

PIANO REGOLATORE PORTUALE DEL PORTO DI LIVORNO 2012

Titolo elaborato:

STUDIO DELLA DINAMICA COSTIERA

Scala:

1
0
0
1
0
R
R
0
1
5
-
0
M
A
R

Committente:

AUTORITA' PORTUALE
DI LIVORNO

Progettisti:

MODIMAR S.r.l.
Prof. Ing. Alberto NOLI
TECHNITAL S.p.A.
SCIRO BUREAU VERITAS S.p.A.
ACQUATECNO S.r.l.

	marzo 2013	0	EMISSIONE	A. SANZONE	A. NOLI	M. TARTAGLINI
Rif. Dis.	Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:

Dimensioni foglio: A4

Visto del Committente:

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR

**NUOVO PIANO REGOLATORE PORTUALE
DEL PORTO DI LIVORNO
2012**

STUDIO DELLA DINAMICA COSTIERA

INDICE

1	PREMESSA, OBIETTIVI E METODOLOGIA DI LAVORO	1
2	INQUADRAMENTO GENERALE, ESPOSIZIONE METEOMARINA DEL SITO E CARATTERISTICHE DELLE OPERE FORANEE DEL PRP 2010	5
2.1	Clima di moto ondoso, anno climatico medio	5
2.2	Caratteristiche delle opere foranee previste da PRP	6
3	APPLICAZIONE DEL MODELLO DI PROPAGAZIONE STWAVE	8
3.1	Definizione delle griglie di calcolo	8
3.2	Propagazione degli spettri d'onda associati agli eventi significativi	9
3.3	Risultati della propagazione	10
4	CALCOLO DEL FLUSSO DI ENERGIA LONGITUDINALE ASSOCIATO AL MOTO ONDOSI	12
4.1	Flusso di energia longitudinale associato ad ogni evento	12
4.2	Risultante del flusso di energia longitudinale	14
5	CONCLUSIONI	15

Appendice 1: Figure

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

1 PREMESSA, OBIETTIVI E METODOLOGIA DI LAVORO

La presente relazione descrive lo studio di dinamica costiera condotto, con l'ausilio di idonea modellistica numerica, per verificare in modo oggettivo le potenziali condizioni di interferenza e variazione indotte sulla morfodinamica costiera ad ampia scala, nel tempo e nello spazio, dalle nuove opere foranee del porto di Livorno contemplate nell'ambito della redazione del Nuovo Piano Regolatore Portuale di Livorno.

Tenuto conto della conformazione geomorfologica della fascia litoranea nell'intorno dell'insediamento del sistema portuale di Livorno l'obiettivo primario del presente studio è stato quello di valutare, sulla base del regime di esposizione medio climatico di esposizione al moto ondoso, l'estensione geografica e l'entità della possibile influenza che le nuove opere foranee previste dal PRP possono esercitare lungo la fascia litoranea posta a nord del porto di Livorno.

Lungo i litorali sabbiosi a carattere microtidale, come quelli del mar Tirreno, la dinamica dei sedimenti costieri è dominata dall'azione del moto ondoso frangente responsabile sia della messa in sospensione che del movimento del materiale detritico (in prevalenza sabbioso) che costituisce la fascia attiva di un litorale. Tali movimenti avvengono prevalentemente all'interno della zona dei frangenti e nel campo delle applicazioni di morfodinamica costiera si è soliti schematizzarli in due componenti principali:

- trasporto longitudinale, cioè parallelo alla linea di riva;
- trasporto trasversale.

La prima componente è responsabile dell'evoluzione a lungo termine del litorale (mesi, anni) mentre la seconda governa i fenomeni evolutivi nel breve termine (singola mareggiata). La particolare orografia dei fondali e/o la natura sedimentologica della fascia litoranea, nonché la presenza e conformazione di opere marittime, possono condizionare ed esasperare i suddetti processi di morfodinamica costiera. Nel caso in esame oltre alle strutture foranee del porto di Livorno e le opere di difesa presenti lungo il litorale oggetto dello studio, il complesso

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

geomorfologico delle “Secche della Meloria” può contribuire a rendere ancora più singolare e particolareggiato il regime della morfodinamica litoranea del litorale retrostante.

