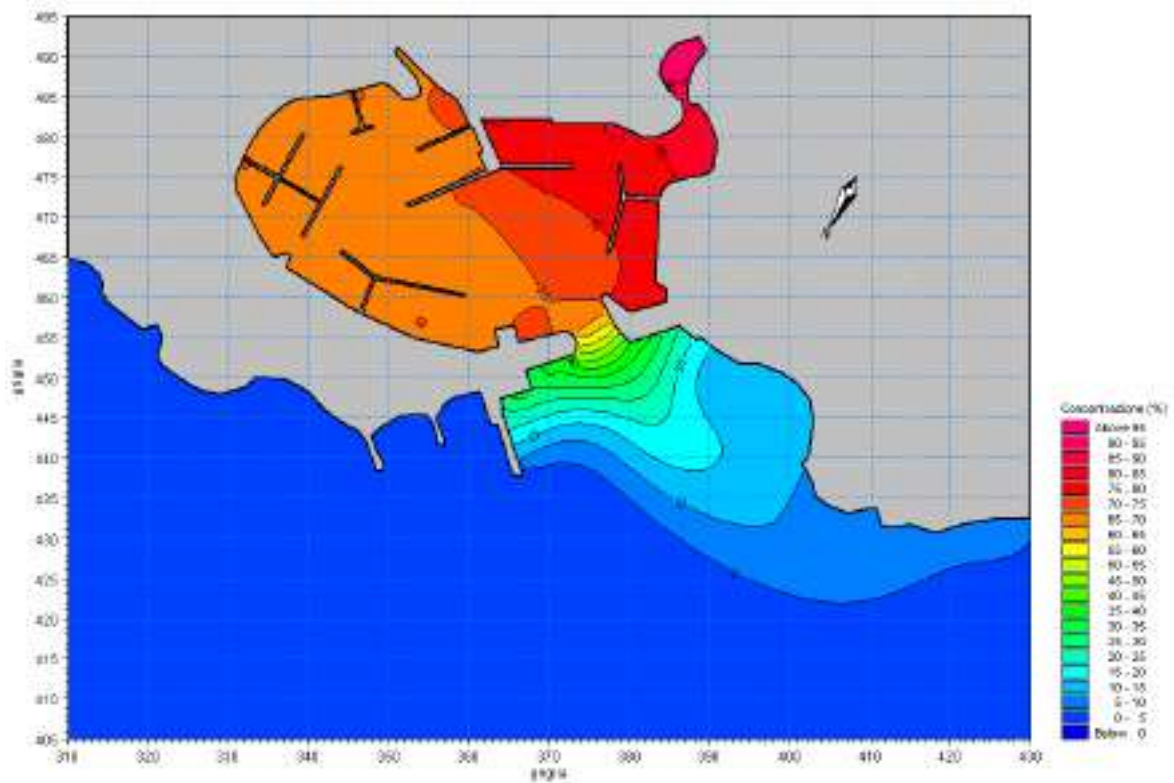


Figura 112 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda L ( $H_s=1.07m$ ;  $T_p=5.7s$ ;  $dir = 29.1^\circ N$ ) nella configurazione 4

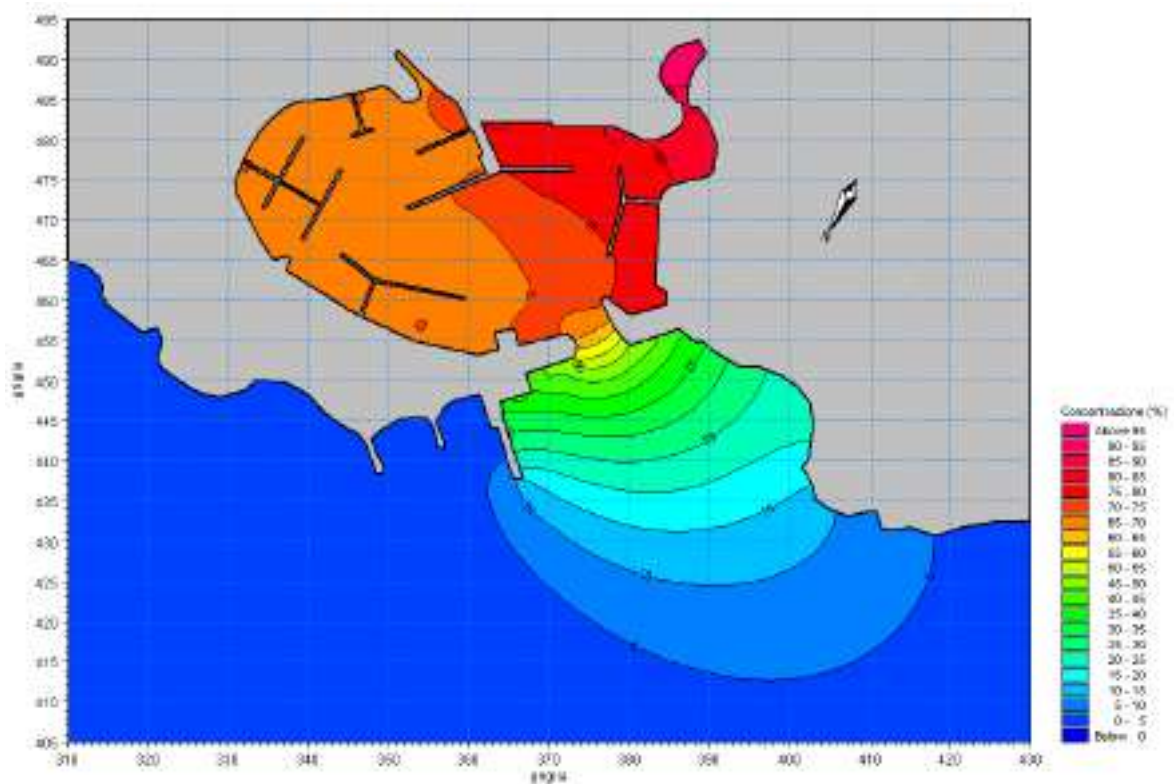


Figura 113 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda R ( $H_s=1.18m$ ;  $T_p=4.8s$ ;  $dir = 65.4^\circ N$ ) nella configurazione 4

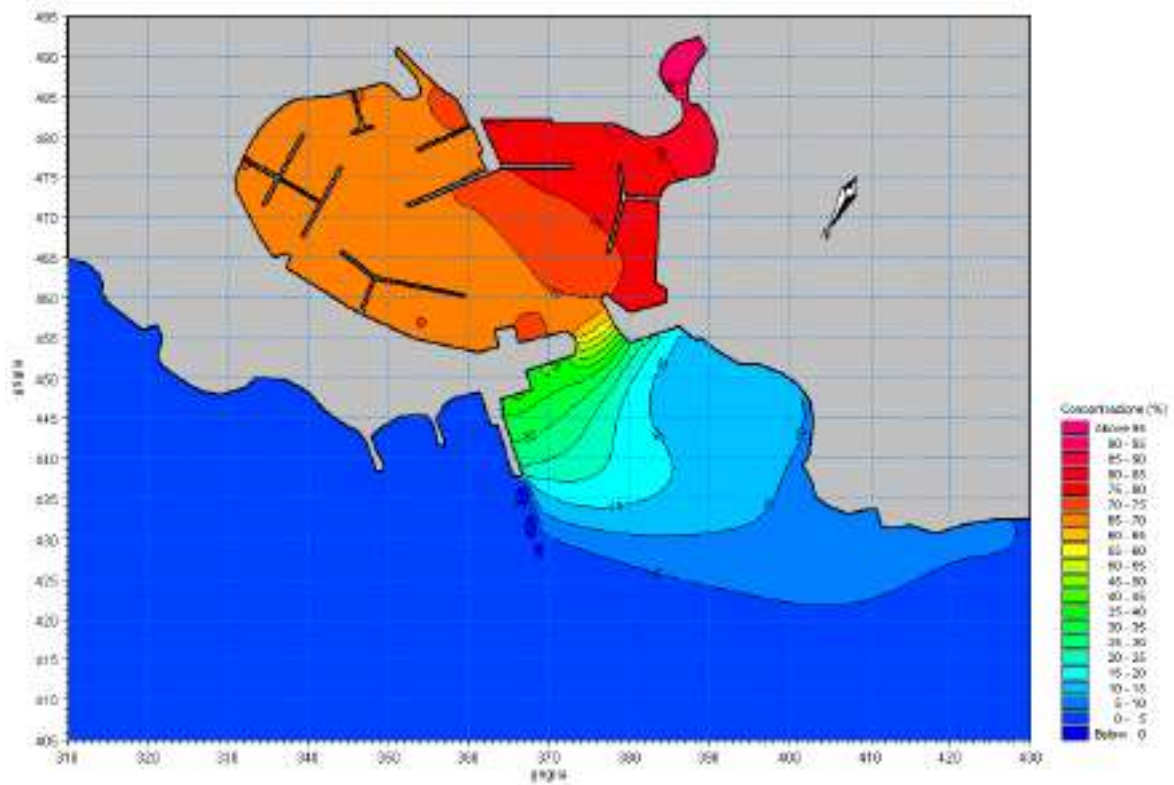


Figura 114 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda L ( $H_s=1.07m$ ;  $T_p=5.7s$ ;  $dir = 29.1^\circ N$ ) nella configurazione 5

