

PROGETTO DEFINITIVO MARINA DI MARSALA FUTURO PIANO REGOLATORE PORTUALE



Tav.	Stato Progetto	DEFINITIVO	Rev.	Data	Sett. 2011	Scala
------	----------------	------------	------	------	------------	-------

MM
R.02

Descrizione

Idrodinamica e Trasporto Solido (Insabbiamento Imboccatura - Ripercussioni sulla Costa Adiacente)-Configurazione Progetto

Committente

M.Y.R. Marsala Yachting Resort S.r.l.
Via Favara 452/c bis- T. +39 0923 722319

myR
Marsala Yachting Resort

Capo Progetto e Marina Designer

Ing. Massimo Ombra

Ordine degli Ing. della Provincia di Trapani n°1046

Timbro e Firma



Progettisti

Coordinamento gruppo di progettazione:

Ing. Francesco Di Noto

Progettazione Architettonica:

Arch. Stefania Bacci

Progettazione Architettonica:

Itinerlab Srl - Architetti Nuzzo

Ingegneria marittima / civile e studi ambientali:

Ing. Antonio D'Arrigo

Collaborazioni

Opere marittime:

Ing. Agostino La Rosa

Analisi strutturali e geotecniche:

Ing. Nicola Rustica

Impianti idrici:

Ing. Giovanni Berbiglia

Impianti elettrici e di illuminazione:

Ing. Pietro Inferrera / Ing. Massimo Brancatelli

Aspetti ambientali:

Ing. Domenico Mangano

Studi geologici e geotecnici:

Dott. Piero Merk Ricordi

REGIONE SICILIANA



COMUNE DI MARSALA

Provincia di Trapani



**PROGETTO DEFINITIVO MARINA DI MARSALA
FUTURO PIANO REGOLATORE PORTUALE**

Committente: M.Y.R. Marsala Yachting Resort S.r.l

**IDRODINAMICA E TRASPORTO SOLIDO (INSABBIAMENTO
IMBOCCATURA PORTUALE – RIPERCUSSIONE SULLA COSTA
ADIACENTE) – CONFIGURAZIONE PROGETTO MARINA**

INDICE

1. GENERALITÀ	1
1.1. PREMESSA	1
1.2. ANALISI DEL TRASPORTO SOLIDO – MODELLO DI CIRCOLAZIONE	2
1.3. VELOCITA' LIMITE DI EROSIONE	4
1.4. EFFETTI DEL MOTO ONDOSO SUL FONDO	5
1.5. EFFETTI DEL MOTO ONDOSO NELLA MASSA LIQUIDA	9
1.6. MODELLO DI CIRCOLAZIONE	10
1.7. TRASPORTO SOLIDO PER EFFETTO DEL MOTO ONDOSO	10
1.8. TRASPORTO SOLIDO TRASVERSALE	11
1.9. TRASPORTO SOLIDO LONGITUDINALE	13
1.10. CLIMA ONDOSO NELLE APPLICAZIONI NUMERICHE DI DINAMICA COSTIERA	16
1.11. CALCOLO DELLA PROFONDITA' DI CHIUSURA	21
1.12. ELABORAZIONE DATI SEDIMENTOLOGICI	22
1.13. MODELLI NUMERICI UTILIZZATI PER LO STUDIO DEL TRASPORTO SOLIDO	23
2. STUDIO DEL TRASPORTO SOLIDO CON MODELLI NUMERICI.....	25
2.1. BREVE DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO	25
2.1.1. MIKE 21 HD FM - HYDRODYNAMIC MODULE	26
2.1.2. MIKE 21 ST - SEDIMENT TRANSPORT MODULE	27
2.2. OPERE MARITTIME PREVISTE NEL SEGUENTE PROGETTO	28
2.3. TRASPORTO SOLIDO NELLO STATO DI FATTO	31
2.3.1. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI DELLO STATO DI FATTO	31
2.4. TRASPORTO SOLIDO DI PROGETTO	65
2.4.1. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI DI PROGETTO	65
3. CONCLUSIONI.....	97

1. GENERALITÀ

1.1. PREMESSA

La presente relazione si riferisce allo studio idrodinamico e del trasporto solido nell'ambito del **“Progetto Definitivo Marina di Marsala futuro Piano Regolatore Portuale”**.

In particolare nella presente vengono trattati gli aspetti dello studio idraulico marittimo connessi con l'analisi del trasporto solido ai fini della caratterizzazione e valutazione delle opere di difesa dell'imboccatura previste in progetto e delle problematiche connesse col trasporto di sabbia all'interno del porto e quindi all'eventuale insabbiatura dello stesso.

Lo studio recepisce le prescrizioni dettate dall'Ufficio del Genio Civile di Trapani che nella Conferenza di servizi del 21.06.10 esprimeva il seguente parere:

“Occorre altresì relazionare in ordine:

- *al regime della dinamica litoranea locale (trasversale e longitudinale) in assenza e in presenza dell'opera progettata;*
- *sugli eventuali fenomeni di insabbiamento dell'imboccatura portuale e sui relativi provvedimenti di mitigazione.*

Appare inoltre opportuno che l'imboccatura portuale sia posta oltre la fascia attiva e la zona dei frangenti (per ridurre l'insabbiamento) e su fondali non inferiori a 7 ml”.

Nella Relazione Idraulico Marittima (cfr. AP R.01) è stato studiato il regime dei venti al fine di determinare le direzioni e le intensità dei venti prevalenti e dominanti. Dai valori massimi per i vari settori di provenienza sono stati determinati i valori delle velocità del vento per i vari settori in funzione del tempo di ritorno. Determinati i fetchs efficaci, per le varie direzioni di provenienza, con il metodo SMB si sono determinate le altezze d'onda al largo in funzione di vari tempi di ritorno. I dati ottenuti con questo metodo, sono stati confrontati con i dati ottenuti dalle elaborazioni dirette del moto ondoso desunte dai dati del Medatlas e dai dati Apat relativi alla boa di Mazara del Vallo definendo infine dei dati di onda di progetto.

Nella presente relazione vengono esaminati i concetti relativi allo studio della dinamica del litorale prima della realizzazione dell'opera, che dovrà essere realizzata dalla M.Y.R. s.r.l., e dopo la sua realizzazione.

Sulla base dello studio sedimentologico si esamina quindi la relazione tra il profilo trasversale della spiaggia e le relative granulometrie dei materiali del fondale marino interessato dalla costruzione dell'opera portuale.

Quindi si procede alla valutazione del trasporto solido costiero medio annuo in direzione cross-shore e long-shore mediante l'applicazione di idonei modelli matematici.

Sulla base di tutto ciò, nella presente relazione, si riportano le analisi per i seguenti punti:

- analisi, nelle condizioni attuali, dei processi di trasporto dei sedimenti lungo la costa, della configurazione di equilibrio della stessa e delle informazioni sulle condizioni d'onda che contribuiscono maggiormente a determinare il bilancio annuale di sedimenti;
- analisi del comportamento delle soluzioni progettuali proposte e analisi dei processi del moto ondoso, delle correnti e del trasporto dei sedimenti che hanno luogo nelle vicinanze delle strutture mediante l'applicazione di modello bidimensionale;

1.2. ANALISI DEL TRASPORTO SOLIDO – MODELLO DI CIRCOLAZIONE

I processi di dinamica del litorale sono determinati da un insieme di fenomeni che determinano il movimento dei sedimenti nella parte attiva della spiaggia, sia immersa che emersa. I movimenti sono ascrivibili all'azione del vento e delle maree sulla spiaggia emersa, mentre la dinamica della spiaggia sommersa è legata all'azione del moto ondoso, prima e dopo il frangimento e delle correnti generate dalla trasformazione del processo di moto da oscillatorio a traslatorio.

Tra le correnti generate dall'onda hanno un ruolo fondamentale, nell'area fuori dal limite del frangimento, le correnti di massa e nell'area compresa tra la *surfzone* e la battigia, quelle che traggono origine dal fenomeno di rottura delle onde. Il moto ondoso determina quindi l'inizio del movimento e la messa in sospensione delle particelle di sabbia, mentre le correnti costituiscono il veicolo di trasporto.

Il movimento del sedimento di spiaggia causato dal moto ondoso viene schematizzato, distinguendo in movimenti trasversali e movimenti longitudinali anche se in realtà questi movimenti si presentano simultaneamente.

La prevalenza di un moto rispetto l'altro è dovuto all'angolo formato dal fronte d'onda con la linea di battigia. I movimenti trasversali sono quelli che si determinano normalmente alla linea di riva mentre i movimenti longitudinali sono quelli che si determinano parallelamente alla linea di riva.

L'estensione di una zona di frangenti è generalmente ben definita in relazione all'altezza e al periodo delle onde incidenti. Infatti, le onde provenienti dal largo raggiungono i fondali più bassi in prossimità della costa diventano più lente a causa dell'attrito sul fondo e quindi più corte e più alte. Ciò fa aumentare la loro ripidità H/L , con H altezza d'onda e L lunghezza d'onda, cosicché esse frangono appena raggiunto il limite di stabilità. Si vede quindi che la larghezza della zona dei frangenti dipende dal clima delle onde presenti nel paraggio che generalmente muta con le stagioni per cui si distingue generalmente un clima invernale da un clima estivo.

Anche la pendenza del fondale in prossimità della riva è un fattore caratterizzante ed è determinato dalle dimensioni delle particelle di sabbia presenti.

Le onde raramente raggiungono la costa parallelamente alla linea di battigia in quanto subiscono il fenomeno della rifrazione appena cominciano a risentire degli effetti del fondo ($d < 0.50 L$). Le loro creste diventano più allineate con la riva e la direzione tende a disporsi normalmente alla linea di costa.

Esse sono comunque ancora inclinate quando frangono così che l'onda risultante ha una componente lungoriva (*longshore*). La componente dell'onda lungoriva induce una corrente nella stessa direzione (*longshore current*). La direzione e la velocità della corrente lungoriva possono rimanere costanti per giorni o settimane, nonostante l'energia immessa nella zona dei frangenti legata alla variabilità della ripidità e dell'angolo di incidenza vari continuamente.

Grandi volumi di sedimenti vengono messi in sospensione nella zona dei frangenti dalla turbolenza causata dal frangimento. Il flusso della corrente lungoriva, agendo sui sedimenti movimentati, li trasporta lungo la spiaggia provocando il trasporto litoraneo (*litoral drift*). In corrispondenza della spiaggia *offshore* l'azione delle onde determina il trascinarsi del sedimento verso riva e verso il largo. Il trascinarsi delle onde verso riva è dovuto ad onde di mare morto particolarmente lunghe. Nel caso di mareggiate il moto di trascinarsi al fondo è prossimo allo zero, ma un po' sopra del fondo si ha un moto di trascinarsi di verso contrario a quello di propagazione dell'onda. Quando vi sono violente mareggiate il trasporto di massa verso mare aiuta a spargere materiale lontano dalla costa ad una distanza tanto maggiore quanto minore è la dimensione dei sedimenti.

In generale le mareggiate producono un'azione erosiva che viene compensata in parte con la lunga persistenza delle onde di mare morto che spingono il sedimento verso riva. Le particelle sono inoltre soggette all'azione di gravità che le spinge verso largo per cui si determina un profilo di equilibrio e poiché la pendenza del fondale aumenta

generalmente avvicinandosi alla riva anche la dimensione del sedimento aumenta in questa zona. Il materiale più grossolano raggiunge la linea di frangimento, mentre le frazioni più fini sono spinte a largo.

1.3. VELOCITA' LIMITE DI EROSIONE

La tendenza dei materiali a farsi trasportare dipende solo dalle loro caratteristiche fisiche ed in particolare dalle dimensioni. Infatti, assumendo come dimensione caratteristica il diametro nominale d_n , essa è proporzionale alla velocità per terreni limosi, mentre è funzione del quadrato della velocità per ciottoli e ghiaia.

Per le sabbie, caratterizzate da avere un diametro nominale compreso tra 0.062 mm e 2 mm, può essere utilizzata una legge in cui l'esponente della velocità può variare tra 1 e 2.

La legge di resistenza allo spostamento, per oscillazioni ondose di periodo T variabile, può essere ottenuta esprimendo la velocità limite di erosione delle sabbie V_m , tramite l'espressione omogenea, ricavata a mezzo di esperienze su modello nei laboratori di Chatou:

$$V_m = W + 95 \cdot (v^{1/2} \cdot (\delta - 1)^{1/3}) / T^{1/2} \quad (\text{c.g.s.}) \quad (1)$$

dove

- W è la velocità di sedimentazione che può essere ricavata tramite l'espressione di Stokes

$$W_f = g \cdot (\delta - 1) \cdot d_{50}^2 / (18 \cdot \mu) \quad (2)$$

- ν è la viscosità cinematica del fluido
- $\delta = \gamma_s / \gamma_w$ il peso specifico apparente del materiale
- T è il periodo del moto ondoso
- d_{50} è il diametro delle particelle corrispondente al 50% del passante

Nella Tabella 1 che segue sono riportati alcuni valori ottenuti in funzione di un campo di diametri, quindi delle relative velocità di sedimentazione W_f , e di un campo di periodi d'onda compatibili con il caso in esame.

VALORI DELLA VELOCITA' LIMITE DI EROSIONE V_m (cm/s)												
IN FUNZIONE DI W_f (cm/s) E DI T (s)												
Visc.	=	1,10E-2	cm ² /sec									
Den.mat.	=	2,30	g/cm ³									
Den.wat.	=	1,03	g/cm ³									
g	=	981	cm/sec ²									
		³	³	T1	³	T2	³	T3	³	T4	³	T5

d (mm)	Wf (cm/s)	3	5	7	9	12
0,300	5,50	11,67	10,28	9,54	9,06	8,58
0,400	9,77	15,94	14,55	13,81	13,34	12,86
0,500	15,27	21,44	20,05	19,31	18,83	18,36
0,600	21,99	28,16	26,77	26,03	25,55	25,08
0,700	29,93	36,10	34,71	33,97	33,50	33,02
0,800	39,10	45,27	43,88	43,14	42,66	42,18
0,900	49,48	55,65	54,26	53,52	53,04	52,57
1,000	61,09	67,26	65,87	65,13	64,65	64,17

Tabella 1 – velocità limite di erosione

1.4. EFFETTI DEL MOTO ONDOSO SUL FONDO

Come già detto nel paragrafo sull'esposizione del Modello di Circolazione il vettore idraulico può essere originato sia da correnti dovute al moto ondoso, sia da correnti dovute alle maree o alle differenze di temperatura.

Il trasporto dovuto alle correnti, anche se la velocità di queste è notevole, si sviluppa fuori dalla zona dei frangenti. Nella zona dei frangenti la componente di trasporto dovuta alle correnti è trascurabile in quanto le altre componenti agiscono su sedimenti sollevati dall'energia delle onde frangenti quindi su notevoli quantità di materiale.

Si fa riferimento quindi, agli effetti sul fondo determinati dal moto ondoso ed alla profondità.

Il movimento delle particelle liquide sul fondo presenta due aspetti caratteristici:

- un movimento periodico
- un movimento di massa.

A partire da profondità limitate ($1/20 \leq h/L \leq 1/2$), la traiettoria delle particelle liquide è caratterizzata da ellissi sempre più schiacciate man mano che ci si approssima al fondo, sino a diventare segmenti di retta, la cui lunghezza varia con l'altezza d'onda e la profondità relativa (Figura 1).

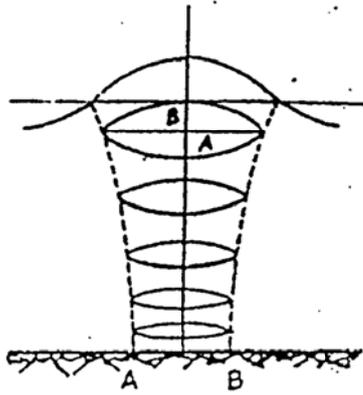


Figura 1 – Caratteristiche del moto ondoso verso il fondo

Facendo riferimento alla teoria trocoidale del 1° ordine, la velocità delle particelle su tali segmenti è data dall'espressione:

$$U_f = g \cdot K \cdot H \cdot \sin(Kx - \sigma t) / (2 \cdot \sigma \cdot \cosh(Kh)) \quad (3)$$

che può anche essere scritta:

$$U_f = \pi \cdot H \cdot \sin(Kx - \sigma t) / (T \cdot \sinh(Kh)) \quad (4)$$

con $K = 2\pi/L$ (numero d'onda) e $\sigma = 2\pi/T$ (frequenza angolare)

Al passaggio della cresta o del cavo sarà $\sin(Kx - \sigma t) = \pm 1$ e la velocità assumerà rispettivamente il valore massimo e minimo:

$$U_f = \pm \pi \cdot H / (T \cdot \sinh(Kh)) \quad (5)$$

dalla quale si può comprendere, tenendo presente la ben nota espressione di Airy per fondale limitato

$$L = g \cdot T^2 / 2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tgh}(2\pi h/L) \quad (6)$$

come conti molto la ripidità dell'onda. Infatti, a parità di H, un'onda lunga è capace di velocità al fondo maggiori di una breve.

Ciò risulta chiaramente con il diagramma di Figura 2 in cui sulle ascisse è riportata la profondità h e sulle ordinate il rapporto U_{\max}/H . Se si fissa un valore di U_{\max}/H si

individua una retta parallela all'asse delle ascisse che intercetta le curve a parametro T crescente a profondità sempre crescenti.

Si verifica quindi che una sabbia che ha velocità limite di erosione pari a 0.65 m/sec viene posta in movimento da una oscillazione ondosa di ampiezza H = 6.5 m ad una profondità di 25 m se il periodo è pari a 7.5 sec, mentre se il periodo è 10 sec la profondità diventa pari a 45 m. Quindi a parità di altezza d'onda, un'onda lunga è capace di muovere al fondo particelle a profondità maggiore di un'onda breve.

L'espressione (5), in ogni caso non dà luogo a trasporto di massa ma solo ad oscillazioni dette "ripple marks" visto che i valori estremi della Uf sono uguali ma di segno opposto.

Quando la profondità decresce ulteriormente ($h/L < 1/30$), entra in gioco il secondo aspetto caratteristico per interpretare i movimenti delle particelle fluide sul fondo, il "trasporto di massa", ed è necessario fare riferimento alla teoria trocoidale del secondo ordine. Secondo Stokes, si ha la relazione:

$$U_f = \pi H \sin(Kx - \sigma t) / (T \sinh(Kh)) + 3\pi^2 H^2 \sin(2(Kx - \sigma t)) / (4 T L \sinh^4(Kh)) \quad (7)$$

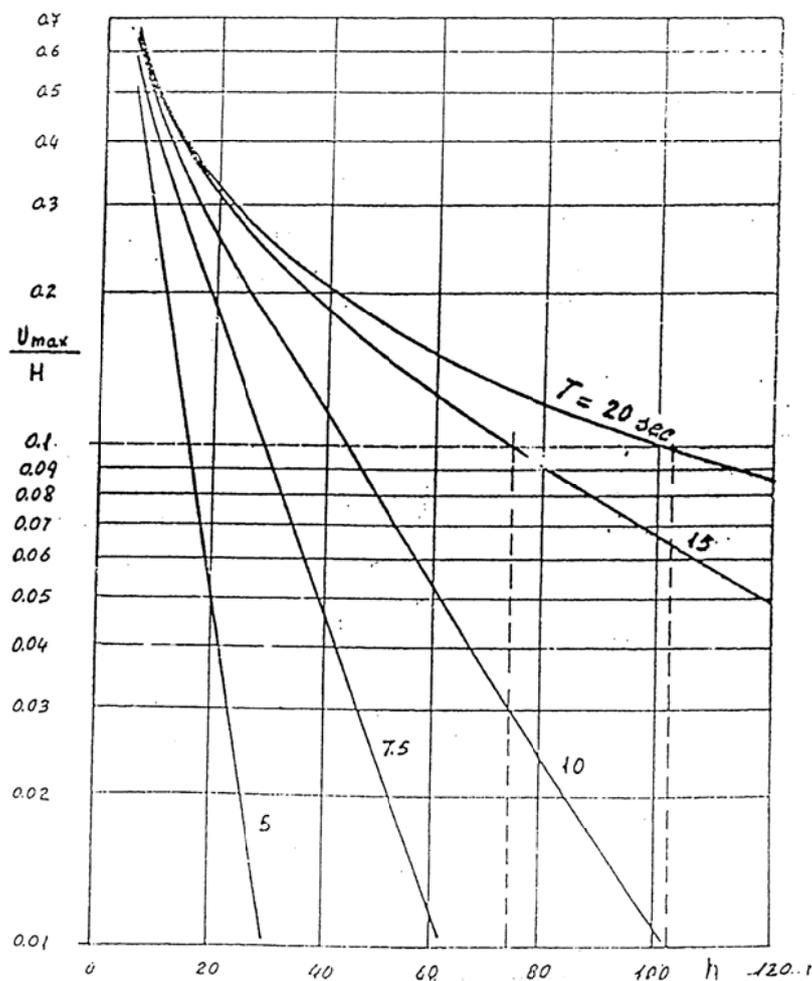


Figura 2 – Curva V_{max}/H,h

Questa espressione è stata riportata nei diagrammi di Figura 3 che mostrano l'andamento della velocità solo per il primo termine, solo per il secondo termine e quindi dalla somma dei due diagrammi. Tenendo conto che i valori positivi delle velocità corrispondono al passaggio della cresta dell'onda in superficie e si riferiscono ai valori

del tempo per i quali la velocità è verso riva, dal diagramma finale si nota che l'azione di trascinamento verso riva, lì dove la profondità decresce, predomina su quella verso il largo.

Se si staccano infatti due orizzontali in corrispondenza dei valori della velocità limite di erosione di un determinato materiale, si osserva che l'area positiva tratteggiata supera quella negativa. Pertanto, per la continuità si può affermare che sul fondo si manifesta un flusso di liquido verso la riva (verso il largo in superficie) che assume un vero e proprio carattere di trasporto di massa sul fondo.

Tutto ciò senza che sia ancora intervenuto il fenomeno del frangimento.

In condizione di frangimento le altezze d'onda cui si può fare riferimento sono quelle definite dalle seguenti espressioni

- $H = 0.78 h$ (Mc Cowan)
- $H = 0.714 h$ (Leiton)

In cui H è l'altezza d'onda e h l'altezza del fondo.

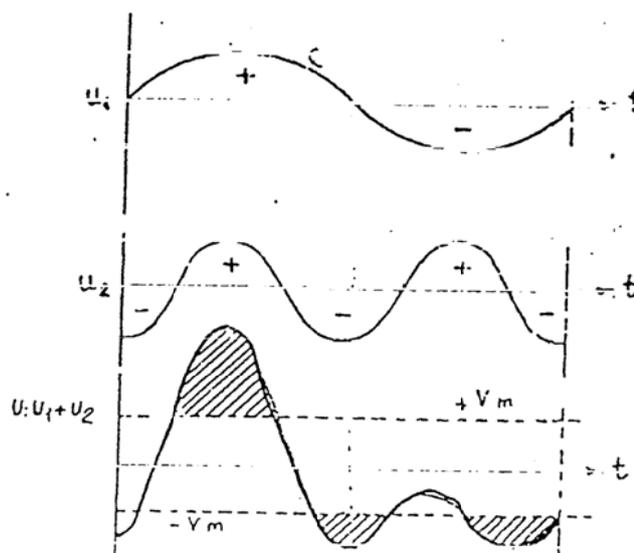


Figura 3 – Andamento della velocità per il primo e secondo termine

1.5. EFFETTI DEL MOTO ONDOSO NELLA MASSA LIQUIDA

Il frangimento di onde oblique rispetto alla riva provoca un trasporto di massa parallelo alla riva nello stesso senso della componente del flusso di energia longitudinale e la velocità massima di tale trasporto si ritrova intorno alla zona di frangimento o lievemente più a largo. Si è già detto in precedenza che la corrente che deriva da tale trasporto prende il nome di corrente *longshore* anche se non si tratta di una vera e propria corrente, ma di un trasporto lievemente pulsante lungo traiettorie a forma elicoidale.

La velocità media di questa pseudo-corrente varia da qualche centimetro al secondo a circa 1 m/sec con i valori massimi ubicati a riva della zona dei frangenti e può essere calcolata con l'espressione di Longuet - Higgins:

$$V_b = 20.7 * m * (g * H_b)^{0.5} * \sin(2 * \alpha_b) \quad (\text{piedi/sec}) \quad (8)$$

nella quale:

- m è la pendenza del fondo
- H_b è l'altezza d'onda al frangimento
- α_b è l'angolo di inclinazione del fronte d'onda

Il valore della velocità della corrente *longshore* è influenzato principalmente dall'angolo α_b che il fronte d'onda al frangimento forma con la linea di riva.

L'entità del flusso della corrente, così come l'entità del trasporto *longshore* dipendono poi in massima parte dall'altezza del frangente, così come la larghezza della zona dei frangenti è determinata dalla posizione del frangente e quindi la zona dei frangenti è più larga per onde in arrivo più alte. Cioè l'altezza dell'onda è determinante sia per la larghezza della zona dei frangenti che per l'entità del flusso della corrente lungoriva nella stessa zona.

La zona in cui la corrente lungoriva si sviluppa completamente è pari a circa dieci volte la larghezza della zona dei frangenti a partire da una certa sezione in cui si suppone nullo il valore della corrente longshore.

Il profilo di velocità della corrente lungoriva varia in una sezione trasversale nella zona dei frangenti, in modo che il rapporto tra la velocità nella posizione del frangente e quella media nella zona dei frangenti è di circa 0.4 nella sezione di partenza del flusso; diventa circa 0.80 – 1.00 nella sezione dove il flusso è pienamente sviluppato. Tali variazioni, sommate a quelle della idrografia della zona dei frangenti, rendono incerta la

stima della velocità della corrente lungoriva, per la quale si può utilizzare l'equazione di Longuet – Higgins riportata in precedenza.

1.6. MODELLO DI CIRCOLAZIONE

In definitiva per definire il trasporto solido e la conseguente dinamica dei litorali, occorre distinguere le correnti costiere come le correnti di marea, le correnti transitorie dovute al vento e le correnti associate alla distribuzione di massa che fluiscono parallelamente alla spiaggia dando luogo ad un trasporto relativamente uniforme nelle acque più profonde adiacenti alla zona dei frangenti, da un sistema prossimo alla riva, che può essere sovrimposto alla corrente costiera o esistere indipendentemente da essa che è associato all'azione dell'onda nella zona prossima al frangimento.

Quest'ultimo sistema, come già detto in precedenza, è composto da:

- **trasporto di massa** diretto verso la spiaggia dovute alle onde di mare morto che spingono il sedimento verso la zona costiera;
- movimento dell'acqua parallelamente alla riva sotto forma di **corrente lungoriva**. Grandi volumi di sedimenti vengono messi in sospensione nella zona dei frangenti dalla turbolenza causata dal frangimento. Il flusso della corrente lungoriva, agendo sui sedimenti movimentati, li trasporta lungo la spiaggia provocando il cosiddetto trasporto litoraneo (*litoral drift*).
- il **flusso di ritorno** verso largo che segue spesso sentieri preferenziali con la formazione di correnti note come le correnti a getto (*rip currents*) caratterizzate da forte intensità;
- un movimento lungoriva di **espansione della rip-currents** (*feeders*).

Per eseguire lo studio della dinamica del litorale, occorre riferirsi quindi ad un sistema di circolazione bidimensionale in cui si prende in considerazione prevalentemente la corrente lungoriva che costituisce il principale agente di modificazione di una spiaggia.

1.7. TRASPORTO SOLIDO PER EFFETTO DEL MOTO ONDOSO

Il trasporto solido per effetto del moto ondoso è quello che di norma c'interessa di più ai fini pratici data la sua aperiodicità e l'elevata velocità dei suoi effetti che tendono a rettilineizzare la costa. Infatti, per effetto del fenomeno della rifrazione ed in assenza di specifici fattori concomitanti, si presentano zone di concentrazione dell'energia in prossimità dei promontori, che tendono così ad essere erosi, e zone di espansione in prossimità delle baie che, invece, tendono ad essere riempite.

A seconda poi delle caratteristiche con le quali si presenta l'onda al frangimento, si hanno fenomeni di prevalente trasporto trasversale o longitudinale.

1.8. TRASPORTO SOLIDO TRASVERSALE

Il trasporto solido trasversale si esplica per effetto di azioni dinamiche ortogonali al litorale, infatti le onde, sia che risalgano la riva sia che ne ridiscendano, portano in sospensione della sabbia. Durante le mareggiate le onde frangenti, per effetto delle "undertow *current*" che si formano al fondo, trascinano la sabbia verso gli alti fondali disperdendola; le piccole onde di bel tempo, invece, per mezzo delle correnti orbitali, trascinano prevalentemente la sabbia verso la battigia generando un ripascimento compensatore.

Per quanto detto, quindi, le particelle solide che costituiscono il fondo, in presenza di moto ondoso, sono soggette a movimenti ogniqualvolta la velocità dei filetti fluidi ad esse più prossimi raggiunge un valore uguale o maggiore della velocità limite di erosione V_m prima definita.

L'azione di trascinamento si esplica con modalità diverse, a seconda delle caratteristiche cinematiche del moto ondoso e, poiché, tali caratteristiche variano, a parità di altezza d'onda al largo, con la profondità i movimenti delle particelle solide si presentano di tipo diverso man mano che ci si approssima alla riva.

Dove la profondità relativa è ancora elevata tali movimenti sono di tipo alternativo, producono solo caratteristiche ondulazioni (*ripple-marks*) e non danno luogo a trasporto solido di massa. Per ulteriori diminuzioni della profondità relativa, crescendo la velocità dei filetti fluidi, scompaiono le ondulazioni e sul fondo si determina un vero e proprio trasporto solido di massa, per sospensione o per piccoli salti a seconda che ci si trovi in presenza di materiali più fini (limi e sabbie sottili) o più grossolani (sabbie grosse e ghiaie).

In presenza di materiali di diversa granulometria, si evidenzia quindi una selezione naturale. Man mano che ci si approssima alla riva si incontrano in successione, limo, sabbia fine, sabbia grossa mista a ghiaia, ciottoli, ecc., accompagnate da variazioni di pendenza del profilo trasversale.

In ogni istante si può definire un profilo trasversale dei fondali detto ***Profilo di Equilibrio*** al quale la superficie del fondo tende ad identificarsi se il moto ondoso incidente conservasse indefinitamente le stesse caratteristiche e la medesima incidenza. Tale profilo costituisce il risultato di due azioni concomitanti sul materiale di fondo che ha appena superato il limite di erosione: la prima di trascinamento legata all'effetto del

moto ondoso sul fondo e la seconda dovuta alla componente del peso che tende a spostare il materiale verso gli alti fondali. Prescindendo dagli effetti localizzati del frangimento i profili trasversali presentano, tra linea di riva e il largo una forma leggermente concava verso l'alto la cui pendenza disunisce verso le grandi profondità.

Atteso quanto prima detto circa l'influenza delle caratteristiche del moto ondoso, si può affermare che la pendenza dei fondali, è tanto più dolce quanto più l'onda è ripida (onda proveniente da piccola distanza) ed il materiale fine.

Viceversa il profilo è tanto più acclive quanto meno l'onda è meno ripida (onda proveniente da grande distanza) ed il materiale grossolano.

A causa del frangimento, i profili di equilibrio sono interrotti, nella zona di rottura dell'onda, da una o più **barre di frangimento** cui seguono più a riva altrettante depressioni del profilo dette anche fosse di levigazione.

Essendo in condizioni di paraggio con escursione di marea trascurabile, per individuare i possibili andamenti del profilo, si può adoperare l'espressione di Larras:

$$y/L_o = K*(x/L_o)^m \quad (9)$$

nella quale:

- $K = H_o/L_o + 0.039*d^{0.5}/(\delta-1)^{1/3}$
- $m = 11.5 * (H_o/L_o) + 0.0275/((\delta-1)^{1/3} - 0.05)$
- H_o è l'altezza d'onda
- δ è il peso specifico del granulo rapportato a 1000
- d_m il diametro medio del granulo in mm

La ubicazione delle fosse e delle barre dipende dal livello di riposo dell'acqua e dalle caratteristiche dell'onda che frange sul litorale in questione. Queste anomalie del profilo di equilibrio conservano una posizione abbastanza stabile nei paraggi soggetti a maree trascurabili, viceversa si spostano e si manifestano in maggior numero lungo litorali soggetti a notevole escursione di marea. Di particolare interesse appare l'individuazione della distanza l tra la fossa di levigazione più lontana dalla battigia ed il limite superiore della spiaggia emersa. La distanza l può essere ricavata mediante la formula di Sitarz

$$l = k*H_b^{3/2} / (\delta-1)^{1/2} * d_m^{1/2} \quad (10)$$

in cui

k è una costante che può assumere valori compresi tra 65-70 per situazioni reali

- H_b altezza d'onda al frangimento
- δ è il peso specifico del materiale rapportato a 1000
- d_m diametro medio in mm.

Circa la valutazione qualitativa dell'altezza della barra e della profondità della fossa di levigazione rispetto al profilo di equilibrio ci si riferisce agli studi di Keulegan (1945) e Sitarz (1963). Detto h_0 il tirante d'acqua del profilo di equilibrio indisturbato in corrispondenza del frangimento, le altezze d'acqua sulla cresta h_1 e sul fondo della fossa di levigazione h_2 possono valutarsi con le espressioni seguenti:

$$h_1 = 0.58-0.60 h_0 \quad (11)$$

e

$$h_2 = 0.98-1.10 h_0 \quad (12)$$

Il Dean (1981) ha suggerito una relazione per i profili di equilibrio di una spiaggia ricavata da misurazione dirette sul campo. Tale relazione è espressa dall'equazione

$$h(y) = A * y^{2/3} \quad (13)$$

dove $h(y)$ è la profondità legata alla distanza verso il largo y da una parametro di scala A il cui valore è legato alle dimensioni del sedimento alla profondità $h(y)$.

1.9. TRASPORTO SOLIDO LONGITUDINALE

Questo tipo di trasporto si genera per effetto delle correnti generate da onde oblique rispetto alla linea di riva. Il fronte dell'onda incidente nell'approssimarsi alla costa, pur modificando la propria direzione secondo le leggi della rifrazione, investe la riva con direzione diversa dalla normale, causa un modellamento del fondo ed un conseguente trasporto solido in senso longitudinale.

Il trasporto litoraneo longitudinale può essere schematizzato come somma di due fenomeni contemporanei ma distinti:

- 1) l'andata in sospensione del materiale, per effetto delle elevate velocità sul fondo;
- 2) trasporto per effetto della presenza di pseudo-correnti come il "*jet de rive*" ed il "*long-shore current*" originate dal frangimento.

La corrente dovuta al *jet de rive*, localizzata tra la battigia e la linea dei frangenti, è animata da due movimenti successivi, un flusso obliquo rispetto alla riva ed un riflusso di ritorno secondo la linea di massima pendenza, che danno luogo ad un andamento delle traiettorie a denti di sega tipo "*beach drifting*".

La *long-shore current*, dovuta alla componente dell'apporto di massa all'incirca parallela alla costa, si verifica intorno alla zona di frangimento e determina una circolazione rotatoria tra la riva ed il largo.

Questa corrente ha origine dall'esistenza di una componente nella direzione della riva dell'apporto di massa dovuto al moto ondoso; essa lambendo la costa per lunghi tratti, in definitiva, determina una circolazione in senso rotatorio tra la riva e il largo, circolazione dovuta al fatto che, in presenza di onde oblique l'apporto di massa non è compensato da una corrente di ritorno così come avviene per l'onda frontale.

All'azione di queste due correnti si deve aggiungere l'effetto delle correnti di espansione laterale dovuta alla rifrazione e alla diffrazione del moto ondoso.

Nell'ipotesi di riva stabile, rettilinea, indefinita e senza ostacoli i parametriche entrano in gioco sono, da un lato, quelli relativi all'onda incidente (altezza, lunghezza, ripidità angolo d'incidenza) e, dall'altro, quelli che caratterizzano i materiali (granulometria, peso specifico, forma). Particolare attenzione merita l'influenza dell'angolo di incidenza α_0 (Blosset) e la ripidità α_0 (Sauville) dell'onda al largo.

I risultati ottenuti mostrano che il trasporto litoraneo longitudinale, nullo nel caso di incidenza $\alpha_0 = 0$, raggiunge la massima intensità per valori di $\alpha_0 = 65^\circ$. Per valori di α_0 maggiori di 65° il regime di trasporto diventa instabile.

Il termine *longshore drift* indica il trasporto del sedimento nella zona litoranea sotto l'azione delle onde e delle correnti. La velocità alla quale la corrente *longshore* si muove parallelamente alla riva è la velocità di trasporto lungoriva ed è stata definita dall'espressione di Longuet – Higgins. Per questo trasporto lungoriva due sono i possibili versi del moto: da destra o da sinistra per cui la portata solida dovuta alla corrente lungoriva nel complesso sarà la somma dei due valori di portata da destra verso sinistra e da sinistra verso destra. Il contributo netto sarà quindi dato da

$$Q_n = Q_{ri} - Q_{le} \quad (14)$$

Per conoscere i valori di Q_n si possono utilizzare i seguenti metodi:

- il trasporto lungoriva in un tratto di costa eroso e in cui le condizioni naturali sono state modificate viene assunto pari a quello misurabile dal bilancio dei sedimenti in un tratto vicino in cui non vi sono state variazioni delle condizioni naturali;
- il trasporto viene desunto da misurazioni eseguite sulle variazioni storiche riportate in cartografia;
- se i metodi indicati in precedenza non sono praticabili si possono ricavare indicazioni sul trasporto partendo dalla valutazione delle caratteristiche dell'onda e

dalla componente lungoriva del flusso di energia P che viene rapportata alla quantità trasportata Q tramite relazioni di carattere sperimentale;

- un quarto metodo è quello che permette di stimare la quantità di trasporto lungoriva desumendola dall'altezza media annuale del frangente vicino alla riva.

Se si dispone della sezioni della costa in due differenti tempi il calcolo dei volumi può essere sviluppato con il metodo delle sezioni ragguagliate. Normalmente però si dispone al massimo della variazione nel tempo della linea di costa per cui il calcolo dei volumi si può desumere moltiplicando l'area della superficie tra le due linee di costa per 6-8 mc/mq, dove il valore 6 si assume per intensità del moto ondoso normale e 8 per intensità del moto ondoso severa. Il flusso di energia dell'onda può essere espresso con la formula S.P.M.

$$Pl = \rho * g * H^2 * C_g * \text{sen}(2 * \alpha) / 16 \quad (15)$$

Nella zona dei frangenti l'espressione precedente si può scrivere nel modo seguente:

$$Pls = \rho * g * H_b^2 * C_g * \text{sen}(2 * \alpha b) / 16 \quad (16)$$

in cui C_g è la celerità del gruppo di onde.

La velocità del gruppo di onde C_g si può porre pari con la velocità di fase al frangimento dell'onda lineare o dell'onda solitaria

$$C = gT / (2 * \pi) * \tanh(2 * \pi * d / L) \quad (17)$$

o

$$C = [g * (H + d)]^{0.5} \quad (18)$$

Per entrambe le equazioni si assume $d = 1.28 H_b$.

Ponendo $C_g = C$ si ha

$$Pls = \rho * g * H_b^2 * C_g * \text{sen}(2 * \alpha b) / 16 \quad (19)$$

dove I valori di H_b e αb sono i valori al frangimento e C è la celerità. L'equazione suddetta è valida solo se vi è un treno d'onde caratterizzato da un periodo e un'altezza costanti. Nel caso di onde reali la varietà delle altezze d'onda è descritta da distribuzioni statistiche tra le quali quella che ben rappresenta tale variazione è la distribuzione di Rayleigh. Per questa distribuzione la corretta altezza d'onda da usare nelle equazioni precedentemente descritte è il valore quadratico medio delle onde presenti H_{rms} . Il valore di Pls è approssimativamente il doppio del valore esatto del flusso di energia per le altezze d'onda sinusoidali descritte dalla distribuzione di Rayleigh.

La correlazione fra le quantità Q di sedimento trasportato lungoriva e il flusso Pls è stata ricavata empiricamente da misurazioni in campo da diversi Autori. L'espressione che lega Q e Pls è la seguente

$$Q = (K*Pls)/[(\rho_s-\rho)*g*a'] \quad (20)$$

dove K è un coefficiente dimensionale, $(\rho_s-\rho)$ è il peso del trasporto immerso e a' la porosità della sabbia. Il valore di $K = 0.39$ e il valore di $a' = 0.60$.

Una formula ancora più semplice è la seguente:

$$Q \text{ (mc/yr)} = 1290*Pls \quad (21)$$

in cui Pls deve essere espresso in $J/(m*sec)$. Anche l'espressione di Galvin è un'espressione estremamente semplice da utilizzare per cui

$$Q = 1.646*10^6*H_b^2 \quad (22)$$

in cui H_b è espresso in m e Q in mc/yr.

1.10. CLIMA ONDOSO NELLE APPLICAZIONI NUMERICHE DI DINAMICA COSTIERA

L'applicazione dei metodi di calcolo o dei modelli matematico-numeriche sui problemi di dinamica e morfodinamica costiera richiede la preliminare conoscenza delle caratteristiche ondose, quali azioni forzanti di analisi, da inserire come dati di ingresso. Precisamente il dato iniziale può consistere o in un'unica azione ondosa, oppure in una sequenza di più azioni ondose diverse (di numero più o meno ridotto) di cui vengono sovrapposti i relativi effetti.

L'analisi dinamica della stabilità di coste e spiagge può essere di due tipi: di breve o di lungo termine. Nel breve termine si tratta di studiare i mutamenti subiti dai profili della spiaggia nel corso ad esempio di un'unica mareggiata, quindi al trascorrere di poche ore o al massimo di qualche giorno. Un tale singolo evento produce trasformazioni sulle spiagge generalmente di carattere momentaneo, anche se esse possono essere cospicue e recuperabili a volte molto lentamente (o al limite non proprio completamente fino alla situazione preesistente).

Al contrario nel lungo termine si tratta di esaminare quello che avviene sul litorale al trascorrere di interi cicli stagionali o meglio annuali.

Durante questi ultimi lunghi intervalli di tempo le spiagge sono sottoposte all'azione di parecchie condizioni diverse del mare. Le trasformazioni subite in tal caso dalle spiagge hanno carattere abbastanza duraturo, ed esse rientrano nella generale tendenza evolutiva del litorale stesso.

Ai due tipi di analisi delle spiagge descritti sopra, risultano associate, ai fini delle applicazioni matematico-numeriche, caratteristiche ondose forzanti ovviamente di diverso tipo.

Nell'analisi delle spiagge nel breve termine si fa riferimento, come già detto, alla durata di un'unica mareggiata. Essa può essere rappresentata da uno specifico evento realmente avvenuto oppure, in mancanza del dettaglio di specifici eventi o nel caso di un esame più generale degli effetti delle mareggiate, si può far riferimento ad eventi ondosi fittizi con caratteristiche estratte dalla tipologia ondosa della mareggiata o del settore direzionale considerato.

Quindi la condizione ondosa da utilizzare come dato forzante d'ingresso nel metodo di calcolo utilizzato per l'analisi, va ottenuto o direttamente dagli elementi ondosi che si sono manifestati nel corso dello specifico evento indagato oppure dagli elementi ondosi in possesso riguardo al settore direzionale preso in esame. I dati di ingresso così ottenuti saranno costituiti proprio dalla sequenza temporale dei valori ondosi rilevati nel corso della specifica mareggiata reale, oppure dai valori relativi ad una condizione ondosa fittizia, scelta a rappresentare le caratteristiche ondose della specifica mareggiata o in generale del settore direzionale esaminato. Le caratteristiche ondose introdotte in tal caso nell'analisi avranno intensità proporzionale a quella del fenomeno ondoso da riprodurre (in genere alte), direzione e durata (dell'ordine di ore o al massimo giorni) compatibili con quelle dell'evento stesso.

Quando ci si riferisce invece ad un'analisi di lungo termine, le condizioni ondose che si succedono nel corso di un simile intervallo di tempo sono numerose e soprattutto diverse in intensità, direzione, durata e frequenza. Il loro complesso insieme va a costituire il cosiddetto regime (o clima) ondoso del paraggio marino esaminato: in esso ad ogni tipo di onda, individuata entro predeterminate classi di intensità e direzione di provenienza, risulta associato il valore della rispettiva frequenza (assoluta o relativa). Ne consegue che le onde che costituiscono il regime sono abbastanza numerose e di caratteristiche differenti. La possibilità di riprodurre, nelle applicazioni dei metodi o dei modelli di studio di dinamica costiera, la completa sequenza di tutte le ondate che si sono effettivamente succedute nel regime medio, singolarmente e separatamente in successione l'una dopo l'altra, diventa troppo onerosa ed improponibile. In alternativa, per semplificare le simulazioni di calcolo, si cerca di utilizzare un'unica condizione ondosa fittizia (o al più la sovrapposizione in sequenza di una serie, molto ridotta, di singole onde) quale dato forzante di ingresso. Tale onda fittizia, considerata agente sul litorale in maniera continuativa per una durata di tempo paragonabile al lungo periodo

dell'analisi (dell'ordine dei giorni, dei mesi o degli anni), deve essere in grado di riprodurre, nella simulazione di calcolo, effetti analoghi a quelli realmente prodotti sulla spiaggia, durante il lungo periodo di tempo dell'analisi nel prototipo, da tutte le azioni ondose (del regime medio relativo a quel paraggio) realmente succedutesi in tale intervallo temporale. Come detto tale onda fittizia (unica o in alternativa la successione di una serie ridotta di onde), dovendo rappresentare un clima ondosso medio su un lungo periodo di tempo, viene riprodotto nelle simulazioni agente continuamente e costantemente su durate di tempo anch'esse lunghe. Per cui essa è in genere contraddistinta da valori relativamente bassi di intensità (altezza e periodo) e da una direzione di provenienza simile a quella della traversia principale o prevalente del paraggio costiero indagato.

Nel gergo tecnico le onde fittizie in genere prendono il nome di “onde equivalenti”, in particolare quelle relative alle analisi di lungo termine dei processi costieri si dicono anche “onde modellatrici” o “onde morfologiche”.

Nel caso di utilizzare come onda equivalente una sequenza di più onde (al posto di un'unica singola) nasce anche il problema di stabilire l'ordine migliore per la riproduzione della loro successione.

Gli effetti costieri riprodotti, infatti, possono differire anche in base alla differente sequenza con cui si fanno agire le singole onde. Le combinazioni possibili delle successioni delle singole onde possono anche diventare molto numerose ed il loro numero si amplifica notevolmente aumentando quello delle onde da riprodurre. Quindi, oltre alle altre grandezze caratteristiche delle singole onde (altezza, periodo, direzione di provenienza e durata), anche l'ordine delle onde multiple da simulare costituisce un ulteriore parametro da dover scegliere per la migliore riproduzione degli effetti reali.

Inoltre per stabilire nella maniera più corretta quale onda fittizia risulti adeguata, come dato di ingresso, all'applicazione del metodo di calcolo o del modello di analisi utilizzato, risulta essenziale che l'applicatore curi una preventiva procedura di taratura del metodo (o modello) di simulazione in questione. Essa va condotta nel tentativo di riprodurre effetti confrontabili con quelli realmente verificatisi nel tratto di spiaggia preso in esame, utilizzando onde fittizie di tentativo.

L'azione ondosa fittizia che risulta fornire il miglior adattamento (degli effetti simulati con quelli reali) rappresenta quella più idonea da utilizzare con tale procedimento di calcolo (o modello) e sul tratto di costa in esame. Ovviamente tale procedura di taratura andrà ripetuta ogniqualvolta si applica un nuovo metodo o si cambia il litorale di

indagine. Questo criterio di scelta dell'onda fittizia equivalente vale sia per le analisi delle spiagge di lungo termine sia nel caso delle analisi di breve termine.

Tale fase di taratura viene preceduta dalla preliminare fase di calcolo delle onde fittizie di primo tentativo (da sottoporre alla definitiva taratura del modello utilizzato). Queste vengono ricavate a partire dalla tipologia della mareggiata indagata nel caso dell'analisi di breve termine oppure dai regimi ondosi medi nel caso dell'analisi di lungo termine. In quest'ultimo caso per impostare il calcolo dell'equivalenza ci si può riferire a diversi aspetti si può ricorrere ad esempio ai metodi sintetizzati di seguito:

1) *intensità ondosa equivalente al largo* (l'onda equivalente di primo tentativo viene individuata, sia come altezza sia come direzione, tramite la media pesata delle stesse grandezze, relative alle singole onde componenti il regime medio, in base alla loro frequenza);

2) *energia ondosa di riva equivalente* (l'onda modellatrice è determinata in modo che la sua energia a riva, in particolare al frangimento, sia pari a quella delle singole onde del regime medio);

3) *trasporto solido equivalente* (l'onda morfologica viene determinata in modo che il suo trasporto solido lungo costa sia pari a quello prodotto da tutte le singole onde del regime medio).