La metodologia seguita si è articolata nei seguenti punti di indagine condotti con l’ausilio di appositi modelli numerici di idraulica marittima:

1. Sulla base della serie ondometrica, rappresentativa delle condizioni di esposizione climatica al largo di Livorno, definita nell’ambito dello Studio Meteomarine applicando il metodo della “trasposizione geografica” alla sequenza validata di dati ondometrici della boa di La Spezia (della Rete Ondometrica Nazionale attualmente gestita dall’ISPRA), è stato definito il clima di moto ondoso medio annuale (anno climatico medio) rappresentativo delle “forzanti meteomarine” responsabili dei processi di morfodinamica costiera.
2. I singoli eventi di moto ondoso che costituiscono l’anno climatico medio sono stati propagati sottocosta, utilizzando un modello numerico di propagazione spettrale del moto ondoso. I risultati dei calcoli condotti, relativi a tutti gli eventi di moto ondoso che compongono l’anno medio climatico, sono stati memorizzati in corrispondenza di più punti sottocosta (station point) ubicati alla profondità media di -6,0 m s.l.m. e distribuiti con un interasse di 50 m lungo tutto lo sviluppo longitudinale di circa 18 km a partire dall’estremità dell’attuale diga foranea del Marzocco procedendo verso nord.
3. Per ciascun stato di mare al largo, caratterizzato in termini di altezza d’onda, periodo e direzione, e propagato sottocosta sino ai suddetti punti caratteristici (station point), tenendo conto dell’orientamento medio della linea di riva a tergo è stata determinata la componente longitudinale del relativo flusso di energia associato al moto ondoso sottocosta.
4. Associando ad ogni stato di mare la sua frequenza di accadimento ed integrandone i valori di calcolo si è determinata la risultante annuale e il verso del flusso di energia associato al moto ondoso lungo tutto il dominio fisico di calcolo.
5. Questa procedura è stata condotta due volte riferendosi allo “scenario ATTUALE” e successivamente allo “scenario di PRP” inserendo cioè nel dominio di calcolo dei processi di

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

propagazione del moto ondoso le differenti conformazioni planimetriche delle opere foranee portuali

6. La comparazione dei risultati ottenuti relativi ai due scenari simulati ha fornito gli elementi di valutazione oggettiva sulle potenziali interferenze e variazioni imputabili alle nuove opere foranee, in termini di estensione geografica e di intensità, nei confronti dei fenomeni di morfodinamica costiera su area vasta.

Per lo svolgimento dello studio è stato utilizzato il pacchetto applicativo NEMOS incluso nel software package Coastal Engineering Design & Analysis System (**CEDAS** versione 4.03) sviluppato dall'U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station per l'analisi e la progettazione di interventi di ingegneria marittima e costiera e licenziato dalla Very-Tech.

In particolare per la propagazione del moto ondoso è stato applicato il modello STWAVE che, attraverso i moduli operativi WWWL, WSAV, SPECGEN, Grid Generator, consente di predisporre i dati di moto ondoso in ingresso al modello numerico e di implementare una griglia numerica contenente le informazioni batimetriche del sito in esame.

La metodologia di studio utilizzata si basa sull'analisi del campo di variabilità della "forzante" responsabile della mobilitazione dei sedimenti lungo il litorale associata sostanzialmente al flusso di energia del moto ondoso incidente sotto costa. Oltre all'analisi della risultante del flusso si possono esaminare separatamente le due componenti del trasporto longitudinale, una negativa e l'altra positiva, calcolate sulla base dell'orientamento medio della linea di riva in ogni punto di calcolo.

Si precisa che, da un punto di vista quantitativo, questa metodologia non fornisce una stima effettiva dell'entità del trasporto solido litoraneo lungo la fascia attiva ma semplicemente l'ordine di grandezza delle condizioni di interferenza, imputabili alla conformazione delle nuove opere foranee previste dal PRP, rispetto all'attuale dinamica costiera del tratto di costa su area vasta.

Per le finalità progettuali di un Piano Regolatore Portuale ed in particolare per la fase di selezione ed ottimizzazione della nuova conformazione planimetrica delle opere foranee

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

l'impiego di questa metodologia di analisi delle potenziali interferenze sulla morfodinamica dei litorali limitrofi è ampiamente cautelativa in quanto consente un'oggettiva comparazione parametrica tra le due configurazioni portuali esaminate (quella attuale e quella nuova contemplata dal PRP).