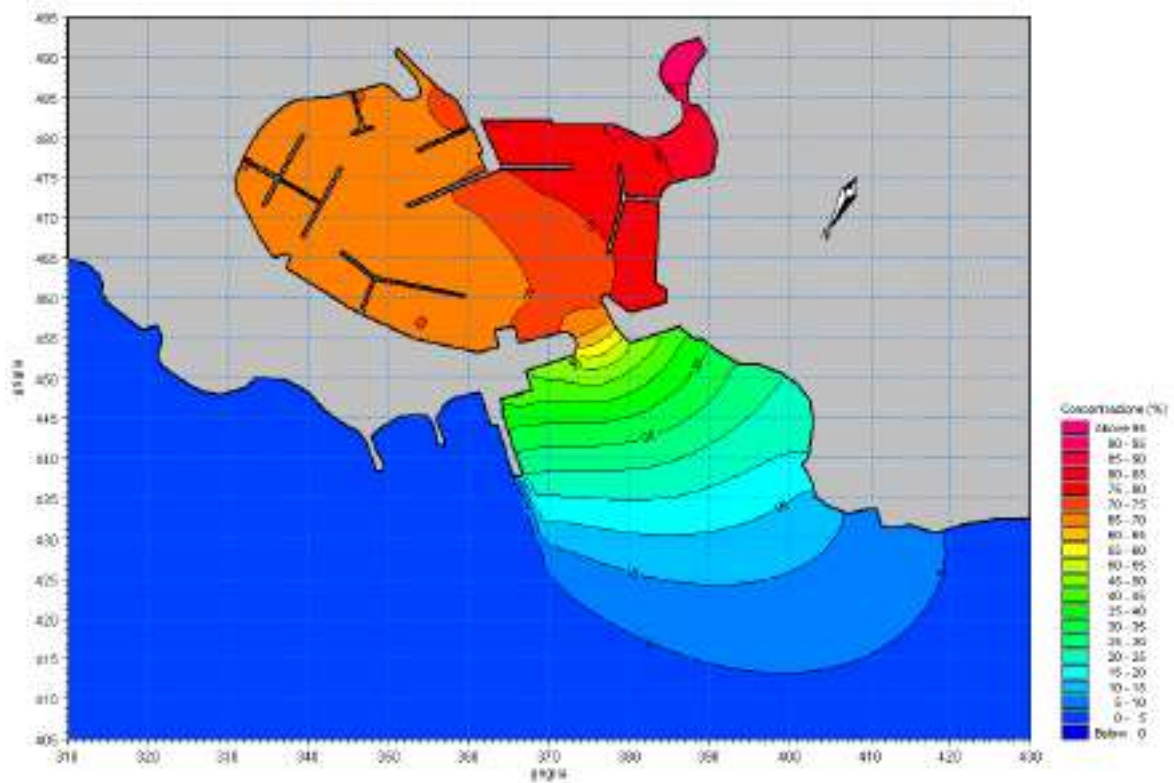


Figura 115 - Linee di isoconcentrazione generate dalle sorgenti nel caso di corrente media annua generata dall'onda R ( $H_s=1.18m$ ;  $T_p=4.8s$ ;  $dir = 65.4^\circ N$ ) nella configurazione 5

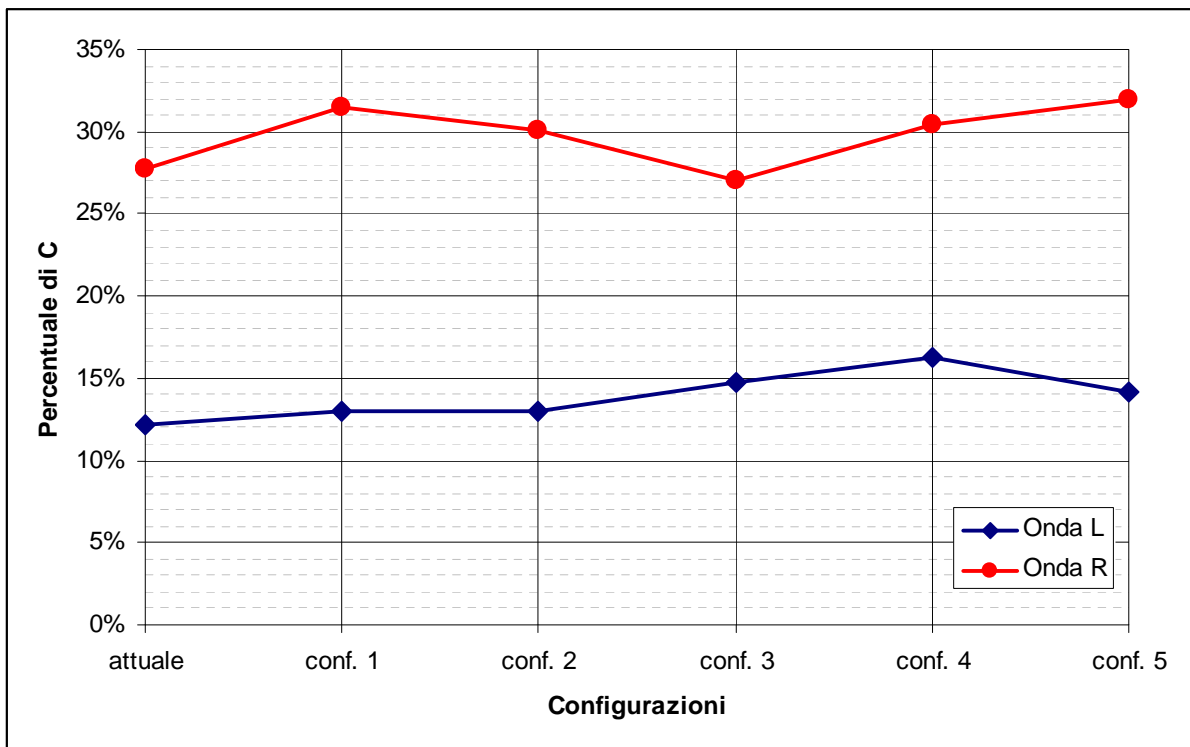


Figura 116 – Percentuali del coefficiente C calcolato tra il punto di prelievo all'interno del porto (380,463) e un punto di fronte alla spiaggia Rudalza (399,448)



## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente studio ha avuto come fine quello di valutare il tempo di ritorno delle opere a mare in progetto, gli eventi ondosi estremi e gli impatti sulle strutture sensibili, la circolazione idraulica, il trasporto solido e la qualità delle acque.

Le configurazioni di progetto esaminate sono 5 ed i risultati delle modellazioni sono stati messi a confronto con la situazione attuale, sia nelle aree limitrofe al porto che su un'area più vasta.

Si è partiti dallo studio meteo-marino considerando i modelli più avanzati di ricostruzione del moto ondoso. I risultati sono stati messi a confronto con i modelli classici (SMB) che i dati a disposizione ci hanno permesso di utilizzare.

E' stato calcolato il tempo di ritorno delle opere in progetto. Facendo riferimento ad esso si è fatta un'analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso e sono stati valutati gli impatti in corrispondenza dei punti più sensibili.

Successivamente sono state determinate le onde morfologicamente equivalenti, utilizzate per valutare il moto ondoso, la circolazione idraulica e la capacità di trasporto solido medio annuo del sito in studio.

Si è infine valutata la variazione della qualità delle acque in conseguenza alla realizzazione delle opere in progetto nella zona portuale e nelle spiagge limitrofe.