Una volta che sono state individuate (dopo il calcolo dell'onda fittizia di primo tentativo e dopo aver effettuato i tentativi delle operazioni di taratura del procedimento di analisi costiera) le caratteristiche dell'onda equivalente più adatta da utilizzare nel metodo (o modello) di calcolo di dinamica costiera, rimane il problema di dover scegliere le opportune grandezze ondose (per esempio spettrali, medie, significative, di picco, di onda sinusoidale, regolare, ecc.) che lo rappresentano.

Esse devono essere adeguate a quelle richieste dal procedimento analitico-numerico in questione. Comunque può essere sempre effettuata una conversione dall'uno all'altro tipo di grandezza. Una grossa distinzione può essere fatta anzitutto tra l'utilizzo delle caratteristiche delle onde sinusoidali o regolari e di quelle statistiche spettrali delle onde irregolari casuali.

Comunque ogni modello (o metodo di calcolo) richiede l'utilizzo di un tipo diverso di grandezza ondosa. Per cui sembra utile raccogliere, nel breve schema riassuntivo della tabella seguente, alcune delle grandezze ondose (altezza, periodo e direzione) richieste da alcuni dei più comuni modelli (o metodi) di calcolo su argomenti di dinamica costiera.

Segue infine un breve schema delle formule da utilizzare, in mancanza di informazioni specifiche, per la conversione di un tipo di altezza ondosa o periodo ad uno diverso, relativamente alla stessa condizione ondosa. Quanto riportato è fatto nell'ipotesi di validità della distribuzione di Rayleigh per le altezze e secondo le indicazioni delle "Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe frangiflutti", elaborate da una commissione ministeriale di tecnici nel 1994, per i periodi:

$$H_s = H_{1/3} = 1.41 * H_{rms} = (1/0,63) H_m = (1/1,27) H_{1/10} = (1/1,67) H_{1/100} = (1/1,80) H_{1/250}$$

$$T_s = T_p(1,13, 1,07) = T_{01}/(0,88, 0,90) = T_m/(0,88, 0,90) = T_{02}/(0,84, 0,86) = T_z/(0,84, 0,86)$$

ove sono stati adottati ovviamente i simboli di uso comune ed universalmente standardizzati a livello scientifico per rappresentare le diverse grandezze ondose di altezza e periodo più note.

<i>metodo di calcolo o modello matematico</i>	<i>Altezza ondosa richiesta</i>	<i>Periodo ondoso richiesto</i>	<i>direzioneondosa richiesta</i>
piani di rifrazione	di onda regolare	di onda regolare	di onda regolare
metodo flusso energia (formule CERC)	di onda sinusoidale	di onda sinusoidale	di onda sinusoidale
formula profilo trasv. Dean	dipendente solo	dalla granulometria	del sedimento D ₅₀
evoluz. ripasc. Dean	di onda sinusoidale	di onda sinusoidale	di onda sinusoidale
profondità limite di Hallermeier	(H _s) _{12 ore/anno}	T _s	–
formula trasporto Kamphuis	H _s	T _p	media o picco
modello Battjes e Janssen	H _{rms}	T ₀₁	–
modello sul profilo trasv. Nishimura e Sunamura	di onda sinusoidale	di onda sinusoidale	–
evoluz. profilo trasv. Van der Meer	H _s	T _z = T ₀₂	–
modello ARIES	H _s (regime medio)	T _p	picco (con s=75)
modello spettrale A.F.S. (con forma spettrale Carter)	H _s	T _z = T ₀₂	media d'assieme
modello presente Convenzione	richiede l'andamento	del sollevamento della	superficie nel tempo

Figura 4 – Caratteristiche ondose richieste da alcuni modelli di dinamica costiera

Nella tabella seguente, viene riportato in funzione delle varie classi di altezze d'onda e dei vari settori di provenienza il numero di apparizioni, mentre nella ultima colonna viene riportato il numero totale di apparizioni per il settore preso in esame.

L'energia specifica per le varie classi di altezza d'onda viene calcolata mediante la formula:

$$E=k*H_s^{2.5} \quad (23)$$

Il valore ottenuto viene moltiplicato per il numero di apparizioni che quella determinata altezza d'onda ha avuto nel settore considerato.

Tale operazione viene ripetuta per tutte le classi d'onda ricadenti nel settore esaminato. Le energie così calcolate vengono sommate e la somma divisa per il numero totale di onde registrate nel settore, ottenendo così un'energia media pesata sulla frequenza per il settore. Applicando nuovamente la formula dell'energia sopra riportata è possibile calcolare, partendo dall'energia media pesata, il valore dell'altezza d'onda significativa. L'onda così calcolata risulta dal punto di vista energetico equivalente alle varie onde provenienti dal settore in esame, e rappresenta la forzante da inserire come dato di input per il settore esaminato per il calcolo del trasporto solido.

Settore	Dir. Media	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA										Hs (m)	Ts (s)	f (Hz)	Hrms (m)	Tp (s)
		0,5 E (J/mq)	2,5 E (J/mq)	5,5 E (J/mq)	8 E (J/mq)	Em (J/mq)	Hs (m)	Ts (s)	coef. trasp.Hs	coef. trasp.Ts						
11	157,5	1306135,38	25273515,99	635024,40	0,00	3495,78	1,495	4,99	0,90	0,93	1,35	4,65	7,33	0,95	5,12	
12	172,5	1006614,90	11132983,79	907177,71	0,00	2441,39	1,295	4,64	0,95	0,95	1,21	4,42	5,03	0,85	4,86	
13	187,5	773554,05	8656179,23	816459,94	0,00	2489,36	1,305	4,65	0,97	0,98	1,27	4,56	3,87	0,90	5,02	
14	202,5	643799,51	7822153,20	816459,94	0,00	2670,43	1,343	4,72	1,00	1,00	1,34	4,72	3,27	0,95	5,19	
15	217,5	572140,65	6874396,35	725742,17	0,00	2650,76	1,339	4,72	1,01	1,00	1,35	4,73	2,90	0,95	5,21	
16	232,5	521052,62	6495293,61	1270048,79	0,00	2924,95	1,392	4,81	1,02	1,02	1,43	4,89	2,67	1,01	5,38	
17	247,5	564680,89	7645238,59	1360766,56	0,00	3069,50	1,419	4,86	1,00	1,00	1,42	4,87	2,94	1,01	5,36	
18	262,5	887710,91	17931559,59	2086508,73	0,00	3893,79	1,561	5,10	0,99	0,99	1,54	5,06	5,05	1,09	5,57	
19	277,5	2008934,78	77627604,35	14061254,50	0,00	6170,42	1,877	5,61	0,97	0,98	1,83	5,51	14,29	1,29	6,06	
20	292,5	2422838,19	90896200,25	15059149,98	0,00	5995,36	1,855	5,57	0,96	0,97	1,78	5,41	17,02	1,26	5,96	
21	307,5	1521338,03	34763721,24	3719428,61	0,00	4201,27	1,609	5,18	0,98	0,99	1,58	5,12	8,96	1,12	5,63	
22	322,5	797967,79	10437962,10	997895,48	0,00	2801,43	1,368	4,77	1,08	1,05	1,48	5,02	4,11	1,04	5,52	
23	337,5	363945,65	4410228,54	362871,08	0,00	2616,94	1,332	4,70	1,31	1,20	1,74	5,62	1,85	1,23	6,18	

Tabella 2 – Clima medio annuo

1.11. CALCOLO DELLA PROFONDITA' DI CHIUSURA

La profondità di chiusura è la massima profondità del fondale in cui un'onda fa sentire i suoi effetti al fine del trasporto solido.

Per determinare la profondità di chiusura in mancanza di rilievi batimetrici nel tempo si fa riferimento alla relazione

$$H_c = 1.60 * H_{0,12} \quad (24)$$

In cui H_c è la profondità di chiusura espressa in m, $H_{0,12}$ è l'altezza d'onda a largo che compare per 12 ore l'anno nel settore di traversia considerato.

Il valore di $H_{0,12}$ si ricava dall'analisi statistica effettuata sui dati d'onda disponibili.

Se si conoscono il numero di apparizioni totali d'onda relative al periodo di osservazione e se si conoscono il numero di apparizioni di un'onda di una certa altezza

H in una certa direzione α si può determinare la frequenza dell'onda di altezza H nella direzione α con la relazione

$$f_{H,\alpha} = n_{H,\alpha}/n_{tot} * 100 \quad (25)$$

Il tempo di apparizione dell'onda è dato da

$$t_{H,\alpha} = f_{H,\alpha} * T \quad (26)$$

in cui T è il tempo totale dell'osservazione in ore che, se lo studio è riferito all'anno medio, vale $T = 8760$ ore.

Il tempo di apparizione totale della singola onda per tutto il settore di traversia è dato da

$$t_H = \sum_{\alpha=\alpha_1\alpha_2} t_{H,\alpha} \quad (27)$$

dove α_1 e α_2 sono le direzioni estreme del settore di traversia in esame.

Noto t_H è possibile tracciare la curva t_H funzione di H che è rappresentata nella Figura 5. Il valore $H_{0,12}$ è immediatamente determinato intersecando la curva di apparizione con la retta parallela all'asse delle ascisse e passante per il punto di ordinata $t = 12$ ore.

Si determina il valore dell'altezza dell'onda che compare per 12 ore l'anno che è pari a $H_{0,12} = 5,60$ m per cui la profondità di chiusura è pari a

$$H_c = 1.60 * 5.60 = 8.96 \text{ m}$$

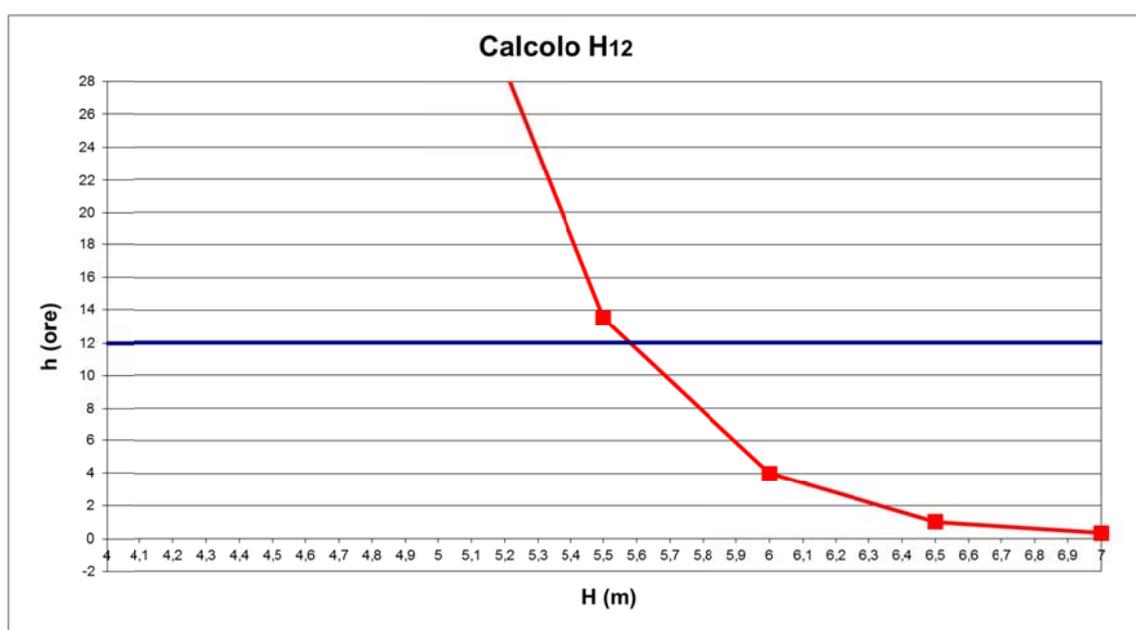


Figura 5 – Curva t_H, H per la determinazione della profondità di chiusura

1.12. ELABORAZIONE DATI SEDIMENTOLOGICI

La caratterizzazione sedimentologica è stata condotta sulla scorta dei dati rilevati da un'indagine espressamente condotta per la redazione del presente progetto, nel corso

della quale sono stati prelevati e destinati alla caratterizzazione granulometrica diversi campioni subacquei e di riva.

Le analisi granulometriche hanno permesso di determinare le percentuali di sedimento per ogni fascia di diametro, distinguendo i ciottoli, le ghiaie, le sabbie e i peliti.

Sono stati determinati quindi i valori dei diametri in Φ corrispondenti a valori percentili standard.

Da questi valori sono stati desunti i parametri caratteristici del sedimento quali la media, la mediana, la classazione, l'asimmetria e l'appuntimento.

I risultati ottenuti hanno consentito di definire con sufficiente affidabilità il carattere sedimentologico del sito e di metterlo in relazione con la geomorfologia riscontrata, delineando così le caratteristiche del sistema in studio ed ipotizzare la sua probabile evoluzione.

Si può ben affermare che trattasi di terreni con matrice prevalentemente limo – sabbiosa con una modesta percentuale argillosa.

Inoltre l'elaborazione dei dati sedimentologici ha portato a concludere che il sedimento sommerso è caratterizzato da valori del D_{50} di 0.125 mm e che il valore della deviazione standard geometrica da introdurre nei modelli per la valutazione del trasporto solido è dato da:

$$\sigma_g = \sqrt{(D_{84}/D_{16})} = 1,10.$$

I valori suddetti sono assunti come parametri del modello ST del Mike 21 per la zona in esame ai fini della valutazione del trasporto solido.

1.13. MODELLI NUMERICI UTILIZZATI PER LO STUDIO DEL TRASPORTO SOLIDO

Per le analisi che seguono e che sono riportate nella presente relazione si è utilizzato il codice di calcolo MIKE 21 che 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 infatti il numero “21” che contraddistingue il codice, indica la bidimensionalità nel piano (“2”) e la monodimensionalità lungo la verticale (“1”).

Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto e in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero, può essere anche applicato per la simulazione

di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi.

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

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

2. STUDIO DEL TRASPORTO SOLIDO CON MODELLI NUMERICI

2.1. BREVE DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO

Il dominio di calcolo è definito dalla conoscenza delle coordinate dei punti (x,y,z) che definiscono il fondale del sito in oggetto. La griglia di calcolo è stata scelta in modo da includere l'area da modellare, definendo i contorni del dominio e attribuendo un codice per il riconoscimento delle condizioni al contorno.

La discretizzazione spaziale delle equazioni è avvenuta secondo un metodo ai volumi finiti calcolato al centro di ogni elemento.

Il dominio spaziale è stato discretizzato in celle che possono avere forma triangolare o di quadrilateri.

La griglia ha anche la proprietà di essere infittita o diradata in alcune aree rispetto ad altre, permettendo dei risultati di maggior dettaglio nelle aree di maggior interesse e di velocizzare il calcolo del modello in altre aree dove non si ritiene opportuno tale dettaglio. È stato necessario, dopo aver scelto la risoluzione della griglia, cercare di modellare la costa o il confine della terraferma, in modo da evitare la formazione di celle molto piccole in prossimità di insenature o rientranze della costa.

I moduli di MIKE 21 utilizzati per lo studio del trasporto solido in condizioni di clima medio annuo sono stati:

- SW - utilizzato per la ricostruzione del clima del moto ondoso locale sotto costa a partire dalle condizioni note al largo;
- HD - 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 - utilizzato per il calcolo delle condizioni locali di trasporto solido per effetto di onde e correnti ed in presenza delle strutture esistenti ed in progetto.

Del codice di calcolo SW si è parlato diffusamente in precedenza, di seguito verranno presi in considerazione i modelli numerici HD ed ST.

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i molti fenomeni quali, *flooding and drying*, *perdite di carico*, *attrito al fondo*, *forza di*

Coriolis, effetto del vento, gradienti di pressione barometrica, coperture di ghiaccio, effetto delle maree, precipitazioni, evaporazioni, radiation stresses, pozzi e sorgenti.

Inoltre, il modulo HD è stato utilizzato insieme al modulo *Sand Transport* per simulare il trasporto rispettivamente di materiale non coesivo.

Nelle aree costiere, laddove il trasporto è in gran parte dominato dalle correnti indotte dal moto ondoso, come nel nostro caso, il modulo idrodinamico è stato forzato dai campi di radiation stress ottenuti mediante l'utilizzo del modulo SW (*spectral wave*).

I risultati del modello idrodinamico possono essere rappresentati o esportati in modo da essere utilizzati in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico. In corrispondenza di ogni elemento della griglia di calcolo (classica o flessibile), possono essere rappresentate le variazioni temporali della *profondità e dei livelli idrici, dei flussi di corrente nelle direzioni principali, della densità, temperatura e salinità; della velocità e direzione della corrente (come nel nostro caso), della velocità del vento e della pressione atmosferica.*

Lo studio della capacità di trasporto nella modellazione matematica mediante il codice MIKE 21 è stata eseguita attraverso il modulo ST (*Sand Transport*) che determina la capacità di trasporto di sedimenti non coesivi, per effetto dell'azione combinata onde-correnti o solo delle correnti.

Il modulo ST calcola il trasporto solido sulla base delle simulazioni idrodinamiche effettuate con il modulo HD ed eventualmente delle simulazioni di moto ondoso effettuate con SW.

In output sono stati rappresentati il campo vettoriale del trasporto solido calcolato (direzione ed entità del trasporto) i tassi di sedimentazione/erosione del fondo.

2.1.1. MIKE 21 HD FM - HYDRODYNAMIC MODULE

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- *flooding and drying*;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di *Coriolis*;
- effetto del vento;

- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni, evaporazioni;
- *radiation stresses*;
- pozzi e sorgenti.

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

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

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

2.1.2. MIKE 21 ST - SEDIMENT TRANSPORT MODULE

Lo studio della capacità di trasporto nella modellazione matematica mediante il codice MIKE 21 è eseguita attraverso il modulo ST (Sand Transport) che determina la capacità di trasporto di sedimenti non coesivi, per effetto dell'azione combinata onde-correnti o solo delle correnti.

Il codice di calcolo MIKE 21 ST include svariate formulazioni di trasporto e può essere utilizzato indistintamente in campo marittimo-costiero o fluviale.

Il modulo ST calcola il trasporto solido sulla base delle simulazioni idrodinamiche effettuate con il modulo HD ed eventualmente delle simulazioni di moto ondoso effettuate con SW. Per effettuare simulazioni a fondo mobile è possibile includere il feedback degli effetti dell'idrodinamica sulla batimetria utilizzando i moduli HD, SW ed ST in maniera accoppiata.

Il modulo ST può essere applicato per la quantificazione della capacità di trasporto laddove il moto ondoso e/o le correnti causano trasporto di sedimenti non coesivi.

Il modulo ST può essere utilizzato per applicazioni a larga scala oppure a scala locale, laddove si desidera studiare l'impatto di strutture costiere sulla dinamica litoranea con risoluzioni dell'ordine del metro. Aree di applicazione tipiche sono: gestione e protezione dei litorali; ottimizzazione di layout portuali; studi di insabbiamento dei bacini portuali, morfologia costiera etc.

2.2. OPERE MARITTIME PREVISTE NEL SEGUENTE PROGETTO

Il porto presenta allo stato attuale una significativa esposizione rispetto alle onde con direzione di provenienza Nord, come evidenziato dalla seguente figura 3.



Figura 6 - Planimetria del porto di Marsala allo stato attuale.

Al fine di ridurre il grado di agitazione interna ed aumentare conseguentemente la fruibilità del porto, sono state ipotizzate diverse tipologie di modifica al layout esistente fino a giungere alla configurazione finale di PRP.

In particolare si sono previste le seguenti opere:

- realizzazione di una diga di sottoflutto radicata sulla testata dell'esistente Molo di Levante, con direzione NE-SO;
- banchinamento del tratto terminale del Molo di Levante e realizzazione di un dente per l'accosto delle navi Ro-Ro;
- banchinamento della testata del Molo Cristoforo Colombo;

- creazione di una darsena banchinata per i tender alla radice del Molo Cristoforo Colombo;
- realizzazione di un molo su pali per l'accosto di grandi *yachts*;
- rifiorimento della testata del molo di Ponente;
- prolungamento del molo in corrispondenza della darsena turistica esistente;
- realizzazione dei moli per attracco dei traghetti;
- realizzazione banchine a giorno per allargamento strada come da progetto già esistente presso il Comune di Marsala;
- dragaggi per la correzione dei fondali portuali e del canale di accesso.

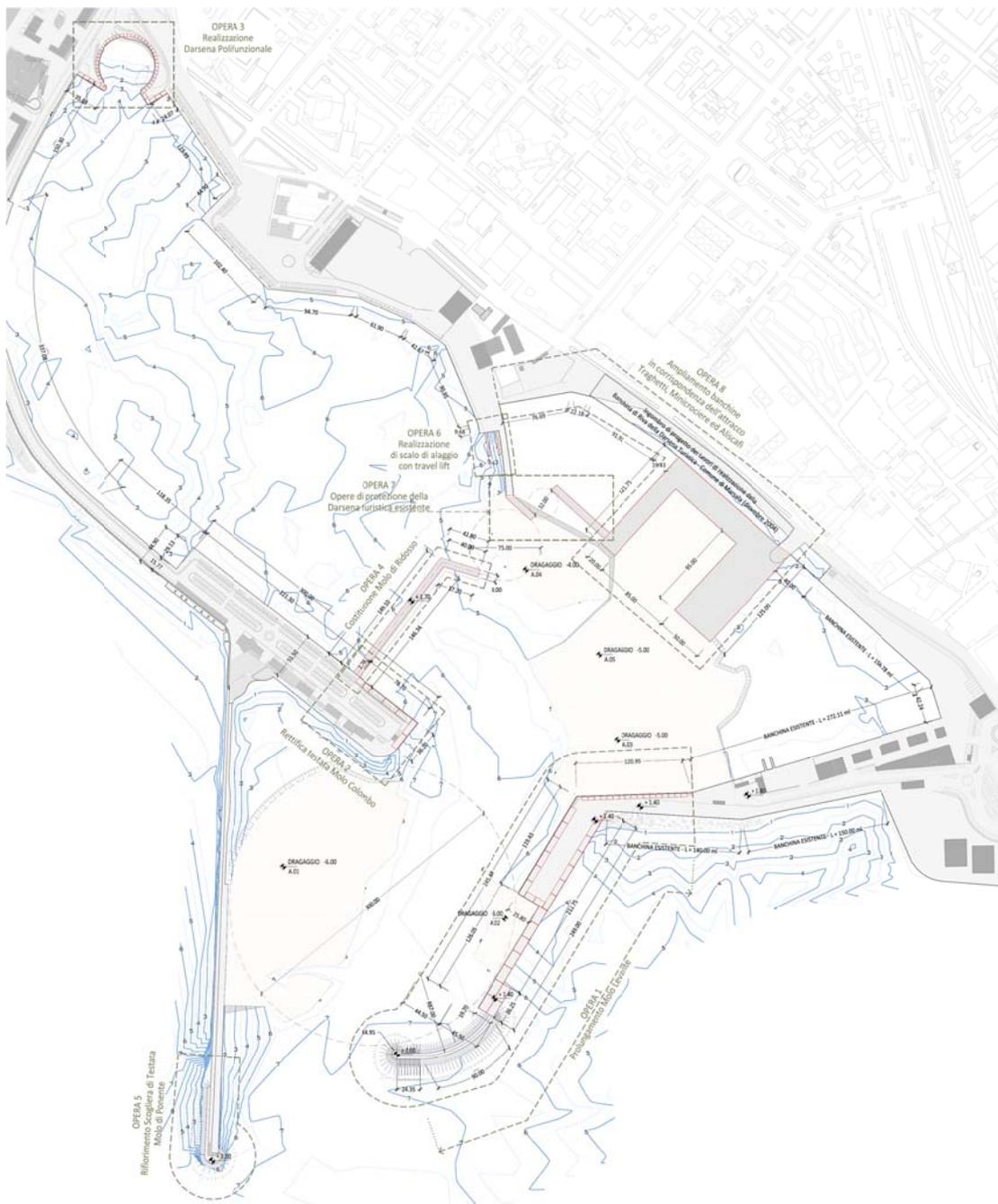


Figura 7 - Planimetria del porto di Marsala – futuro PRP.

In seguito all'esito della procedura preliminare e agli studi del progetto definitivo si è potuto definire il layout portuale, in particolare la M.Y.R. s.r.l. dovrà eseguire le seguenti opere:



Figura 8 - Planimetria del porto di Marsala – Intervento della M.Y.R. s.r.l.

- realizzazione di una diga di sottoflutto radicata sulla testata dell'esistente Molo di Levante, con direzione NE-SO;
- banchinamento del tratto terminale del Molo di Levante e realizzazione di un dente per l'accosto delle navi Ro-Ro;
- banchinamento della testata del Molo Cristoforo Colombo;
- creazione di una darsena banchinata per i tender alla radice del Molo Cristoforo

Colombo;

- realizzazione di un molo su pali per l'accosto di grandi *yachts*;
- rifiorimento della testata del molo di Ponente;
- dragaggi per la correzione dei fondali portuali e del canale di accesso.

2.3. TRASPORTO SOLIDO NELLO STATO DI FATTO

La determinazione della capacità di trasporto solido nello stato di fatto assume una importanza fondamentale per la scelta del sito in quanto permette di verificare l'alterazione dei processi di erosione e deposito nelle aree limitrofe. In particolare il confronto tra lo stato di fatto e la soluzione progettuale in termini di trasporto solido, consente di prevedere le modificazioni di dinamica litoranea per effetto della costruzione della nuova opera.

2.3.1. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI DELLO STATO DI FATTO

Come già detto in precedenza, e come già fatto per gli eventi estremi, ai fini dell'applicazione dei modelli è stata costruita una batimetria che per la parte più vicina alla linea di costa è una batimetria di dettaglio ricavata da un rilievo batimetrico, mentre per la parte più a largo è stata ricavata dalle carte nautiche della zona.

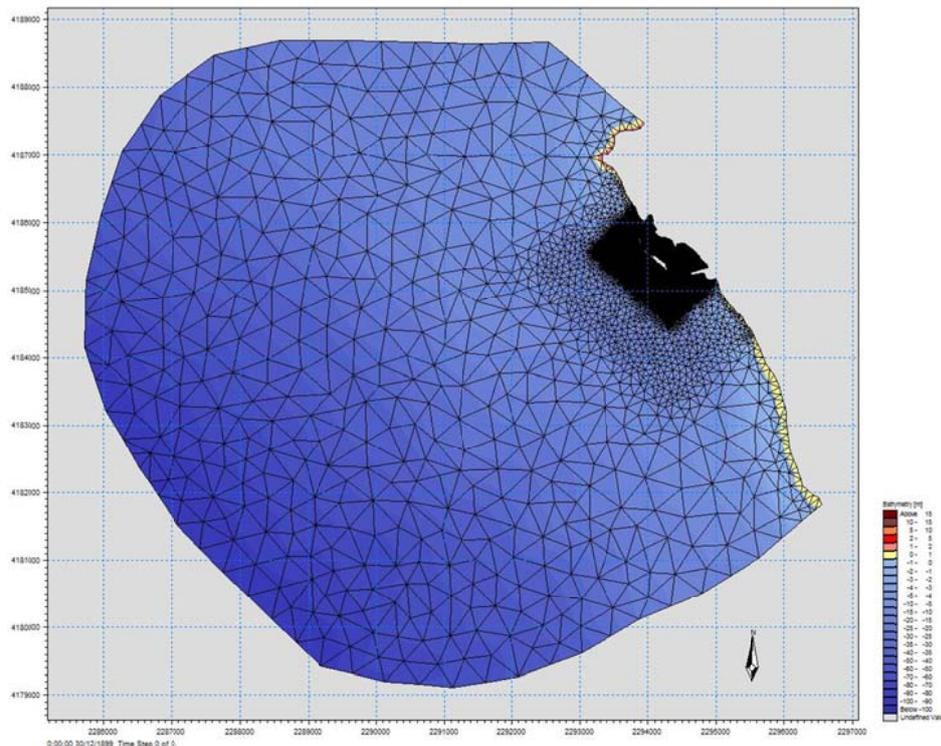


Figura 9 a– Mesh modello di largo

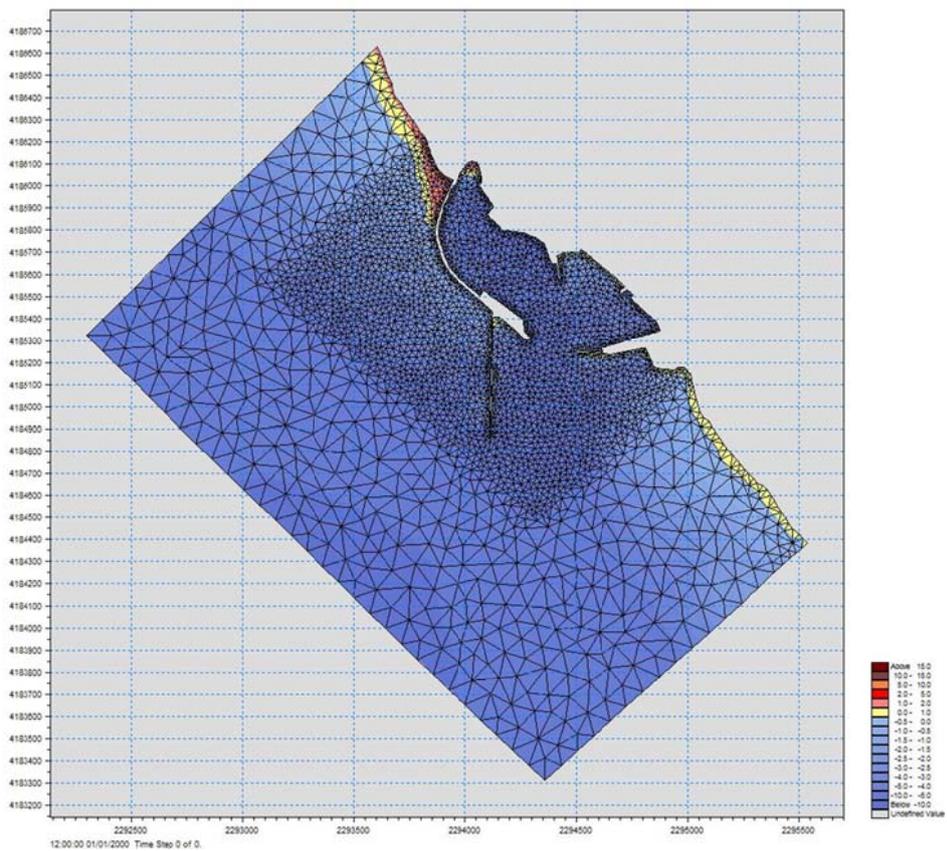


Figura 9 b – Mesh modello di dettaglio

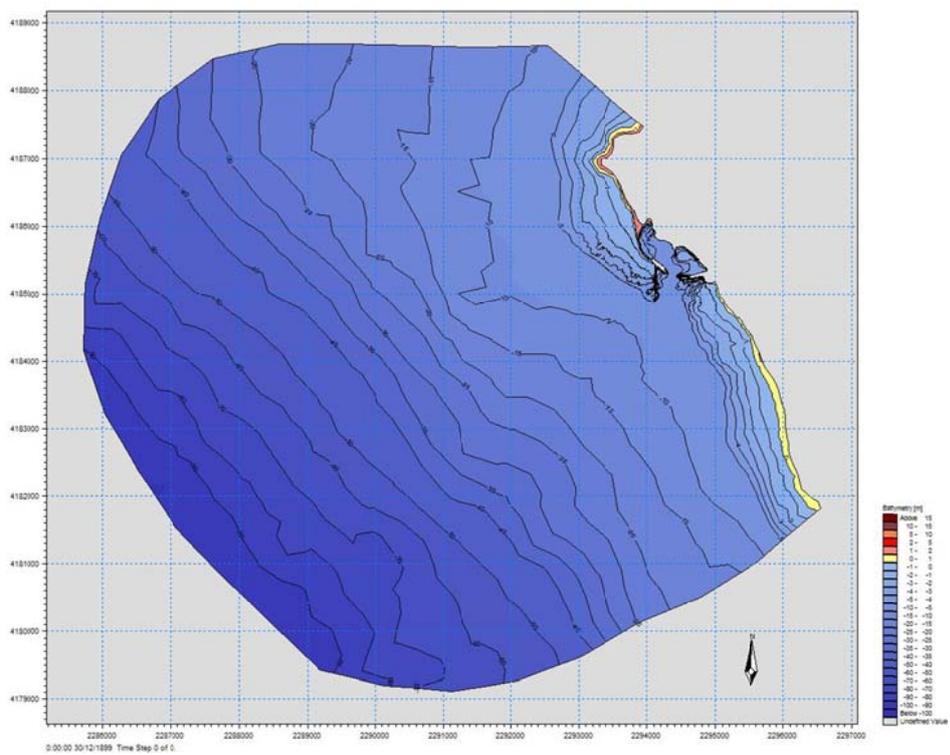


Figura 9 c – Batimetria modello di largo

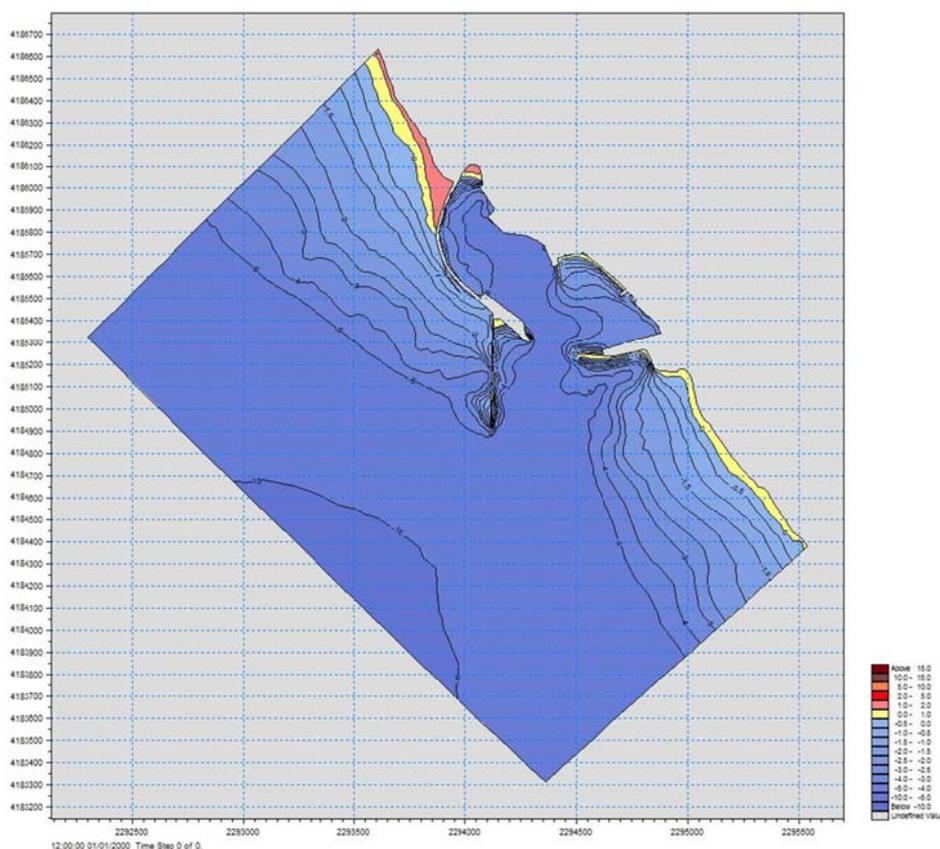


Figura 9 d – Batimetria modello di dettaglio

Il clima ondoso sotto costa è stato determinato con le stesse modalità descritte e utilizzate in precedenza (Relazione PD_BI.2 – Studio moto ondoso sotto costa) applicando il modello SW per i settori di traversia compresi dal 11 al 23 in cui le onde di input sono quelle del clima ondoso medio annuo determinato nel paragrafo 1.10.

Ottenute le onde sotto costa si è passati all'applicazione del modello idrodinamico (MIKE 21 HD) che calcola le correnti litoranee utilizzando i dati delle analisi svolte in precedenza.

Le tensioni sul fondo in termini di *radiation stress* sono determinate dalle onde al frangimento obliquo dell'onda per cui si utilizzano come input i dati di onda provenienti dal modello di dettaglio SW.

Nelle figure seguenti sono riportati i grafici che rappresentano per ogni direzione di onda i risultati del modulo SW.

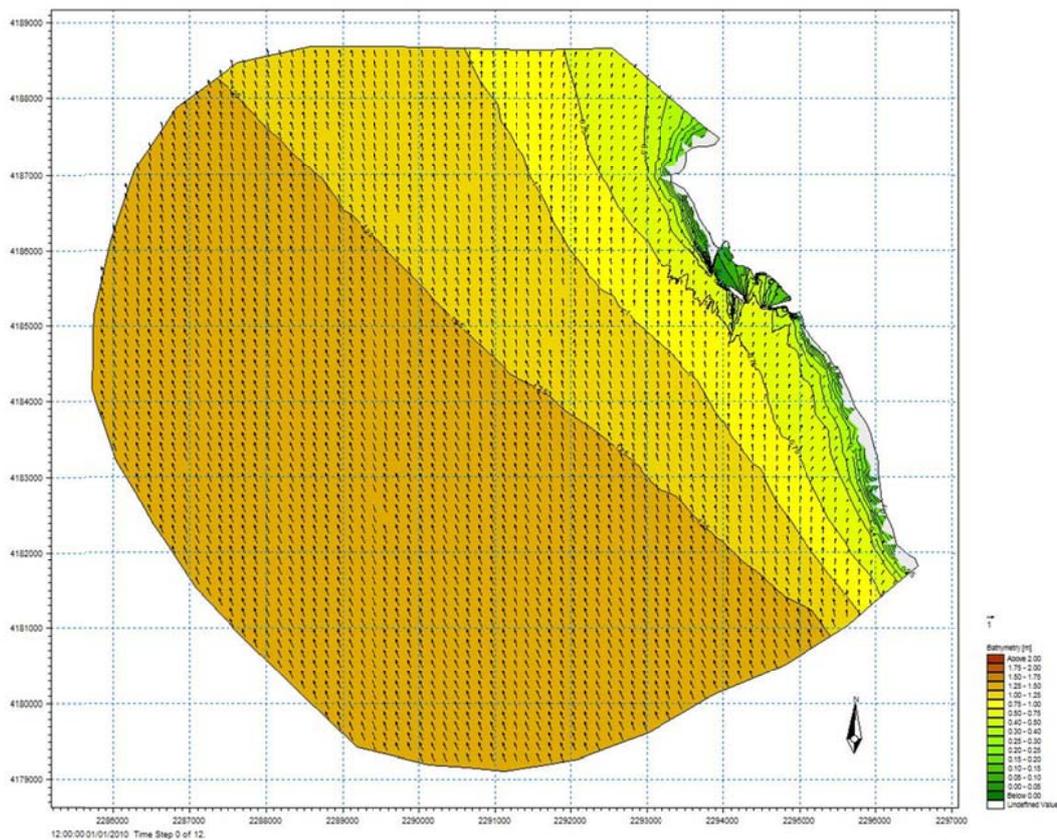


Figura 10 a - Andamento dell'onda dal settore 11 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di largo

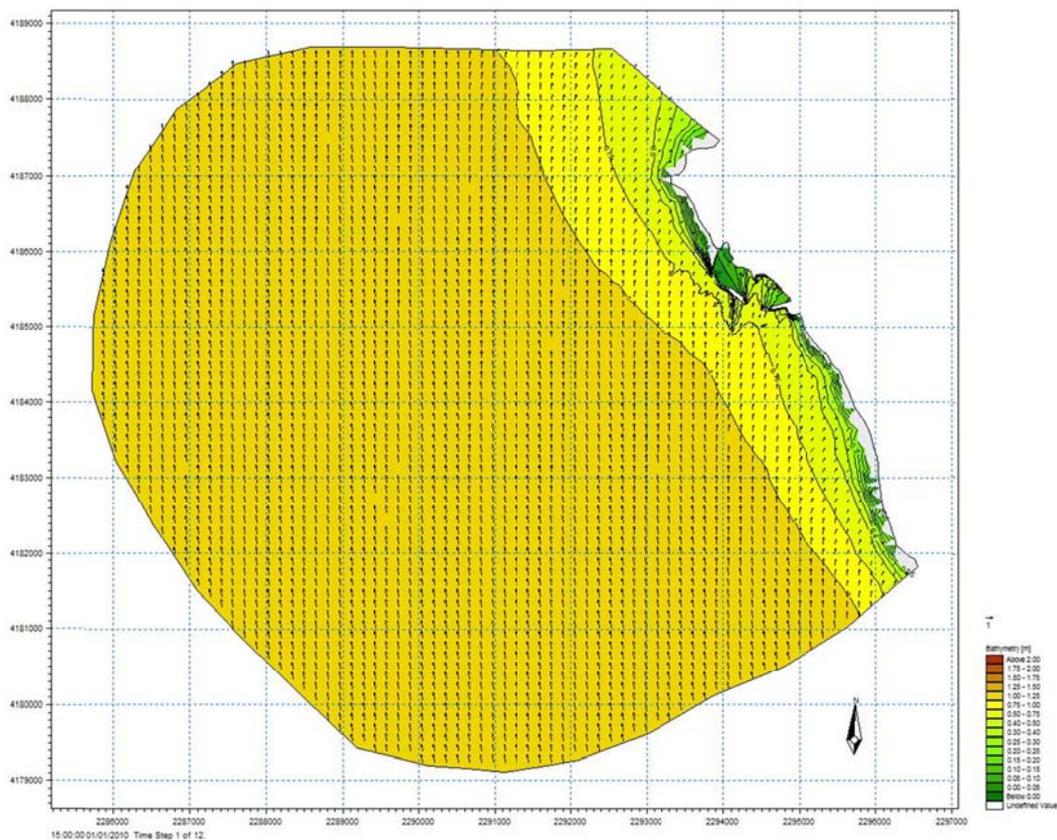


Figura 10b - Andamento dell'onda dal settore 12 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di largo

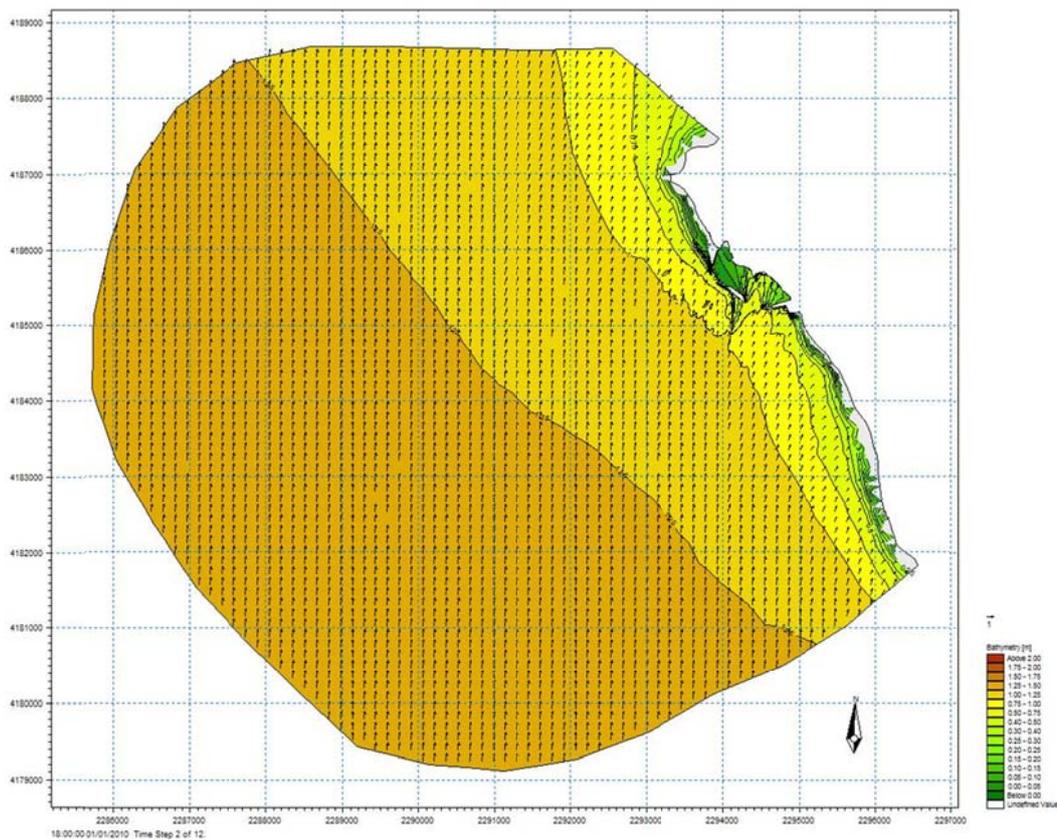


Figura 10c - Andamento dell'onda dal settore 13 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di largo

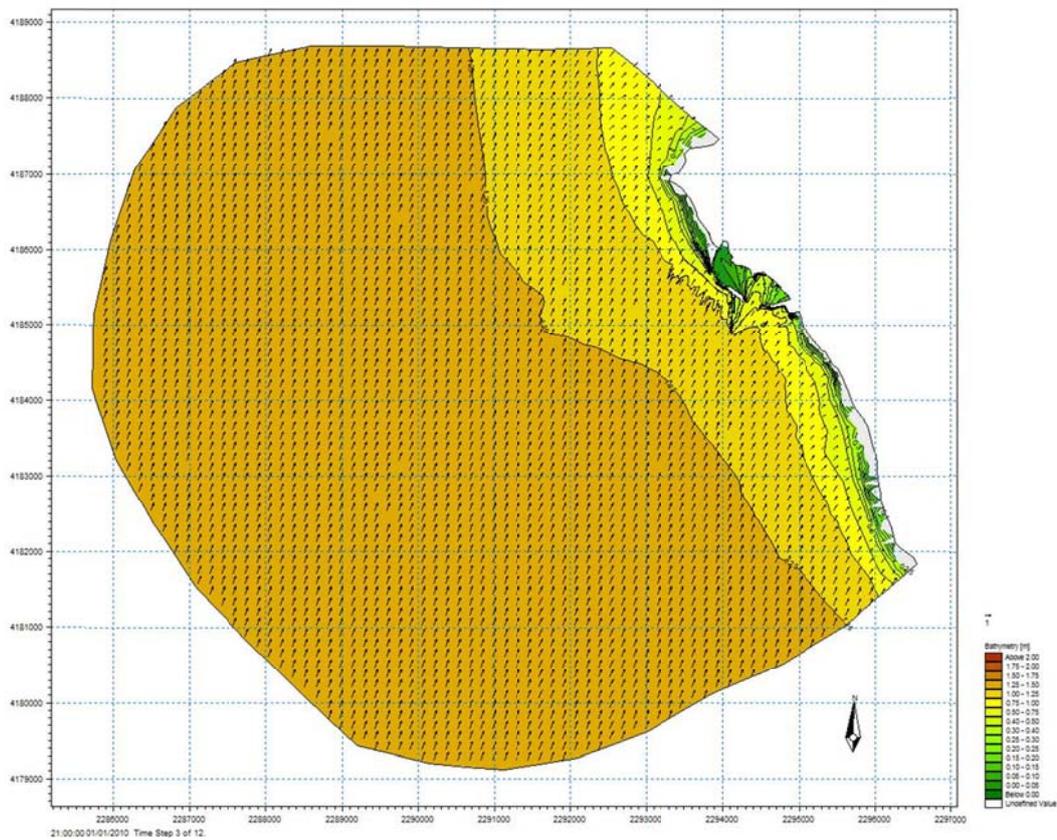


Figura 10d - Andamento dell'onda dal settore 14 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di largo