Il confronto dei risultati ottenuti tra le configurazioni di progetto con la situazione attuale ha mostrato quanto segue:

### dal punto di vista dell'agitazione ondosa:

- la configurazione 1 (pennello allungato di 80 m) è quella che garantisce una maggiore protezione della bocca del porto e della nuova darsena, la zona di calma si estende anche a parte della spiaggia Rudalza;
- la configurazione 2 (pennello allungato di 40 m) garantisce una buona riduzione dell'agitazione nei punti adibiti all'ormeggio e all'ingresso in porto e allo stesso tempo mantiene la spiaggia Rudalza nelle sue condizioni di esposizione al moto ondoso attuali;
- le configurazioni 3 e 4 mantengono per lo meno gli stessi livelli di agitazione della configurazione attuale, pertanto non sono adatte a garantire la sicurezza di ormeggi





esterni al porto;

- la configurazione 5 (barriera sommersa) presenta gli stessi livelli di agitazione della configurazione 1.

dal punto di vista della circolazione idraulica e di trasporto solido potenziale:

- ad Est del porto non si hanno modifiche né delle spiagge più lontane (spiaggia dei Sassi, spiaggia Hruska) né della spiaggia antistante Punta Lepre;
- le spiagge oltre il promontorio di Punta di Volpe, ad esempio spiaggia delle Alghe, non sono interessate dalle variazioni che le opere previste in progetto possono provocare sul trasporto dei sedimenti;
- ad Ovest del porto le spiagge Ira e Rudargia non subiscono modificazioni quantificabili;
- la spiaggia Rudalza, immediatamente ad Ovest dell'imboccatura portuale, subisce l'effetto del prolungamento del pennello e del dragaggio. La conseguenza principale è quella di una diminuzione dell'intensità delle correnti che ha come effetto la diminuzione della capacità di trasporto solido, con il conseguente possibile accumulo di sedimento lungo la spiaggia. Tale effetto è evidente per le configurazioni 1 (pennello allungato di 80 m) e 5 (barriera sommersa di 80 m), mentre è notevolmente ridotto e difficilmente quantificabile per la configurazione 2 (pennello allungato di 40 m) la quale presenta una situazione molto simile all'alternativa di non intervento.

dal punto di vista della qualità delle acque:

- le variazioni dovute alla realizzazione dei nuovi ormeggi con l'allungamento del pennello, i dragaggi, la sistemazione dell'ingresso del porto e il banchinamento Ovest non producono sostanziali variazioni della qualità delle acque nelle spiagge adiacenti, né in fase di cantiere né in fase di esercizio.

Riassumendo si può affermare che le configurazioni 1 (pennello allungato di 80 m) e 5 (barriera sommersa di 80 m) garantiscono un'ottima protezione dell'agitazione del moto ondoso ma provocano variazioni del regime del trasporto solido in prossimità della spiaggia Rudalza; la configurazione 2 (pennello allungato di 40 m) garantisce una buona attenuazione del moto ondoso in prossimità dei nuovi approdi e nell'imboccatura del porto e nello stesso tempo non modifica sostanzialmente il regime di trasporto solido; le configurazioni 3 (allargamento dell'imboccatura portuale) e 4 (allargamento dell'imboccatura portuale e banchinamento lato Ovest) non garantiscono alcun miglioramento dell'agitazione portuale, il



che rende fortemente sconsigliata la realizzazione di nuovi approdi nel lato Ovest all'esterno del porto, mentre la situazione dal punto di vista del trasporto rimane identica alla situazione attuale; la qualità delle acque si mantiene simile in tutte le configurazioni studiate.



**APPENDICE A:  
descrizione dei modelli numerici utilizzati.**



## A. DESCRIZIONE DEL MIKE 21 NSW, PMS, HD, ST E AD

Il codice di calcolo MIKE 21 è un programma modulare che contiene diversi codici per la simulazione dell'idrodinamica bidimensionale, dei fenomeni di moto ondoso, di trasporto solido, di trasporto e dispersione di inquinanti e di qualità dell'acqua. Viene adottata una schematizzazione bidimensionale piana per fluidi verticalmente omogenei.

Nel seguito vengono presentati i moduli:

- NSW - Near Shore Spectral Wind-Wave Module, utilizzato per lo studio della propagazione del moto ondoso dal largo verso riva;
- PMS - Parabolic Mild Slope Equation Module, utilizzato per l'analisi del comportamento del moto ondoso sottocosta in corrispondenza di strutture;
- HD - Hydrodynamic Module, utilizzato per la costruzione, nell'intorno dei siti di interesse, del campo di moto generato dagli sforzi tangenziali trasmessi dalle onde e della sua interazione con le strutture esistenti ed in progetto;
- ST - Sediment Transport, utilizzato per la valutazione dei campi di trasporto solido nell'intorno del sito di interesse.
- AD - Advection Dispersion Module, utilizzato per determinare i campi di concentrazione di sostanze inquinanti diffuse nell'ambiente e propagate dalle correnti marine.

Viene effettuata una sintetica descrizione tecnico-scientifica.





## A.1 MIKE 21 – NSW

Il codice consente di simulare il moto ondoso in zone costiere tenendo conto dei fenomeni di shoaling e di rifrazione, dell'attrito di fondo, del frangimento, dell'interazione tra moto ondoso e correnti, della generazione locale di onde dovuta al vento e della dispersione direzionale dello spettro energetico che caratterizza il moto ondoso.

Le equazioni che stanno alla base del MIKE 21 NSW sono derivate dall'equazione di conservazione dello spettro di energia del moto ondoso. Una parametrizzazione di tale equazione nel dominio della frequenza è stata eseguita introducendo i momenti di ordine zero e di ordine uno dello spettro energetico (variabile dipendente del problema). Questo porta alle seguenti equazioni accoppiate alla derivate parziali:

$$\frac{\partial(c_{gx}m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(c_{gy}m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(c_{\theta}m_0)}{\partial \theta} = T_0$$

$$\frac{\partial(c_{gx}m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_{gy}m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_{\theta}m_1)}{\partial \theta} = T_1$$

nelle quali:

- $m_0(x,y,\theta)$  - momento di ordine zero dello spettro di energia;
- $m_1(x,y,\theta)$  - momento di ordine uno dello spettro di energia;
- $c_{gx}$  e  $c_{gy}$  - componenti nella direzione x e y della velocità di gruppo  $c_g$ ;
- $c_{\theta}$  - velocità di propagazione rappresentante la variazione di energia nella direzione  $\theta$ ;
- x e y - coordinate cartesiane;
- $\theta$  - direzione di propagazione dell'onda;
- $T_0$  e  $T_1$  - termini di sorgente.

Il momento  $m_n(\theta)$  è definito come:

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

dove  $\omega$  è la frequenza assoluta e A è lo spettro energetico.

Le velocità di propagazione  $c_{gx}, c_{gy}$  e  $c_{\theta}$  sono ottenute utilizzando la teoria lineare del moto ondoso.



I due momenti  $m_0$  e  $m_1$  sono calcolati dalle condizioni al contorno  $H_s$  e  $T_m$  come:

$$m_0 = \frac{H_s^2}{16},$$

$$m_1 = \frac{m_0}{T_m}.$$

Le equazioni prendono in considerazione gli effetti della rifrazione e dello shoaling, i termini di sorgente gli effetti locali dovuti al vento ed alla dissipazione di energia per attrito sul fondo e frangimento. Sono inoltre inclusi gli effetti generati sui fenomeni principali dalle correnti.

La discretizzazione spaziale delle equazioni alle derivate parziali è eseguita utilizzando il metodo delle differenze finite. La griglia con cui viene discretizzato il campo di integrazione è costante sia nelle direzioni  $x$  e  $y$  che nella direzione di propagazione  $\theta$ . La griglia deve essere scelta in modo tale da garantire un'adeguata risoluzione nella rappresentazione della batimetria, del campo di venti e di correnti nel piano  $x, y$  e del campo d'onda nello spazio  $x, y, \theta$ .

Le caratteristiche della griglia devono inoltre essere selezionate in modo tale da garantire la stabilità dello schema numerico applicato in MIKE 21 NSW. Utilizzando uno schema alle differenze centrali nella direzione  $y$  ed uno schema alle differenze in avanti nella direzione  $\theta$ , il criterio di stabilità è dato da (Abbott, 1979):

$$\left| \frac{c_{gy} \Delta x}{c_{gx} \Delta y} \right| + \left| \frac{c_{\theta} \Delta x}{c_{gx} \Delta \theta} \right| \leq 1$$

dove  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta \theta$  rappresentano le dimensioni (costanti) della griglia lungo le tre direzioni  $x, y, \theta$ . In pratica tale criterio è però di difficile applicazione in quanto non sono note a priori le componenti della velocità di propagazione. Nel caso in cui non sono previste correnti, possono essere utilizzate le seguenti due approssimazioni (Holthuijsen et al., 1989):

$$\frac{\Delta x}{\Delta \theta} \leq \frac{1}{2} \frac{d}{|\nabla d|}$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} \geq 2 \tan(\theta)$$

dove  $d$  è la profondità e  $|\nabla d|$  la pendenza del fondo.



Tali condizioni di stabilità indicano che una griglia spaziale piccola ed un grande settore di direzioni di provenienza del moto ondoso (un grande numero di direzioni discrete) richiedono una discretizzazione spaziale piccola nella direzione  $x$ . Per garantire un settore di provenienza di circa  $120^\circ$  (condizione accettabile nella maggioranza delle applicazioni) il rapporto  $\Delta y/\Delta x$  deve essere maggiore di 4.

La perdita di energia per attrito sul fondo viene regolata con il parametro di scabrezza di Nikuradse  $K_N$  (nel presente studio si è posto  $K_N=0.002$  m). Per quanto concerne la perdita di energia dovuta al frangimento il MIKE 21 NSW utilizza la formulazione di Battjes e Janssen da cui risulta:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{-\alpha}{8\pi} \cdot Q_b \omega H_m^2$$

dove:

- E: energia totale del moto ondoso;
- $\omega$ : frequenza;
- $H_{rms}$ : altezza quadratica media che caratterizza il moto ondoso;
- $H_m$ : altezza massima possibile del moto ondoso;
- $Q_b$ : percentuale delle onde che frangono;
- $\alpha$ : costante.

$Q_b$  è definito da:

$$\frac{1 - Q_b}{\ln(Q_b)} = - \left( \frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2,$$

$H_m$  massima altezza d'onda che si può verificare è definita da:

$$H_m = \frac{\gamma_1}{k} \cdot \tanh\left(\frac{\gamma_2 \cdot k \cdot d}{\gamma_1}\right),$$

- $k$  è il numero d'onda;
- $d$  è la profondità;
- $\gamma_1$  è un parametro che regola il frangimento dovuto alla ripidità dell'onda;
- $\gamma_2$  è un parametro che regola il frangimento dovuto all'interazione con il fondo.

In pratica, considerando un treno d'onde caratterizzato da una certa altezza d'onda significativa  $H_s$ , ipotizzando valida la distribuzione di Rayleigh si ha:



$$H_{rms} = \frac{H_s}{\sqrt{2}} .$$

$Q_b$  è la percentuale di onde che, sempre secondo la distribuzione di Rayleigh, ha un'altezza superiore ad  $H_m$  e per le quali viene imposta un'altezza pari ad  $H_m$  avendo così una perdita di energia indicata dalla equazione precedente.





## A.2 MIKE 21 – PMS

Il modulo PMS è basato sull'approssimazione parabolica dell'equazione ellittica delle onde (Elliptic Mild Slope Equation) che consente di rappresentare i fenomeni di rifrazione, interazione con il fondo, diffrazione e riflessione per onde lineari che si propagano su un fondo con batimetria gradatamente variabile. L'approssimazione parabolica è ottenuta assumendo una direzione principale di propagazione dell'onda (direzione x) e trascurando i termini diffrattivo e di riflessione lungo tale direzione. Recenti miglioramenti alle equazioni di base consentono di rappresentare con l'approssimazione parabolica onde che si propagano con ampi angoli di incidenza rispetto alla direzione principale assunta per l'analisi. L'equazione parabolica è infine in grado di tenere conto, per mezzo della sovrapposizione lineare, della dispersione direzionale e di frequenza delle onde.

L'equazione parabolica risolta nel codice di calcolo è la seguente:

$$\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\sigma_1}{\omega c_g} \frac{\partial}{\partial y} \left( c c_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\sigma_2}{\omega c_g} \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} \left( c c_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \left[ i(k_0 - \beta_1 k) + \frac{1}{2c_g} \frac{\partial c_g}{\partial x} + \frac{W}{2c_g} \right] A = 0$$

nella quale:

$$\sigma_1 = i \left( \beta_2 - \beta_3 \frac{k_0}{k} \right) + \beta_3 \left( \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{2k c_g} \frac{\partial c_g}{\partial x} \right),$$

$$\sigma_2 = -\frac{\beta_3}{k}$$

ed i simboli rappresentano le seguenti grandezze:

A(x, y): ampiezza dell'onda;

c: velocità di fase;

c<sub>g</sub>: velocità di gruppo;

k: numero d'onda;

k<sub>n</sub>: numero d'onda medio lungo la direzione y;

β<sub>1</sub>, β<sub>2</sub>, β<sub>3</sub>: coefficienti dell'approssimazione parabolica;

ω: frequenza;

W: coefficiente complesso di dissipazione dell'energia per attrito sul fondo e frangimento;

i: unità immaginaria;

x, y: coordinate cartesiane.



Per la soluzione numerica dell'equazione sono implementate nel codice tre diverse tecniche di approssimazione basate sui differenti valori dei coefficienti di approssimazione  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ , rispondenti alle equazioni di Padé e di Kirby. La formulazione dell'attrito sul fondo è risolta con una legge quadratica, mentre il frangimento è basato sull'equazione di Battjes e Janssen.

L'equazione parabolica viene risolta con il metodo di Crank-Nicolson alle differenze finite, utilizzando griglie di calcolo rettangolari. Come per il modello NSW anche in PMS vengono calcolati gli sforzi di taglio trasmessi dal moto ondosso, che vengono utilizzati come condizione forzante del modello idrodinamico. Le componenti degli sforzi tangenziali (radiation-stress) sono calcolate con le seguenti formule ricavate sulla base della teoria lineare:

$$S_{xx} = \frac{1}{2} \rho g m_o (G + \cos^2 \theta (1 + G)), \text{ per la componente normale della spinta dell'onda;}$$

$$S_{yy} = \frac{1}{2} \rho g m_o (G + \sin^2 \theta (1 + G)), \text{ per la componente laterale della spinta dell'onda;}$$

$$S_{xy} = \frac{1}{2} \rho g m_o \left( \sin 2\theta \frac{1}{2} (1 + G) \right), \text{ per la componente di taglio della spinta dell'onda;}$$

nelle quali:

$$G = 2kh / \sinh(2kh);$$

$$m_o = \frac{1}{16} H_s^2, \text{ momento di ordine zero dello spettro di energia.}$$

I gradienti dei termini  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$  rientrano nelle equazioni di conservazione della quantità di moto del sistema di de St.Venant risolto dal modulo idrodinamico.



### A.3 MIKE 21 – HD

Il modulo idrodinamico HD del modello MIKE 21 risolve le equazioni complete del moto di de St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema di de St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} P_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} P_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

nelle quali:

- $h(x,y,t)$  = profondità dell'acqua;
- $\zeta(x,y,t)$  = quota del pelo libero;
- $p,q(x,y,t)$  = portate unitarie nelle direzioni x e y;
- $C(x,y)$  = coefficiente di scabrezza di Chezy;
- $g$  = accelerazione di gravità;
- $f(V)$  = fattore d'attrito del vento;



$V, V_x, V_y(x, y, t)$	=	velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;
$\Omega(x, y)$	=	parametro di Coriolis;
$p_a(x, y, t)$	=	pressione atmosferica;
$\rho_w$	=	densità dell'acqua;
$x, y$	=	coordinate spaziali;
$t$	=	tempo;
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	=	componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;
$S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}$	=	componenti del radiation stress.

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio  $\tau$  che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y. La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hE \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

tali due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale,  $\Delta$  è la dimensione spaziale della griglia e  $c_s$  è una costante compresa tra 0.25 e 1.





In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{2} hE \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

Il flusso attraverso la frontiera del modello e l'innalzamento del livello marino dovuti al moto ondoso vengono calcolati utilizzando le componenti di radiation stress ottenute a partire dai risultati del modello del moto ondoso.

La stima di tali grandezze viene effettuata risolvendo due equazioni di conservazione della quantità di moto, monodimensionali (in quanto sulla frontiera e quindi lungo una linea) e in condizioni stazionarie:

1. bilancio tra l'innalzamento del livello marino (wave setup) e le componenti del radiation stress:

$$\rho g h \frac{\partial \xi}{\partial x} = - \left( \frac{\partial \mathcal{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial y} \right),$$

assumendo  $V_x=0$ , cioè che il flusso è ortogonale alla frontiera e l'onda incide normalmente rispetto alla linea di riva;

2. bilancio tra le forze di attrito sul fondo e le componenti di radiation stress:

$$\frac{\rho g V_y^2}{M^2 h^{\frac{1}{3}}} = - \left( \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{yy}}{\partial y} \right),$$

assumendo  $\partial \xi / \partial y = 0$  e cioè che non ci siano variazioni della superficie del pelo libero nella direzione ortogonale a quella di propagazione del moto ondoso.

Nelle equazioni precedenti:



- s = innalzamento del pelo libero;
- h = profondità;
- M = coefficiente di scabrezza secondo Manning.

Anche se la simulazione idrodinamica è variabile nel tempo il campo di sforzi tangenziali prodotti dal moto ondoso è assunto come stazionario, così come le condizioni al contorno da esso generate.