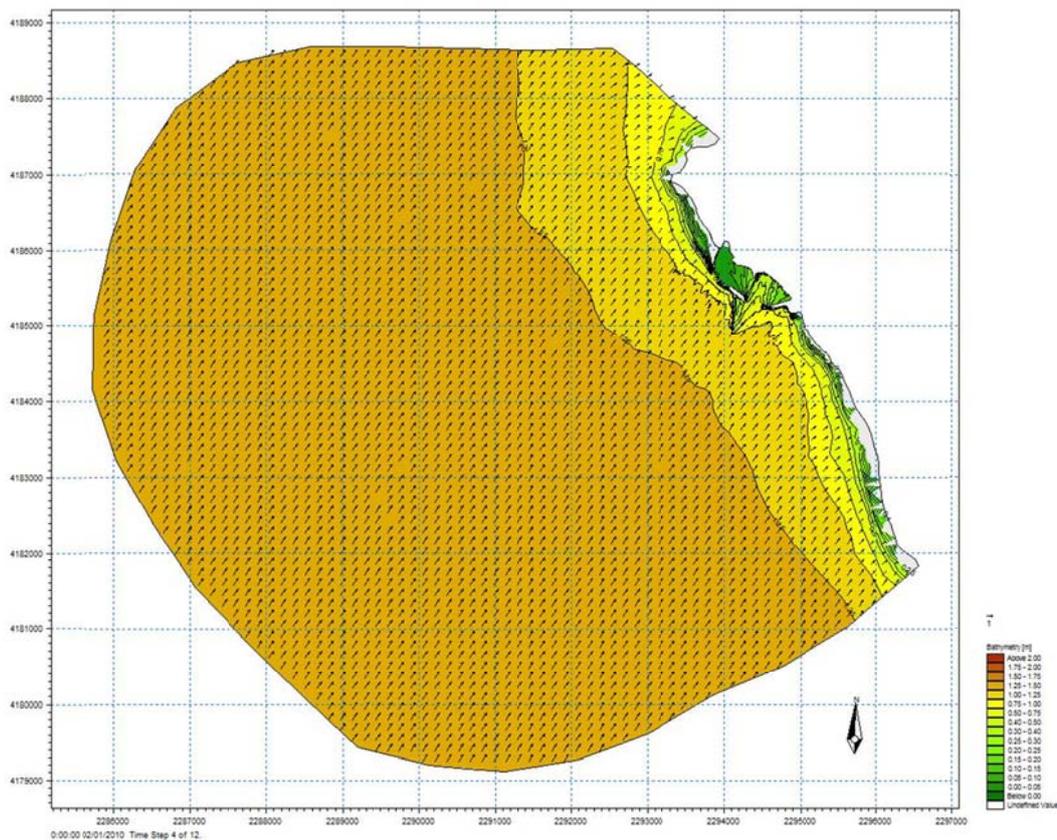


Figura 10e - Andamento dell'onda dal settore 15 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di largo

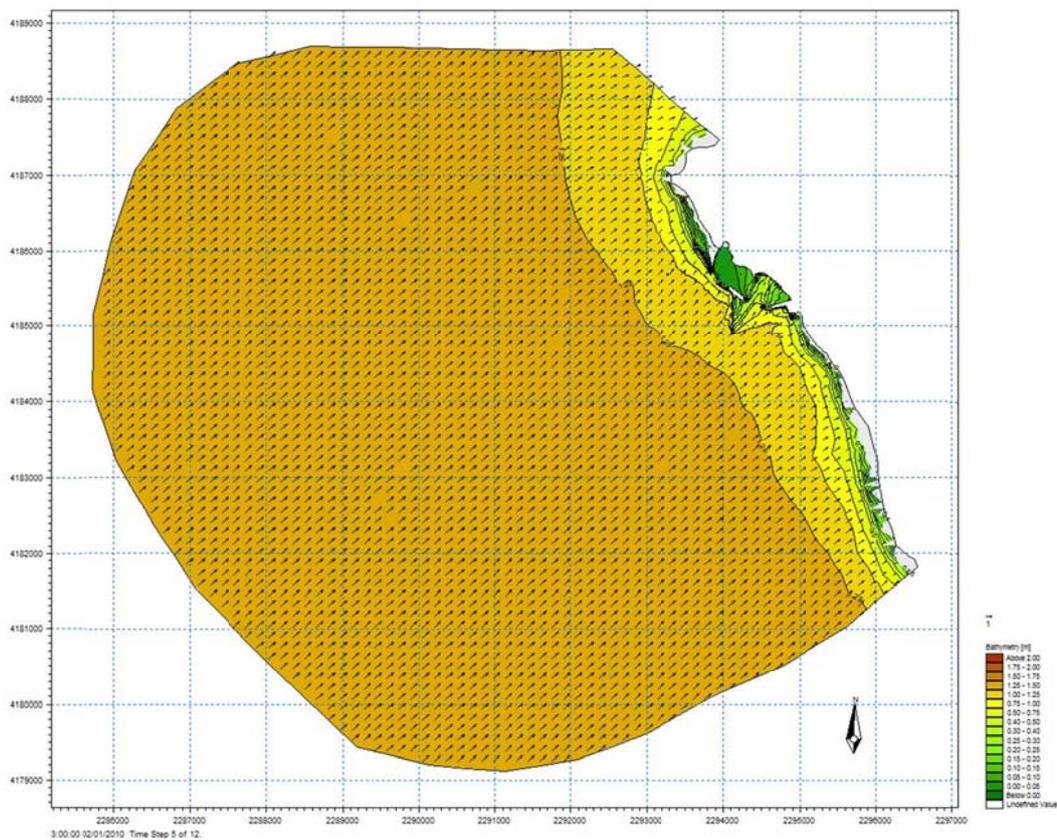
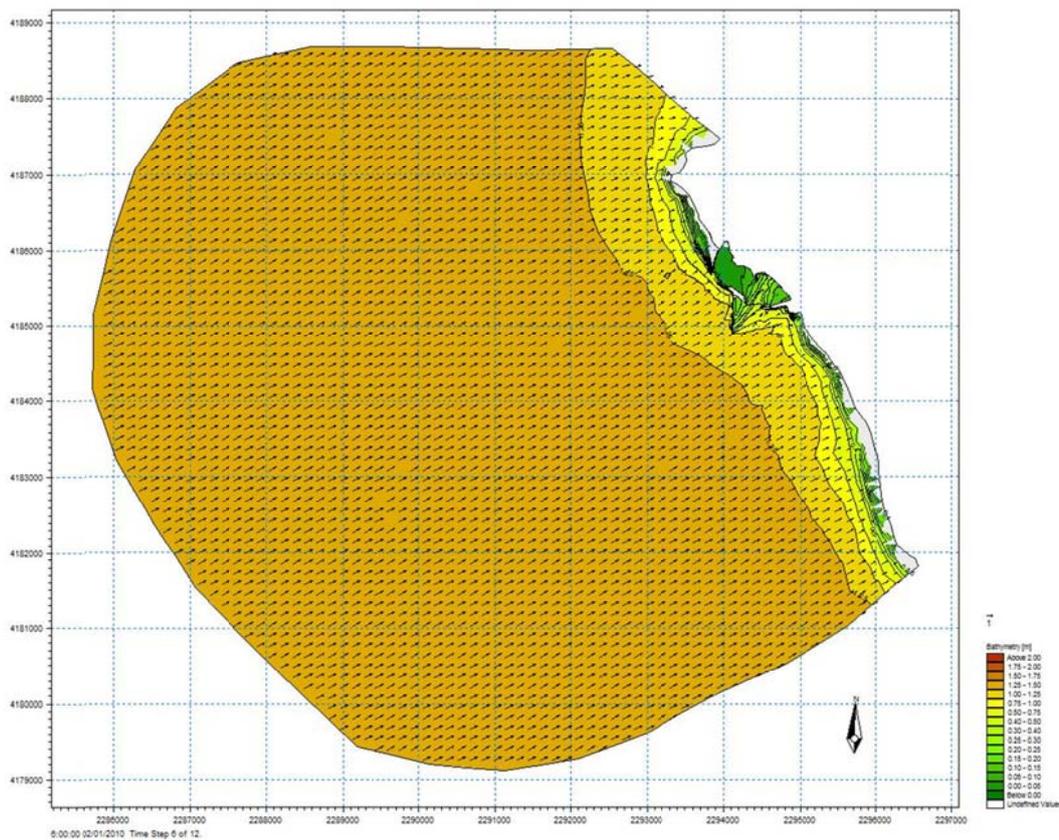
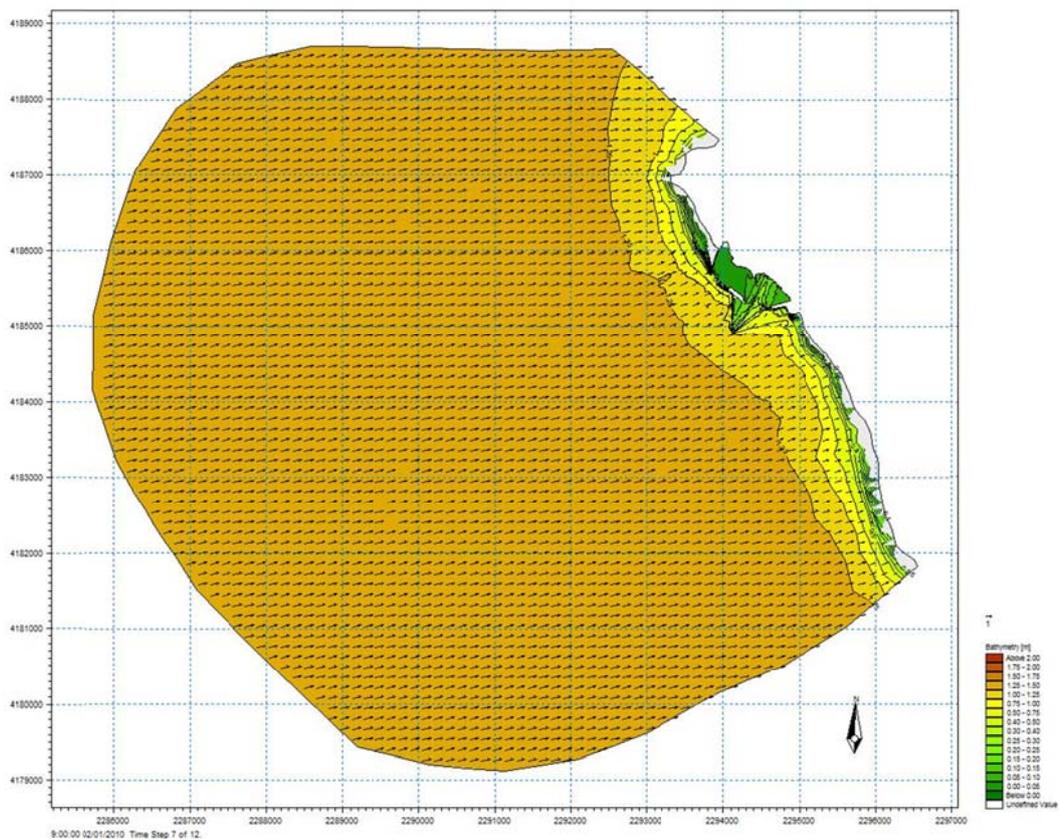


Figura 10f - Andamento dell'onda dal settore 16 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di largo



**Figura 10g - Andamento dell'onda dal settore 17 – modello SW – Clima medio annuo –
Stato di fatto – Modello di largo**



**Figura 10h - Andamento dell'onda dal settore 18 – modello SW – Clima medio annuo –
Stato di fatto – Modello di largo**

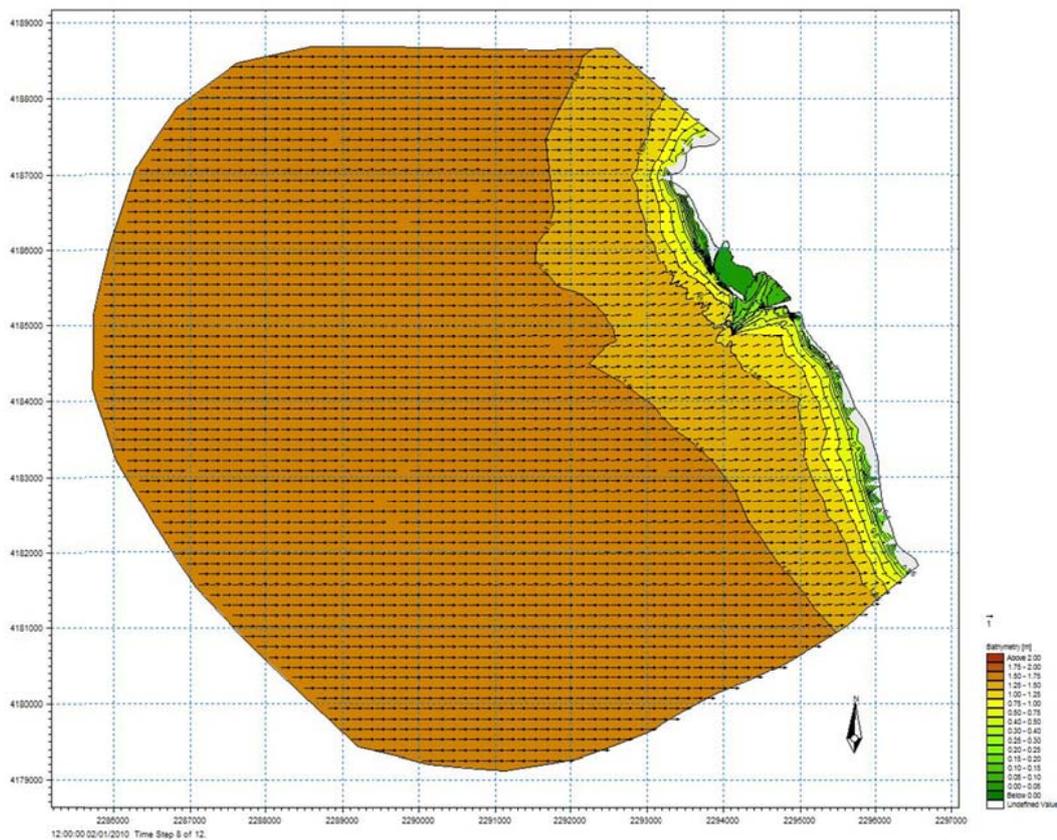


Figura 10i - Andamento dell'onda dal settore 19 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di largo

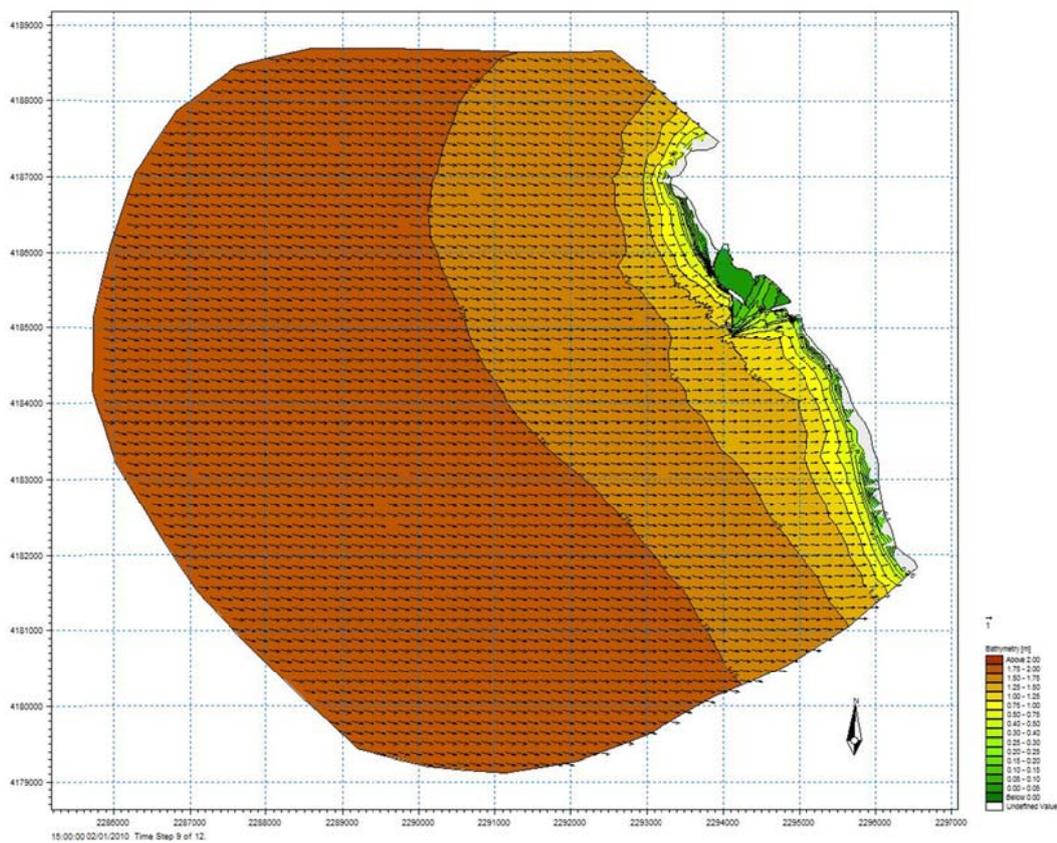


Figura 10l - Andamento dell'onda dal settore 20 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di largo

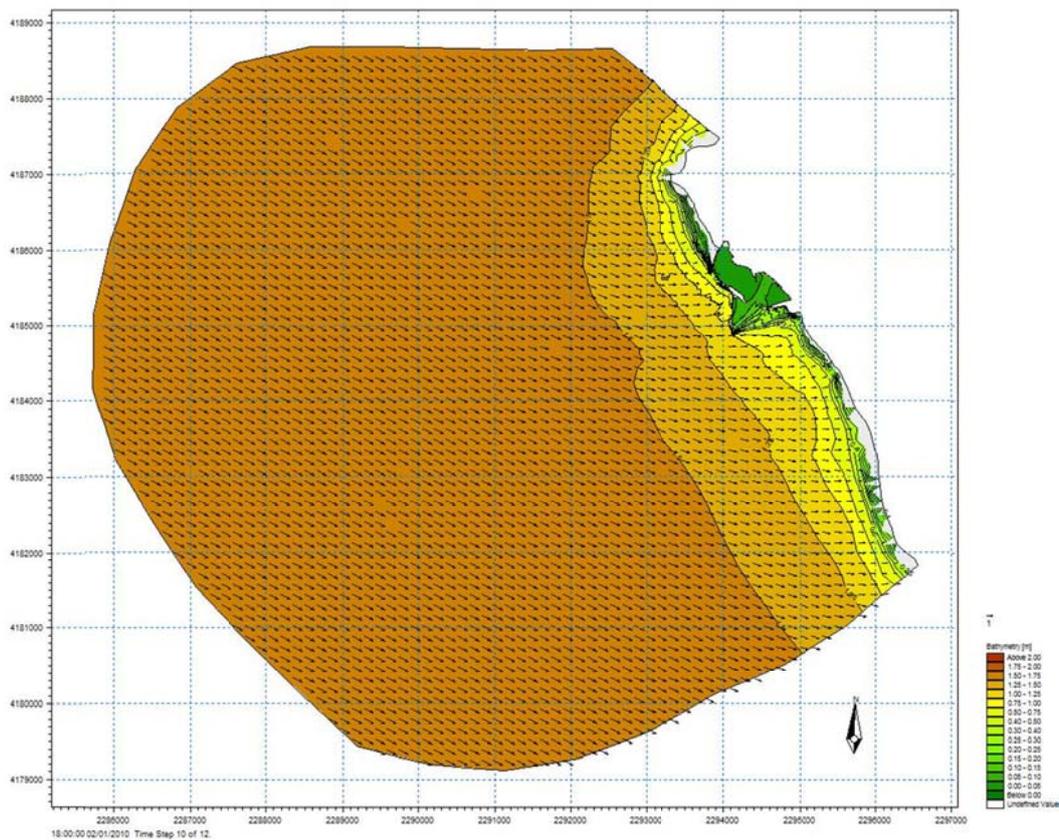


Figura 10m - Andamento dell'onda dal settore 21 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di largo

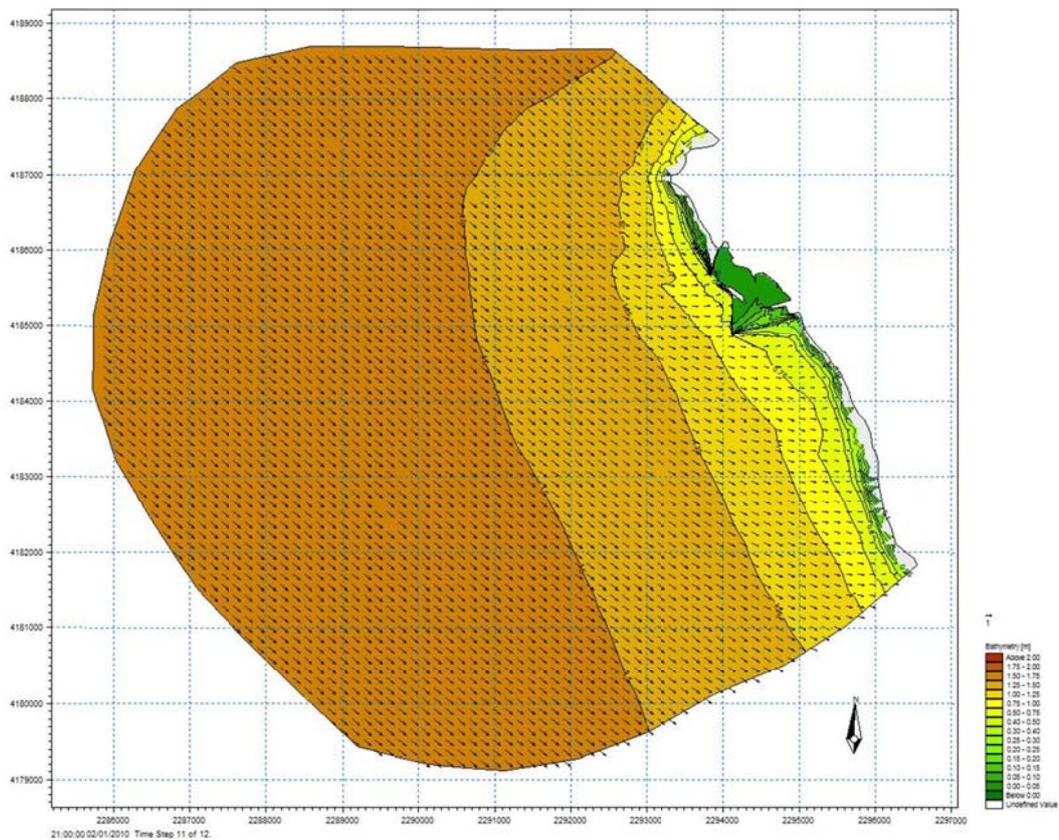


Figura 10n - Andamento dell'onda dal settore 22 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di largo

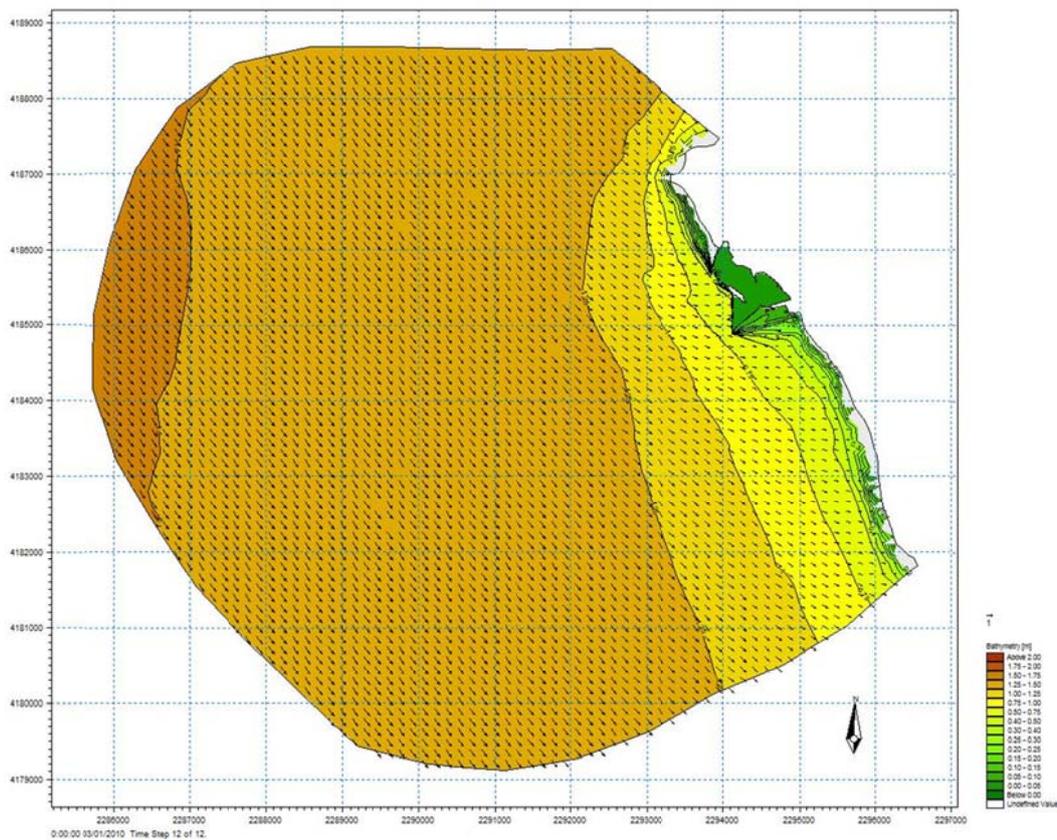


Figura 10o - Andamento dell'onda dal settore 23 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di largo

Una volta studiato il clima ondoso a largo si è “estratto” il clima ondoso sotto costa nel punto di coordinate UTM 4184295,5N 273833,5E. Nelle tabelle seguenti si riportano le onde estratte e poste come input del modello di dettaglio.

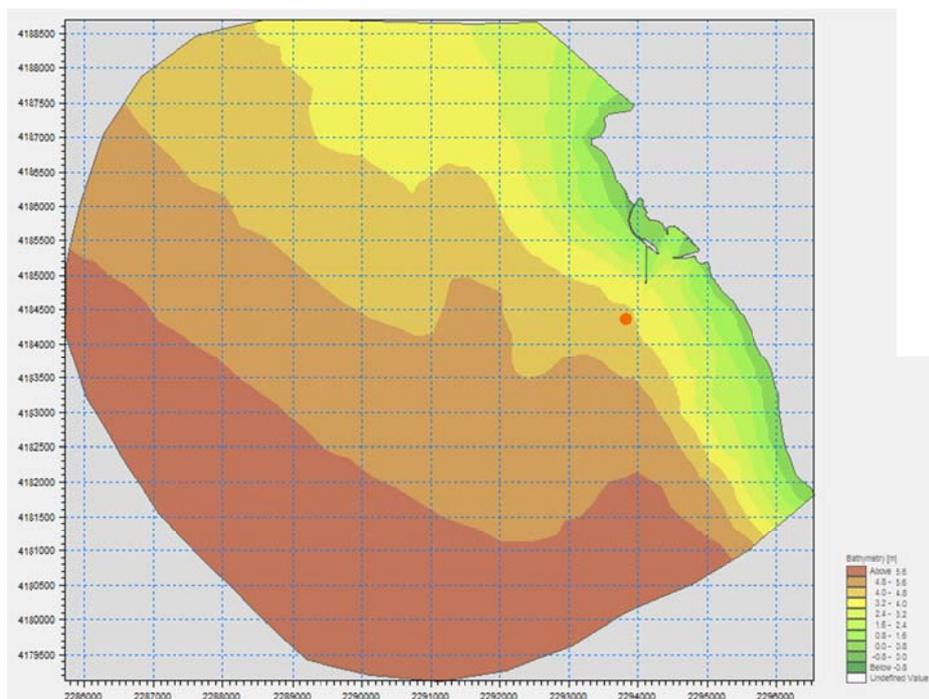


Figura 10p – individuazione del punto di estrazione del clima ondoso sotto costa

Settori	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)
11	0.94794	4,9737	176
12	1,002730	4,7944	182
13	1,108740	4,9054	192
14	1,196120	5,0563	202
15	1,229470	5,1152	214
16	1,265370	5,2161	226
17	1,268900	5,2529	239
18	1,281400	5,2976	251
19	1,363340	5,4828	262
20	1,419320	5,5837	271
21	1,301980	5,3503	281
22	1,093790	5,0375	290
23	0.922024	4,8801	298

Tabella 3 – Valori di Hs e Tp per il Clima medio Annuo

Nelle figure seguenti sono riportati i risultati del modello di dettaglio.

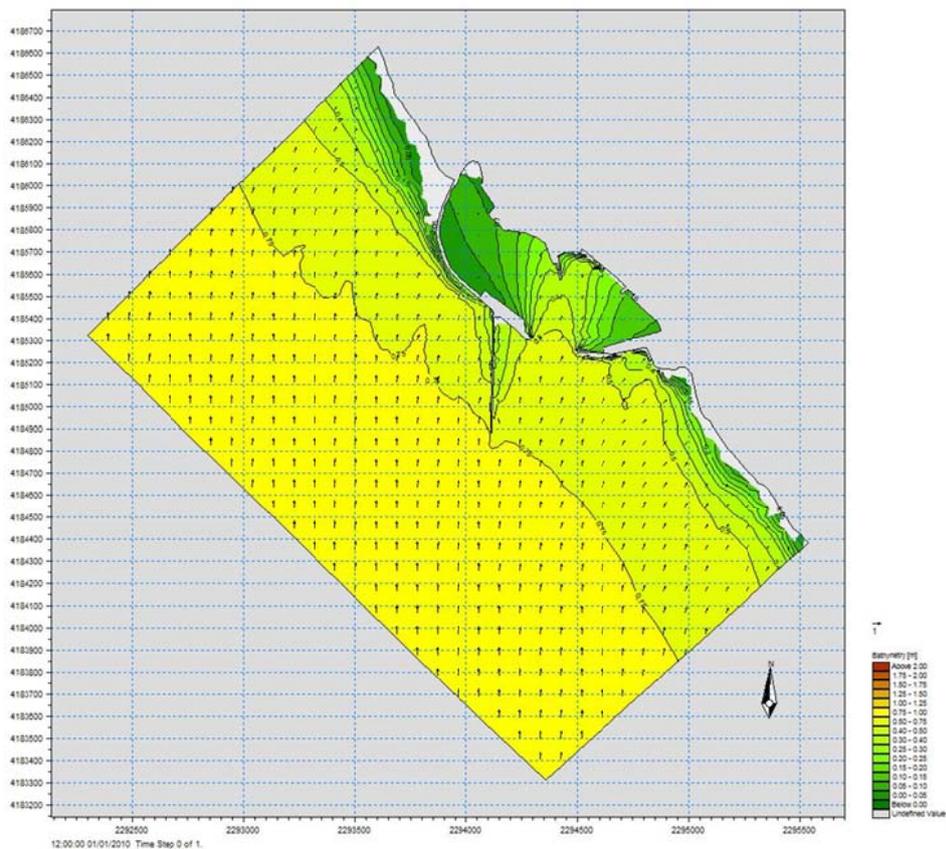


Figura 11 a – Andamento dell'onda dal settore 11 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

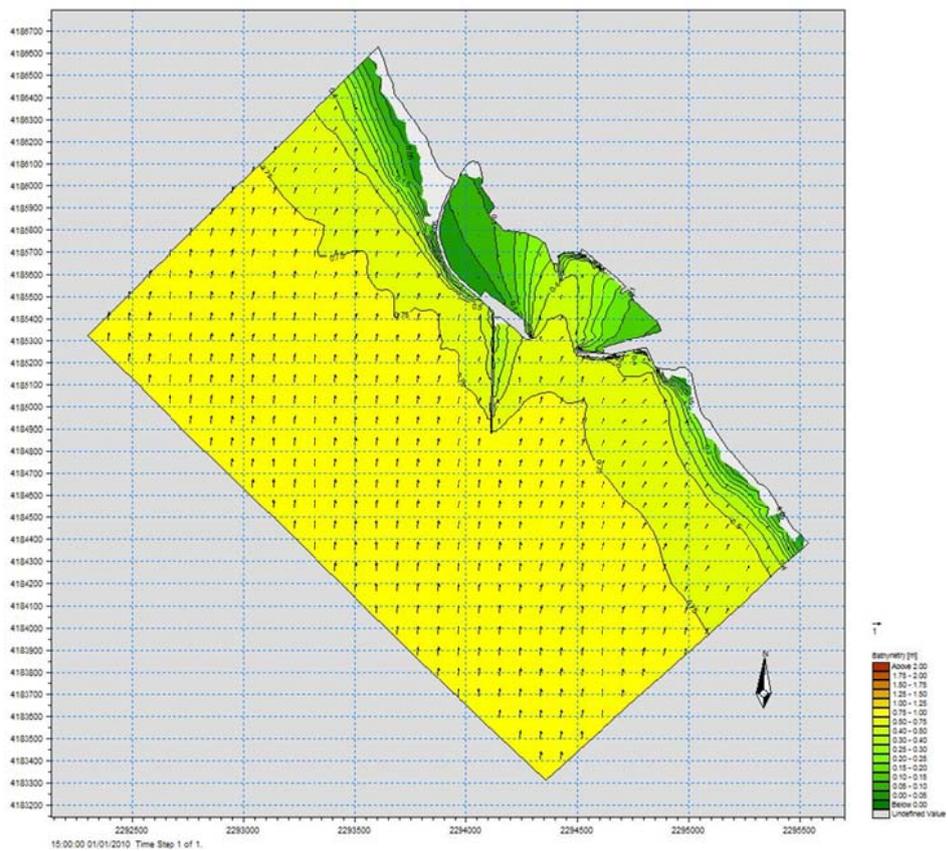


Figura 11 b – Andamento dell’onda dal settore 12 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

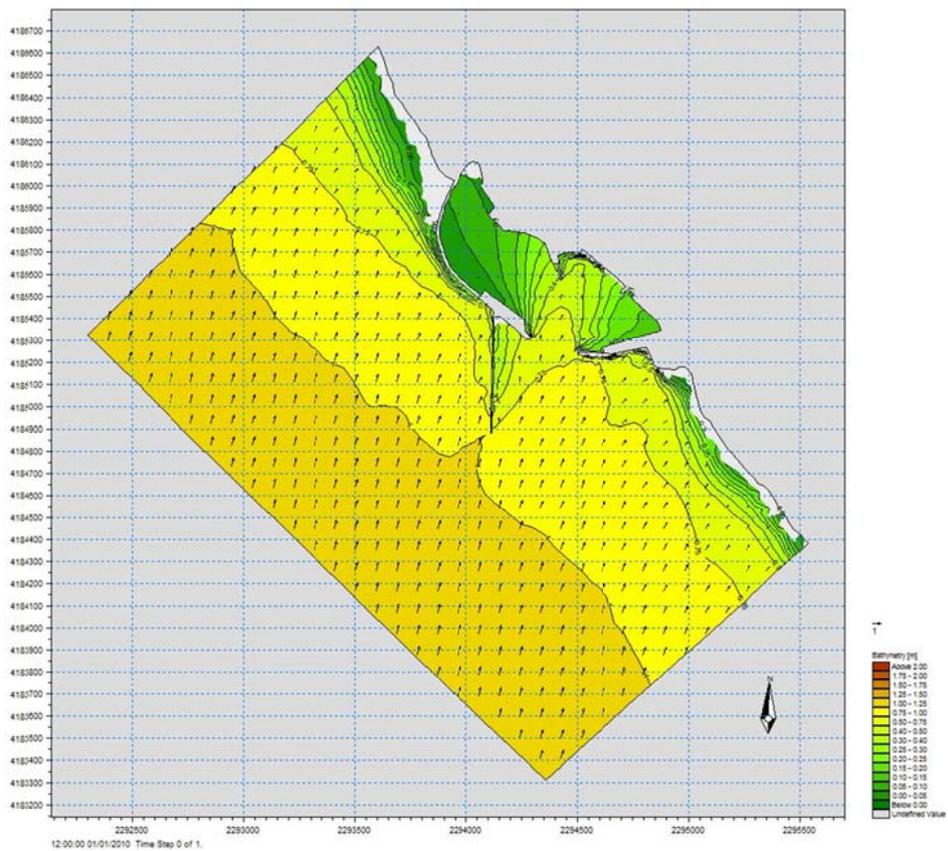


Figura 11 c – Andamento dell’onda dal settore 13 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

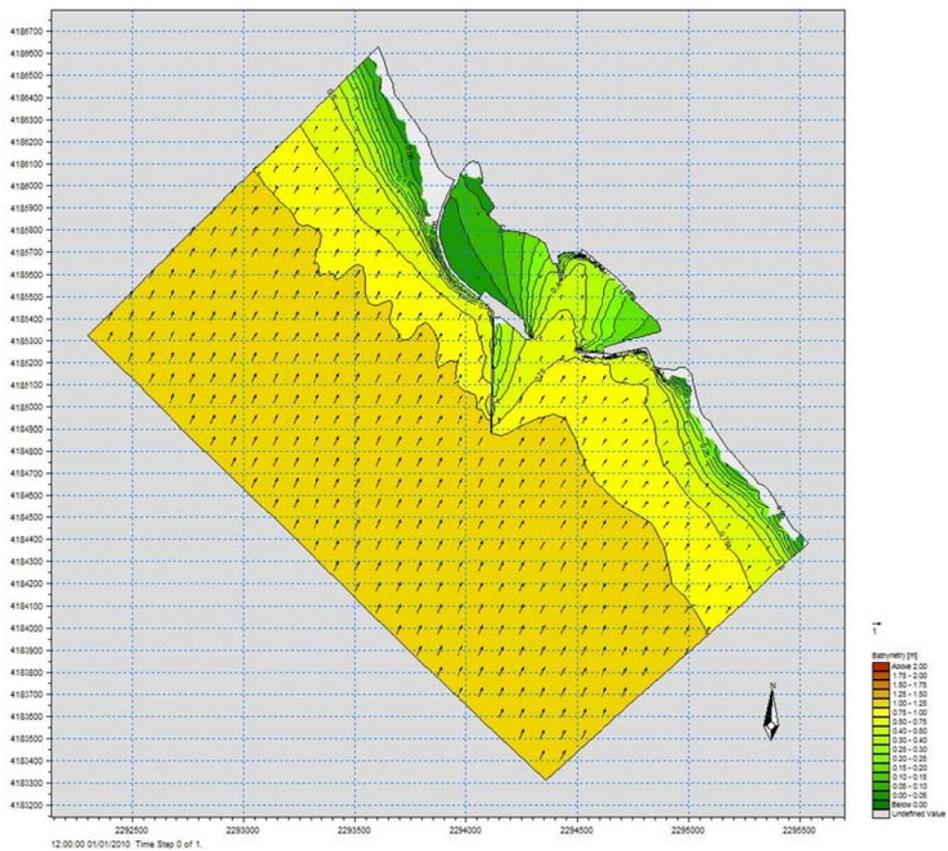


Figura 11 d – Andamento dell’onda dal settore 14 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

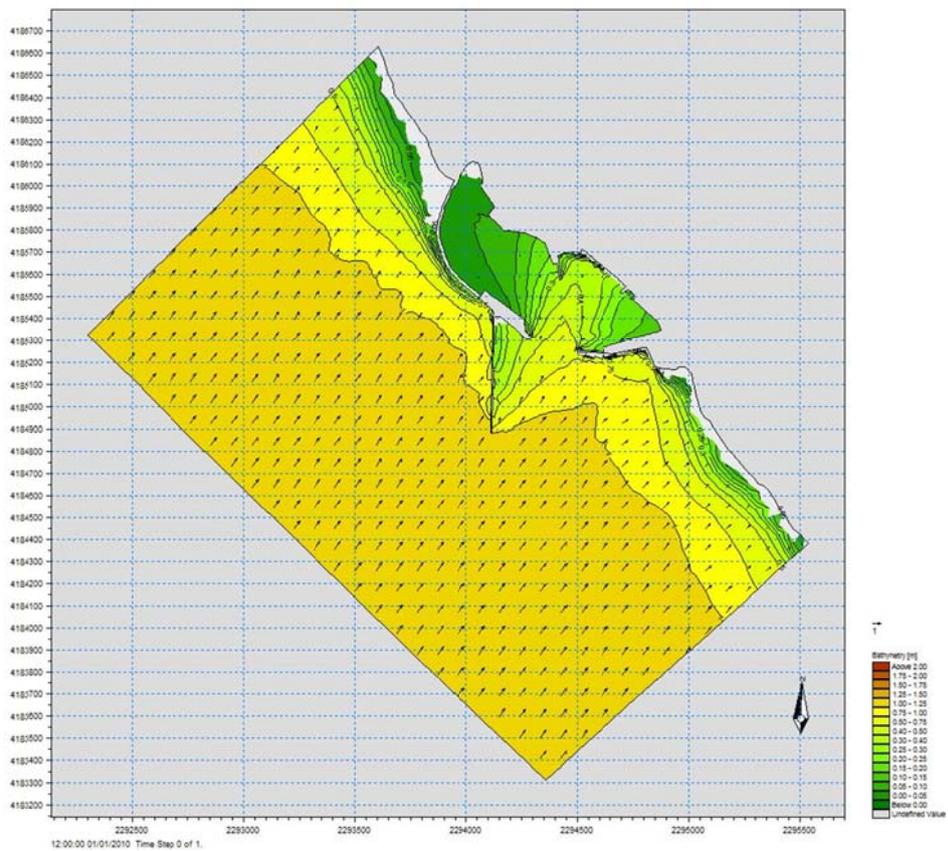


Figura 11 e – Andamento dell’onda dal settore 15 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

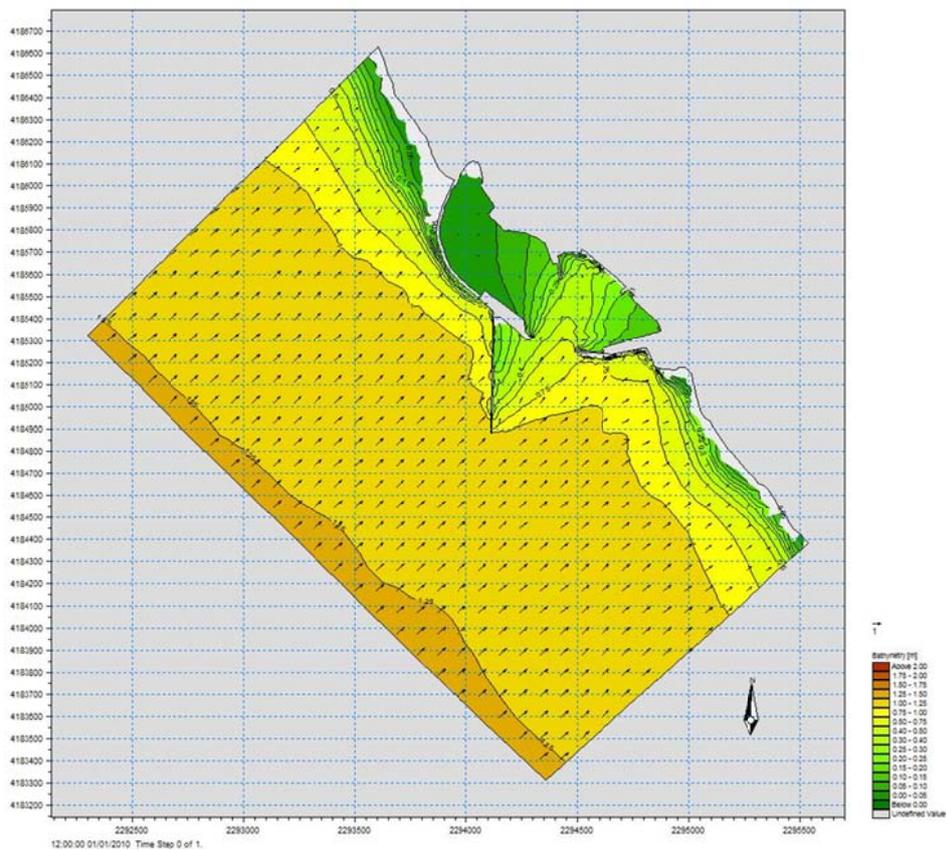


Figura 11 f – Andamento dell’onda dal settore 16 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

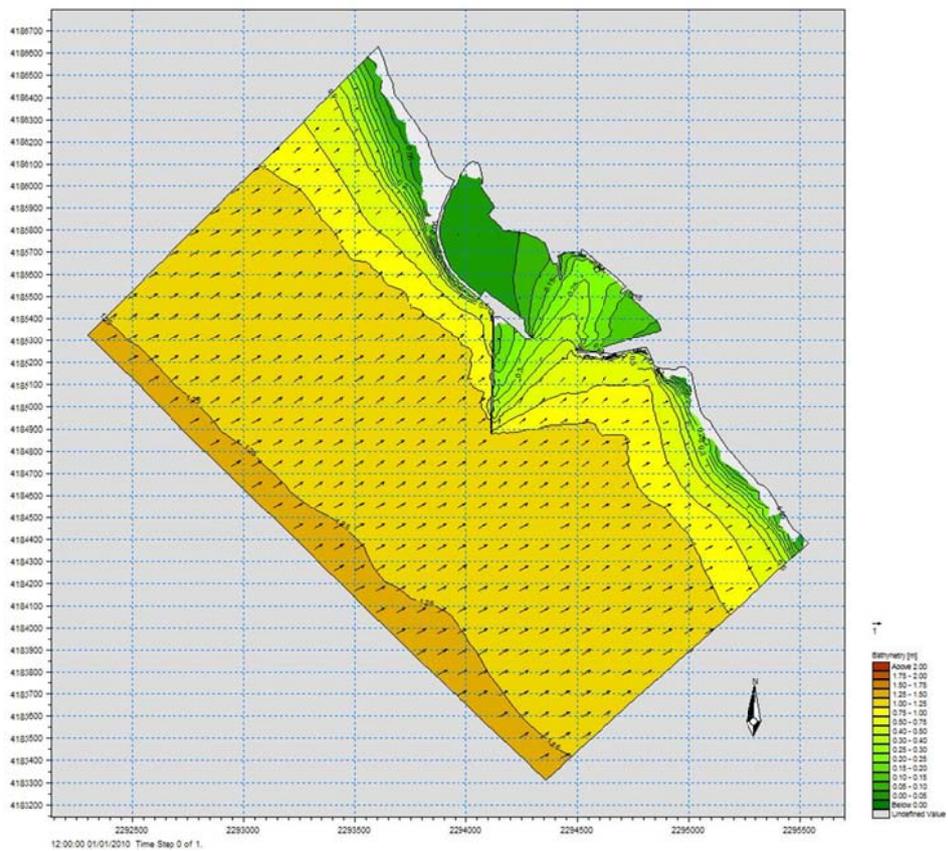


Figura 11 g – Andamento dell’onda dal settore 17 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

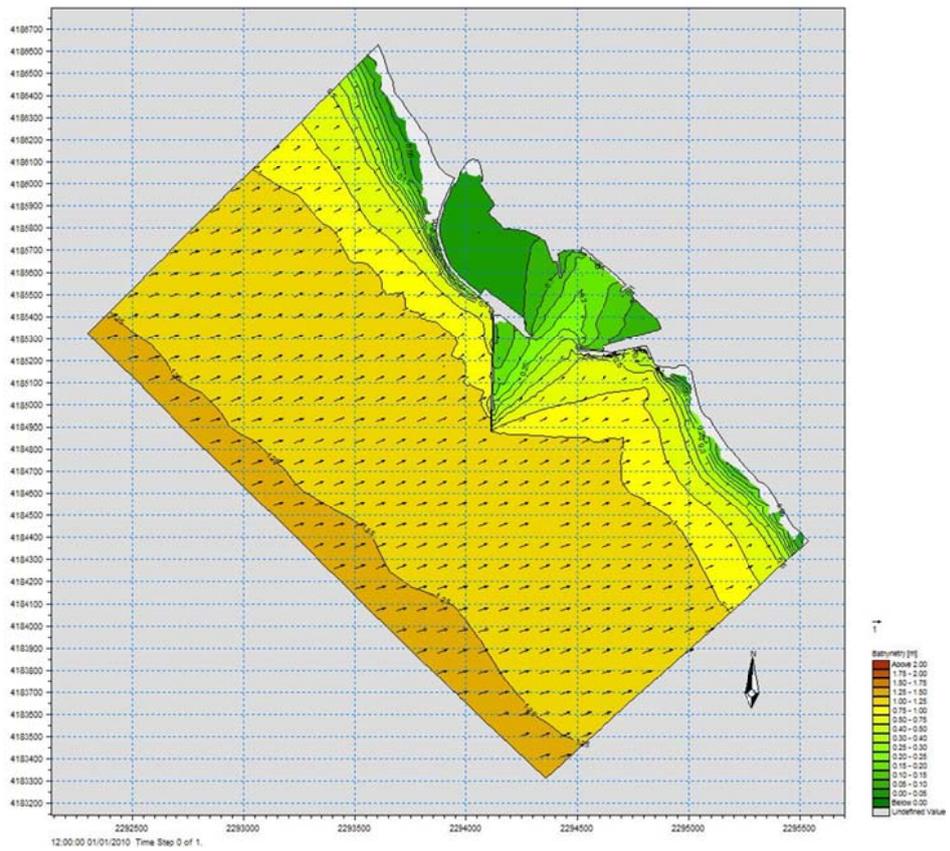


Figura 11 h – Andamento dell’onda dal settore 18 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