La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ( $m^3/s/m$ ) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva ( $m^3/s$ ) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" si verifica che la situazione ottenuta sia di effettiva stazionarietà.

Le equazioni del modello sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).



#### A.4 MIKE21 – ST

Il modulo di trasporto solido MIKE 21 ST calcola per ogni sezione trasversale il trasporto solido di sedimenti non coesivi ed il valore istantaneo iniziale di modificazione del fondo per effetto dell'azione combinata di onde e correnti. Il modello è "a fondo fisso", nel senso che non viene presa in considerazione la modificazione della batimetria dovuta all'erosione ed al deposito calcolati punto per punto con il modello. I valori di trasformazione del fondo forniti dal modello vanno quindi considerati solo come "valori iniziali": essi risultano tuttavia fortemente indicativi del grado di capacità modellante delle condizioni locali del mare.

Il modulo MIKE 21 ST consente di simulare il trasporto solido in condizioni di corrente pura o per l'azione combinata di onde e correnti, tenendo conto in tal caso di qualunque angolo di incidenza delle onde rispetto alle correnti e di onde frangenti. Le caratteristiche sedimentologiche del materiale di fondo possono essere variabili da punto a punto o uniformi. Si può tenere conto di fondo piano o della presenza di ripples.

In presenza di onde e correnti il calcolo del trasporto solido eseguito con il modulo MIKE 21 ST è eseguito per mezzo del modulo di calcolo aggiuntivo STP, che implementa un algoritmo di calcolo deterministico basato sul modello di trasporto solido di *Engelund e Fredsøe [1976]*. Il modulo STP risolve il problema idrodinamico locale e calcola separatamente il contributo al trasporto dei sedimenti trascinati sul fondo e di quelli movimentati in sospensione.

Vengono trattati nel seguito separatamente gli aspetti di calcolo dell'idrodinamica, del trasporto al fondo e del trasporto in sospensione.

Idrodinamica. Il modulo STP determina il moto dovuto alle onde ed alle correnti con un unico algoritmo che richiede come dati in input la profondità dell'acqua, le caratteristiche dell'onda, la velocità della corrente e l'angolo tra la direzione di propagazione del moto ondoso e la velocità della corrente.

Se sono presenti come elementi forzanti le sole correnti, la descrizione idrodinamica è eseguita in modo molto semplice utilizzando la classica distribuzione logaritmica della velocità ed una distribuzione parabolica del parametro di viscosità "eddy viscosity"  $\varepsilon_c$ :



$$\varepsilon_c = \kappa U_f y \left(1 - \frac{y}{D}\right)$$

dove:

$U_f$ : è la velocità di attrito;

$\rho$ : è la densità dell'acqua;

$\kappa$ : è la costante universale di Von Karman;

$y$ : è l'altezza sul fondo;

$D$ : è la profondità dell'acqua.

Nel caso si presentino contemporaneamente moto ondoso e correnti, il modello prende in considerazione l'interazione non lineare tra la turbolenza generata dalla corrente e dal moto ondoso all'interno dello strato limite. Il moto orbitale vicino al fondo produce un considerevole aumento dei valori istantanei dello sforzo tangenziale ed un forte aumento della distribuzione del parametro di eddy viscosity all'interno dello strato limite.

Calcolato l'andamento dello strato limite nel tempo tramite la relazione [Fredsoe, 1984]:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{z(1+z-e^z)}{e^z(z-1)+1} \frac{1}{U_0} \frac{dU_0}{dt} + \frac{30\kappa}{k} \frac{\sqrt{\kappa^2 U_0^2 + z^2 U_{f0}^2 + 2\kappa z U_{f0} U_0 \cos \gamma}}{e^z(z-1)+1}$$

dove:

$z$ : è un parametro collegato allo spessore dello strato limite  $\delta$ ,  $\delta = \frac{k}{30}(e^z - 1)$

$t$ : è il tempo;

$U_0$ : è la velocità orbitale vicino al fondo;

$U_{f0}$ : è la velocità di attrito relativa al flusso medio all'interno dello strato limite;

$\gamma$ : è l'angolo tra la direzione della corrente e quella del moto ondoso;

$k$ : è la scabrezza sul fondo;

al di sopra dello strato limite l'eddy viscosity  $\varepsilon_{wc}$  può essere calcolato utilizzando un profilo logaritmico di velocità:





$$\varepsilon_{wc} = \kappa U_{fc} y \left(1 - \frac{y}{D}\right)$$

e all'interno dello strato limite con la relazione:

$$\varepsilon_{wc} = \kappa U_f y \left[1 - \frac{y}{\delta} \left(1 - \frac{U_{fc}}{U_f}\right)\right]$$

dove:

$U_{fc}$ : è lo sforzo di attrito relativo alla corrente  $U_{fc} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_f^2 \cos\phi dt}$  con  $T$  periodo

dell'onda e  $\cos\phi$  dato dalla relazione  $\cos\phi = \frac{U_0 \kappa \cos\gamma + U_{f0} z}{U_f z}$ .

Nel caso di onde frangenti, il moto dovuto all'onda genera turbolenza non solo all'interno dello strato limite. La turbolenza più intensa è prodotta nell'onda che si rompe vicino alla superficie. Si assume che la distribuzione totale di energia per ciascuna onda sia uguale alla perdita di energia di un salto idraulico di altezza pari a quella dell'onda; la distribuzione di questa energia è fornita da *Deigaard et al. [1986]*. Tale modello è combinato con quello di *Fredsøe [1984]* per determinare le caratteristiche idrodinamiche del movimento nella zona di frangimento. All'eddy viscosity  $\varepsilon_{wc}$  è quindi aggiunto il contributo  $\varepsilon_B$  secondo la relazione:

$$\varepsilon = \begin{cases} \sqrt{\varepsilon_{wc}^2 + \varepsilon_B^2} & \text{per } y > D/30 \\ \sqrt{\varepsilon_{wc}^2 + \varepsilon_B^2 \left(\frac{y}{D/30}\right)^{3.08}} & \text{per } y \leq D/30 \end{cases}$$

Il calcolo del parametro  $\varepsilon_B$  è eseguito mediante l'integrazione nel tempo e nello spazio dell'equazione di variazione dell'energia cinetica turbolenta:

$$\frac{\partial k'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\varepsilon_B}{\sigma_k} \frac{\partial k'}{\partial y} \right) + \frac{P}{\rho} - c_d \frac{k'^{3/2}}{\ell}$$



$$\ell = \begin{cases} c_d^{0.25} \kappa y \text{ per } y \leq \frac{0.07D}{c_d^{0.25}} \\ 0.07D \text{ per } y > \frac{0.07D}{c_d^{0.25}} \end{cases}$$

$$\varepsilon_B = \ell \sqrt{k'}$$

dove:

$k'$ : è l'energia cinetica turbolenta;

$\sigma_k$ : è una costante pari ad 1;

$c_d$ : è una costante pari a 0.08;

$P$ : è la produzione di energia cinetica turbolenta;

$\ell$ : è la lunghezza di mescolamento.

Trasporto di fondo. Il movimento dei grani che costituiscono il fondale dipende dal valore istantaneo dello sforzo di attrito sul fondo: il valore medio del trasporto di fondo in condizioni non stazionarie (in presenza di onde) viene quindi calcolato sulla base del valore istantaneo dello sforzo di attrito e poi mediato nel tempo.

Calcolata la velocità di attrito sul fondo  $U_f$  come [Fredsoe, 1984]:

$$\left[ \frac{U_f}{\kappa} \ln \left( \frac{\delta + k/30}{k/30} \right) \right]^2 = \left[ \frac{U_{f0}}{\kappa} \ln \left( \frac{\delta + k/30}{k/30} \right) + U_0 \cos \gamma \right]^2 + (U_0 \sin \gamma)^2$$

il valore istantaneo del trasporto sul fondo  $\Phi_b(t)$  è ottenuto risolvendo le relazioni proposte da Engelund e Fredsoe [1976]:

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

$$p(t) = \left[ 1 + \left( \frac{\pi\beta/6}{\theta(t) - \theta_c} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}}$$

$$\Phi_b(t) = 5p(t) \left( \sqrt{\theta(t)} - 0.7\sqrt{\theta_c} \right)$$

dove:

$\theta$ : è il parametro di Shields;

$s$ : è la densità relativa del sedimento;

$d$ : è il diametro medio del sedimento;



- $g$ : è l'accelerazione di gravità;
- $\theta_c$ : è il calore critico del parametro di Shields;
- $p$ : è la percentuale delle particelle costituenti il fondale che sono in movimento;
- $\beta$ : parametro dato dalla relazione  $\beta = \frac{30\kappa^2}{k} \frac{U_{lm}}{\omega}$  con  $U_{lm}$  massima velocità orbitale e  $\omega$  frequenza dell'onda.