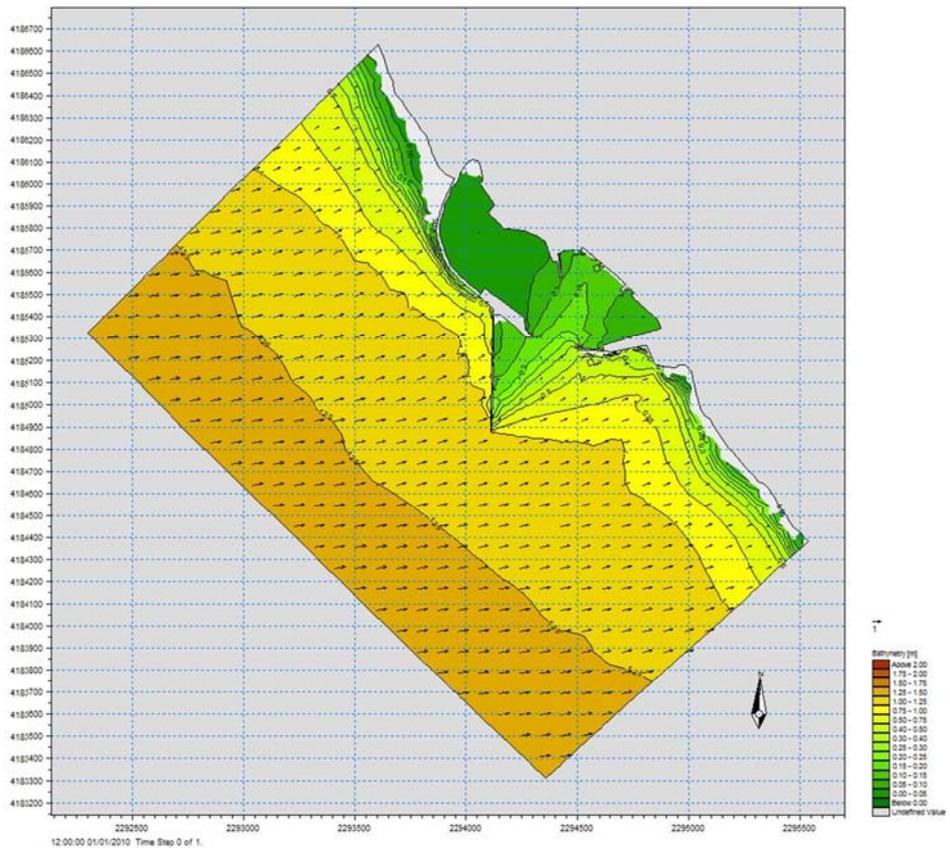


Figura 11 i – Andamento dell’onda dal settore 19 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

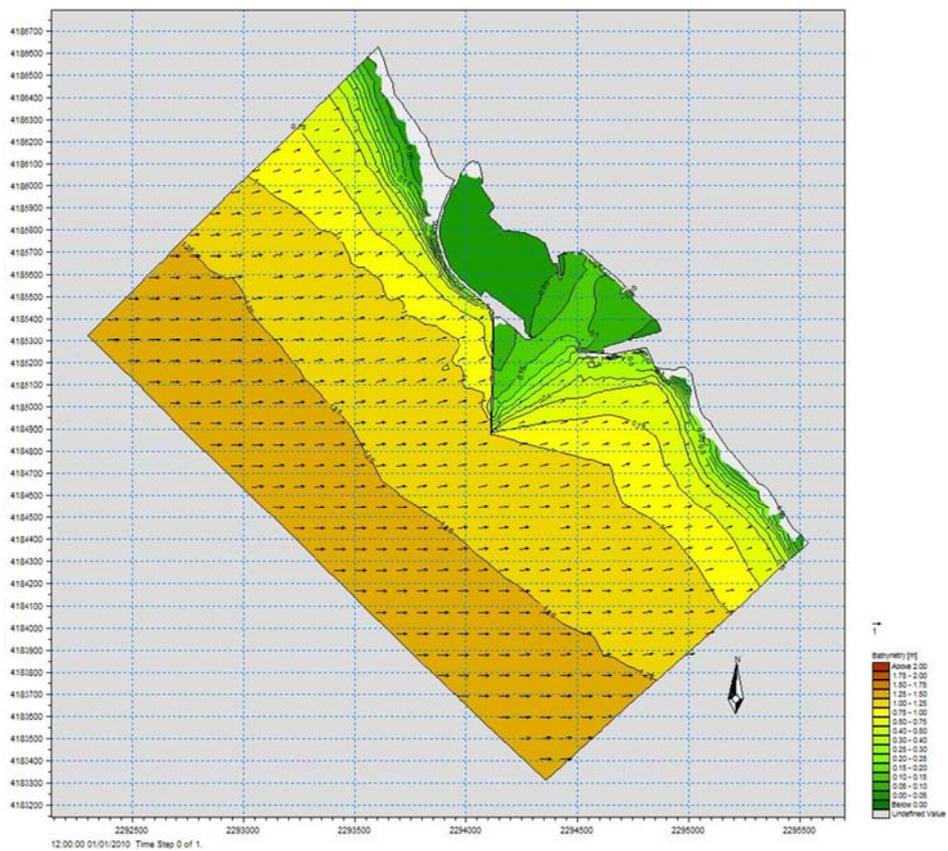


Figura 11 l – Andamento dell’onda dal settore 20 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

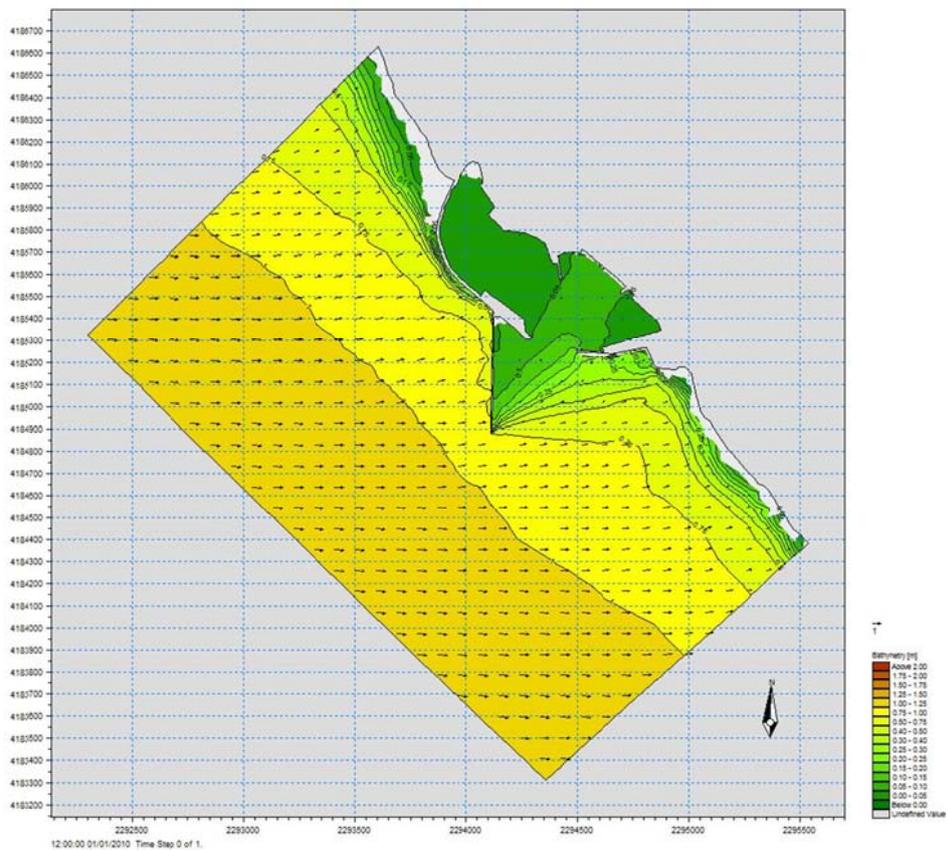


Figura 11 m – Andamento dell’onda dal settore 21 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

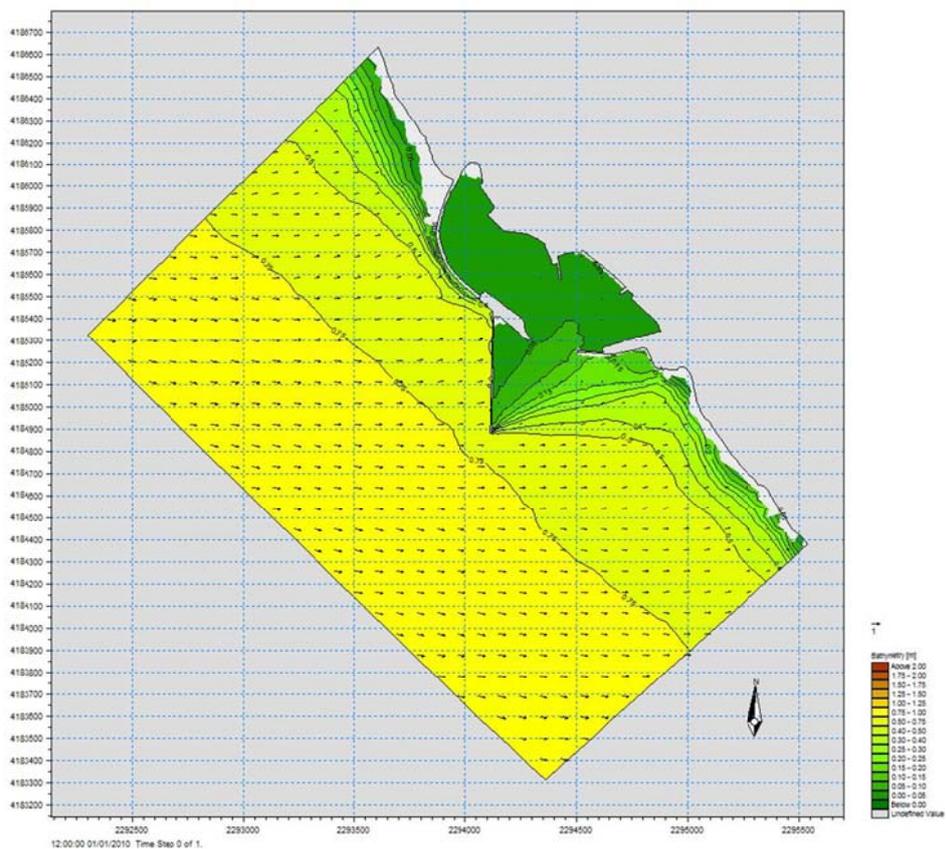


Figura 11 n – Andamento dell’onda dal settore 22 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

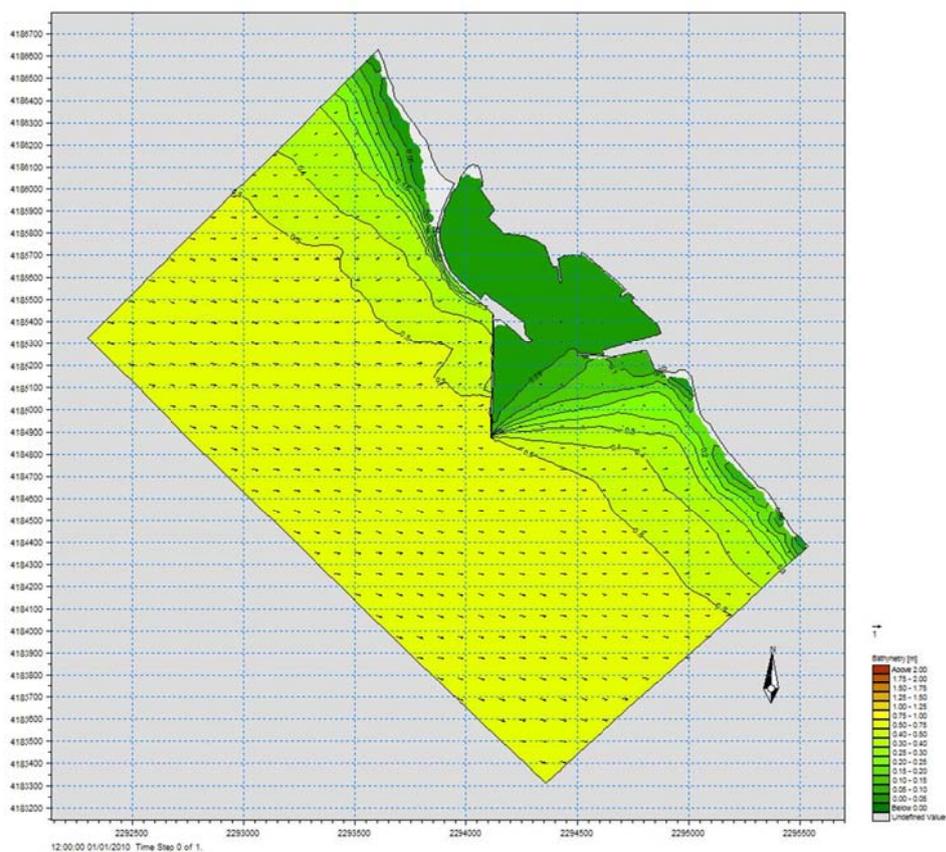


Figura 11 o – Andamento dell’onda dal settore 23 – modello SW – Clima medio annuo – Stato di fatto – Modello di dettaglio

Nelle Figura 12 a-o sono riportati i grafici che rappresentano per ogni direzione di onda i flussi della corrente lungoriva.

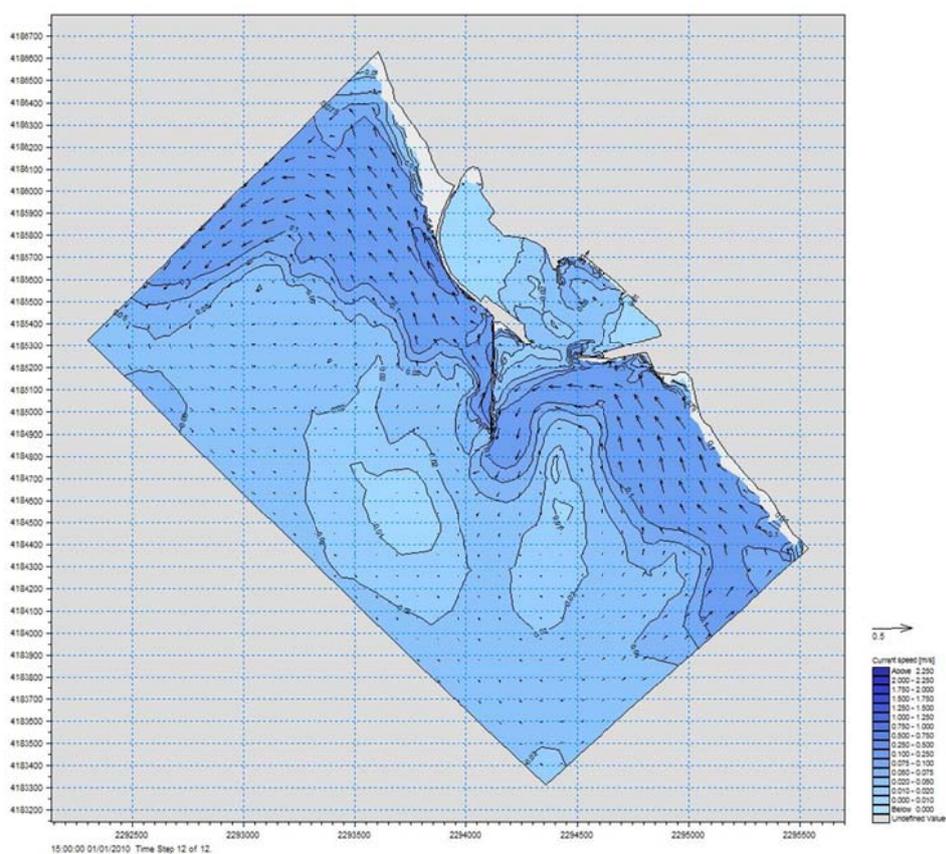


Figura 12 a – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 11 – Stato di fatto

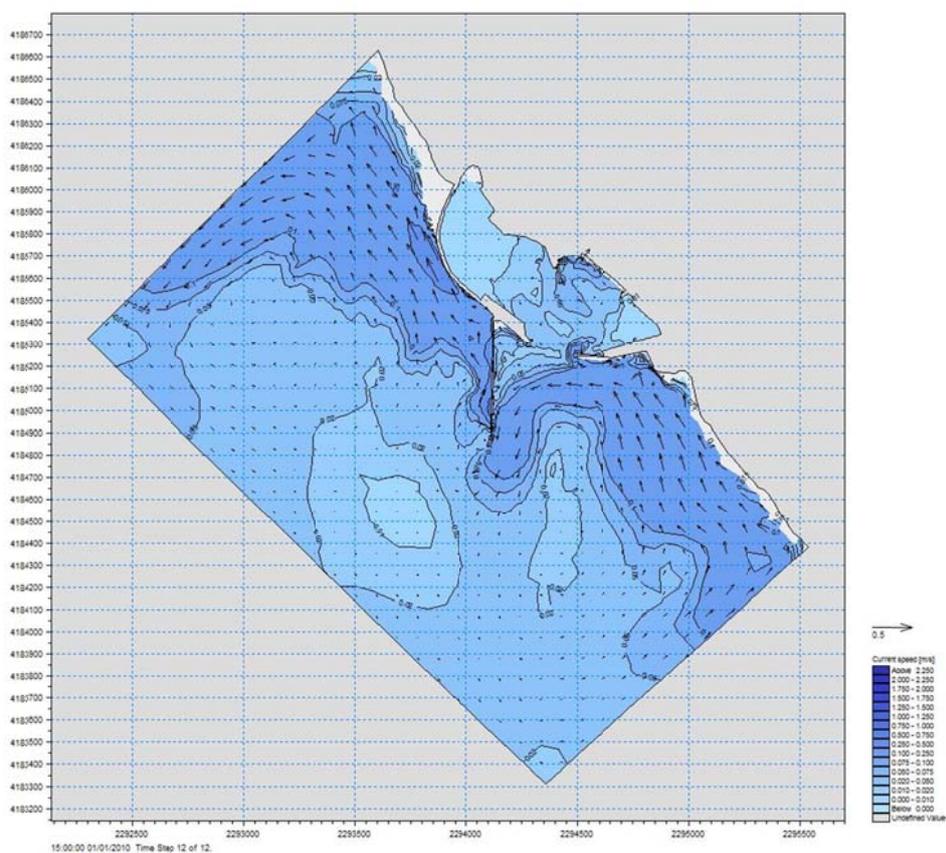


Figura 12 b – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 12 – Stato di fatto

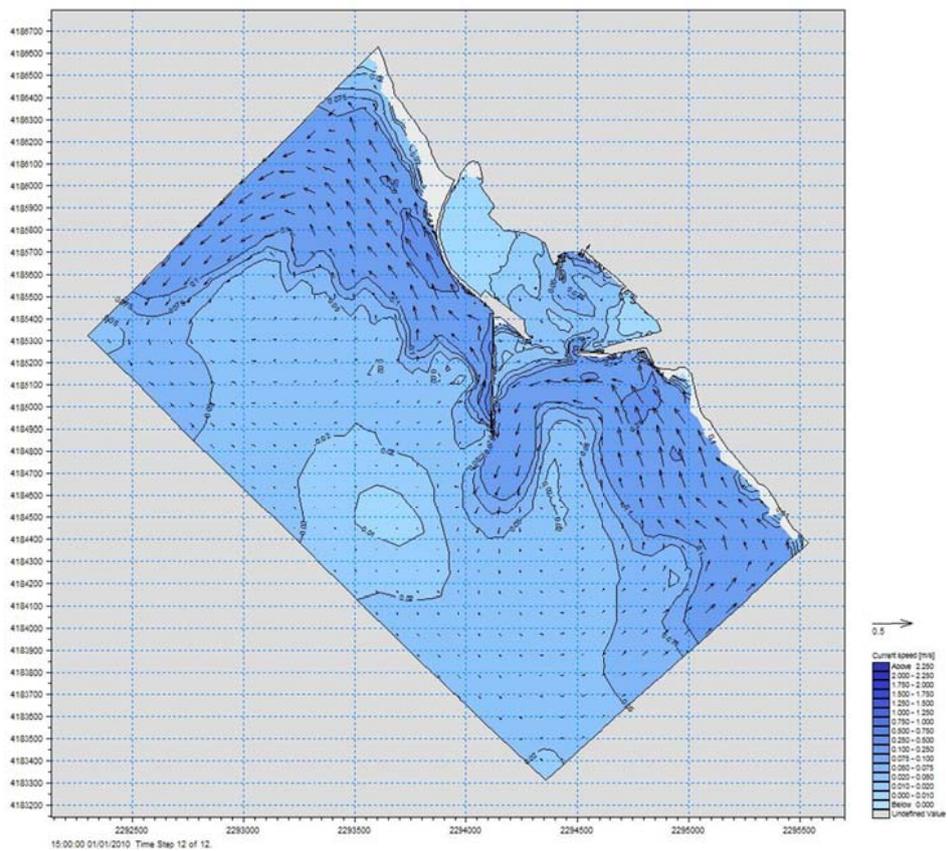


Figura 12 c – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 13 – Stato di fatto

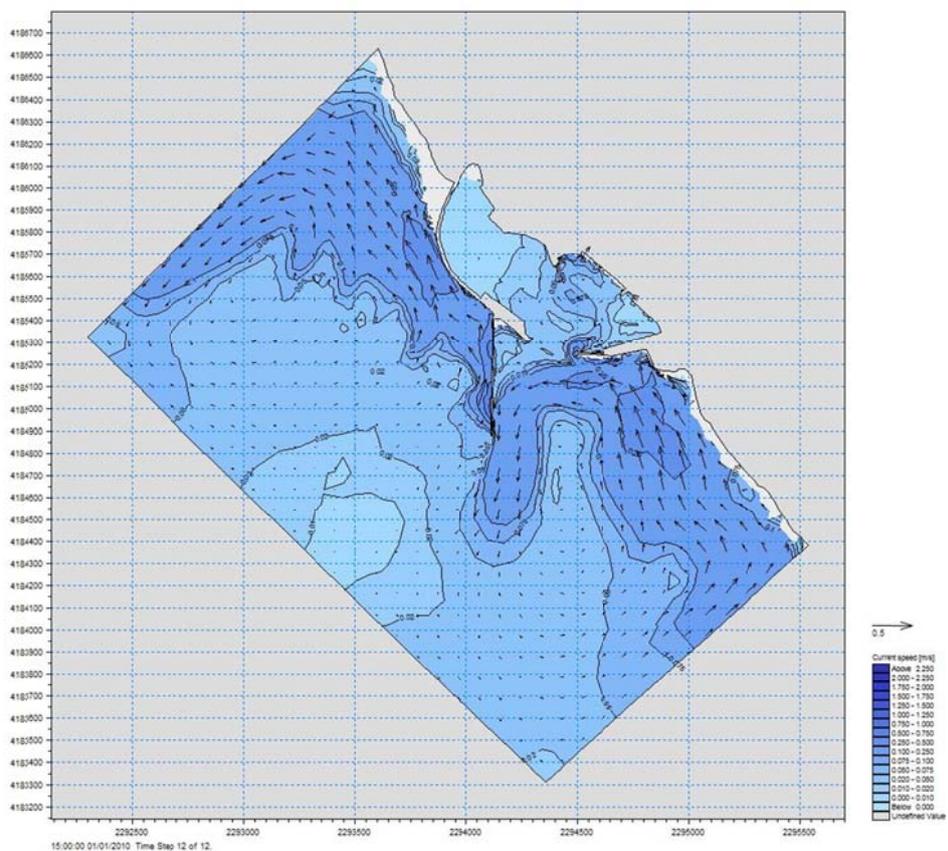


Figura 12 d – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 14 – Stato di fatto

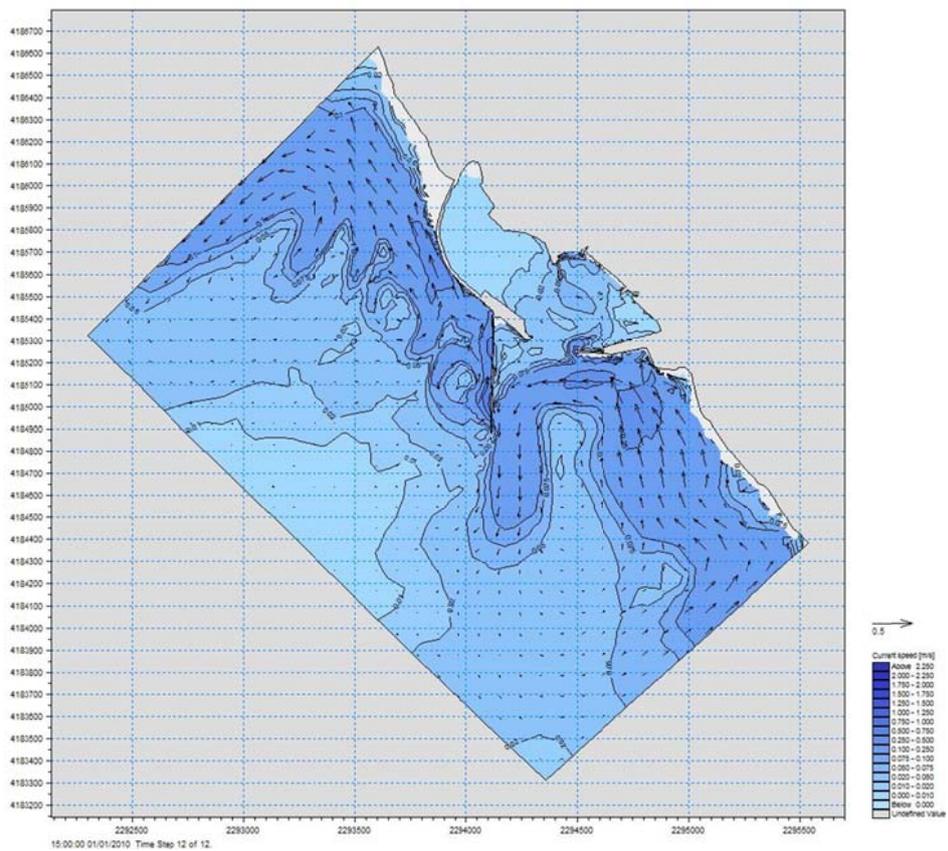


Figura 12 e – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 15 – Stato di fatto

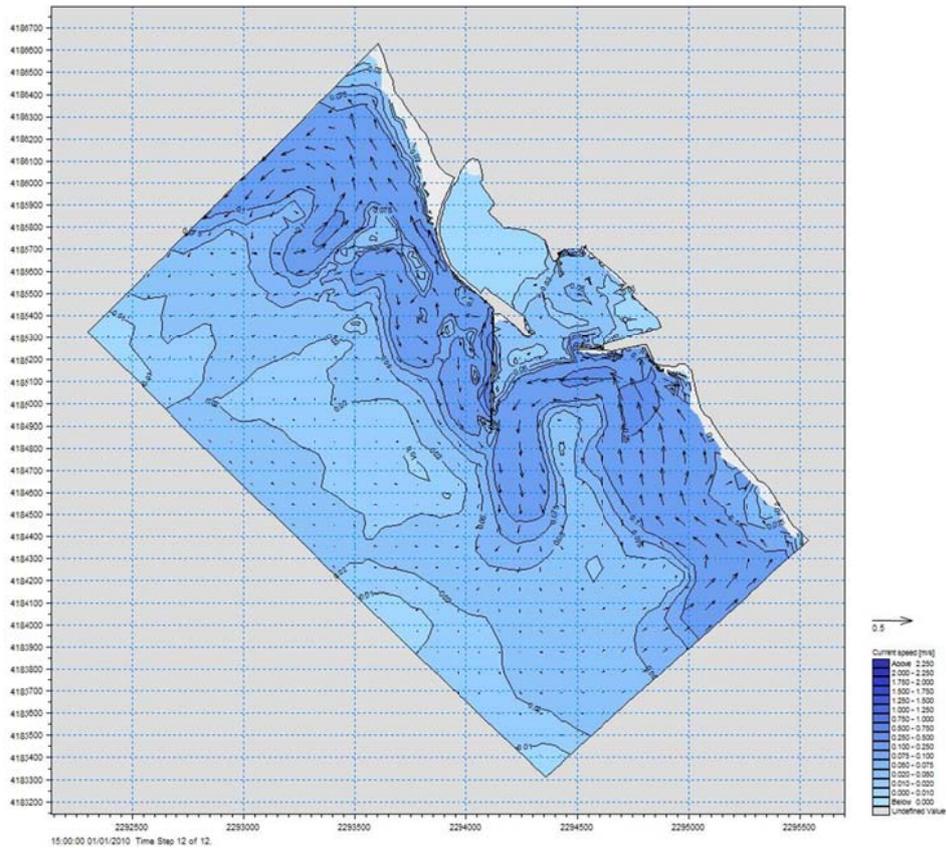


Figura 12 f – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 16 – Stato di fatto

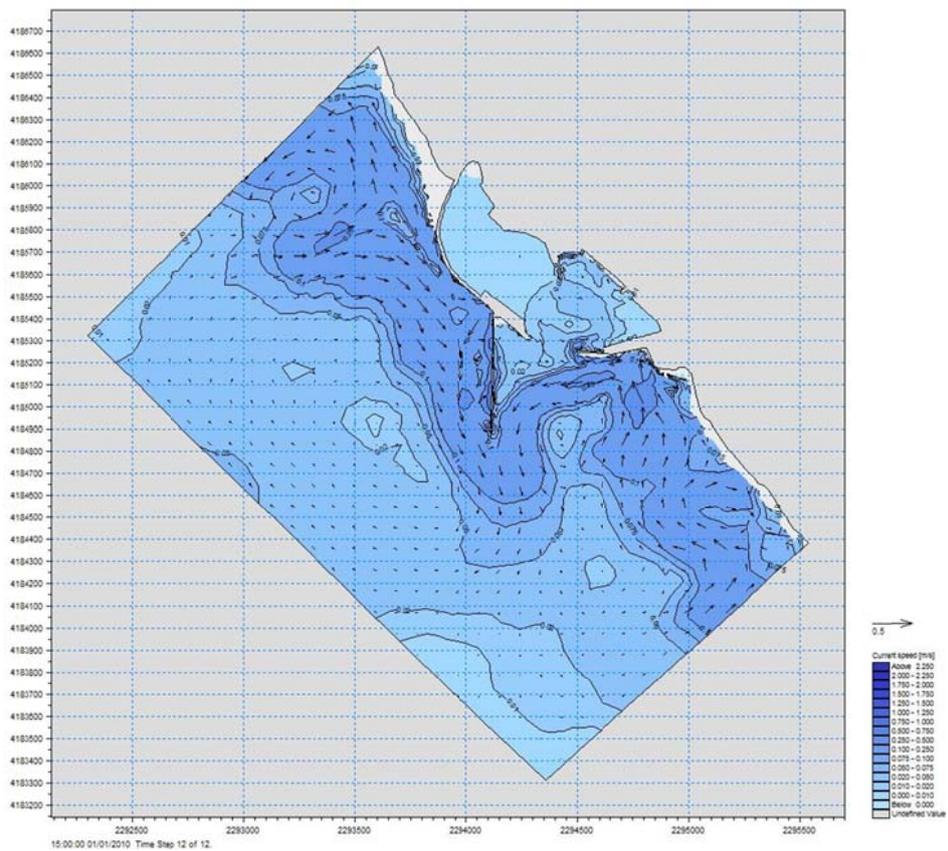


Figura 12 g – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 17 – Stato di fatto

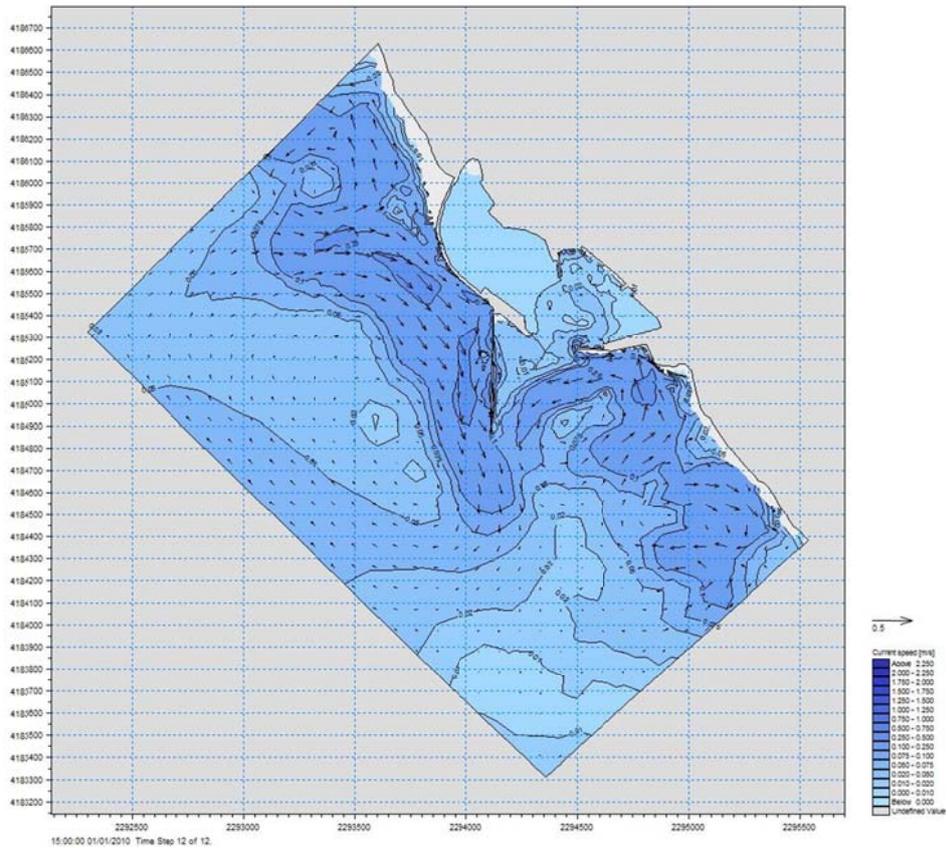


Figura 12 h – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 18 – Stato di fatto

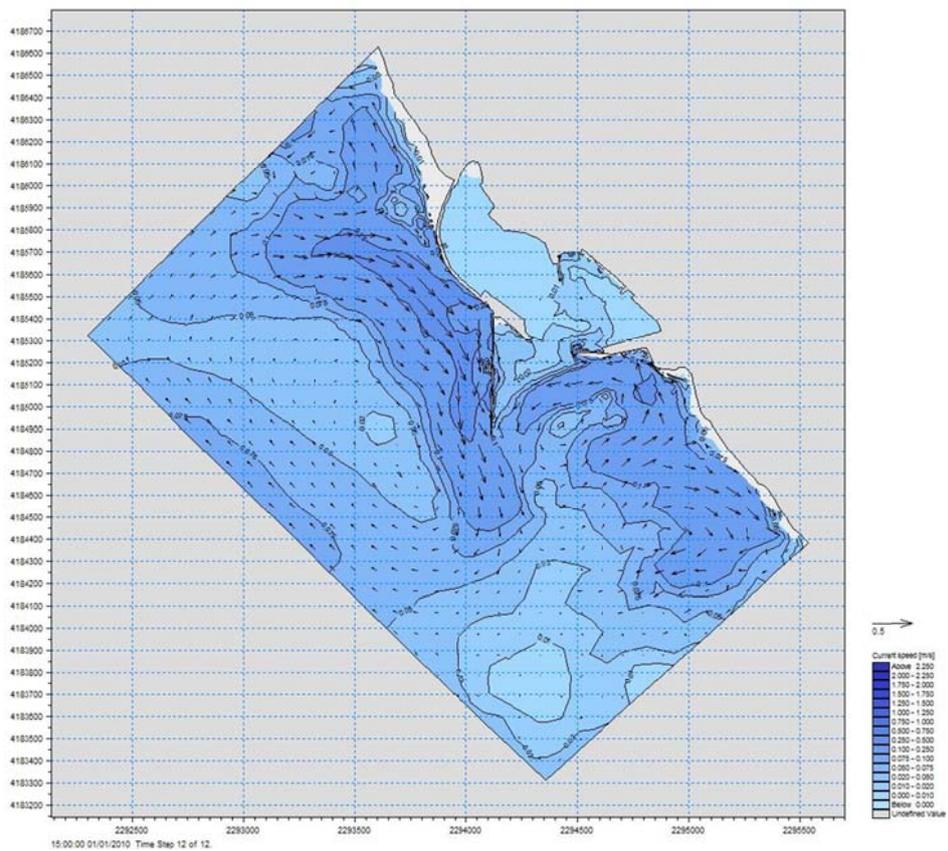


Figura 12 i – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 19 – Stato di fatto

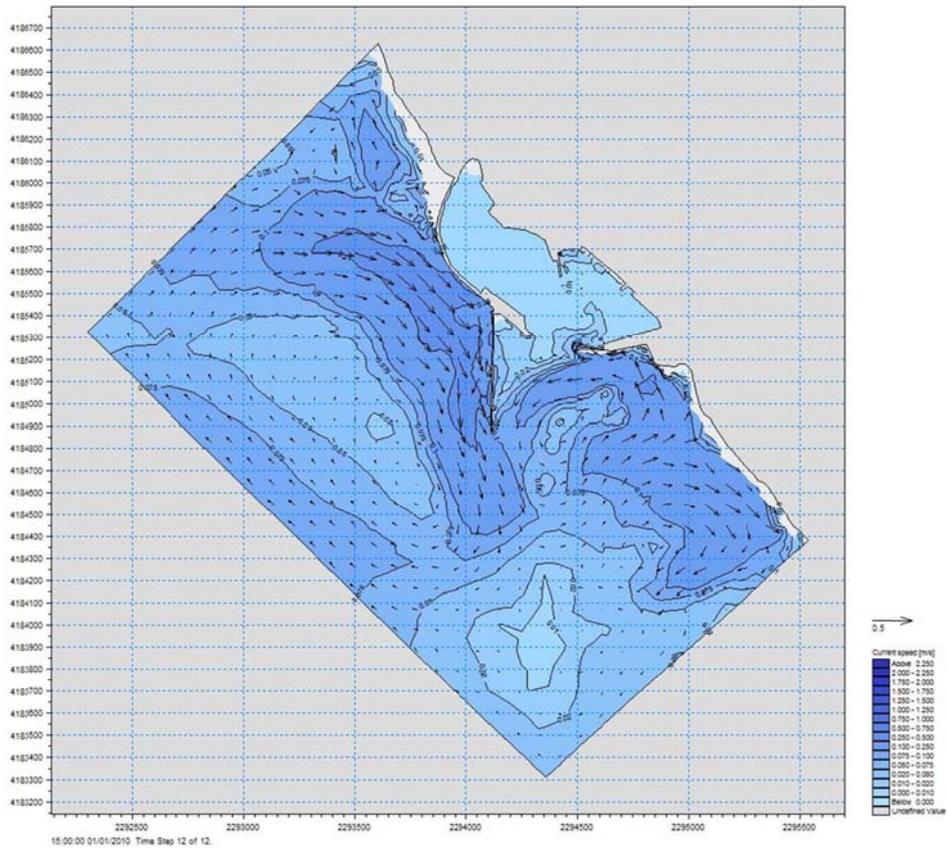


Figura 12 l – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 20 – Stato di fatto

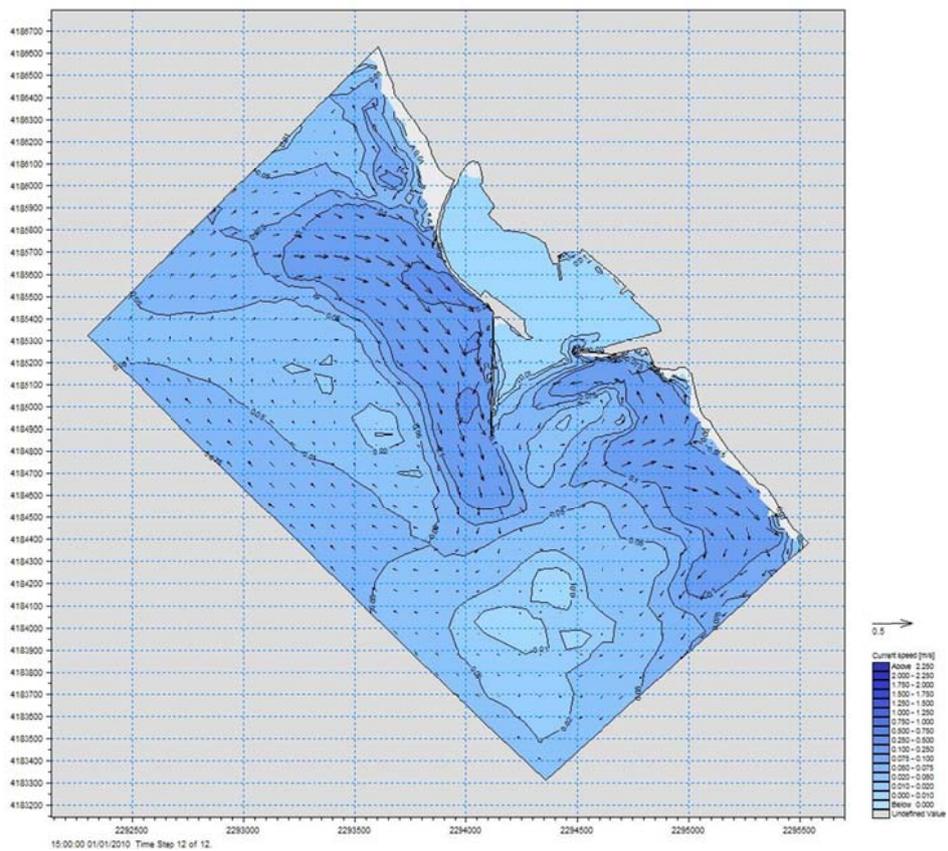


Figura 12m – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 21 – Stato di fatto

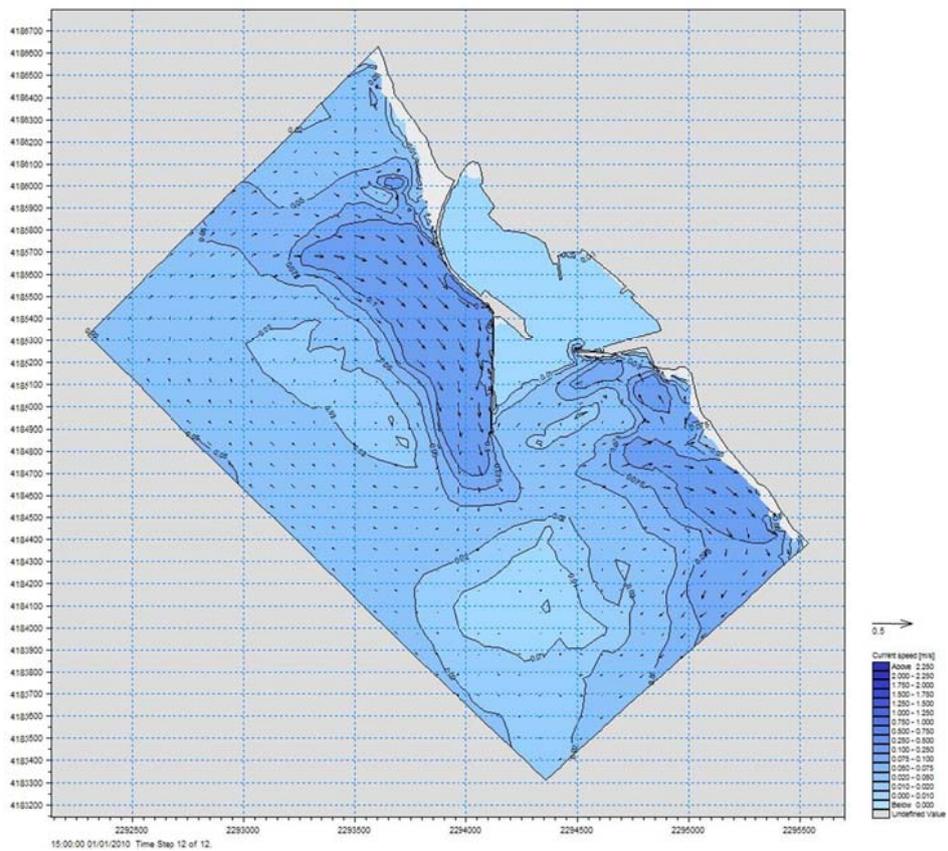


Figura 12 n – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 22 – Stato di fatto

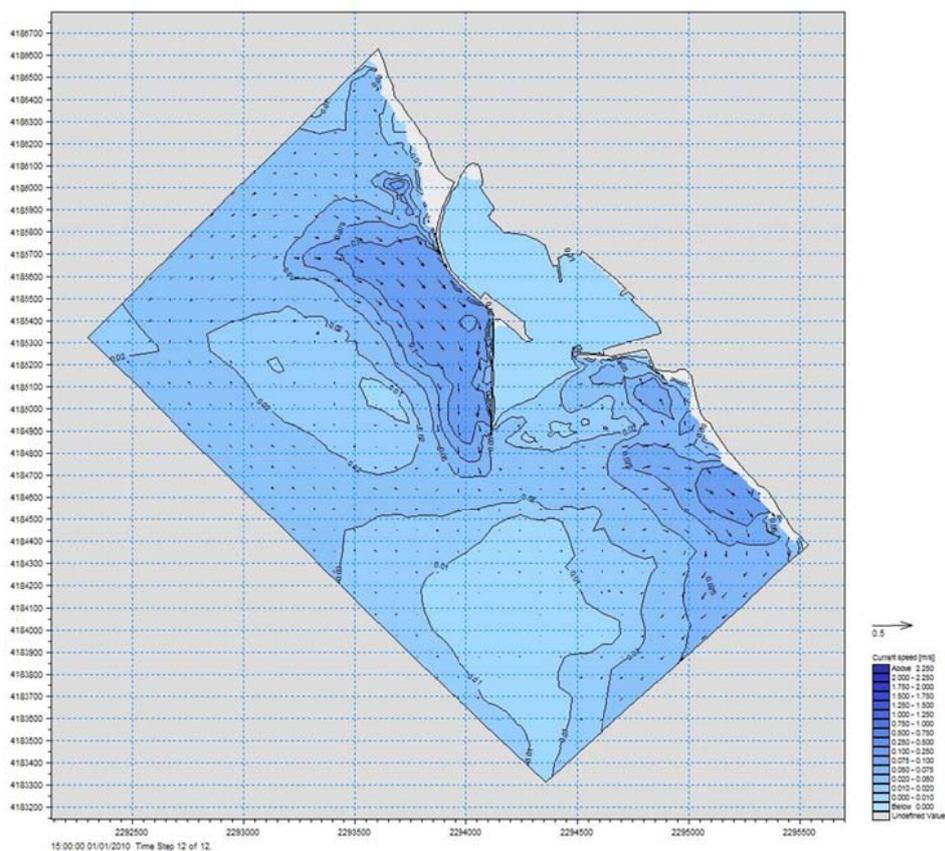


Figura 12 o – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 23 – Stato di fatto

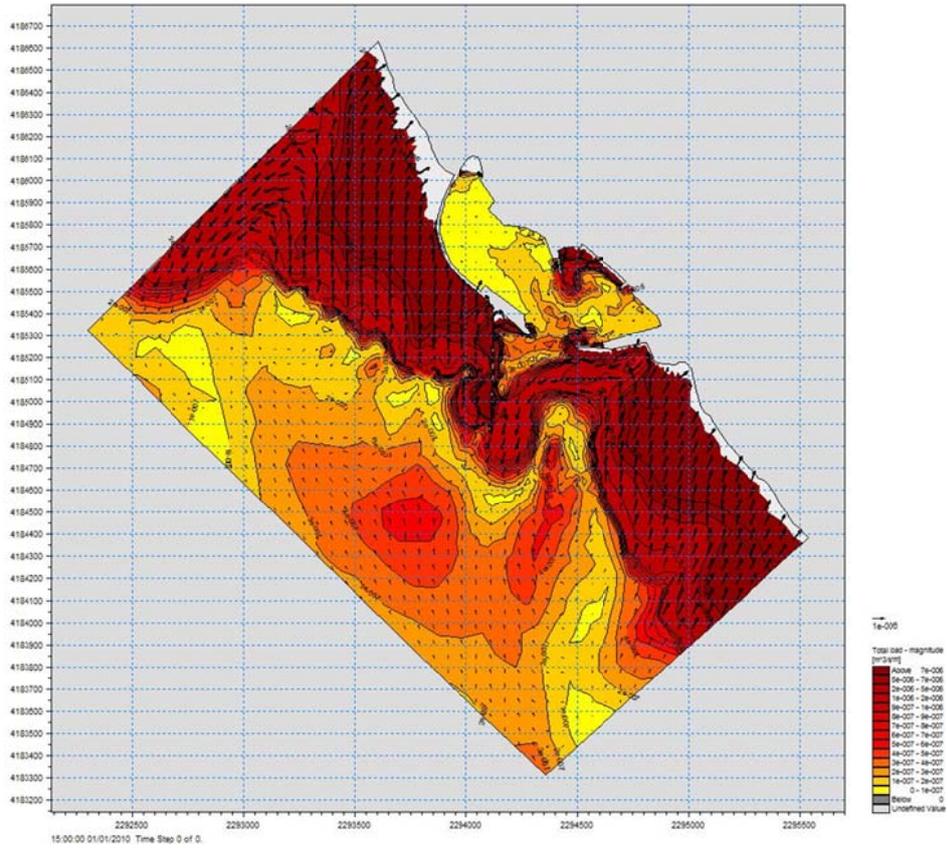
Dall'analisi dei risultati del modello idrodinamico dello stato di fatto si evince che per le onde provenienti dal 2° quadrante, settore 11 e 12, si ha una corrente che si posiziona parallelamente alla costa con intensità di circa 0.25 m/s e che per la conformazione del molo di levante viene indirizzata verso la testa del molo di ponente, cominciando a diminuire di intensità con possibili depositi di sedimento immediatamente fuori l'imboccatura del porto. Inoltre si ha una rapida diminuzione di velocità del flusso andando dal molo di levante verso l'insenatura compresa tra la diga sopraflutto e il molo colombo, creando un potenziale insabbiamento da verificare col modello ST. Per i settori 13 e 14 (Mezzogiorno-Libeccio) si ripete esattamente la dinamica riscontrata nei settori 11 e 12 ma il flusso risulta più intenso e quindi mantiene la stessa intensità fino a circa 500 m fuori dalla diga di ponente. Dopo comincia a diminuire e potenzialmente a depositare. I settori di Libeccio 15 e 16 presentano caratteristiche analoghe a quelli precedentemente descritti con la differenza che l'intensità cresce ancora e porta ad un rallentamento del flusso ancora più al largo. Per i settori 17 e 18 (Ponente-Libeccio) il flusso risulta uscente da Levante e da Ponente e si ricongiunge sulla testa delle diga di ponente per poi cominciare a rallentare a circa 500 m dalla punta della diga di ponente. Nel settore 19 e 20 (Ponente-Maestrale) la velocità del flusso lungo la diga di ponente si incrementa spingendo la corrente ben oltre la testa della diga, mentre lato levante il

flusso superata la testa del molo perde di intensità, e ciò potrebbe portare a un potenziale deposito di sedimenti all'interno dell'imboccatura. Nei settori 21 e 22 (Maestrale) accade la stessa tipologia di idrodinamica dei settori precedenti ma con intensità nettamente più basse, il che porta ad avere un rallentamento del flusso proveniente da ponente in prossimità della testa della diga di ponente, mentre lato levante il flusso è praticamente assente. L'ultimo settore indagato il 23 (Tramontana-Maestrale) presenta caratteristiche analoghe ai precedenti ma con intensità minori, il che comporta un rallentamento brusco del flusso della corrente non appena questa si stacca dalla testa del molo di ponente, provocando un potenziale insabbiamento della testa.