Nota  $\Phi_b(t)$ , l'integrazione nel tempo del trasporto solido di fondo è eseguita come segue:

$$\Phi_{b1} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_b(t) \cos[\phi(t)] dt$$

$$\Phi_{b2} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_b(t) \text{sen}[\phi(t)] dt$$

$$q_{b1} = \Phi_{b1} \sqrt{(s-1)gd^3}$$

$$q_{b2} = \Phi_{b2} \sqrt{(s-1)gd^3}$$

dove:

- $\phi(t)$ : è la direzione del flusso istantaneo;
- $\Phi_{b1}$  e  $\Phi_{b2}$ : sono i valori adimensionali del trasporto di fondo rispettivamente nella direzione principale della corrente ed in quella trasversale;
- $q_{b1}$  e  $q_{b2}$ : sono il trasporto di fondo rispettivamente nella direzione parallela ed in quella trasversale alla corrente.

Trasporto in sospensione. La concentrazione dei sedimenti in sospensione  $c$  è determinata tramite l'integrazione dell'equazione verticale di diffusione [Fredsoe et al., 1985], che lega la variazione locale della concentrazione di sedimento in sospensione alla diffusione turbolenta ed alla deposizione sul fondo:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} \right) + w \frac{\partial c}{\partial y}$$

dove:

- $\varepsilon$ : è il coefficiente di diffusione turbolenta, pari al parametro eddy viscosity;
- $w$ : è la velocità di sedimentazione delle particelle sospese.



La condizione al contorno sul fondo è fornita dal valore istantaneo della concentrazione sul fondale  $c_b$  [Engelund e Fredsøe, 1976]:

$$c_b(t) = \frac{0.65}{\left(1 + \frac{1}{\lambda(t)}\right)^3}$$

dove  $\lambda(t)$  è dato da:

$$\lambda(t) = \left( \frac{\theta(t) - \theta_c - \frac{\pi}{6} \beta p(t)}{0.027 s \theta(t)} \right)^{0.5}$$

In superficie la condizione al contorno corrisponde con un flusso di sedimenti nullo attraverso la superficie del mare:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} + wc = 0$$

Il trasporto totale in sospensione è quindi calcolato mediante l'integrazione verticale del prodotto tra la velocità del flusso e la concentrazione dei sedimenti. Posta pari ad  $U_1$  la velocità nella direzione principale della corrente ed  $U_2$  la velocità nella direzione trasversale valgono le relazioni [Fredsøe, 1984]:

per  $y < \delta(t)$ :

$$U_1(t, y) = U_f \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{k/30}\right) \cos \phi$$

$$U_2(t, y) = U_f \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{k/30}\right) \sin \phi$$

per  $\delta(t) < y < \delta_m$  ( $\delta_m$  è il valor medio di  $\delta$ ):

$$U_1(t, y) = U_{f0} \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{k/30}\right) + U_{lm} \sin(\omega t) \cos \gamma$$

$$U_2(t, y) = U_{lm} \sin(\omega t) \sin \gamma$$





per  $\delta(t) < y$  e  $\delta_m < y$ :

$$U_1(t, y) = U_{fc} \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{k/30}\right) + U_{lm} \sin(\omega t) \cos \gamma$$

$$U_2(t, y) = U_{lm} \sin(\omega t) \sin \gamma$$

In condizioni non stazionarie (moto ondoso) deve essere eseguita l'integrazione nel tempo:

$$\overline{U}_1(y) = \frac{1}{T} \int_0^T U_1(t, y) dt$$

$$\overline{U}_2(y) = \frac{1}{T} \int_0^T U_2(t, y) dt$$

$$\overline{U}_1(y) \overline{c}(y) = \frac{1}{T} \int_0^T U_1(t, y) c(t, y) dt$$

$$\overline{U}_2(y) \overline{c}(y) = \frac{1}{T} \int_0^T U_2(t, y) c(t, y) dt$$

$$q_{s1} = \int_{2d}^D \overline{U}_1(y) \overline{c}(y) dy$$

$$q_{s2} = \int_{2d}^D \overline{U}_2(y) \overline{c}(y) dy$$

dove  $q_{s1}$  e  $q_{s2}$  sono le quantità di sedimenti trasportati in sospensione rispettivamente lungo la direzione della corrente e lungo la direzione trasversale.

I dati necessari per in modello STP possono essere suddivisi in due gruppi: parametri riguardanti l'idrodinamica locale e parametri riguardanti i sedimenti.

Le grandezze che descrivono l'idrodinamica sono:

parametri relativi al moto ondoso:

altezza d'onda (poiché il modello simula onde regolari, nel caso di onde irregolari è utilizzata l'altezza quadratica media);

periodo d'onda (nel caso di onde irregolari è considerato il periodo di zero-crossing);

onda frangente o non frangente;

profondità dell'acqua (viene considerato il valore medio in un periodo d'onda);



parametri relativi alle correnti:

velocità della corrente mediata sulla verticale;  
angolo tra la direzione della corrente e la direzione di propagazione del moto ondoso.

I sedimenti sono caratterizzati da:

diametro dei grani in mm (nel caso di sedimenti non uniformi deve essere inserito il diametro

medio  $d_{50}$ );

velocità di sedimentazione.

Sono infine richiesti alcuni parametri riguardanti le caratteristiche di scabrezza del fondale: la densità dei sedimenti relativa a quella dell'acqua, il valore critico adimensionale del parametro di Shields e la presenza o meno del fenomeno "wave ripples".

I risultati forniti in output sono:

caratteristiche delle wave ripples: altezza massima, scabrezza equivalente, eddy viscosity addizionale nella zona in prossimità del fondo, una misura del contributo addizionale alla concentrazione di sedimenti sul fondo;

caratteristiche del trasporto di sedimenti: profilo della concentrazione media e del trasporto in sospensione, i valori totali del materiale trasportato in sospensione nelle direzioni  $x$  e  $y$  e nella direzione di propagazione dell'onda, i valori complessivi del materiale trasportato (sospeso+fondo);

caratteristiche della velocità: profilo della velocità media e velocità in prossimità del fondo, profilo del valore medio del parametro eddy viscosity.

L'applicazione del modulo STP richiede elaborazioni piuttosto onerose, specialmente a causa della necessità di integrare le formulazioni all'interno del periodo dell'onda. Pertanto un'applicazione contestuale all'esecuzione dei calcoli di trasporto sarebbe scarsamente gestibile. Per ottimizzare le operazioni vengono quindi costruite a priori delle "tabelle di trasporto solido", applicando il modulo STP ad una serie di numerosi casi possibili ottenuti facendo variare le condizioni al contorno del fenomeno di trasporto (altezza d'acqua, altezza dell'onda, velocità della corrente, granulometria del materiale di fondo ecc.) nel range di variazione delle caratteristiche osservato in sito. Nel corso dell'applicazione di MIKE 21 ST



per ogni punto di calcolo, a seconda del valore locale delle grandezze di interesse, il dato di trasporto solido viene ottenuto interpolando i valori contenuti nelle tabelle costruite con il modulo STP.

Il tasso iniziale di variazione del fondo viene infine determinato risolvendo l'equazione di continuità del materiale solido al fondo sulla base del valor medio del trasporto locale calcolato sullo step temporale di integrazione:

$$\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{1-n} \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{1}{1-n} \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0,$$

nella quale i simboli hanno il seguente significato:

$z(x, y, t)$ : livello del fondo;

$q_x(x, y, t)$ : componente lungo  $x$  del trasporto solido medio nello step di calcolo;

$q_y(x, y, t)$ : componente lungo  $y$  del trasporto solido medio nello step di calcolo;

$n$ : porosità del materiale di fondo;

$t$ : tempo.

L'equazione è risolta su uno schema alle differenze finite applicato ad una griglia di calcolo rettangolare. La discretizzazione delle equazioni differenziali è effettuata con lo schema modificato di Lax-Wendroff con la condizione di stabilità di Courant-Friedrichs-Lewy, che assicura l'accuratezza al secondo ordine.