L'analisi dei flussi è indispensabile per il successivo studio del trasporto solido, considerando che flussi elevati al largo non implicano necessariamente trasporti di notevole entità in quanto le azioni devono essere riportate sul fondo e si attenuano con l'aumentare della profondità. Flussi modesti in corrispondenza della riva possono provocare viceversa erosioni o apporti di materiale significativi per l'andamento della linea di costa.

Ottenuti i valori di flusso dal modello idrodinamico, si possono determinare i valori relativi al trasporto solido mediante l'applicazione del modello ST. Per ogni onda si sono valutati i valori medi delle portate solide espresse in mc/yr/m nelle due direzioni ottenendo le mappe della capacità di trasporto. Si tratta ovviamente di un'analisi qualitativa della capacità del trasporto nelle varie direzioni che permette di individuare per quale condizione la costa è maggiormente esposta.

Nelle Figura 13 a-o si riportano le capacità di trasporto per tutti i settori.



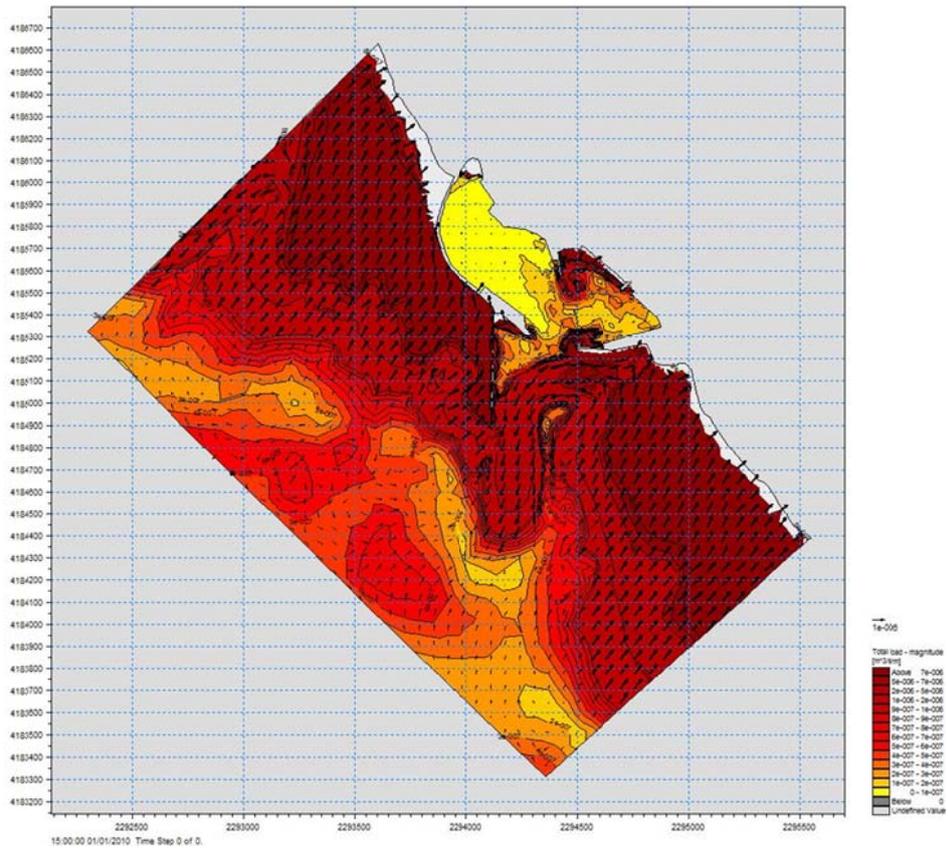


Figura 13 e – Capacità di trasporto onda settore 15

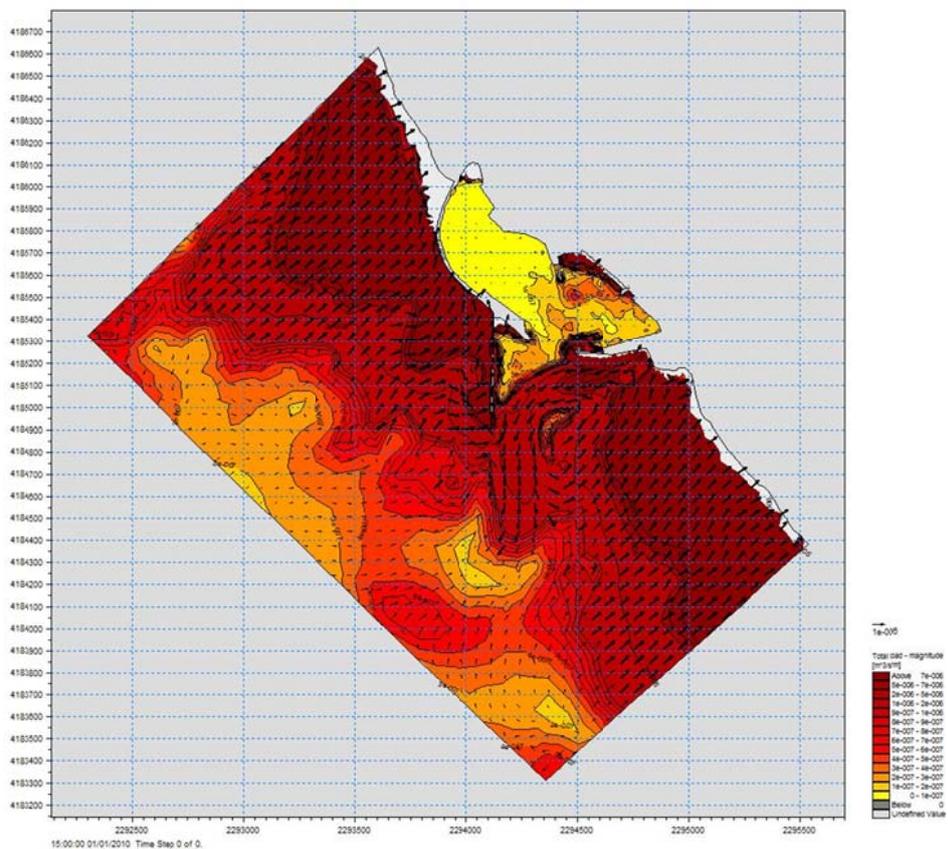


Figura 13 f – Capacità di trasporto onda settore 16

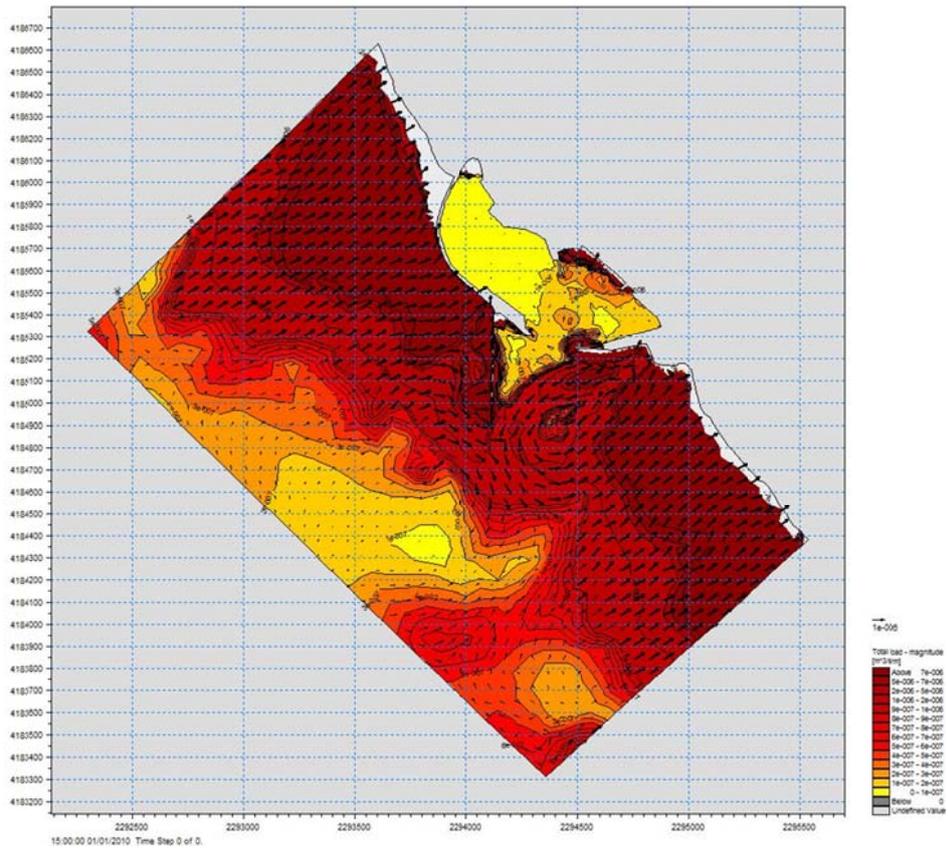


Figura 13 g – Capacità di trasporto onda settore 17

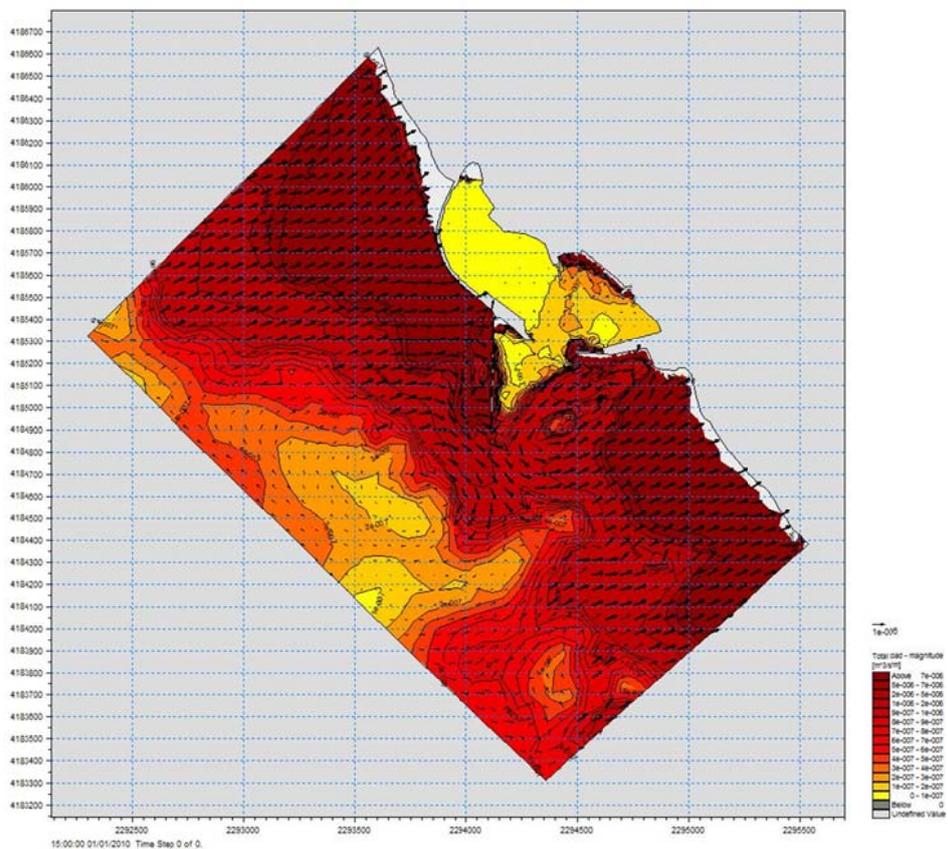


Figura 13 h – Capacità di trasporto onda settore 18

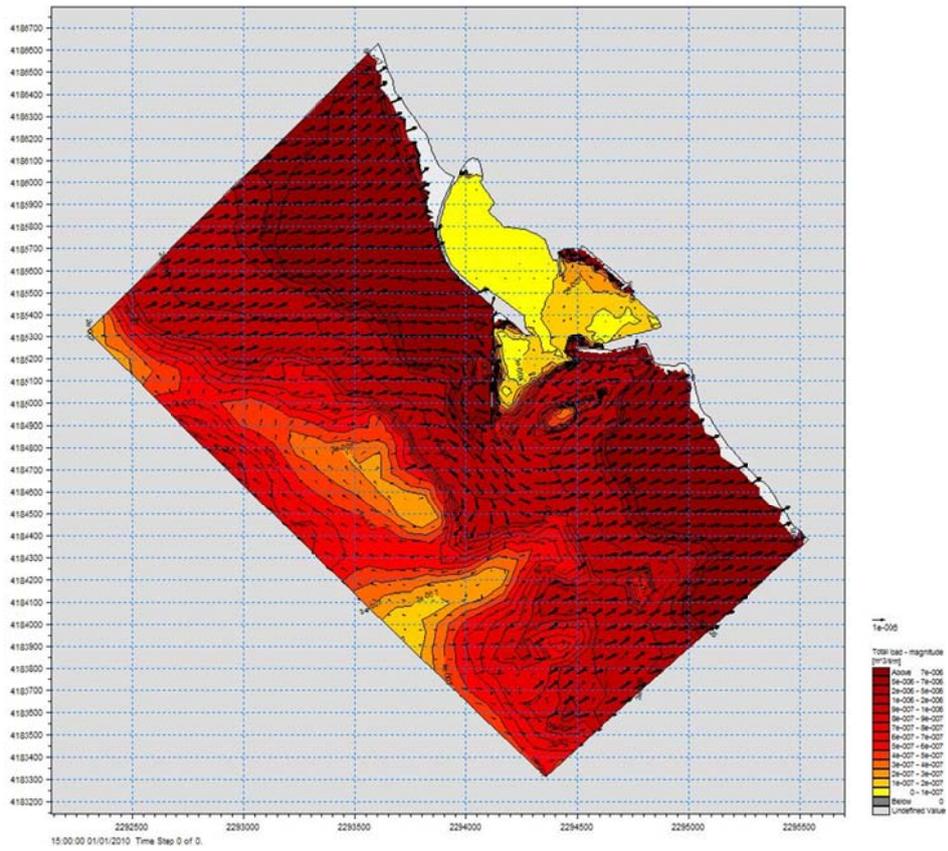


Figura 13 i – Capacità di trasporto onda settore 19

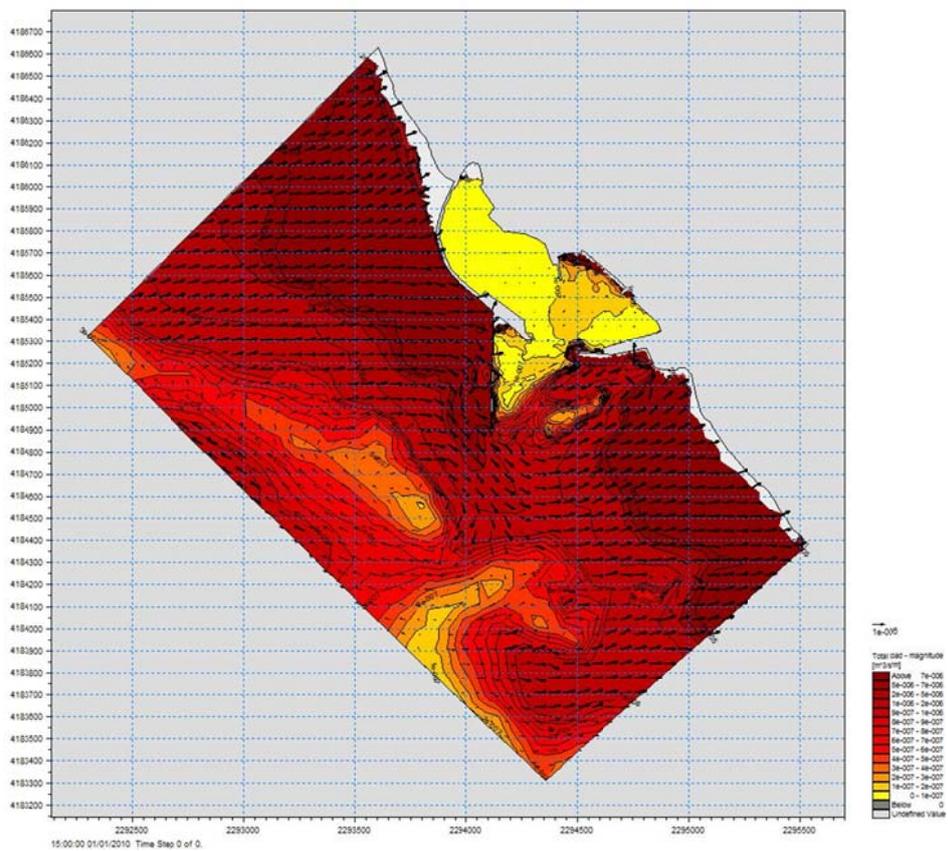


Figura 13 l – Capacità di trasporto onda settore 20

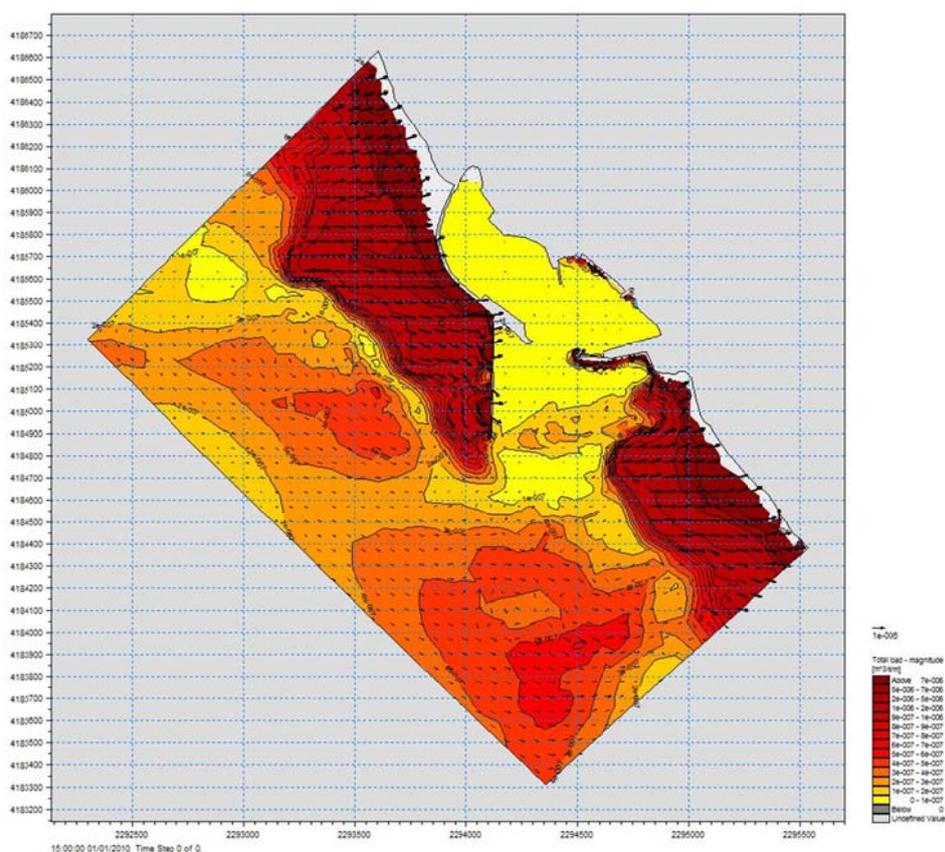


Figura 13 o – Capacità di trasporto onda settore 23

Dall'analisi della capacità di trasporto dello stato di fatto si evince che per i settori che vanno dall'11 al 16 (Scirocco-Libeccio) la capacità di trasporto rispecchia esattamente i flussi generati dal modello idrodinamico. In particolare procedendo da Scirocco verso Levante si ha un incremento della capacità di trasporto che porta i sedimenti dalla testa del molo di Levante verso la testa del molo di Ponente, creando deposito in prossimità della testa del molo di ponente in un'area compresa tra 200 m e 600 m. All'interno della diga di ponente si ha un forte rallentamento della capacità di trasporto e quindi un forte deposito di sedimento a ridosso del molo.

Per i settori 17, 18, 19 e 20 (Libeccio-Maestrale) si viene a creare una forte capacità di trasporto sul lato esterno del molo di Ponente che porta i sedimenti al largo dello stesso ad una distanza variabile da 600m a 1000 m rispetto alla testa del molo. A Levante si viene a creare un vortice che perde di intensità in corrispondenza della congiungente le teste degli attuali moli, creando in questa zona un deposito di materiale.

Per i settori 21, 22 e 23 (Maestrale-Tramontana) la capacità di trasporto proveniente da ponente verso levante riesce a oltrepassare la testa del molo di Ponente subendo però un forte rallentamento e quindi un deposito nella fascia antistante la testa del molo di Ponente in direzione perpendicolare al molo stesso.

Occorre ricordare che i grafici precedenti mostrano una capacità di trasporto potenziale che deve essere confermata dal peso dell'onda che la produce rispetto al clima ondoso preso in esame. I valori di pesatura delle onde sono desunti dalla Tabella 4, per cui applicando tali valori alle capacità di trasporto ottenute per i vari settori si ottiene la capacità di trasporto pesata per il clima ondoso preso in esame.

Nella Figura 14 si riporta l'integrazione di tutto il moto ondoso preso in esame pesato in funzione delle frequenze del moto ondoso stesso per i vari settori di provenienza.

L'integrazione ci mostra che il trasporto prevalente è in direzione da Ovest verso Est. In particolare si nota che i vettori della capacità di trasporto diminuiscono fortemente in testa al molo di Ponente creando un potenziale deposito nella zona antistante la testa del molo. Inoltre si fa notare che nella condizione attuale si instaura una forte capacità di trasporto nella zona della scogliera e della spiaggetta interna che porta ad un successivo deposito nella zona antistante il molo di Levante e nella zona in cui sono posizionati attualmente i pontili per la nautica da diporto.

SETTORE	FREQUENZA
11	0.092
12	0.063
13	0.048
14	0.041
15	0.036
16	0.033
17	0.037
18	0.063
19	0.180
20	0.214
21	0.113
22	0.051
23	0.023

Tabella 4 – Fattori di pesatura per le onde provenienti dai settori in esame

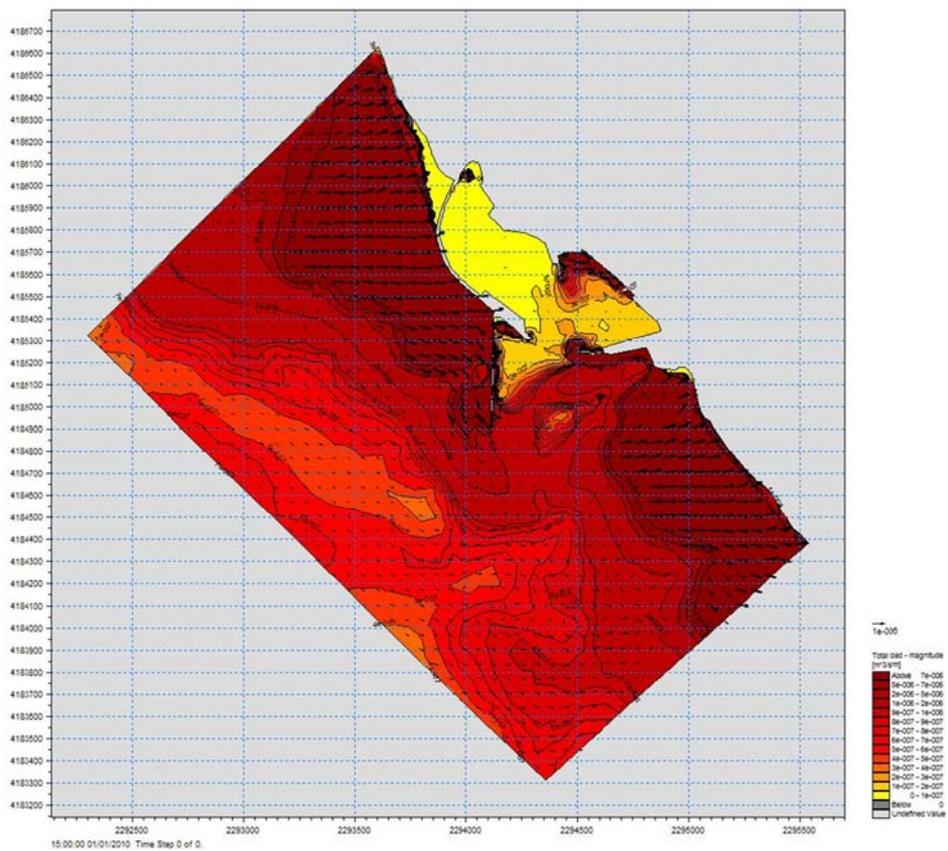


Figura 14 – Capacità di trasporto per tutte le onde pesate

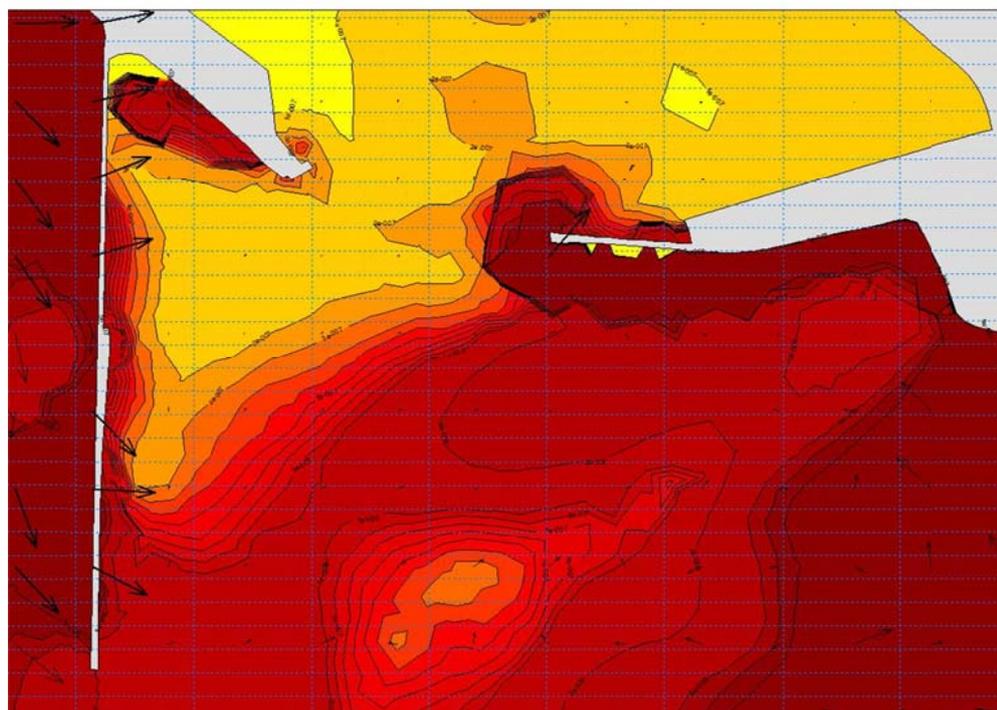


Figura 15 – Capacità di trasporto per tutte le onde pesate in prossimità dell'imboccatura

2.4. TRASPORTO SOLIDO DI PROGETTO

Il confronto tra lo stato di fatto e la soluzione progettuale in termini di trasporto solido, consente di prevedere le modificazioni di dinamica litoranea per effetto della costruzione delle nuove opere.

2.4.1. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI DI PROGETTO

Come già detto in precedenza, e come già fatto per gli eventi estremi, ai fini dell'applicazione dei modelli è stata costruita una batimetria che per la parte più vicina alla linea di costa è una batimetria di dettaglio ricavata da un rilievo batimetrico, mentre per la parte più a largo è stata ricavata dalle carte nautiche della zona.

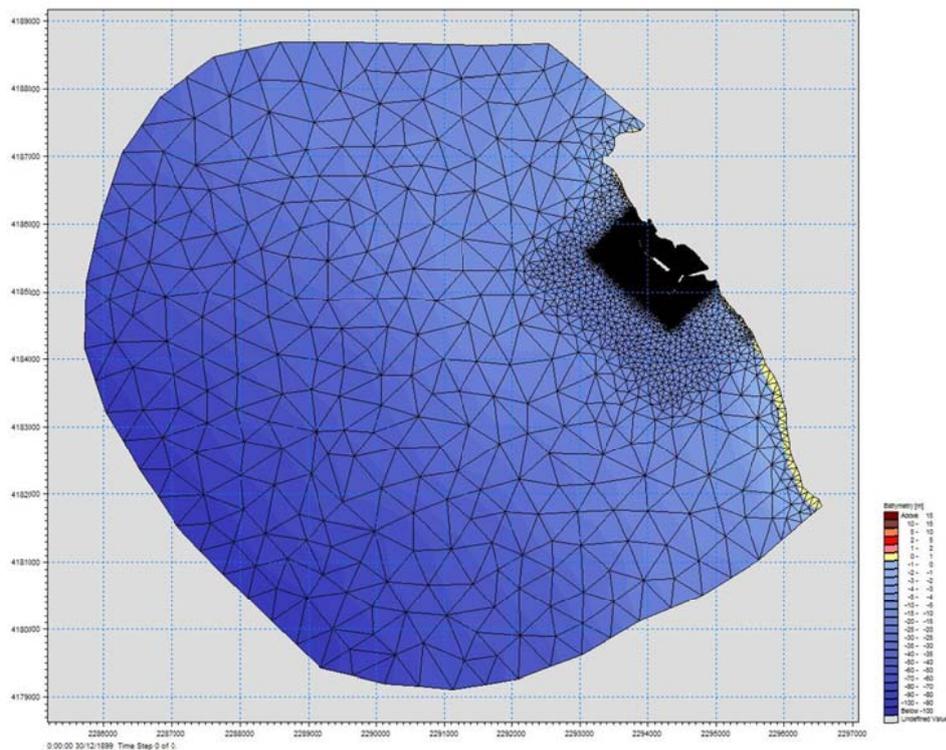


Figura 16 a – Mesh modello di largo – Progetto

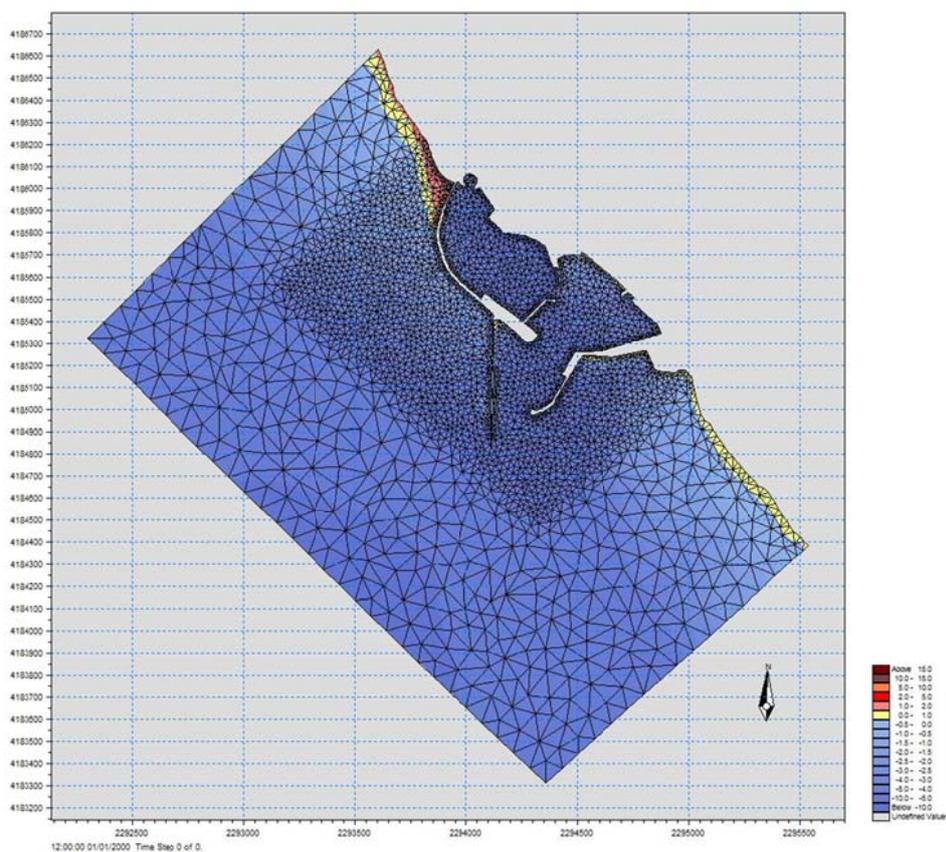


Figura 16 b – Mesh modello di dettaglio - Progetto

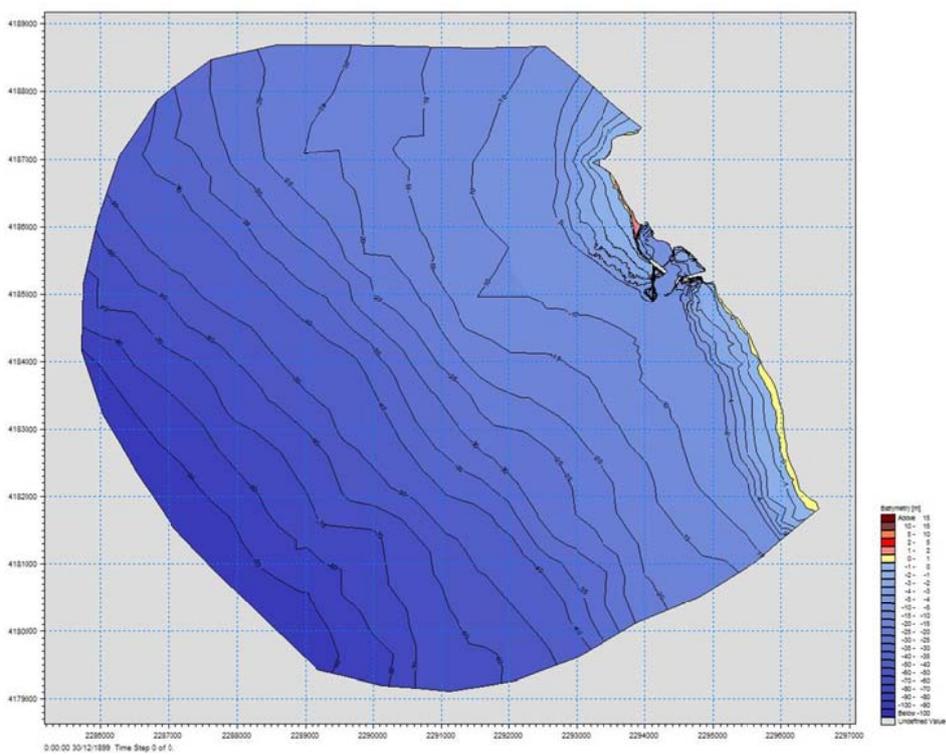


Figura 16 c – Batimetria modello di largo

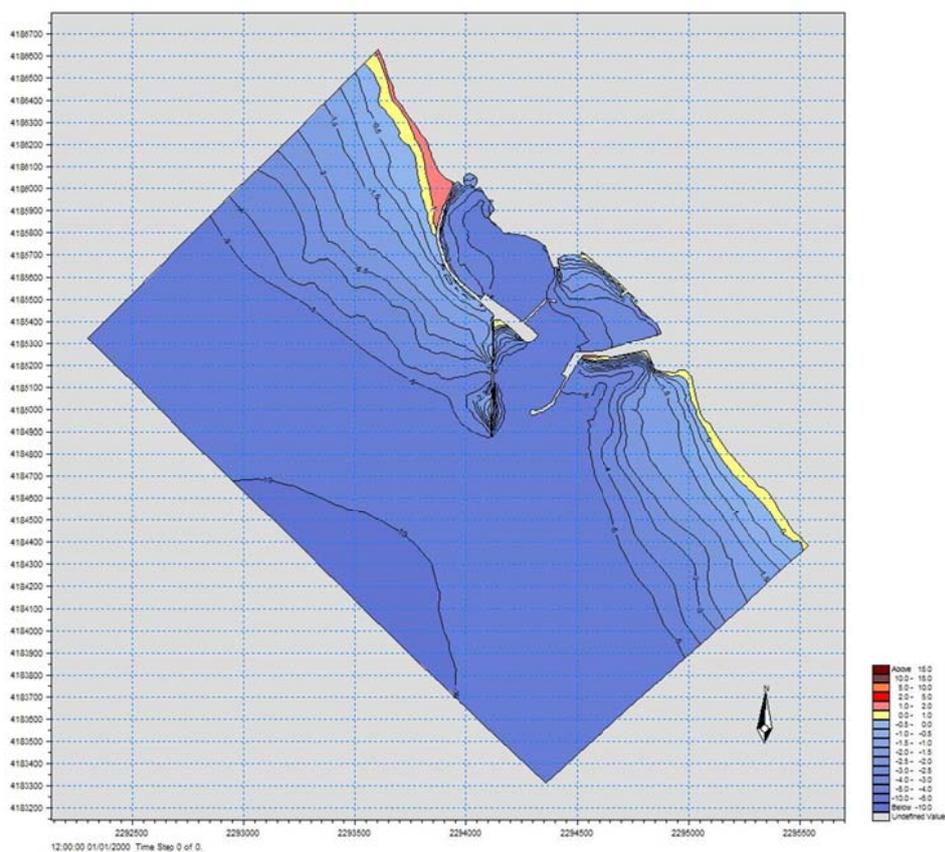


Figura 16 d– Batimetria modello di dettaglio

Come fatto in precedenza si è determinato il clima ondoso sotto costa applicando il modello SW per i settori di traversia compresi dal 11 al 23 in cui le onde di input sono quelle del clima ondoso medio annuo determinato nel paragrafo 1.10.

Ottenute le onde sotto costa si è passati all'applicazione del modello idrodinamico (MIKE 21 HD) che calcola le correnti litoranee utilizzando i dati delle analisi svolte in precedenza.

Le tensioni sul fondo in termini di *radiation stress* sono determinate dalle onde al frangimento obliquo dell'onda per cui si utilizzano come input i dati di onda provenienti dal modello di dettaglio SW.

Nelle figure seguenti sono riportati i grafici che rappresentano per ogni direzione di onda i risultati del modulo SW.

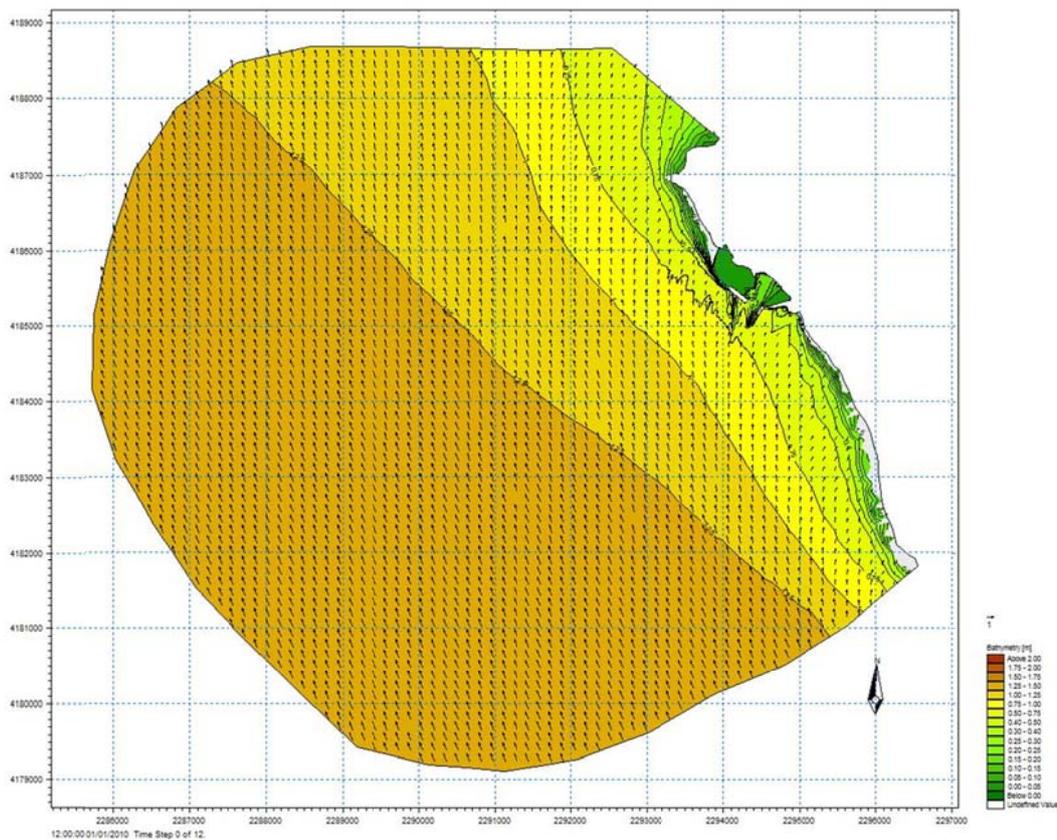


Figura 17 a - Andamento dell'onda dal settore 11 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

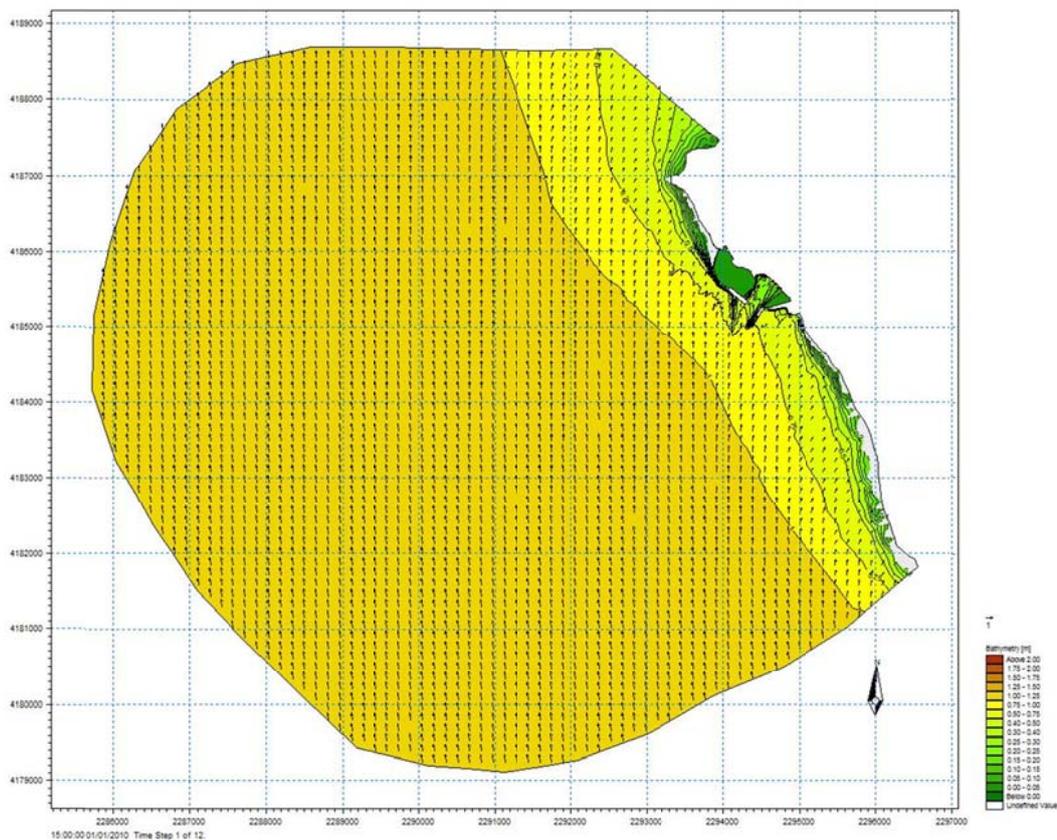


Figura 17 b - Andamento dell'onda dal settore 12 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

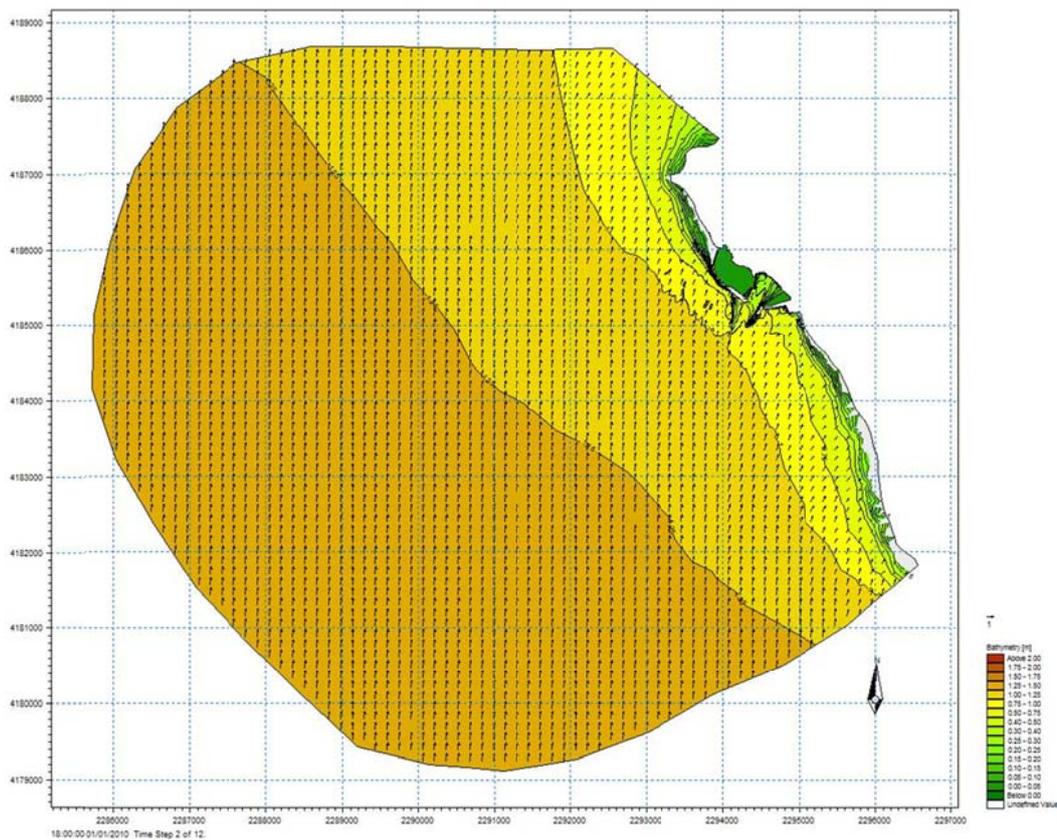


Figura 17 c - Andamento dell'onda dal settore 13 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

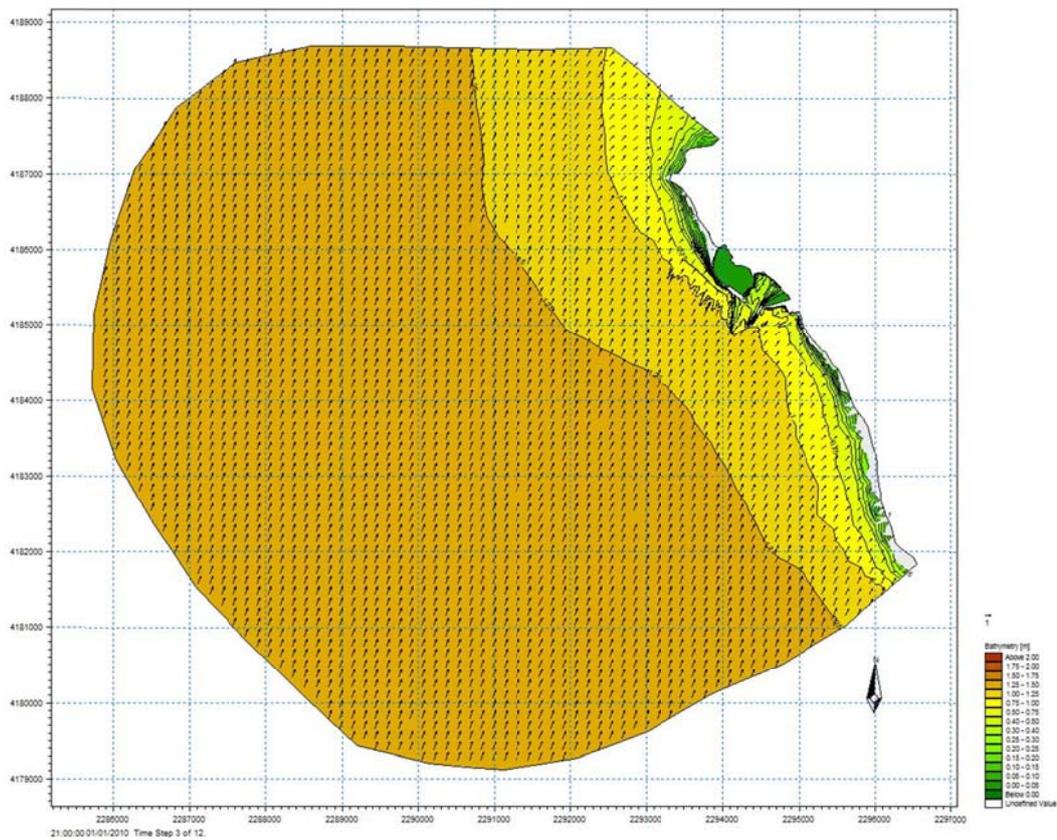


Figura 17 d - Andamento dell'onda dal settore 14 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

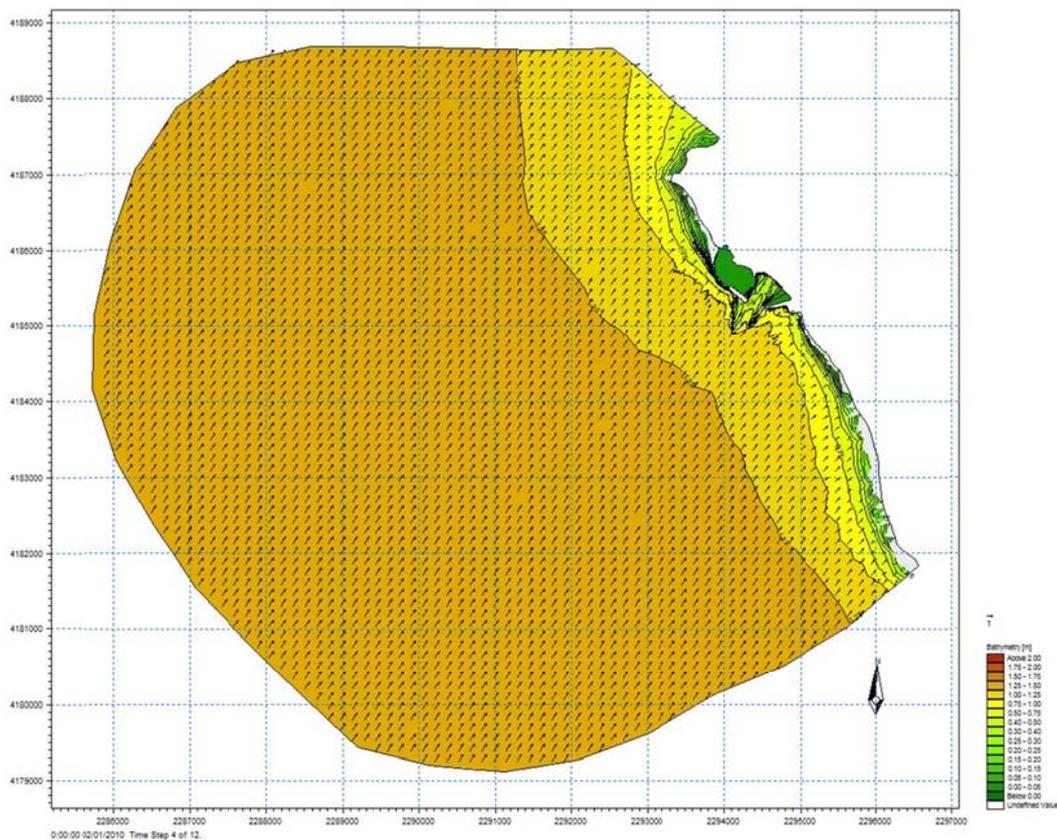


Figura 17 e - Andamento dell'onda dal settore 15 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

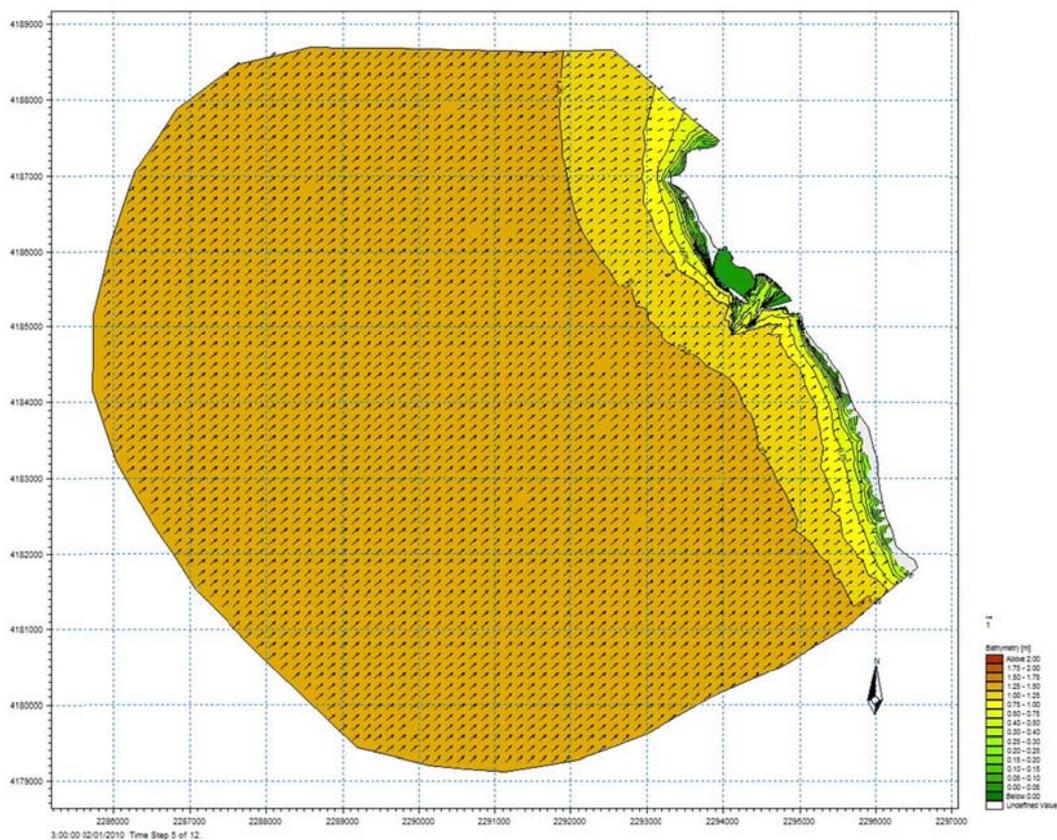


Figura 17 f - Andamento dell'onda dal settore 16 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

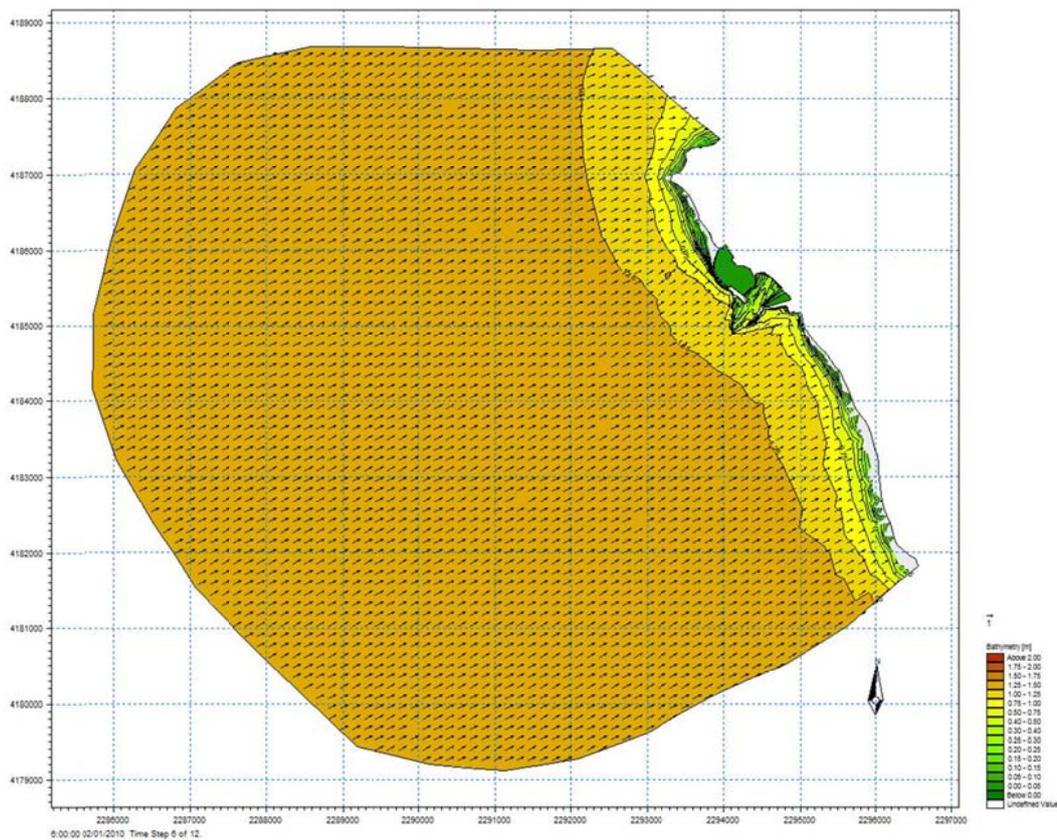


Figura 17 g - Andamento dell'onda dal settore 17 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

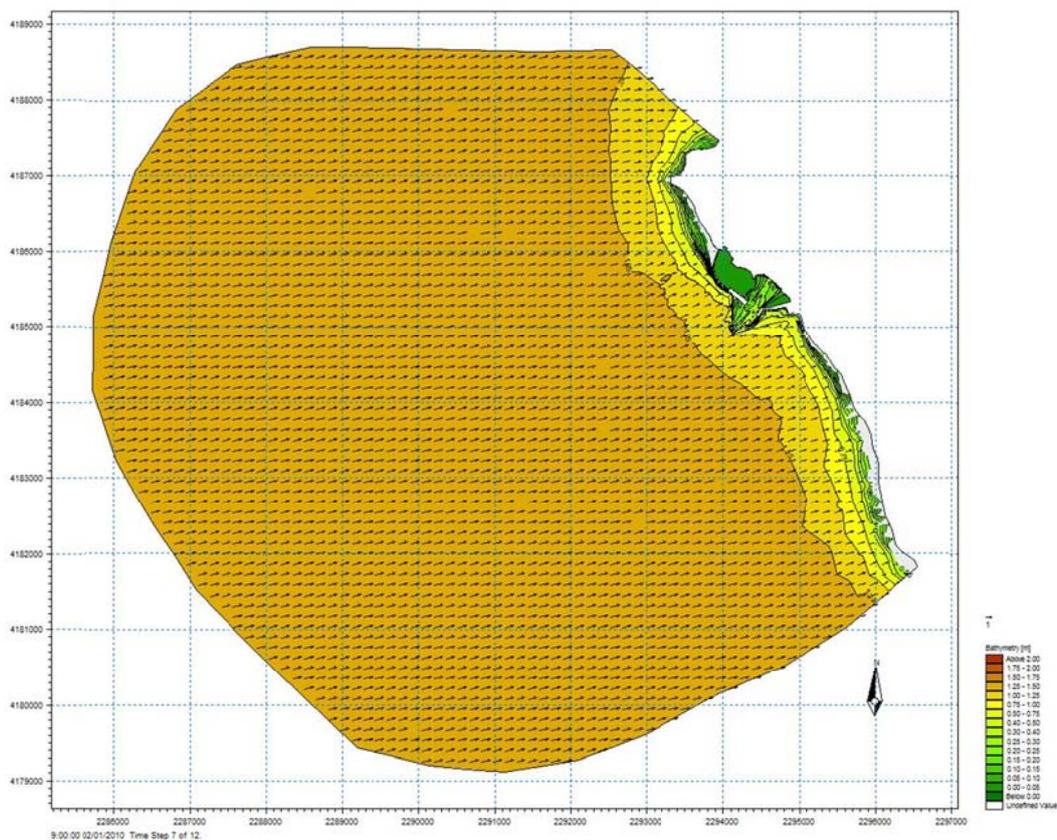


Figura 17 h - Andamento dell'onda dal settore 18 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

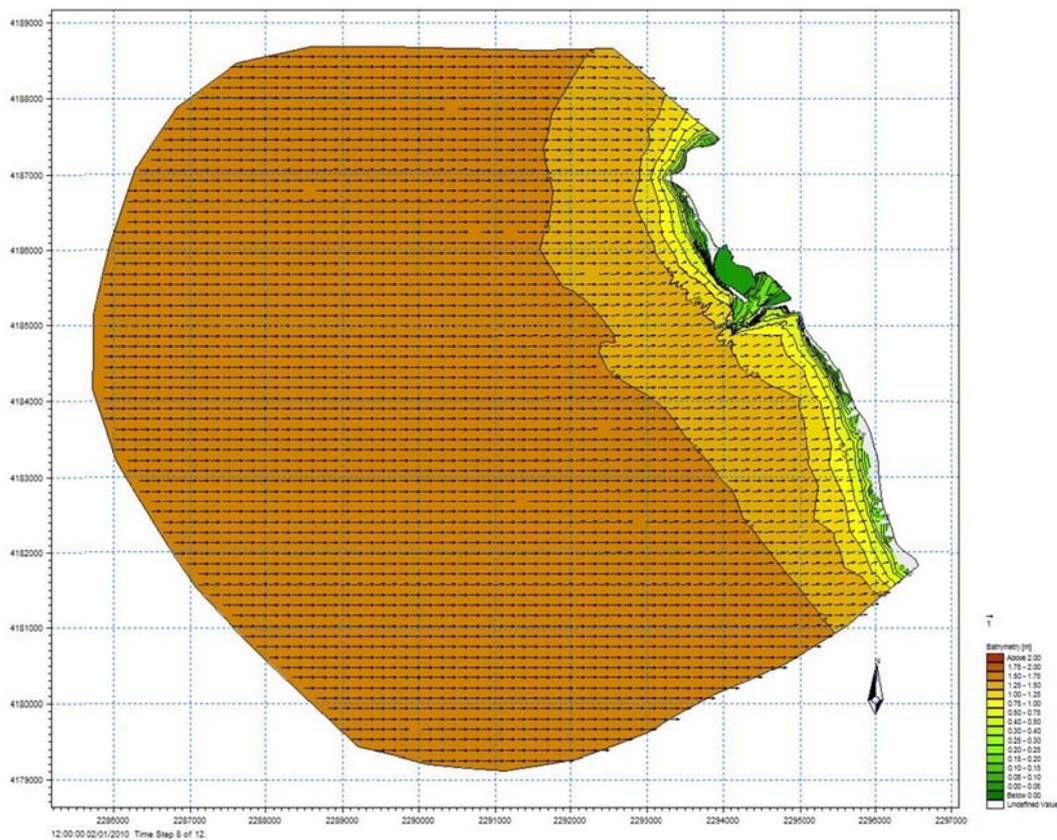


Figura 17 i - Andamento dell'onda dal settore 19 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

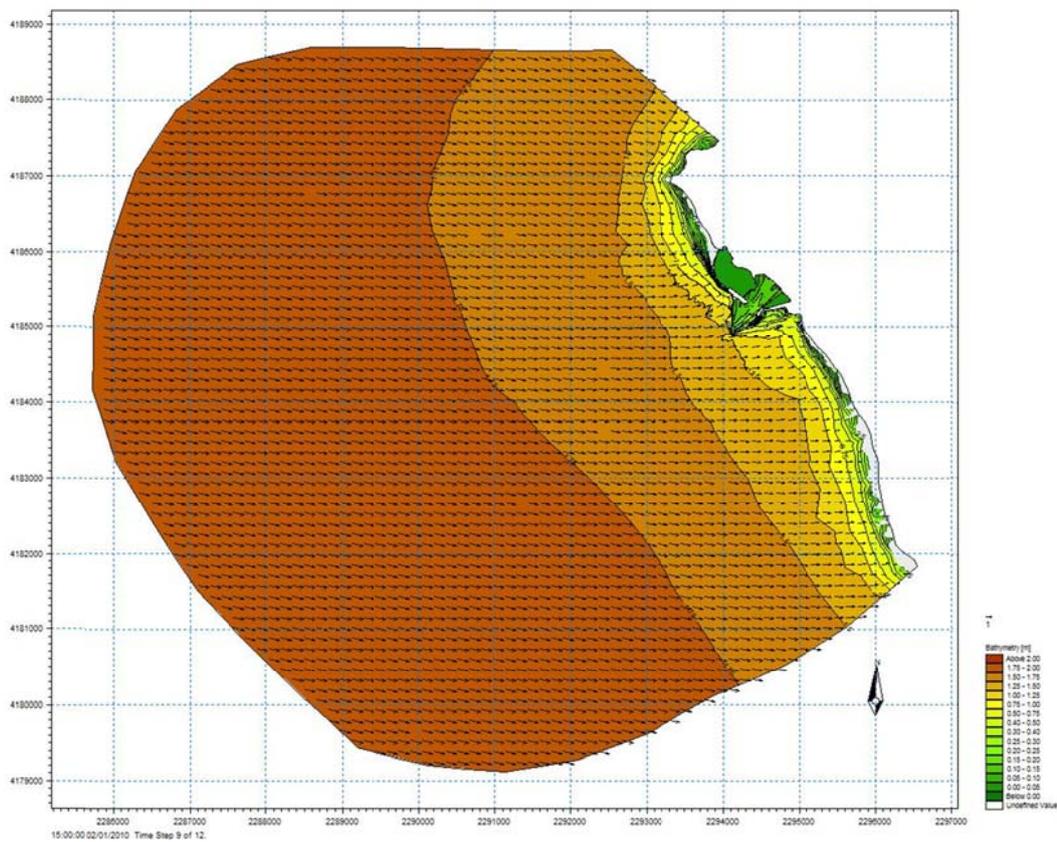


Figura 17 l - Andamento dell'onda dal settore 20 – modello – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

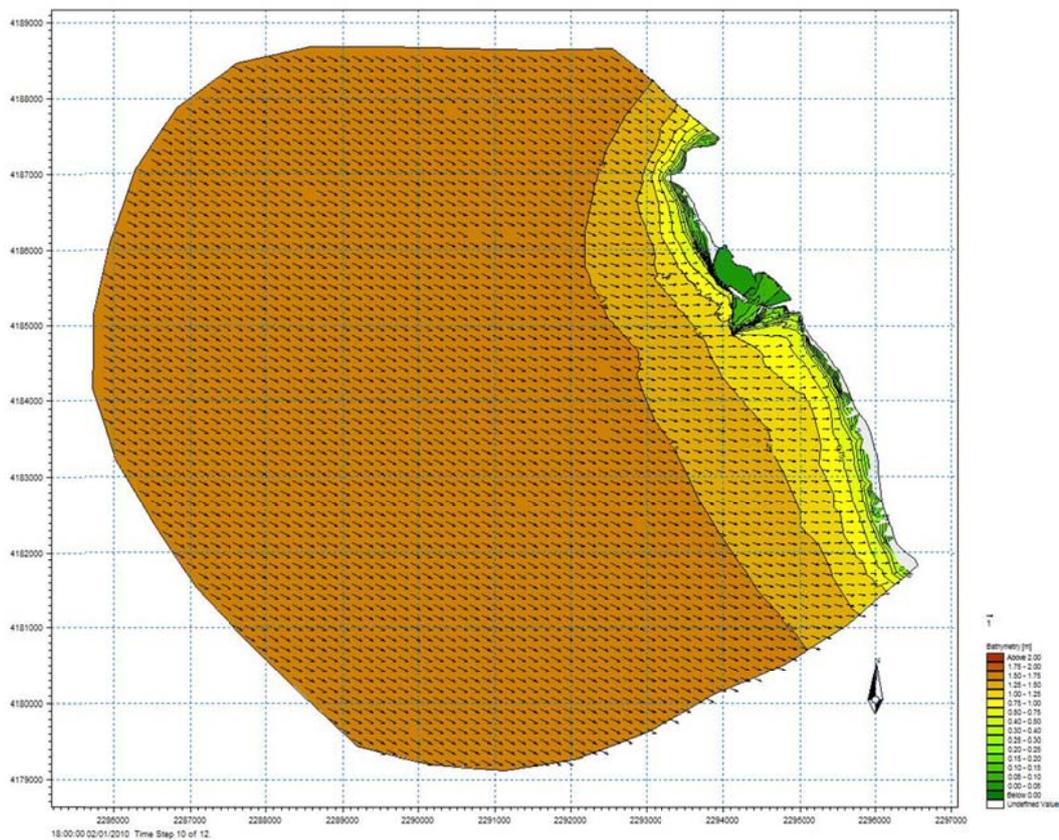


Figura 17 m - Andamento dell'onda dal settore 21 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

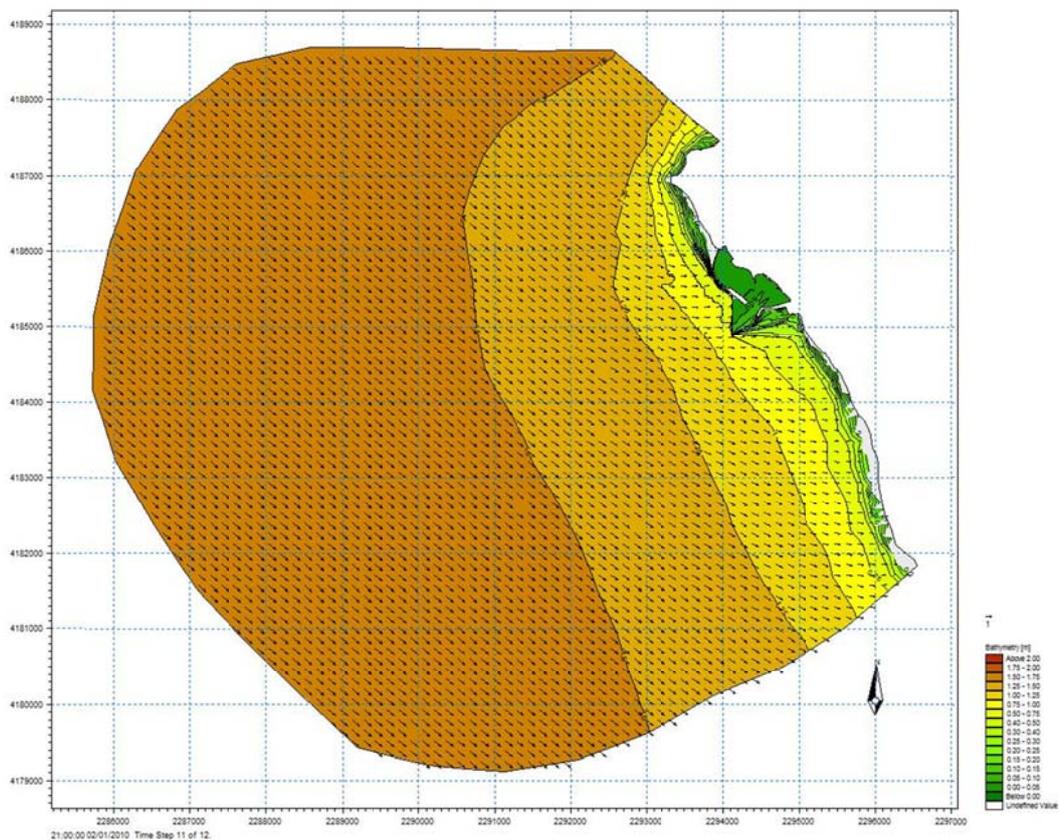


Figura 17 n - Andamento dell'onda dal settore 22 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

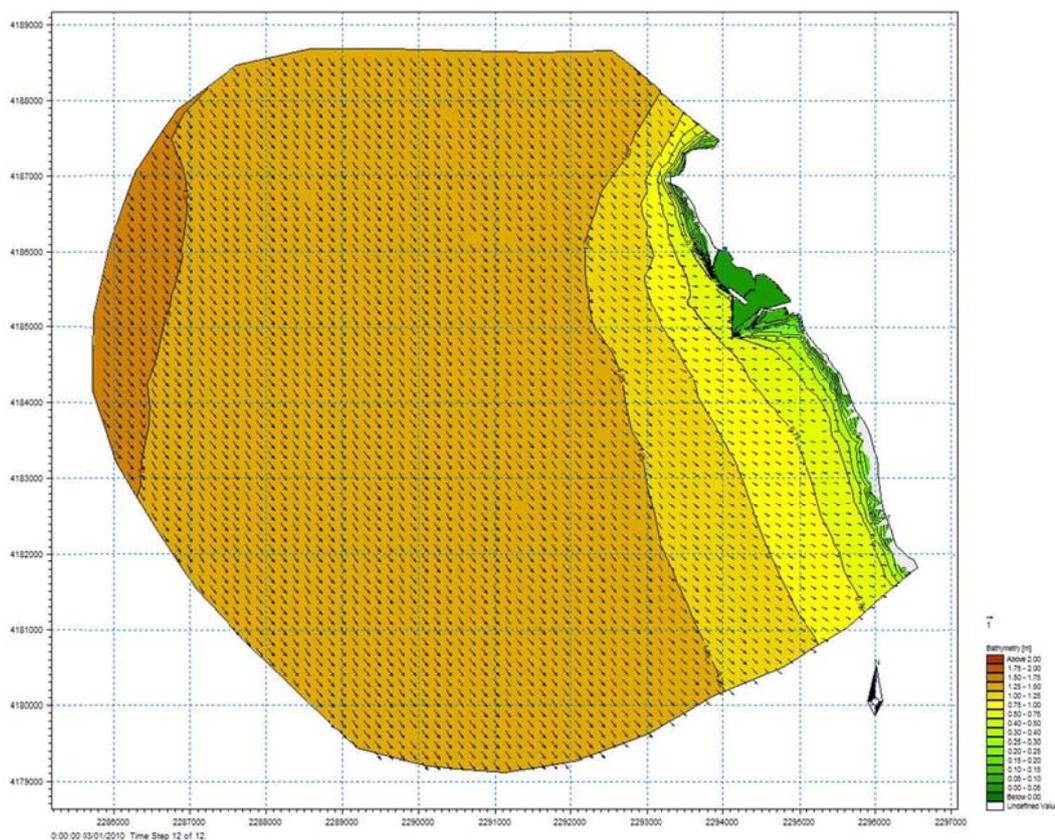


Figura 17 o - Andamento dell'onda dal settore 23 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di largo

Una volta studiato il clima ondoso a largo si è “estratto” il clima ondoso sotto costa nel punto di coordinate UTM 4184295,5N 273833,5E. Nelle tabelle seguenti si riportano le onde estratte poste come input del modello di dettaglio.

Settori	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)
11	0.95	4.97	176
12	1.01	4.79	182
13	1.11	4.90	191
14	1.20	5.06	202
15	1.23	5.11	214
16	1.27	5.22	226
17	1.27	5.25	239
18	1.28	5.30	251
19	1.36	5.49	261
20	1.41	5.59	271
21	1.30	5.35	281
22	1.10	5.03	290
23	0.93	4.87	298

Tabella 5 – Valori di Hs e Tp per Clima medio annuo

Nelle figure seguenti sono riportati i risultati del modello di dettaglio.

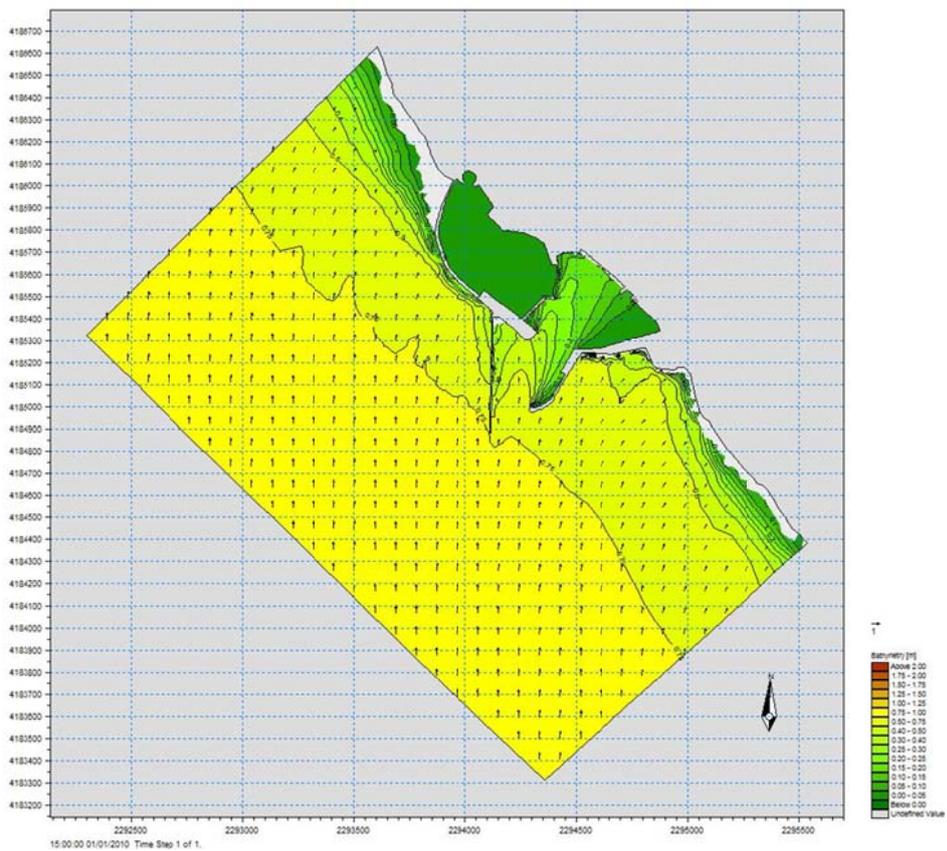


Figura 18 a – Andamento dell’onda dal settore 11 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

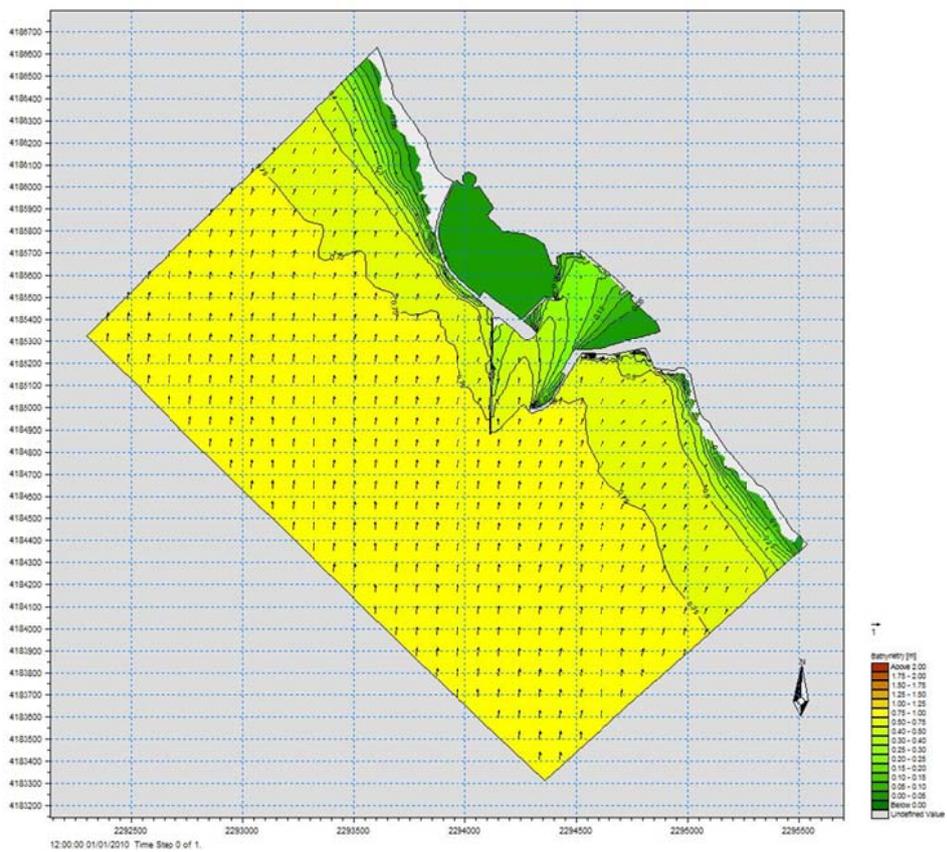


Figura 18 b – Andamento dell’onda dal settore 12 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

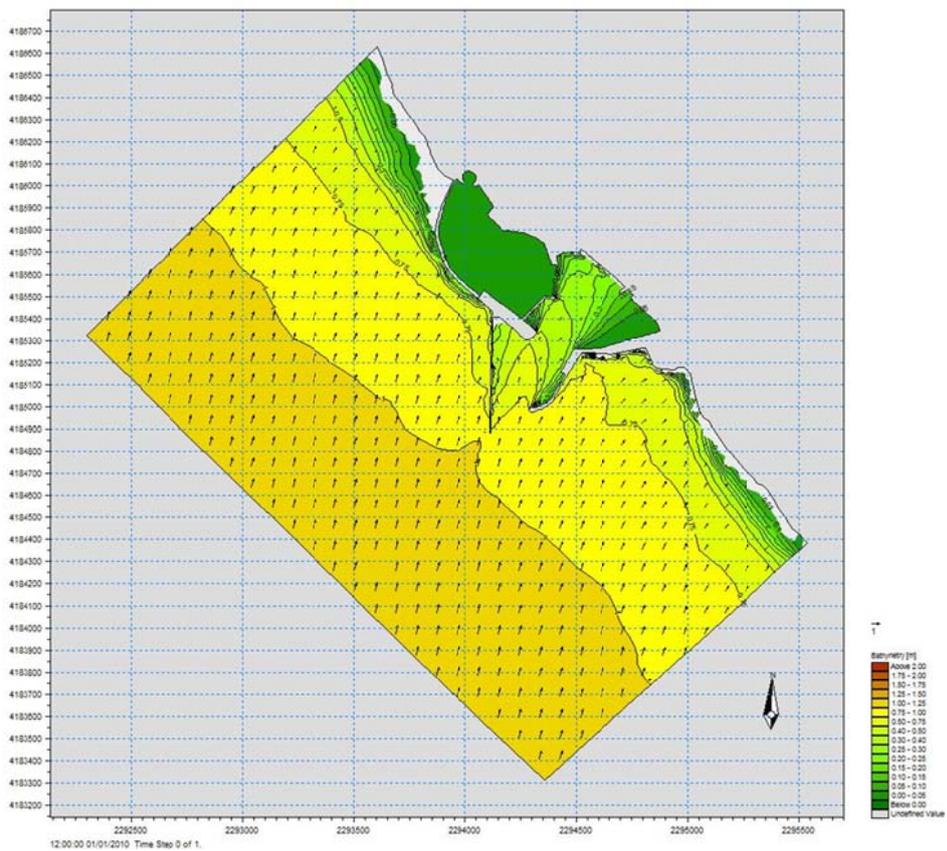


Figura 18 c – Andamento dell’onda dal settore 13 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

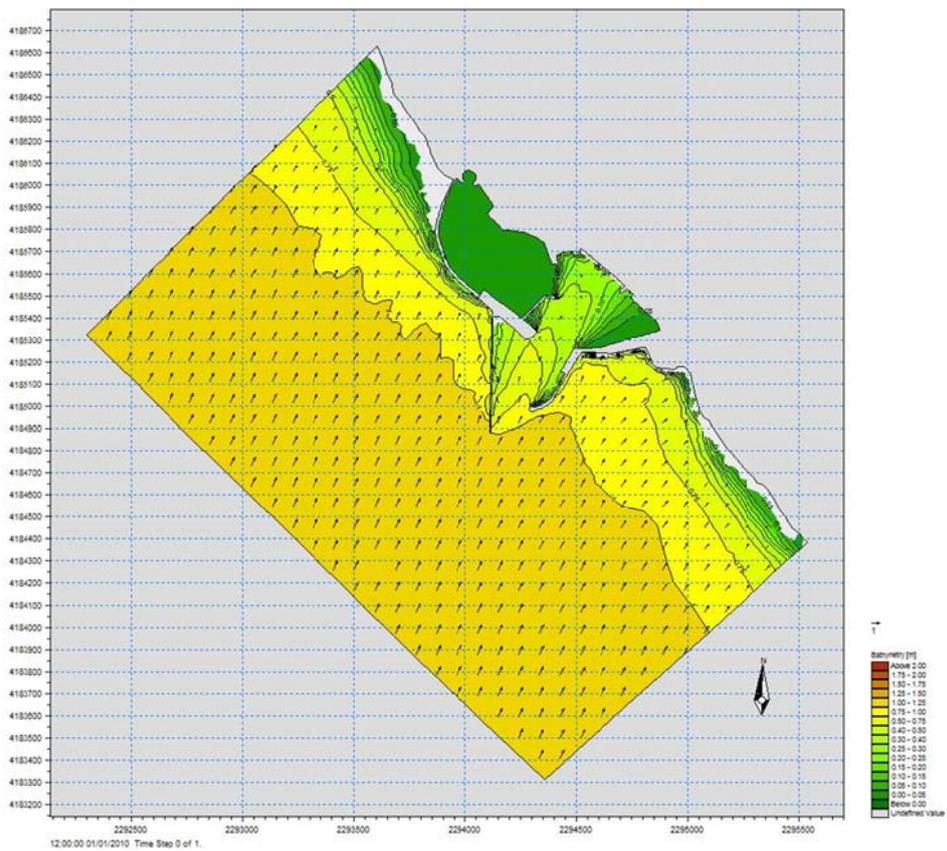


Figura 18 d – Andamento dell’onda dal settore 14 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

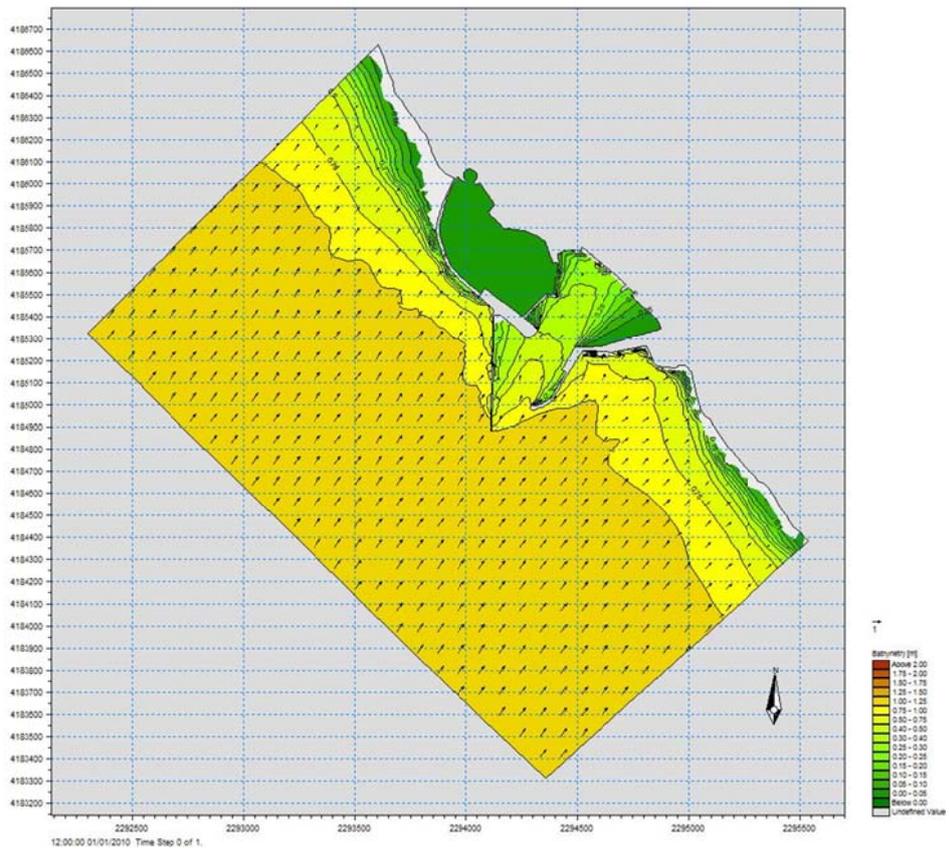


Figura 18 e – Andamento dell’onda dal settore 15 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

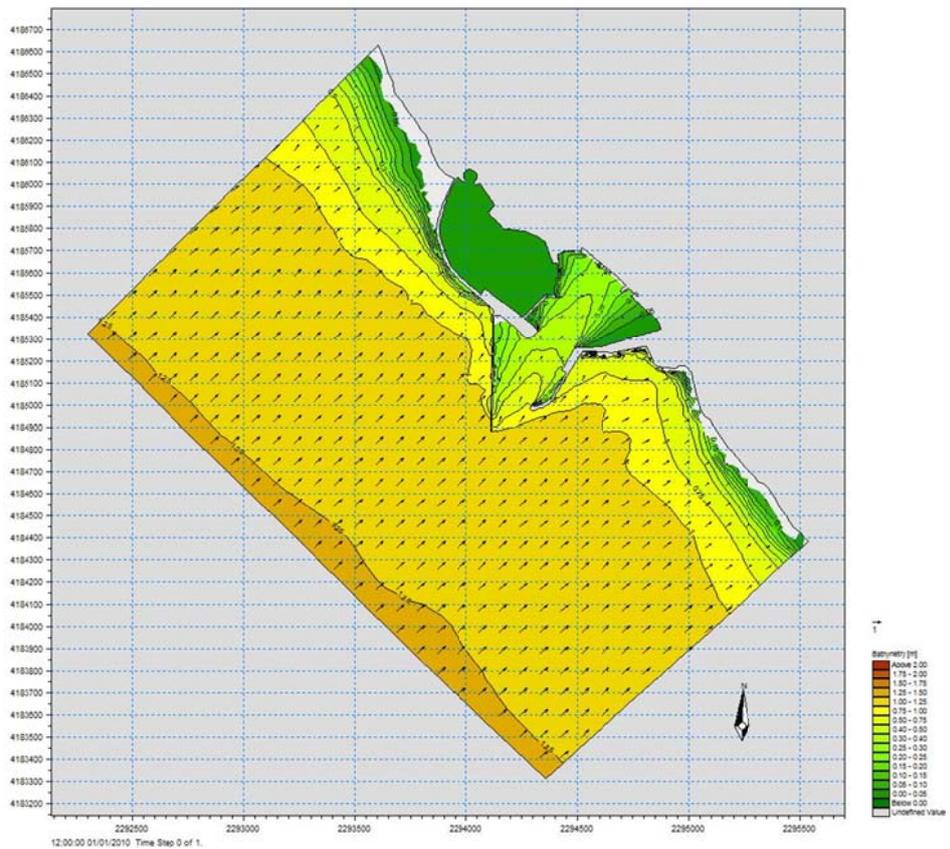


Figura 18 f – Andamento dell’onda dal settore 16 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

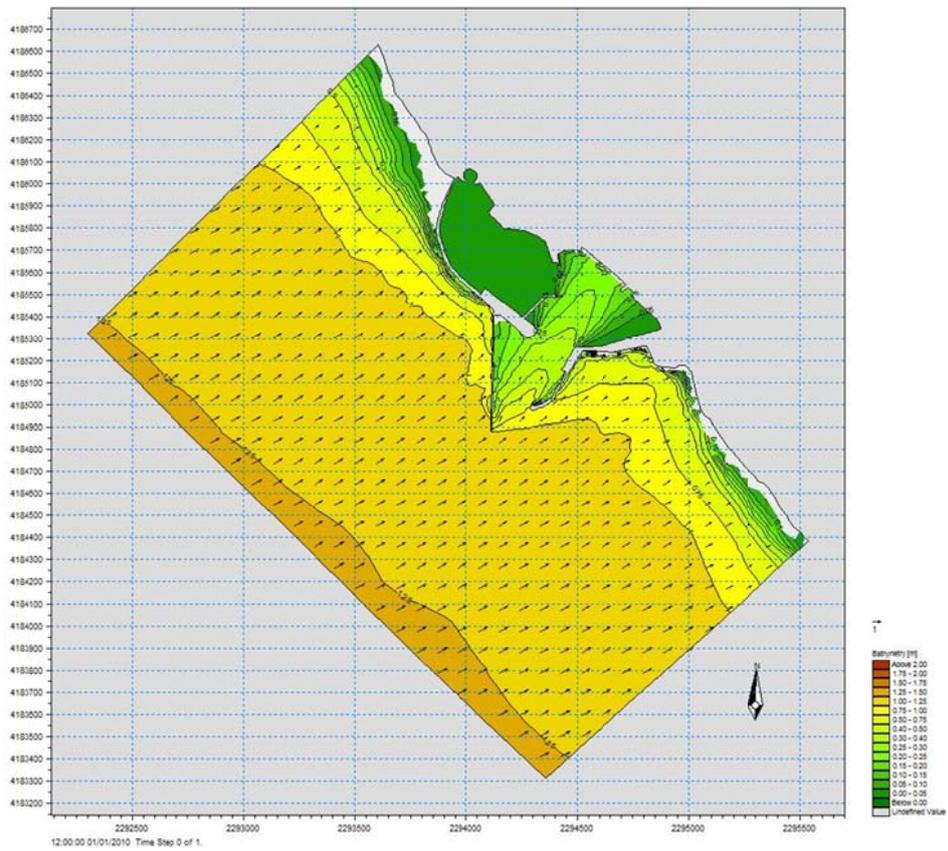


Figura 18 g – Andamento dell’onda dal settore 17 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

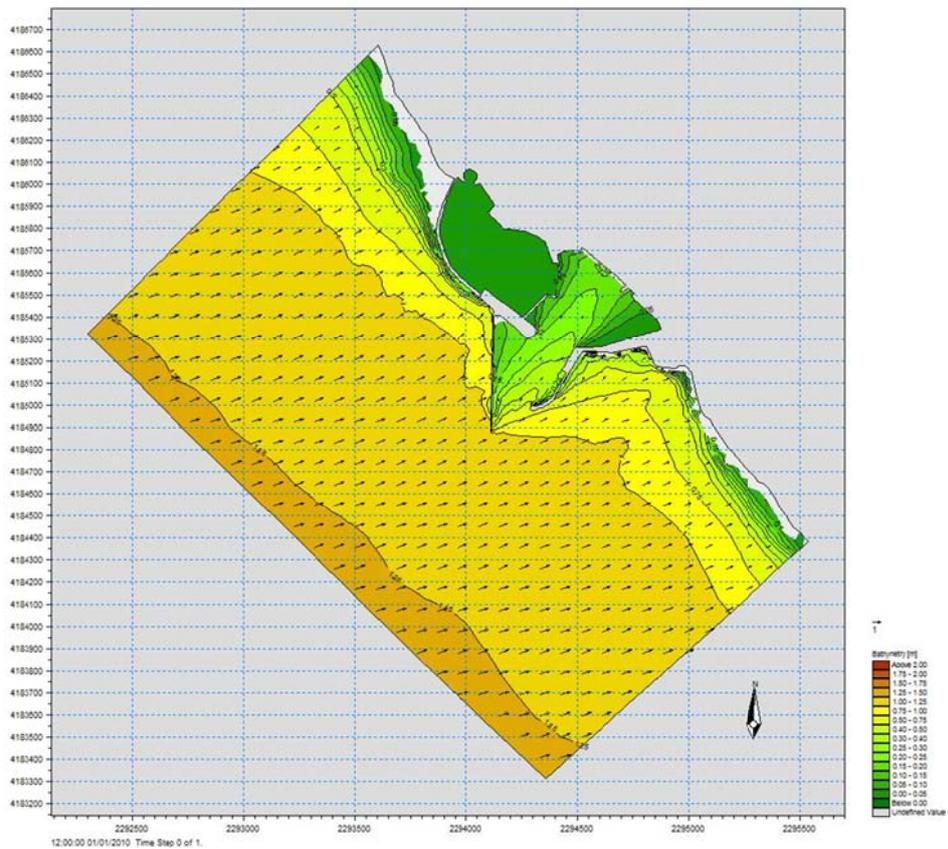


Figura 18 h – Andamento dell’onda dal settore 18 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