## A.5 MIKE21 – AD

Il modulo MIKE 21 AD risolve le equazioni di avvezione-dispersione di dissolvenza o di sostanze in sospensione nelle due dimensioni, in particolare risolve l'equazione di continuità della massa. Le componenti di portata e le concentrazioni di composti nei punti di immissione o di emissione sono impostati insieme al valore di decadimento.

$$\frac{\partial}{\partial t}(hc) + \frac{\partial}{\partial c}(uhC) + \frac{\partial}{\partial t}(vhC) = \frac{\partial}{\partial x}\left(h \cdot D_x \cdot \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h \cdot D_y \cdot \frac{\partial c}{\partial y}\right) - F \cdot h \cdot C + S$$

dove:

C = concentrazione del composto;

u,v = componenti della velocità orizzontale nelle direzioni x, y (in m/s),

h = profondità (in m);

$D_x, D_y$  = coefficienti di dispersione nelle direzioni x, y ( $m^2/s$ );

F = coefficiente di decadimento lineare;

$S = Q_s \times (C_s - C)$ ;

$Q_s$  = portata immessa/emunta ( $m^3/s/m^2$ );

$C_s$  = concentrazione del composto nel punto di immissione/emungimento di portata;

Le componenti della velocità vengono calcolate con l'ausilio di Mike 21 HD

Lo schema di calcolo implementato nel codice è uno schema del terzo ordine alle differenze finite di tipo QUICKEST che risulta essere molto efficace dal punto di vista computazionale: evita i problemi di instabilità associati alla differenza centrale dei termini avveviti.

Lo schema è di tipo Lax-Wendroff o Leith-like nel senso che elimina gli errori di troncamento dovuti alla differenza nel tempo sopra un certo ordine con l'uso stesso delle equazioni. Nel caso dello schema QUICKEST gli errori di troncamento vengono eliminati con ordini superiori al terzo e ciò grazie alle derivate nel tempo e nello spazio. Lo schema QUICKEST è stato originariamente sviluppato solamente per equazioni monodimensionali con qualche estensione per alcuni casi bidimensionali.

Stabilità dello schema di calcolo:



Per uno schema alle differenze finite è importante valutare la stabilità, in figura è riportato il risultato dell'applicazione dello codice per vari valori del numero di Courant e di coefficienti di diffusione adimensionali.

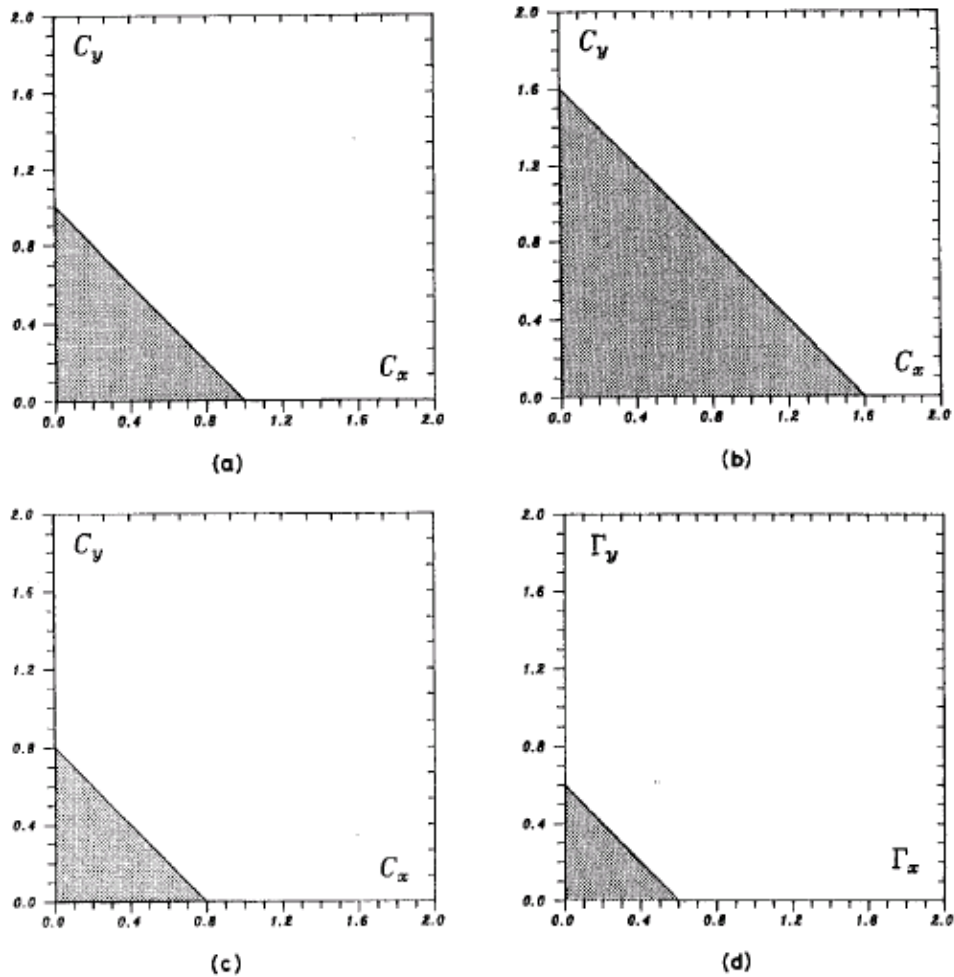


Figura 117: Diagrammi di stabilità. Con le campiture vengono indicate le regioni di stabilità dello schema (a)  $\Gamma_x = \Gamma_y = 0$ ; (b)  $\Gamma_x = \Gamma_y = 0.1$ ; (c)  $\Gamma_x = \Gamma_y = 0.3$ ; (d)  $C_x = C_y = 0.1$

Come si può notare dalla figura nel caso di assenza di diffusione (a) la stabilità è limitata dal criterio di non far superare l'unità al numero di Courant. con l'aumento del coefficiente di diffusione aumenta la regione di stabilità. Quest'ultima, comunque, diminuisce appena la diffusione diventa dominante.

Lo schema è stato testato con i convenzionali test utilizzati usualmente per verificare la praticabilità.





Coefficiente di dispersione:

Un importante fattore che bisogna tenere in conto quando si applicano questo tipo di modelli fisicamente basati è il coefficiente di dispersione che può influenzare in maniera significativa la veridicità dei risultati ottenuti. La dispersione è un termine usato di solito per indicare lo “sparpagliamento” delle particelle di fluido e dipende da processi aleatori come i moti turbolenti molecolari e da processi di scambio di quantità di moto. I processi diffusivi non possono essere risolti analiticamente essendo dei fenomeni indeterministici. Un tentativo di risoluzione venne fatto da Fick (1855) e da Taylor (1921) i quali impostarono dei parametri che potessero individuare i flussi di soluzione dovuti ai moti molecolari e turbolenti. I flussi dei soluti possono essere considerati proporzionali ai gradienti di concentrazione, tali coefficienti di proporzionalità vengono chiamati coefficiente di diffusione molecolare e coefficiente di diffusione turbolenta. Taylor estese questo concetto di proporzionalità anche ai fenomeni di scambio di flusso, l'effetto combinato di avvezione differenziale e di diffusione rappresentata è il cosiddetto coefficiente di dispersione. Il concetto della dispersione di massa di una sostanza in una soluzione o di una sospensione in un flusso può essere estesa ad altre proprietà del flusso. Considerando il principio di scambio di quantità di moto di Backmeteff si può dire che le pulsanti della velocità hanno l'effetto, nei fenomeni dispersivi, dello scambio di quantità di moto. I coefficienti che ne derivano sono chiamati coefficienti di viscosità.

In particolare i processi di dispersione, regolati dalle equazioni della quantità di moto, possono essere risolti sviluppando le stesse equazioni in tre modi diversi.

Scala 1:

Filtraggio dei moti casuali molecolari	→	Diffusione molecolare Viscosità
--	---	------------------------------------

Scala 2:

Filtraggio dei moti turbolenti al di sotto di una data scala	→	Diffusione turbolenta Eddy Viscosity
--	---	---

Scala 3:

Mediaggio della profondità per filtrare i profili verticali delle velocità (modelli 2-D)	→	Dispersione Sforzi tangenziali di fondo e di superficie Sforzi tangenziali orizzontali Shear viscosity
--	---	---



Il primo metodo corrisponde al filtraggio dei moti molecolari casuali basati sull'equazione di viscosità di Newton:

$$\tau_{zx} = \mu \frac{\partial u}{\partial z}$$

dove la viscosità  $\mu$  determina la misura della resistenza del flusso alle deformazioni imposte dagli sforzi tangenziali  $\tau$  i quali sono generati dallo scambio di quantità di moto dovuti alle fluttuazioni di velocità normali alla superficie corrispondente. Riferendosi alle equazioni di Navier-Stokes si considerano gli effetti casuali del fenomeno con i termini empirici:

$$\nu \left[ \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right]; \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

dove  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  è la viscosità cinematica