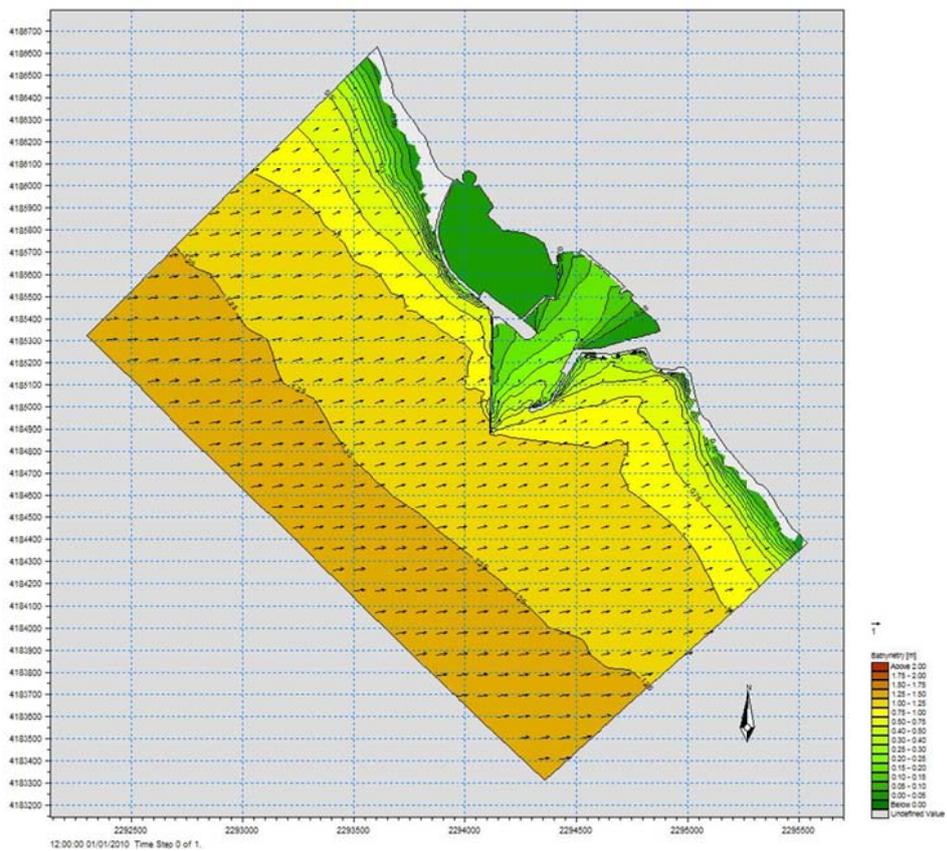


Figura 18 i – Andamento dell’onda dal settore 19 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

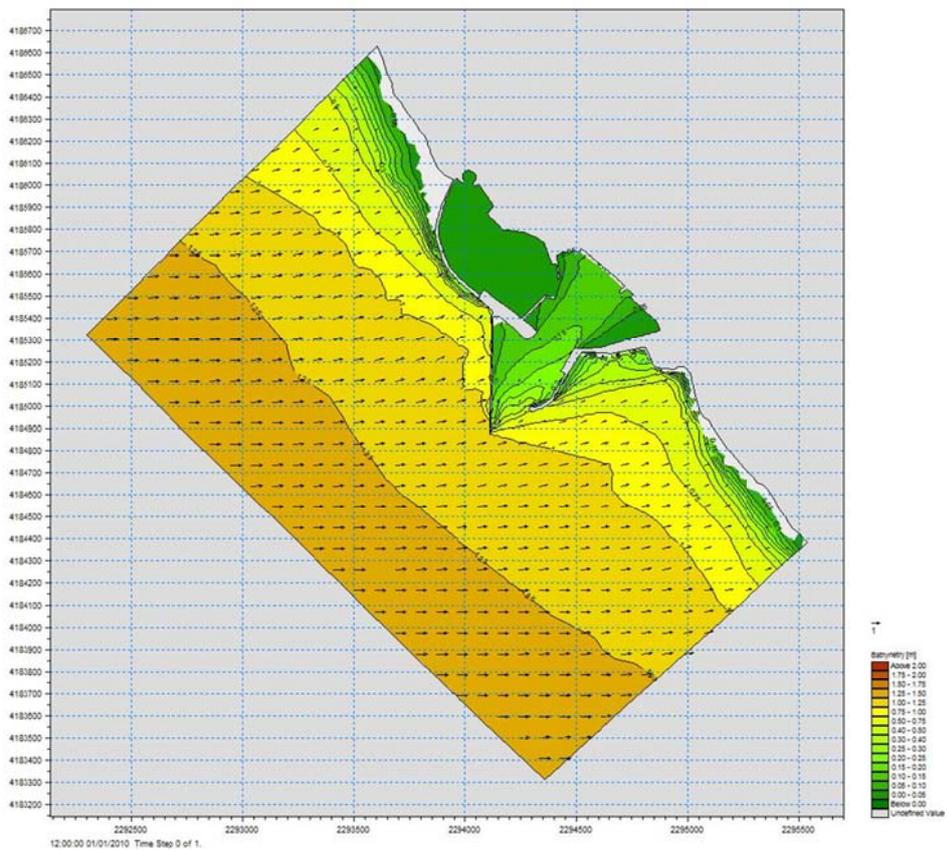


Figura 18 l – Andamento dell’onda dal settore 20 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

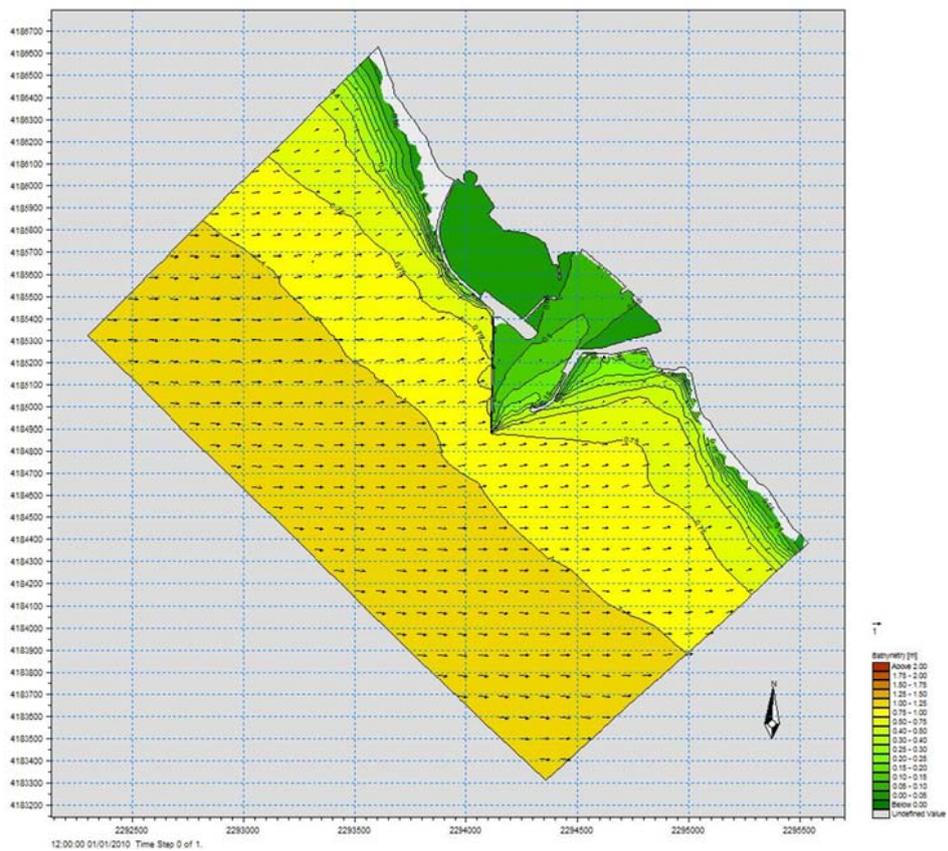


Figura 18 m – Andamento dell’onda dal settore 21 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

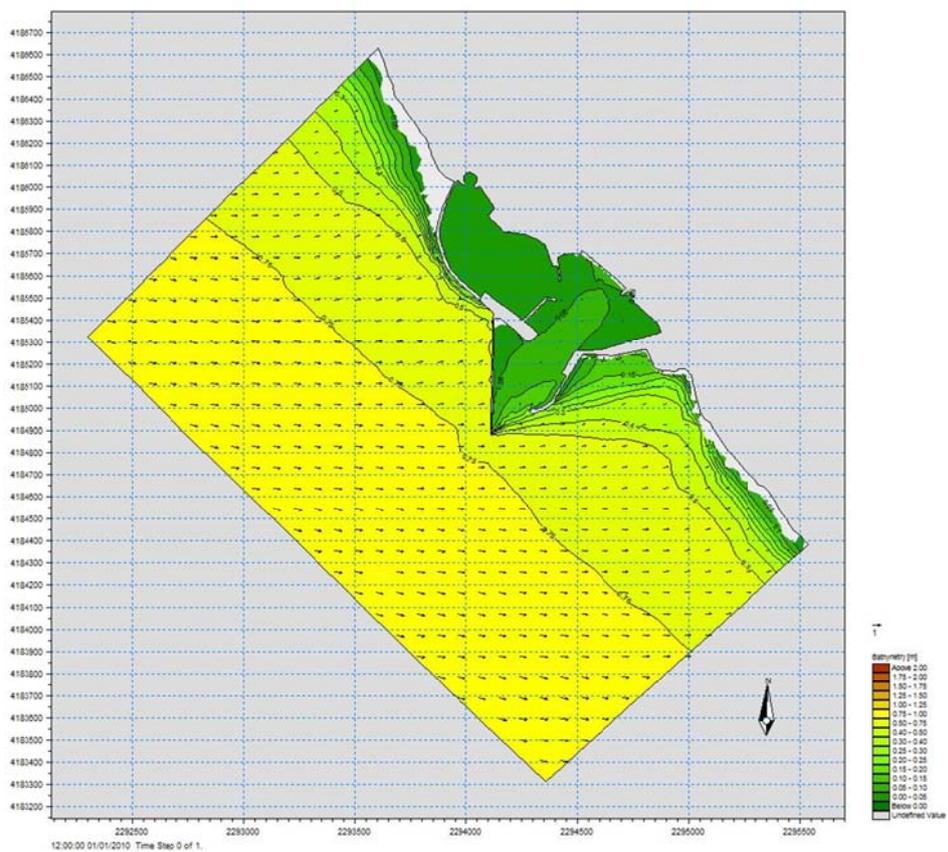


Figura 18 n – Andamento dell’onda dal settore 22 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

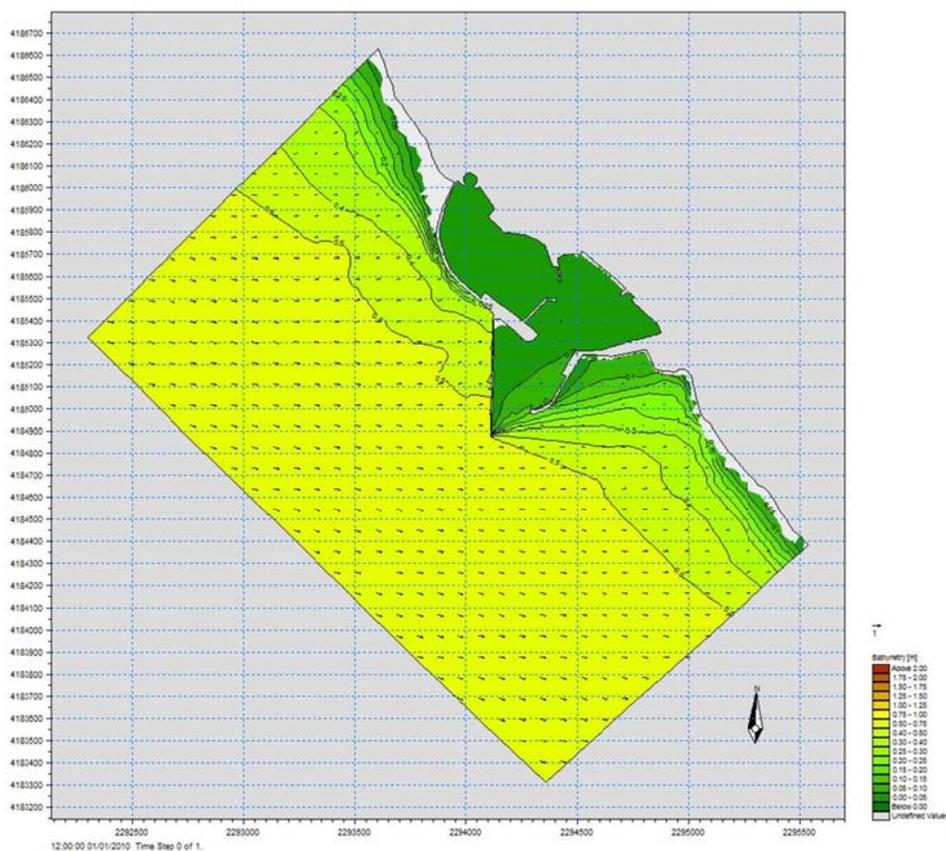


Figura 18 o – Andamento dell’onda dal settore 23 – modello SW – Clima medio annuo – Progetto – Modello di dettaglio

Nelle Figura 19 a-o sono riportati i grafici che rappresentano i flussi della corrente.

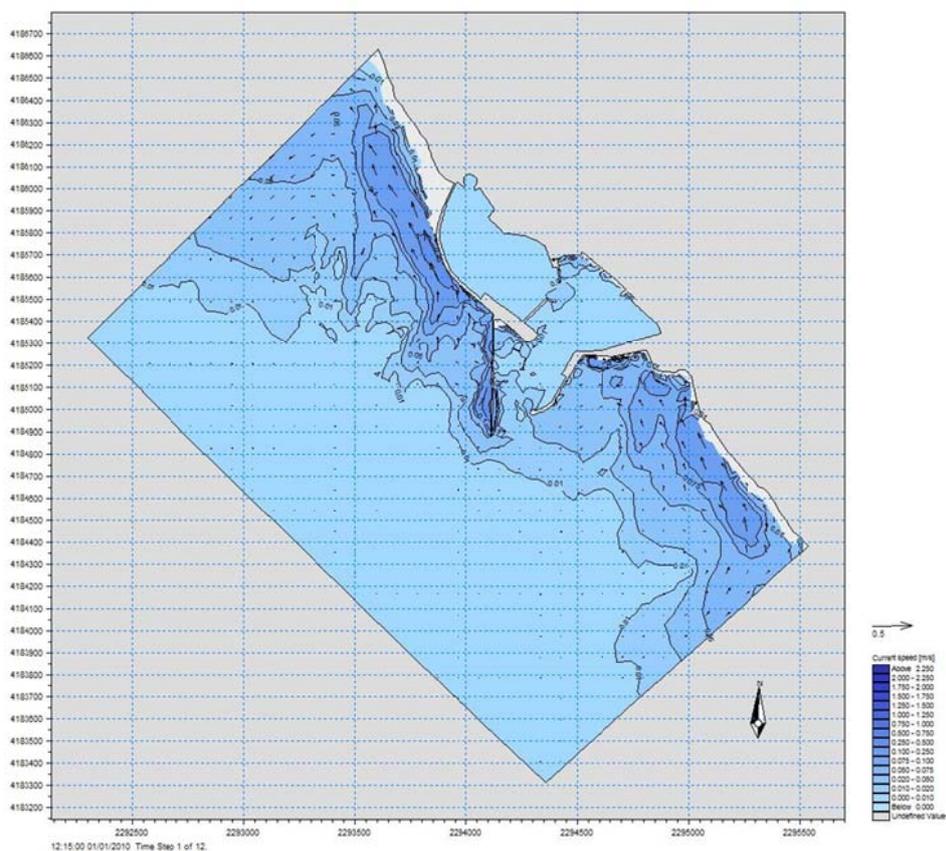


Figura 19 a – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 11 – Progetto

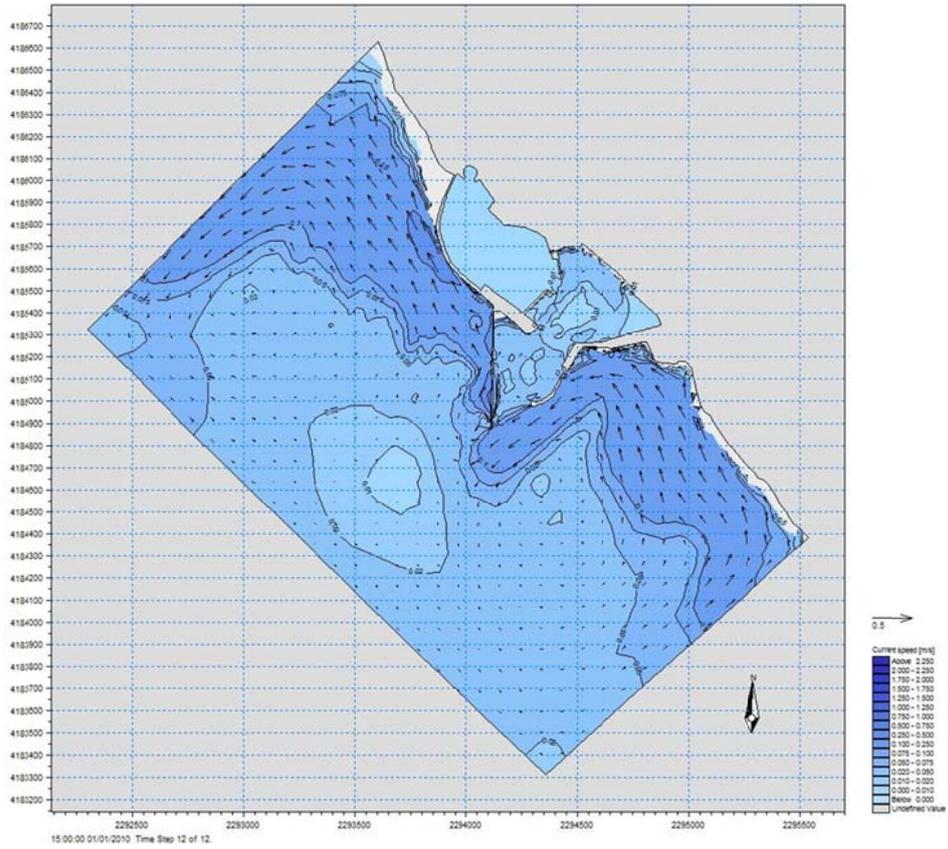


Figura 19 b – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 12 – Progetto

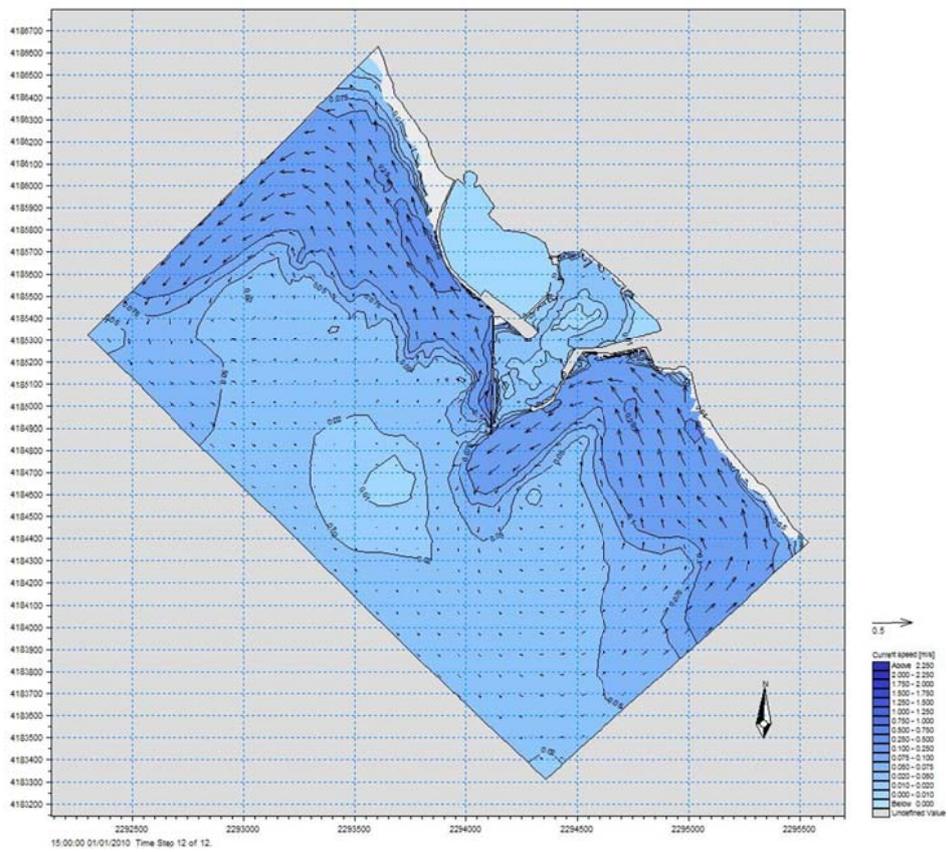


Figura 19 c – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 13 – Progetto

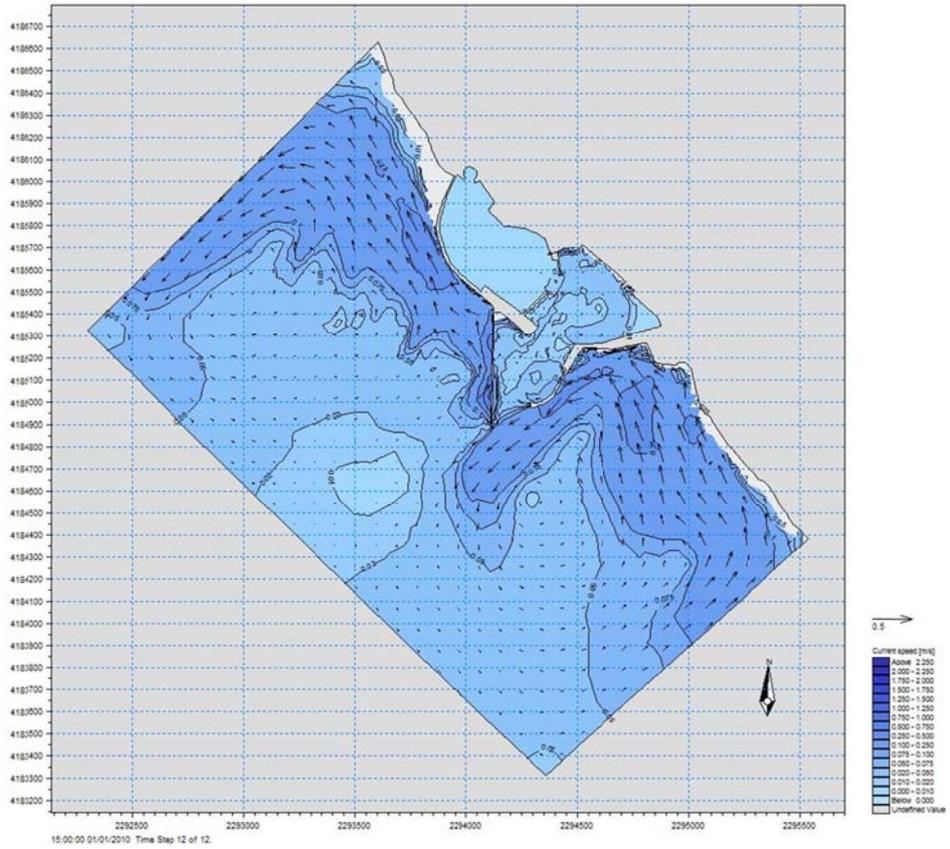


Figura 19 d – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 14 – Progetto

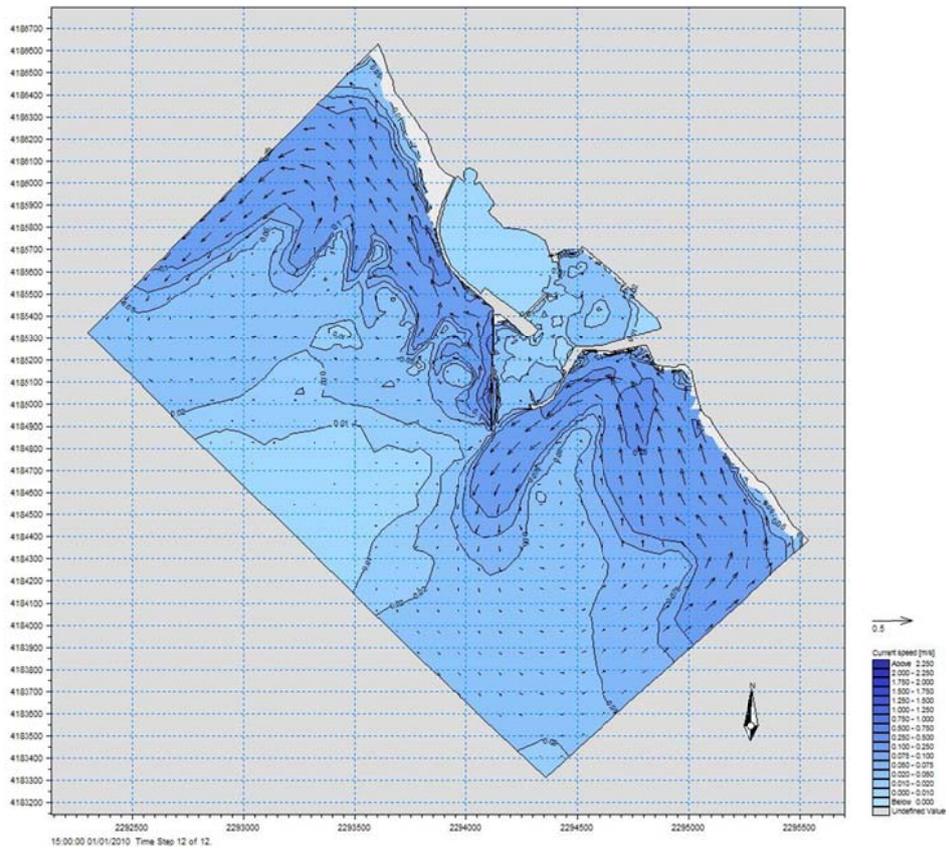


Figura 19 e – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 15 – Progetto

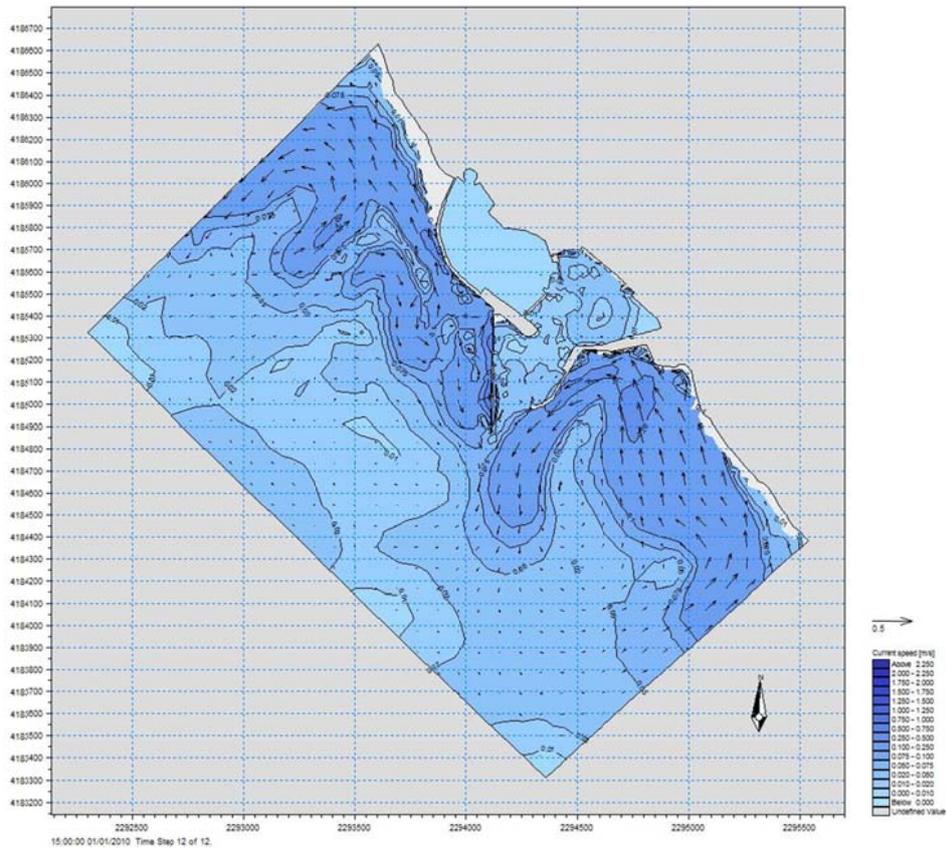


Figura 19 f – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 16 – Progetto

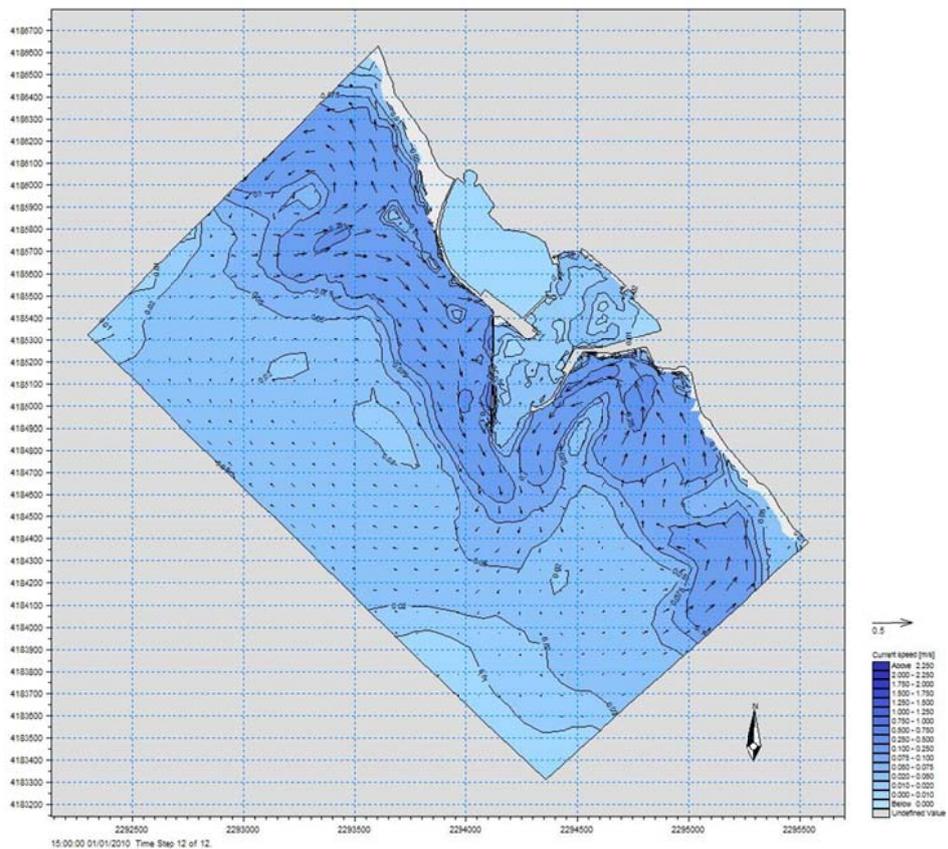


Figura 19 g – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 17 – Progetto

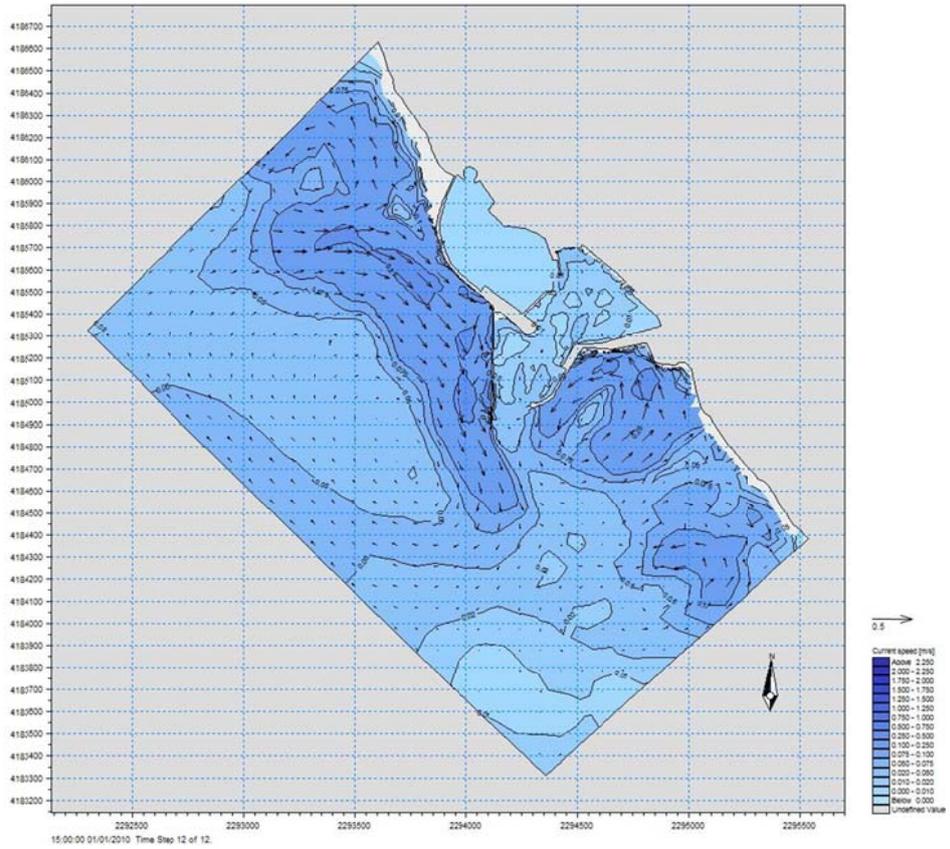


Figura 19 h – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 18 – Progetto

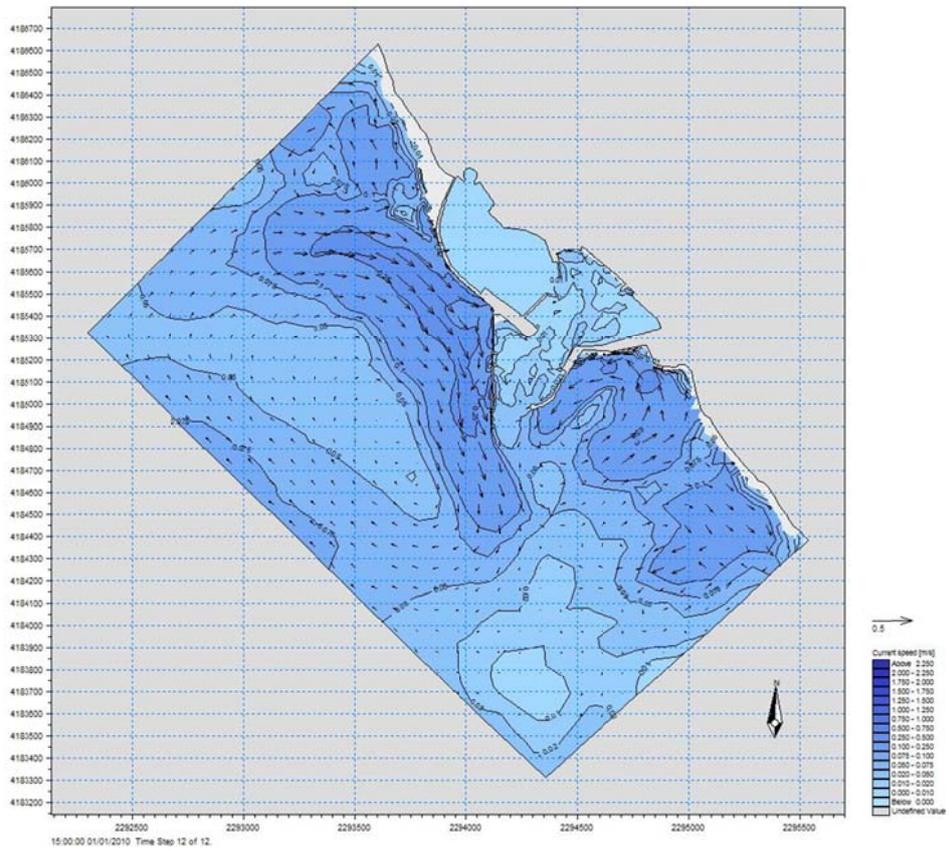


Figura 19 i – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 19 – Progetto

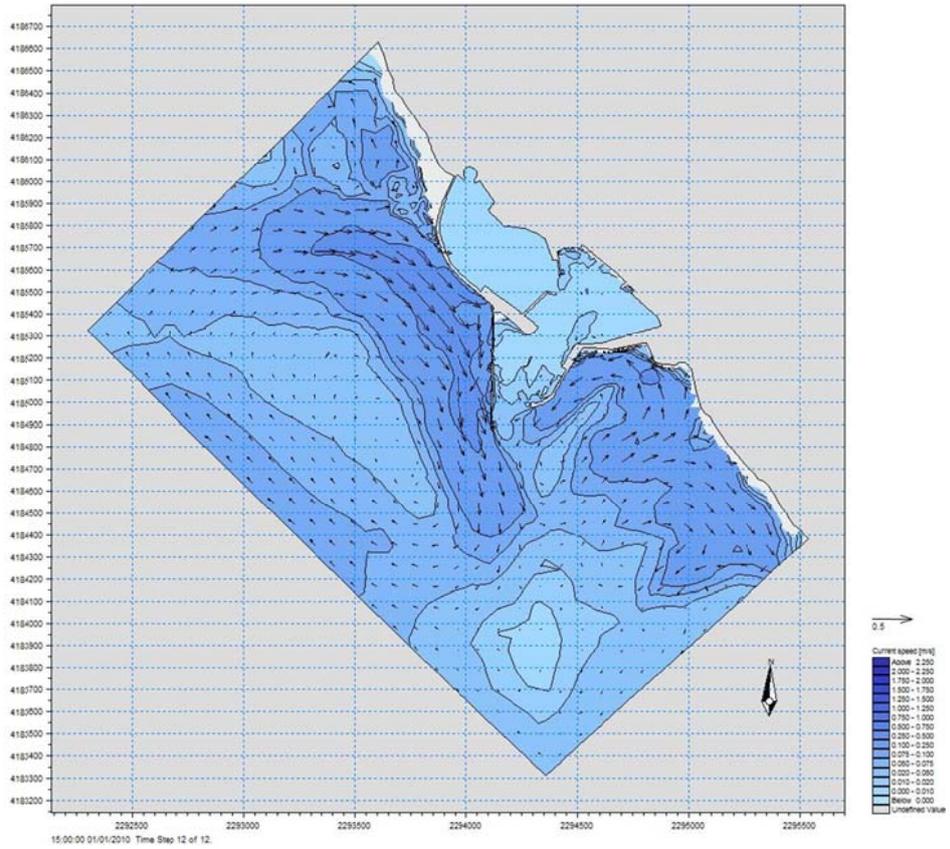


Figura 19 l – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 20 – Progetto

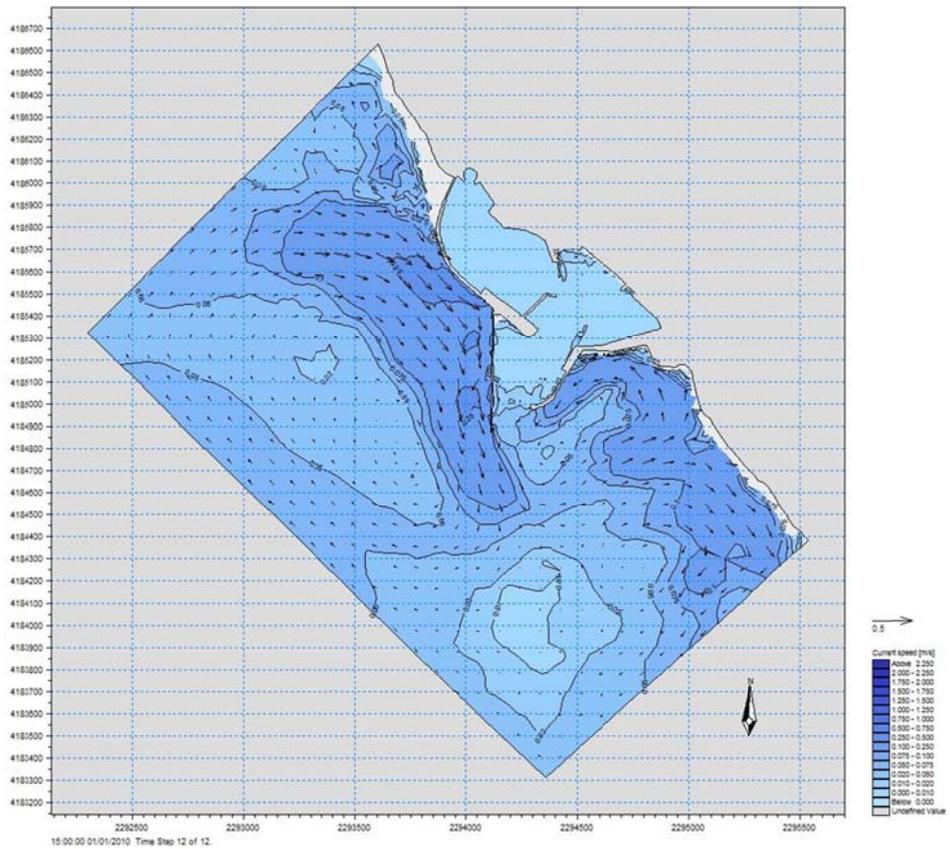


Figura 19 m – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 21 – Progetto

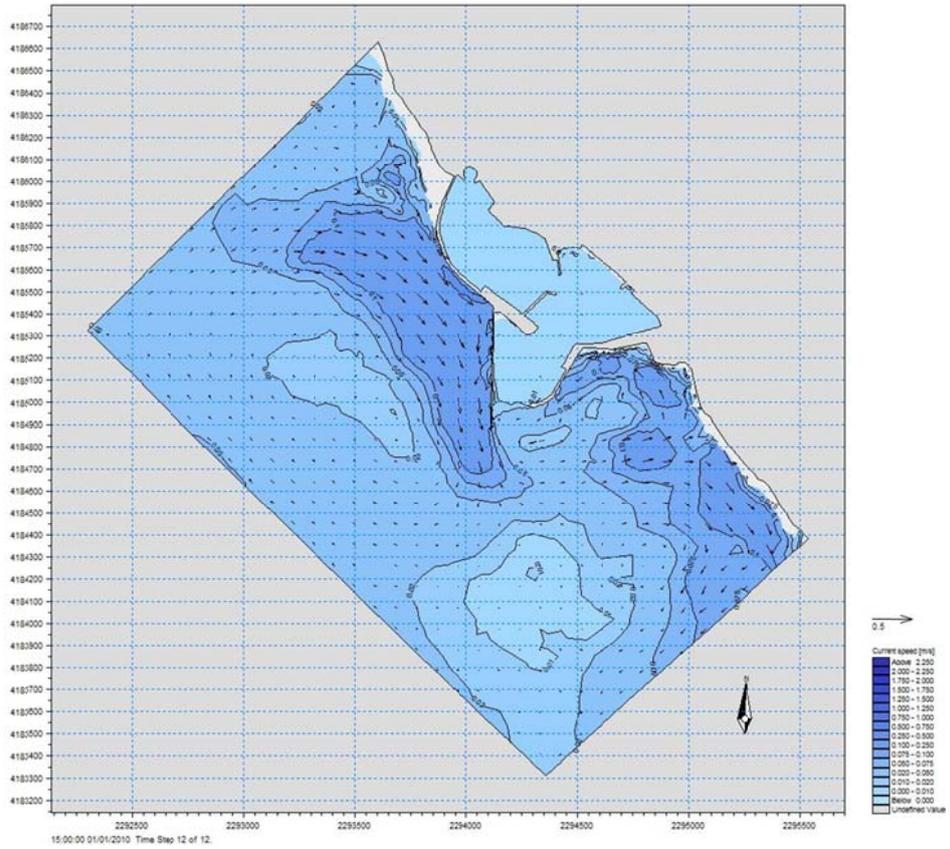


Figura 19 n – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 22 – Progetto

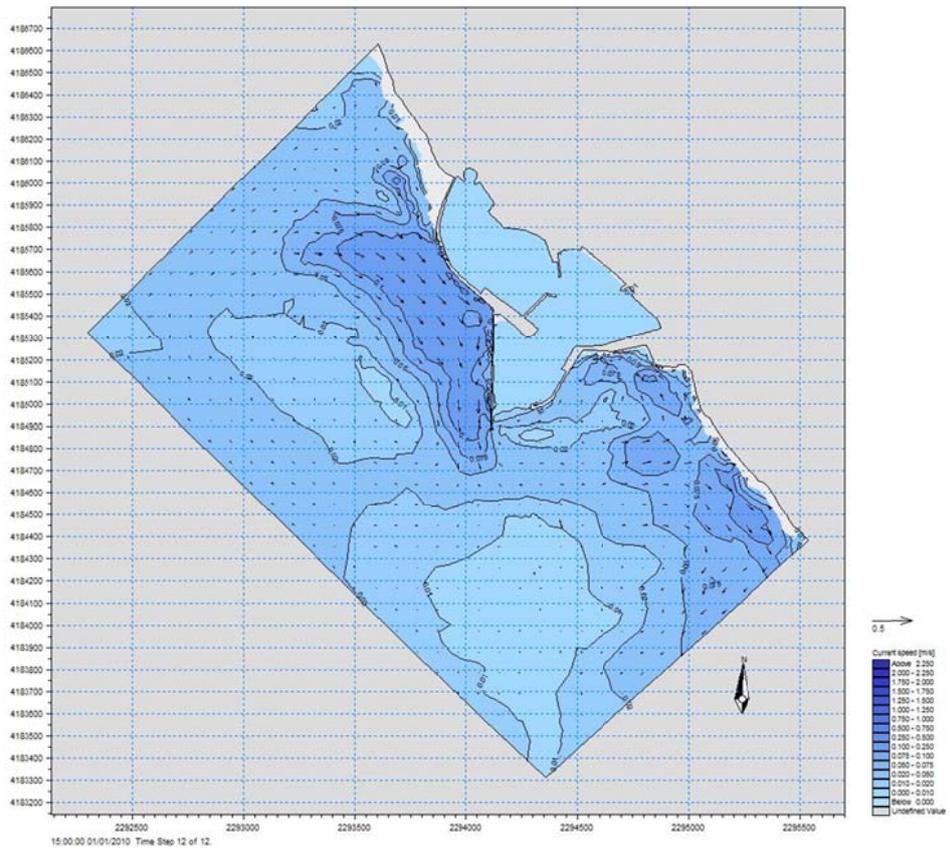
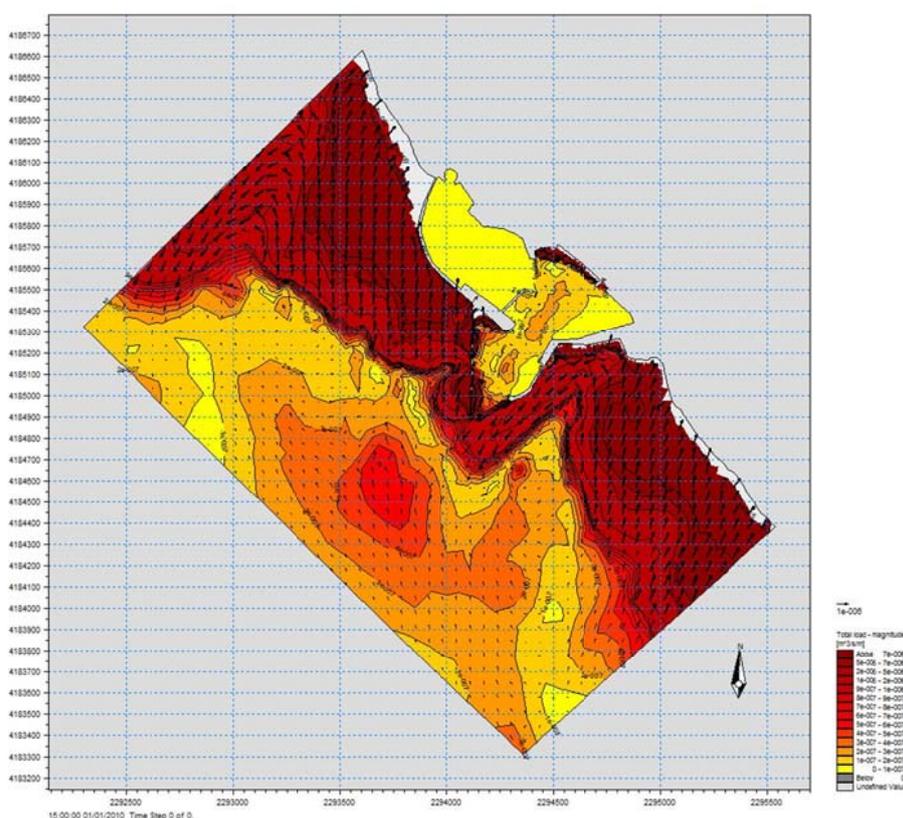


Figura 19 o – Andamento del flusso della corrente per le onde dal settore 23 – Progetto

Dalle figure sopra riportate si evince la dinamica delle correnti generate dal moto ondoso per la soluzione progettuale prevista. Per i settori 11, 12, 13, 14, 15 e 16 la dinamica del flusso è praticamente analoga tranne che per le intensità in gioco, le quali aumentano all'aumentare del settore. Rispetto allo stato di fatto, per effetto della nuova diga di Levante prevista, il flusso subisce una deviazione e non va a colpire la diga di Ponente creando quindi un insabbiamento della stessa. Inoltre nell'avamposto non nascono più correnti in grado di trasportare dei sedimenti rendendo quindi stabile questa zona. Dal settore 17 si ha un flusso sulla diga di Ponente uscente e una corrente di ritorno sulla diga di Levante che si accoppia con la precedente che a sua volta comincia a rallentare al largo dell'imboccatura del porto non creando particolari problemi di potenziale insabbiamento. Dai settori 18, 19, 20, 21 e 22 accade qualcosa di simile al settore 17 ma la corrente di ritorno, nella diga di Levante, non ha intensità tale per ricongiungersi con quella proveniente da Ponente, creando un potenziale deposito di sedimenti, da verificare col modulo ST. Rispetto allo stato di fatto si sono eliminati quei vortici che si venivano a creare nella zona di levante che comportavano un graduale insabbiamento dell'avamposto e in particolare della parte interna del molo di Ponente. Dal settore 23 tale problema non si pone in quanto le correnti di ritorno generate non hanno intensità tale da provocare trasporto di sedimenti. Nelle Figura 20 a-o si riportano le capacità di trasporto per tutti i settori.



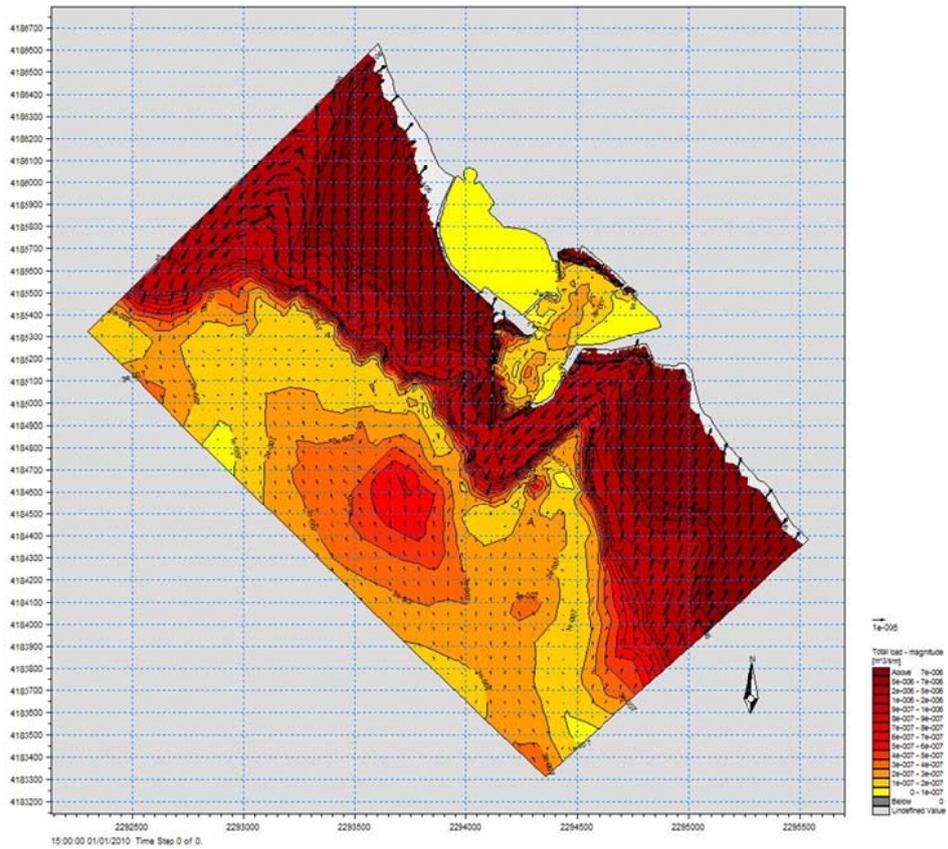


Figura 20 b – Capacità di trasporto onda settore 12

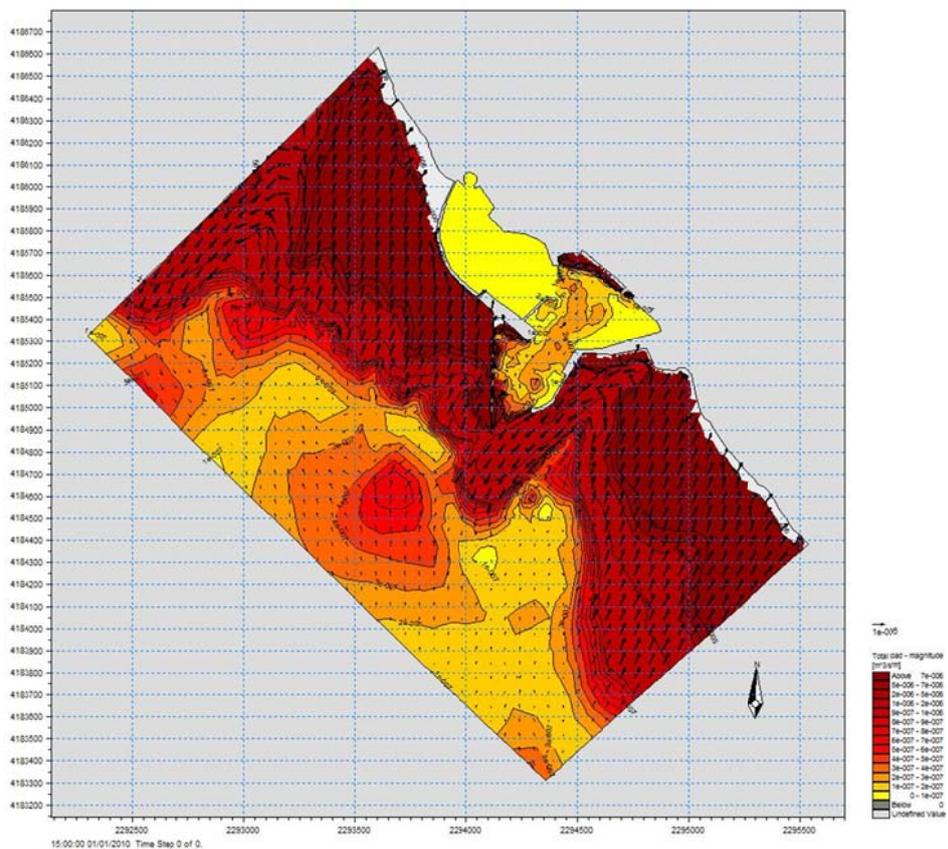


Figura 20 c – Capacità di trasporto onda settore 13

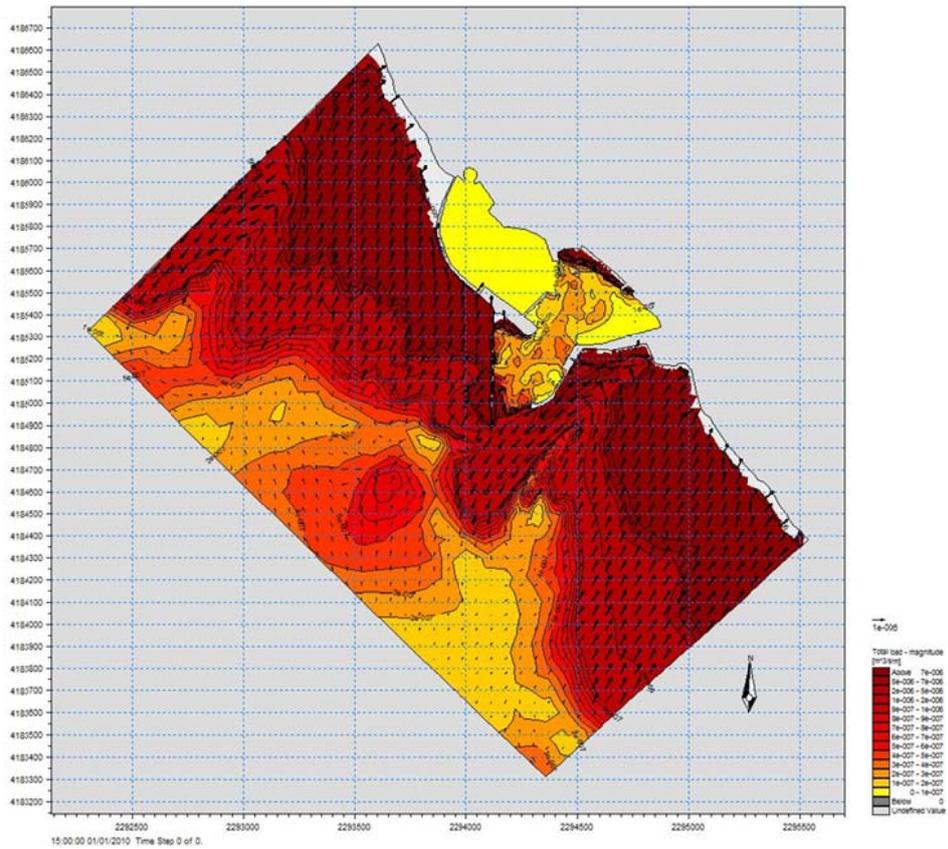


Figura 20 d – Capacità di trasporto onda settore 14

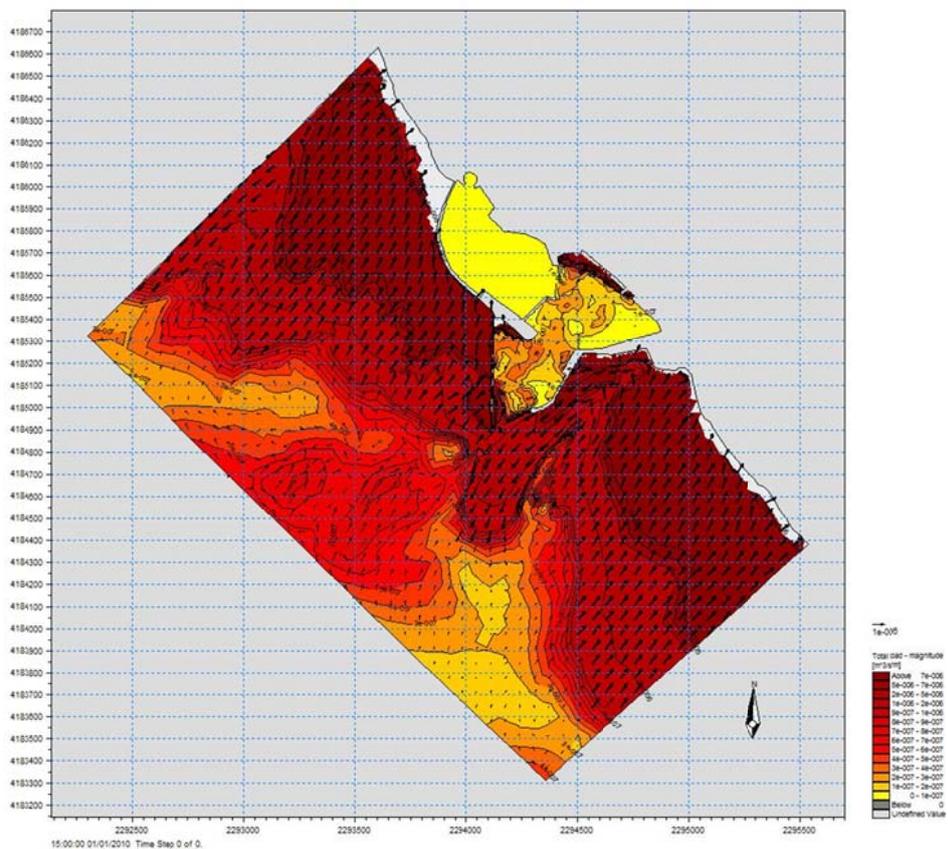


Figura 20 e – Capacità di trasporto onda settore 15

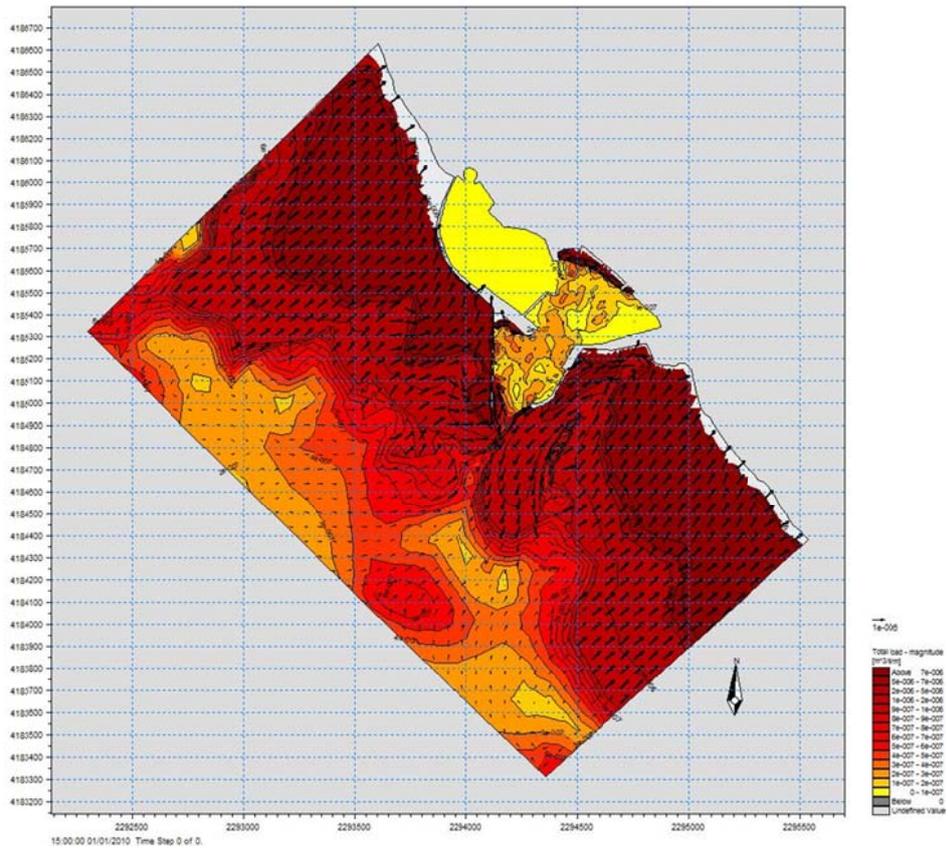


Figura 20 f – Capacità di trasporto onda settore 16

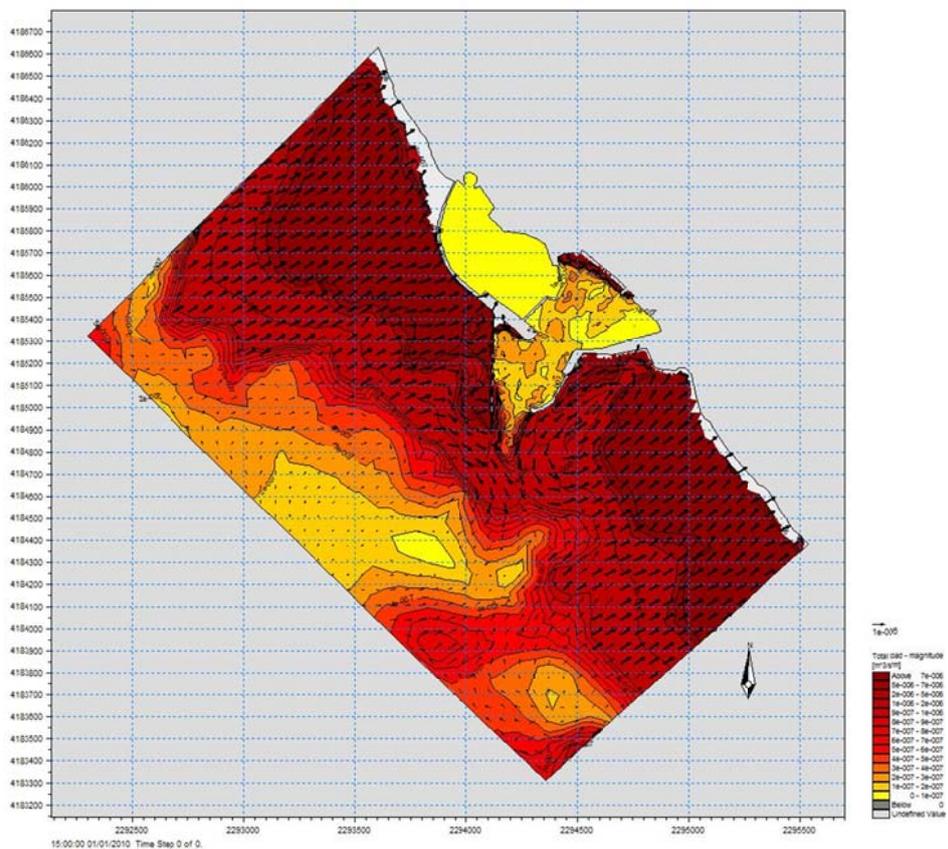


Figura 20 g – Capacità di trasporto onda settore 17

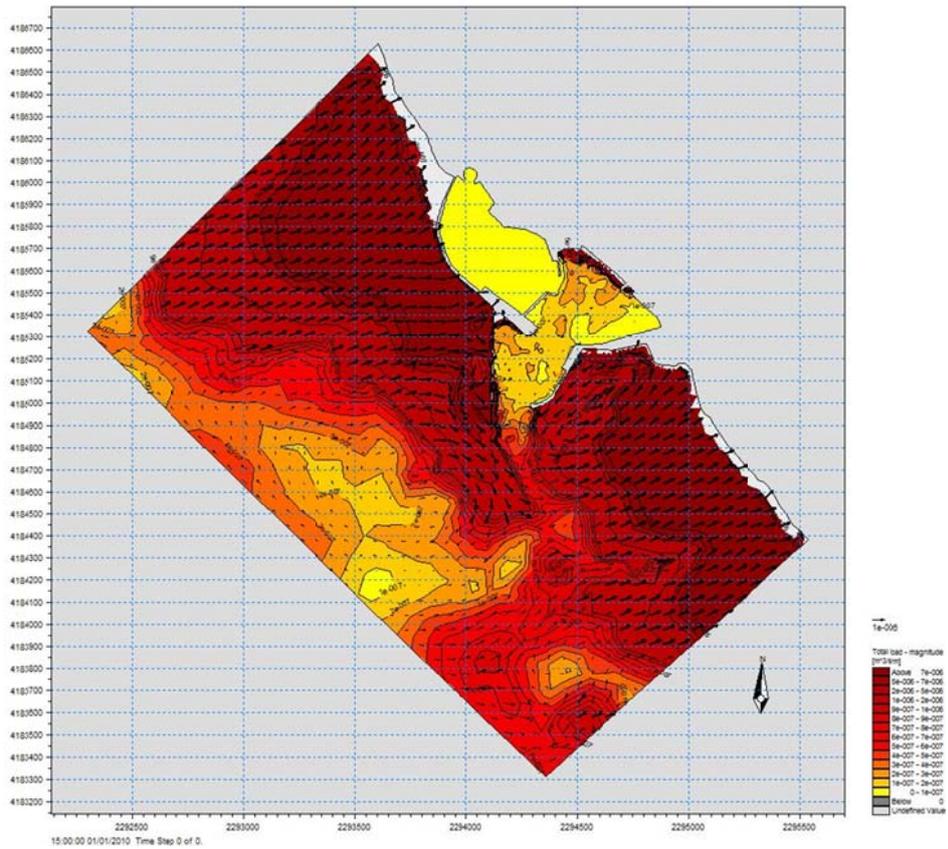


Figura 20 h – Capacità di trasporto onda settore 18

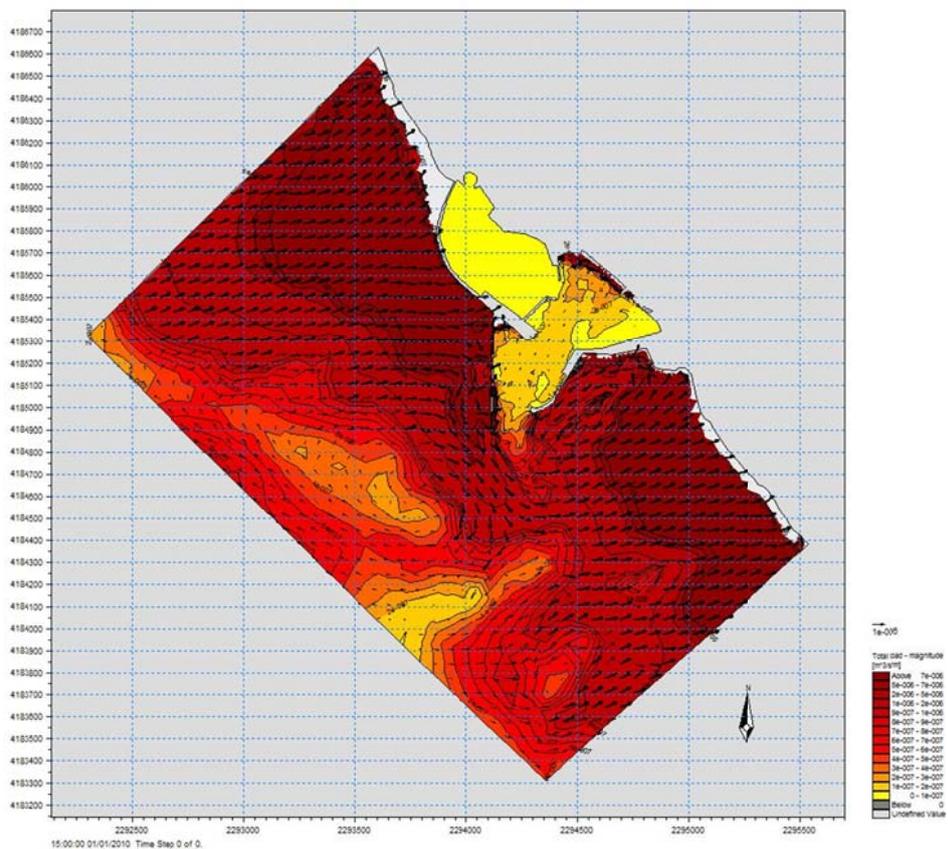


Figura 20 i – Capacità di trasporto onda settore 19

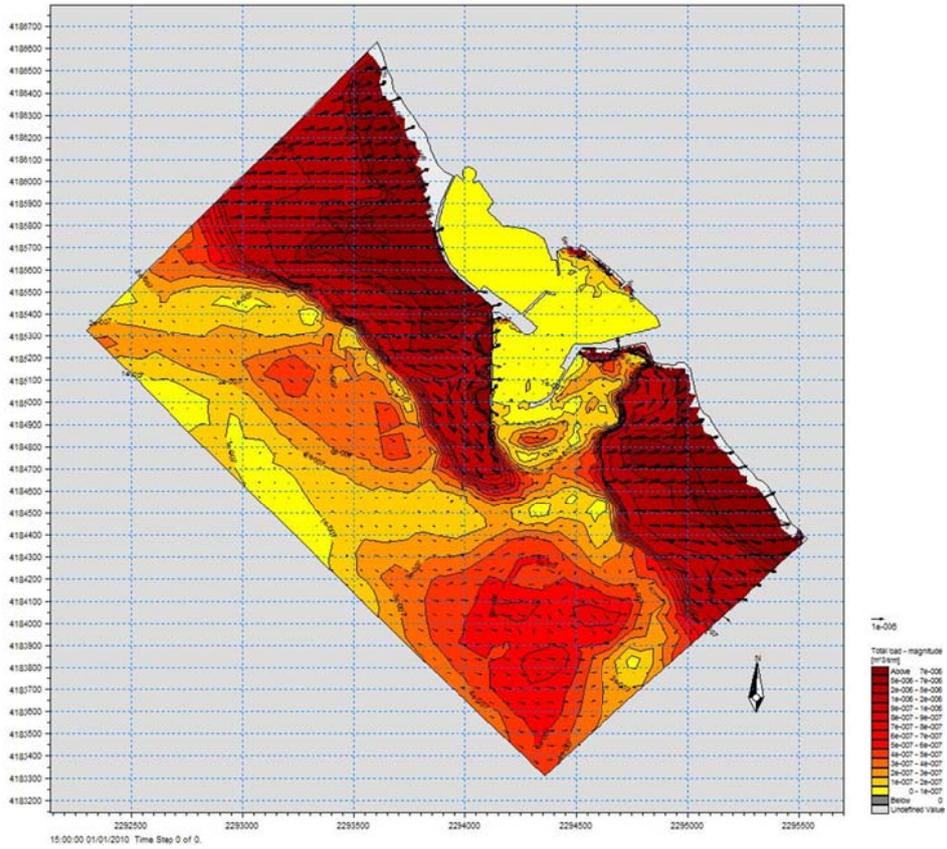


Figura 20 n – Capacità di trasporto onda settore 22

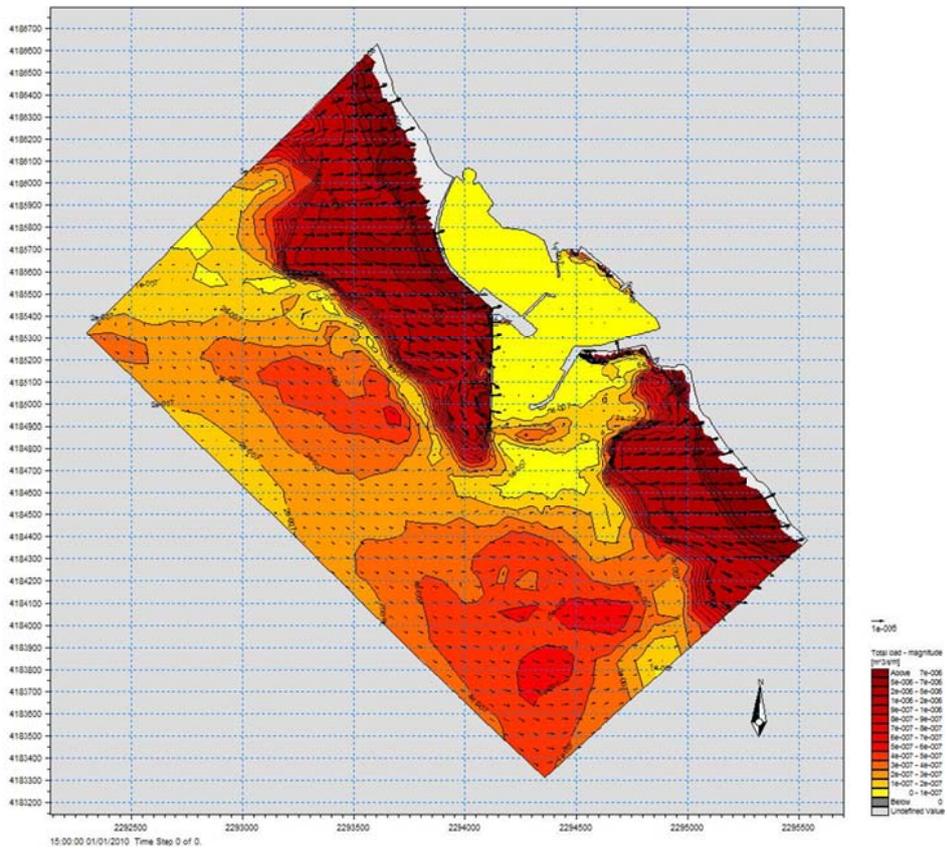


Figura 20 o – Capacità di trasporto onda settore 23

Dalle figure sopra riportate si deduce che per i settori 11, 12, 13, 14, 15 e 16 si instaura una capacità di trasporto nella nuova diga di Levante, uscente verso il largo, la quale crea una deposizione di sedimento in una zona esterna all'imboccatura. Nei settori 17, 18, 19 e 20 si instaura un potenziale moto di sedimenti che nella zona di levante, a tergo della diga, ha un andamento vorticoso con un potenziale accumulo nella zona dell'imboccatura. Nella diga di Ponente invece il flusso dei sedimenti viene portato fuori dall'imboccatura in zona abbastanza lontana dalla stessa. Nei restanti settori 21, 22 e 23 la capacità di trasporto nella zona portuale, nell'imboccatura e nella zona antistante non è in grado di mobilitare sedimenti. Nelle figure sottostanti si è eseguita l'integrazione di tutte le onde in funzione della frequenza di apparizione riportata nel calcolo del clima ondoso dell'anno statistico medio. Infatti le capacità di trasporto espresse sopra per ogni singola onda sono potenziali e devono essere valutate in funzione della frequenza di apparizione. Nello "storm" riportato sotto si deduce che la capacità di trasporto nella configurazione di progetto risulta molto bassa in prossimità dell'imboccatura portuale e ancora più bassa all'interno dell'avamposto. Resta ancora una capacità di trasporto residua in corrispondenza della spiaggetta interna ma attenuata rispetto alla condizione dello stato di fatto. Inoltre tale attenuazione si ripercuote nell'attuale darsena turistica atta a ospitare nel seguito la flotta peschereccia di Marsala.

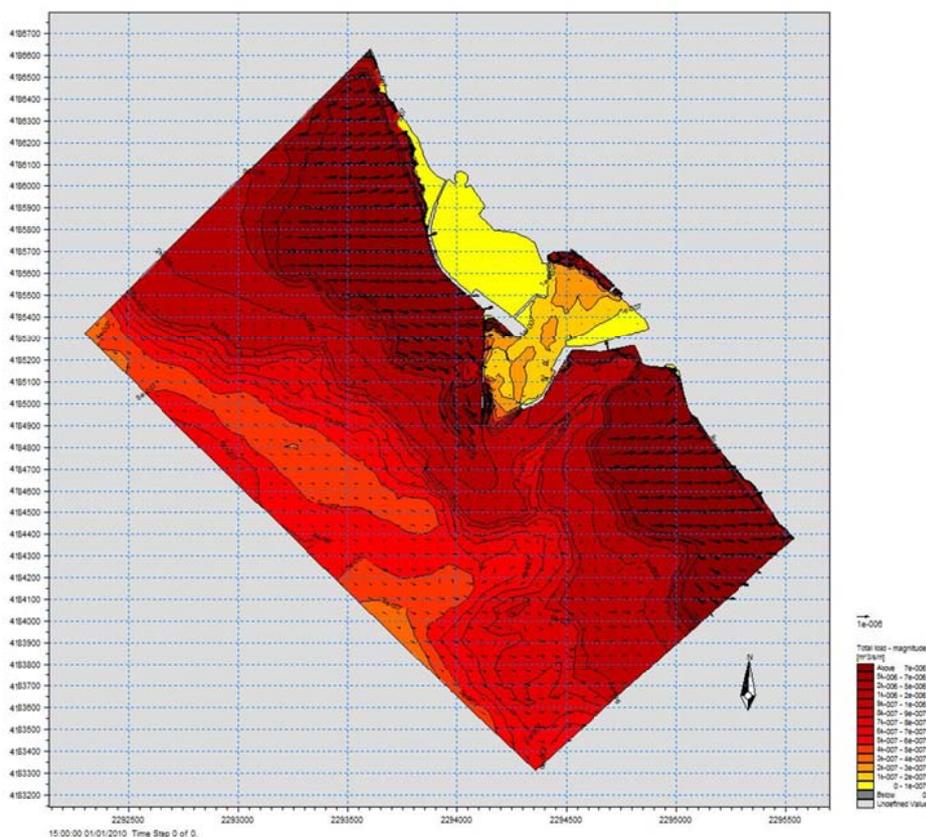


Figura 21 – Capacità di trasporto per tutte le onde pesate - Progetto

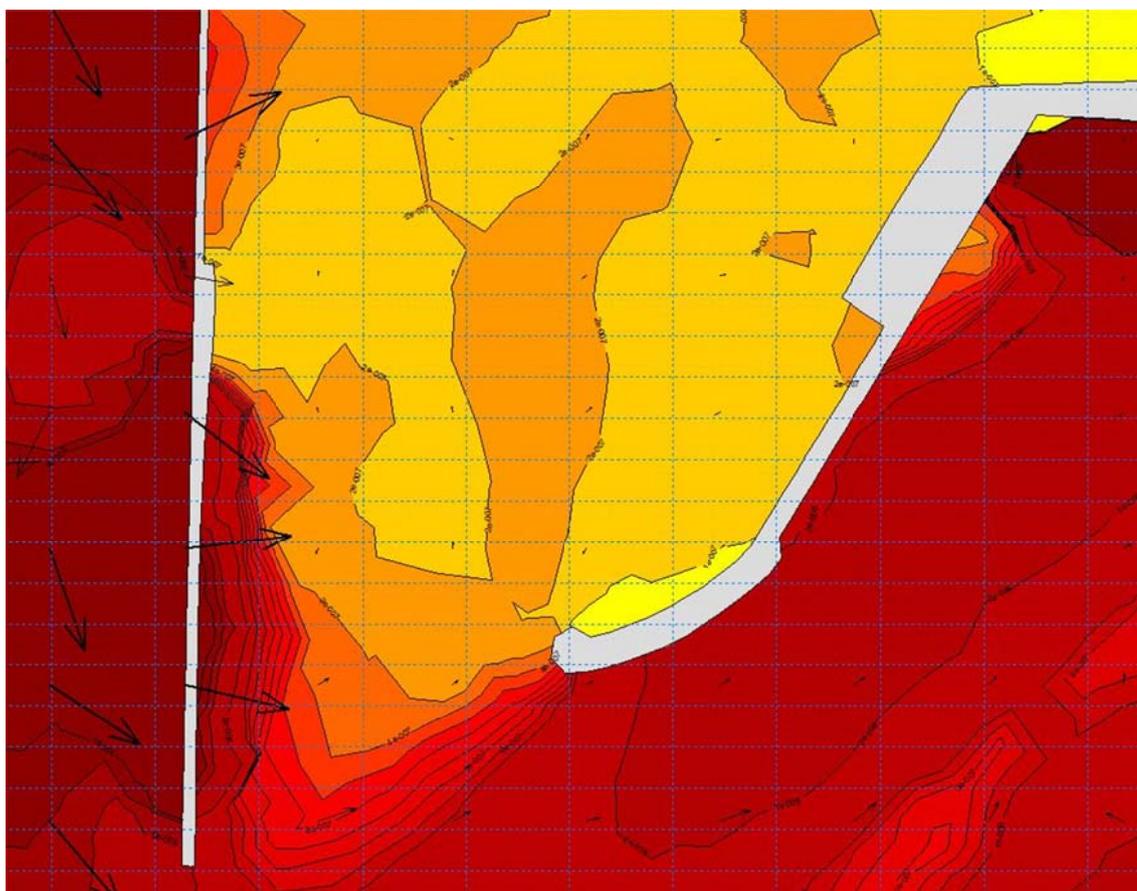


Figura 22 – Capacità di trasporto per tutte le onde pesate in prossimità dell'imboccatura - Progetto

3. CONCLUSIONI

Nella presente relazione è stato esaminato lo studio del trasporto solido in corrispondenza del Porto di Marsala.

Dopo aver esposto i criteri teorici che stanno alla base dei modelli numerici sul trasporto solido e dopo aver descritto i modelli utilizzati si sono applicati gli stessi allo Stato di Fatto in modo da tarare il clima ondoso che deve poi essere applicato al progetto. Verificato che il clima ondoso applicato riproduce qualitativamente e quantitativamente la situazione di fatto, si è analizzata la situazione di progetto notando che la costruzione delle nuove opere foranee produce effetti positivi in prossimità dell'imboccatura senza influire in maniera rilevante sulla costa limitrofa.

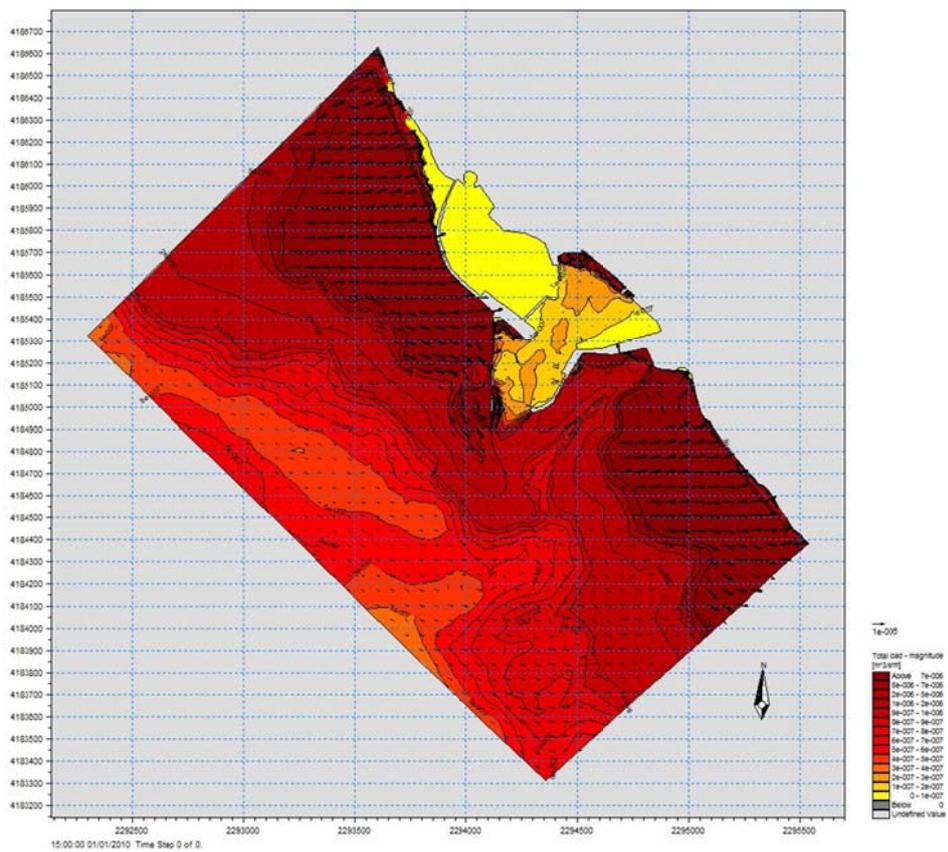
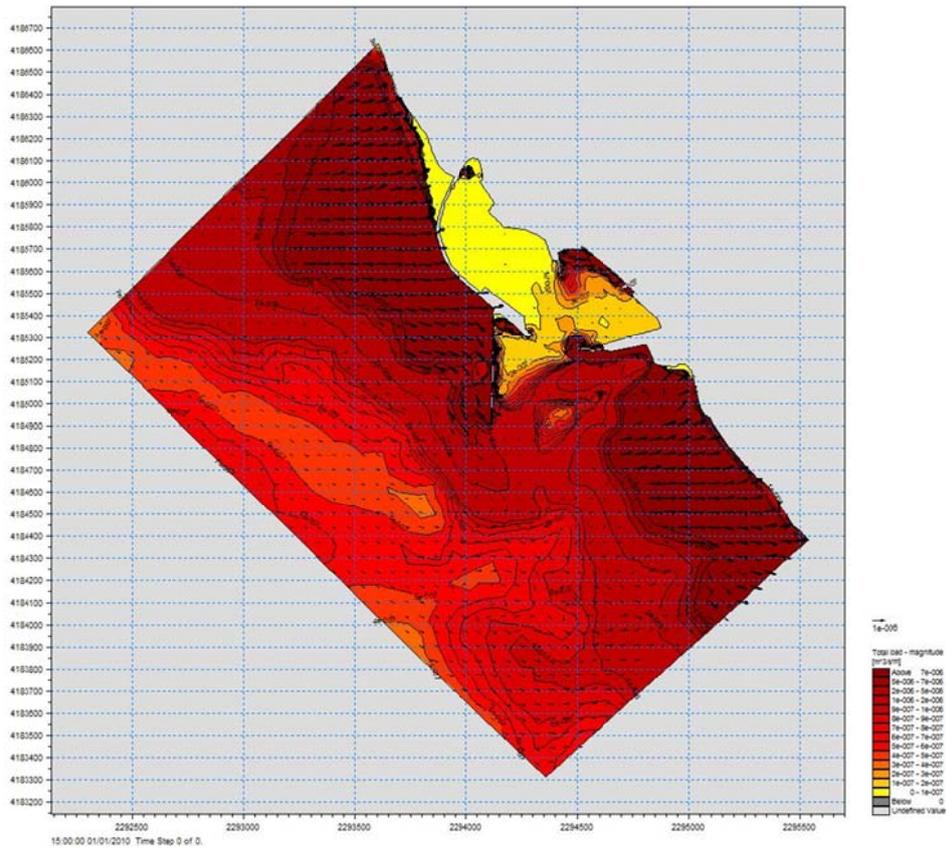
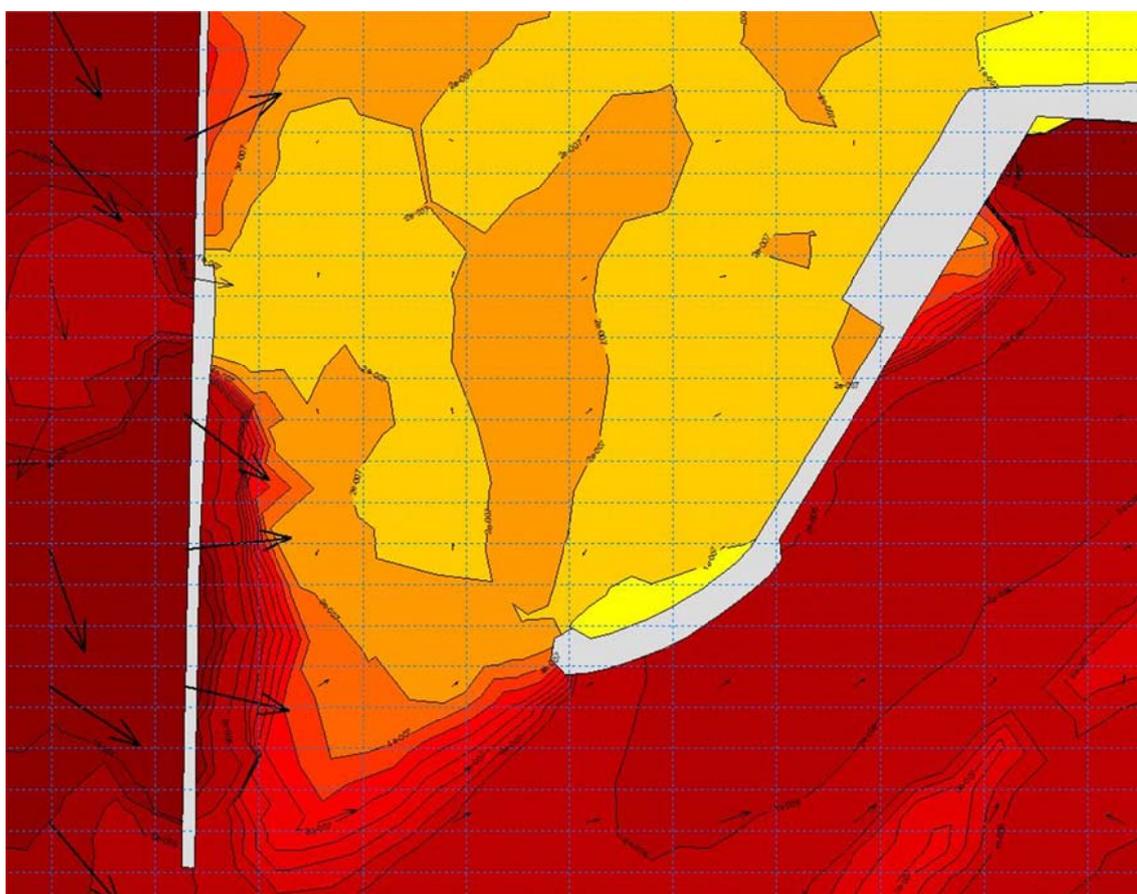
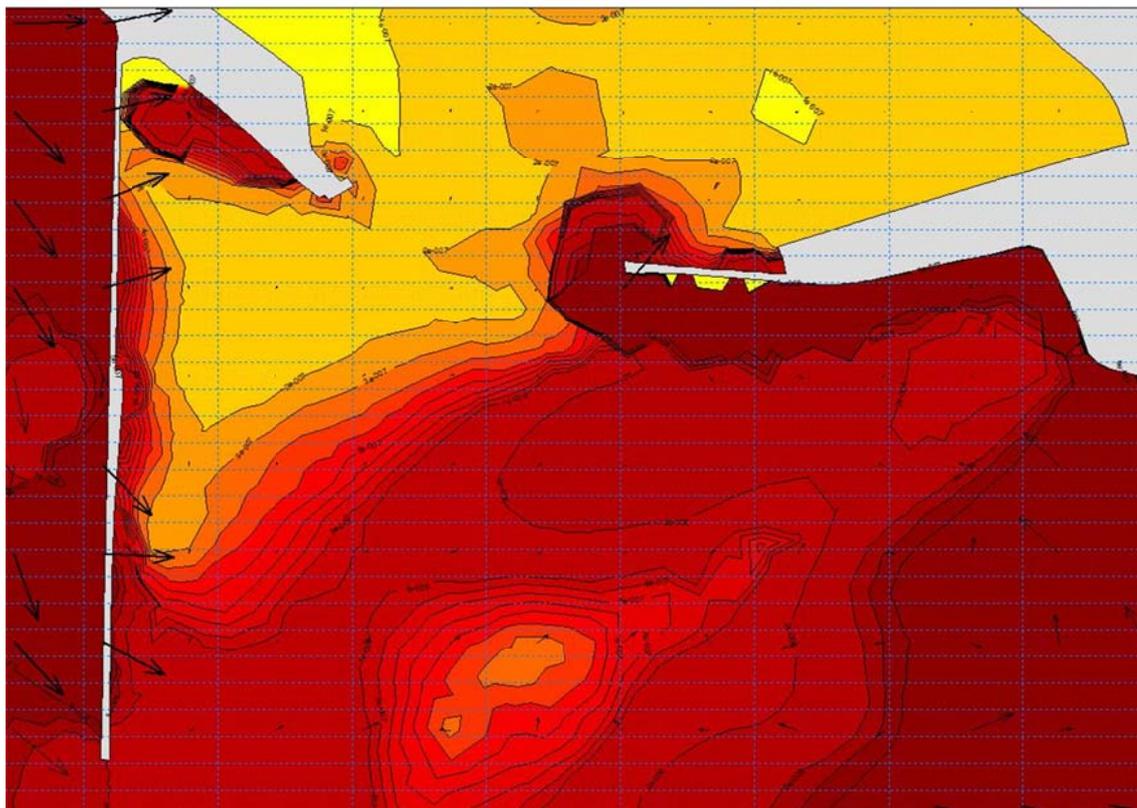


Figura 23 – Capacità di trasporto per tutte le onde – Stato di Fatto e Progetto



**Figura 24 – Capacità di trasporto per tutte le onde in prossimità dell'imboccatura
Stato di Fatto e Progetto**