Il moto casuale molecolare induce, inoltre, il trasferimento della massa delle sostanze dissolte o in sospensione nel fluido in accordo con le legge di Fick:

$$T_i = D^m \frac{\partial c}{\partial x_i}$$

dove  $c$  rappresenta la concentrazione del componente disciolto o in sospensione e  $D^m$  è il coefficiente di diffusione molecolare. Applicando il principio di conservazione delle masse ad un volume di controllo si può considerare il termine diffusivo molecolare da imporre nell'equazione di Navier-Stokes

$$D^m \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right]$$

Essendo l'agitazione molecolare sempre presente anche per i fluidi in quiete, in condizioni di flusso, le particelle di fluido hanno dei moti molto più importanti percorrendo traiettorie molto irregolari e sinuose. Appare evidente, osservando il susseguirsi di velocità istantanee  $u'$ , che il flusso è caratterizzato da fluttuazioni non stazionarie della velocità  $u'$  che si sommano alla



velocità media uniforme  $u$ .

$$u'(x, t) = u(x, t) + u'(x, t)$$

con:

$$\overline{u'(x, y)} = \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t u'(x, t) dt = u(x, t)$$

$$\overline{u'(x, y)} = \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t u'(x, t) dt = 0$$

In queste condizioni è possibile scomporre le fluttuazioni in un periodo  $\Delta T$  integrando le equazioni di Navier-Stokes nel periodo  $\Delta T$ . Si ottiene il termine:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \overline{u'_i u'_j} \right]$$

e similamente per la conservazione della concentrazione risulta:

$$-\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \overline{u'_i c'} \right]$$

Nella teoria classica della turbolenza i termini  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ ,  $\overline{u'_i c'}$  chiamati sforzi di Reynolds sono empiricamente correlati tramite un coefficiente detto "eddy viscosity" :

$$-\rho \cdot \overline{u'_i u'_j} = \nu^T \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

che permette di scrivere il novo termine nella seguente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu^T \frac{\partial u_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu^T \frac{\partial u_i}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \nu^T \frac{\partial u_i}{\partial z} \right]$$



Dove appare evidente che il termine  $v^T$  risulta dipendente dalle caratteristiche del moto. Per la determinazione della “eddy viscosity” sono stati sviluppati diversi metodi che corrispondono a diversi tipi di turbolenza. La formulazione adottata dal *DHI* è la formulazione di Smagorinsky che considera un modello isotropico della turbolenza.

È ovvio che considerando la  $v^T$  costante si riduce la forma della equazione (1). Generalmente è possibile assumere il valore di  $v^T$  pari a:

$$v^T \approx \frac{1}{10} h \cdot u^*$$

dove  $h$  è la profondità e  $u^*$  è la velocità d'attrito.

Introducendo l'analogia di Reynolds per i flussi turbolenti che esprimono il principio che i processi di trasferimento di soluti o sospensioni sono equivalenti ai processi di trasferimento della quantità di moto e di conseguenza considerando  $D^T \approx v^T$  il nuovo termine dispersivo dell'equazione di conservazione diventa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ D^T \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D^T \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D^T \frac{\partial c}{\partial z} \right]$$

In tante applicazioni di ingegneria costiera la profondità è molto minore delle dimensioni orizzontali del dominio in studio e i modelli bidimensionali sono particolarmente adeguati per descrivere i principali moti idraulici. Tuttavia l'integrazione lungo la profondità implica il filtraggio della velocità da una componente responsabile di un'ulteriore dispersione nella direzione del flusso. Tali flussi con gradienti di velocità sono chiamati anche “shear flows” cioè caratterizzati dal fenomeno discusso da Taylor noto come “shear effect”. Per ovviare al problema della dispersione della velocità nei modelli bidimensionali è necessario pertanto considerare ulteriori parametri empirici.

Si consideri:

$$u = U + U'$$

$$\bar{U} = \frac{1}{h} \int_h^\xi U' dz = 0$$

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_\xi^h (U + U') dz = U$$

dove  $U$  rappresenta la velocità integrata lungo la verticale e  $U'$  la deviazione dal profilo della



velocità media  $U$  ad una generica profondità  $z$ . Introducendo queste relazioni nelle equazioni di Reynolds (ovvero le equazioni di Navier-Stokes depurate dei termini turbolenti in un passo di tempo  $\Delta T$ ), è possibile dimostrare che i termini convettivi sono dati da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v u dz = \frac{\partial}{\partial x} (h U U) + \frac{\partial}{\partial x} (h V U) - \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} (u')^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} (u' v') dz$$

Gli ultimi due termini rappresentano il trasferimento di quantità di moto globale dovuto allo "shear effect". Usualmente si accetta la relazione tra le variabili dipendenti (integrate lungo la verticale).

$$\frac{1}{h} \int_{-h}^{\zeta} (U')^2 dz = -v_x^2 \frac{\partial U}{\partial x} \quad \text{e} \quad \frac{1}{h} \int_{-h}^{\zeta} (U' V')^2 dz = -v_y^2 \frac{\partial U}{\partial y}$$

Queste ultime assunzioni e l'analogia di Reynolds permettono di scrivere i termini per la conservazione della quantità di moto nella seguente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ v_i^s h \frac{\partial U_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_i^s h \frac{\partial U_i}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ v_i^s h \frac{\partial U_i}{\partial z} \right]$$

e

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ D_i^s h \frac{\partial U_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_i^s h \frac{\partial U_i}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_i^s h \frac{\partial U_i}{\partial z} \right]$$

dove  $v_i^s \approx D_i^s$  ed indicano rispettivamente gli sforzi tangenziali e la dispersione integrati lungo la verticale.

Il coefficiente  $v_i^s$  verrà chiamato d'ora in poi "shear viscosity"

Nel caso di un canale a moto uniforme lo shear viscosity può essere ricondotto nella forma:

$$v_i^s = D_i^s = \frac{\alpha - (\alpha')^2}{2} C_z U h$$





con:

$$\alpha = \frac{\int_{-h}^{\zeta} u^3 dz}{U^3 h} \quad \text{e} \quad \alpha' = \frac{\int_{-h}^{\zeta} u^2 dz}{U^2 h}$$

nelle quali  $C_z$  è il numero di Chézy adimensionale e  $U$  è la velocità mediata sul tirante d'acqua.

Per esempio, considerando un canale profondo 10 m con una velocità media della corrente di 1 m/s ed un  $C_z$  pari a 18, il coefficiente di shear viscosity, che corrisponde ad una distribuzione esponenziale della velocità lungo la verticale data da  $K Z^{0.2}$ , vale  $v^s = 4$  m/s. È facile intuire, dai risultati ottenuti, come lo scambio di quantità di moto è strettamente legata alle dimensioni delle grandezze in gioco, gli effetti molecolari e turbolenti diventano trascurabili in rapporto allo shear effect (da  $10^{-6}$  a  $10^{-1}$  contro i 4 m/s).

A questo punto è importante mettere in evidenza che il concetto di viscosità e di diffusione hanno determinato la necessità di prendere in considerazione i moti non-risolti delle particelle di fluido, ad esempio la diffusione e la dispersione sono il risultato dei processi di avvezione associati alle scale non risolte. Questo concetto è quello che realmente ha importanza quando le procedure di filtraggio sono lontanamente estese alle scale maggiori, come una conseguenza della necessità della discretizzazione spaziale nelle direzioni orizzontali delle equazioni integrate nella profondità. Questo implica che saranno necessarie una dispersione ed una viscosità aggiuntiva per le equazioni di ordine superiore non-risolte del moto, considerate per le grandi scale la cui grandezza dipende dalla dimensione della maglia della griglia computazionale. Pertanto è facile aspettarsi che con l'incremento della dimensione della maglia  $\Delta x$ , aumentino anche i coefficienti di dispersione.

Una delle maggiori difficoltà nella stima dei coefficienti di dispersione è la caratterizzazione delle nuove scale non risolte del moto che possono essere fortemente dipendenti da fattori come le configurazioni locali della batimetria, i gradienti di densità e l'attrito del vento sulla superficie. Oltremodo possono essere usate alcune formule generali per una stima preliminare, l'accuratezza del risultato sarà comunque dipendente da una buona taratura del modello e da una buona dose di esperienza del modellatore.



In conclusione, il fatto che la risoluzione numerica delle equazioni primitive deve considerare una discretizzazione aggiuntiva nello spazio e nel tempo (in genere non disponibili risoluzioni analitiche) rende necessario estendere il filtraggio a più larghe scale del moto che dipendono dalla risoluzione del modello, ovvero dalla dimensione della griglia:  $\Delta x$ . Quindi deve essere aggiunta una quarta scala:

Scala 4:

Media sul modello  
Risoluzione  $\Delta x, \Delta t$



dispersione aggiuntiva  
viscosità addizionale

Il che implica una Dispersione Sub- griglia  $D^G$  ed una Viscosità Sub- Griglia  $\nu^G$ .

Cagliari, marzo 2010