Ovviamente tale metodo non entra nel merito dei fenomeni localizzati della morfodinamica costiera e/o delle condizioni di bilancio solido litoraneo ivi compresi gli eventuali apporti terrigeni. D'altra parte questi aspetti di dettaglio della dinamica evolutiva di un litorale sabbioso sono strettamente correlati e condizionati dalla presenza di elementi che ricadono all'interno della fascia attiva del litorale, quali opere di difesa costiera e/o altre strutture poste lungo la spiaggia emersa, le cui ripercussioni "sovrastano" su scala locale gli effetti di "ridosso" eventualmente esercitati dalle nuove opere foranee del porto contemplate dal PRP.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
	10	010	RR	015	-0	MAR	

2 INQUADRAMENTO GENERALE, ESPOSIZIONE METEOMARINA DEL SITO E CARATTERISTICHE DELLE OPERE FORANEE DEL PRP 2010

Il litorale in esame si colloca all'interno dell'ampia unità fisiografica della Toscana settentrionale che si estende tra Livorno e la Bocca di Magra (per circa 60 km in linea d'aria) e più specificatamente costituisce il tratto meridionale della sub-unità fisiografica che si sviluppa per circa 12 km a sud della foce del fiume Arno sino alle scogliere radenti che delimitano lato mare l'ambito nord del porto di Livorno posto in destra idrografica del Canale Scolmatore.

2.1 Clima di moto ondoso, anno climatico medio

Il paraggio in esame risulta esposto prevalentemente agli stati di mare provenienti da libeccio e da ponente. Nell'ambito dello studio meteomarino sono state valutate le condizioni di esposizione meteomarina al largo della costa di Livorno in corrispondenza del punto di trasposizione geografica di coordinate 10.0°E-43.5°N.

Utilizzando i risultati dell'analisi dei dati ondometrici ricostruiti a largo di Livorno è stato possibile definire una serie sintetica di onde rappresentativa dell'anno climatico medio.

Sulla base della frequenza di accadimento stagionale degli eventi di moto ondoso, suddivisi per classi di altezza e direzione, sono stati definiti una serie di eventi triorari rappresentativi del clima di moto ondoso stagionale. Successivamente i suddetti eventi sono stati ridistribuiti casualmente, all'interno della stagione, secondo una distribuzione di tipo Gauss con varianza 1 e media nulla.

Complessivamente sono stati sintetizzati 2920 stati di mare con cadenza trioraria, rappresentativi dell'anno climatico medio. È stato assunto come settore di traversia quello compreso tra 185 °N e 345 °N. Del totale di 2920 eventi, 1693 (~57%) sono risultati inferiori, come altezza d'onda significativa, a 0.5 m o esterni al settore di traversia indicato. Tali eventi costituiscono un contributo trascurabile o nullo al flusso longitudinale che causa la modellazione della spiaggia e sono stati di conseguenza assunti come valori di calma.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

I restanti 1227 eventi sono stati suddivisi secondo classi di altezza, periodo e direzione come riportato nel diagramma di Figura 2. Nel complesso sono stati definiti 71 stati di mare rappresentativi del clima meteomarinario dinanzi a Livorno, contraddistinto pertanto da valori di altezza d'onda compresi tra 0.75 m e 5.25 m provenienti dal settore di traversia al largo compreso tra 190° e 340°N.

2.2 Caratteristiche delle opere foranee previste da PRP

Nel nuovo Piano Regolatore Portuale del porto di Livorno è previsto l'ampliamento del porto esistente attraverso la realizzazione di un ampio bacino esterno (denominato Piattaforma Europa), a nord della diga del Marzocco, fino alla foce del canale Scolmatore d'Arno.

La delimitazione del Bacino della Piattaforma Europa a Nord è stata prevista con un'opera di difesa radicata alla sponda sud della foce del Calambrone ed orientata nello stesso modo dell'attuale opera di difesa settentrionale del porto (Diga del Marzocco), cioè in pratica secondo la direzione libeccio-grecale.

L'opera di difesa, denominata diga nord, mantiene l'orientamento libeccio-grecale per circa 3.000 m fino a raggiungere fondali naturali dell'ordine di 10 m, indi devia descrivendo un arco di cerchio di raggio pari a circa 600 m e poi prosegue in direzione SSE per circa 800 m, raggiungendo la batimetrica -15 m, in modo tale da delimitare la nuova imboccatura portuale e l'avamposto.

A sud il nuovo avamposto e l'imboccatura esterna sono delimitati da una diga rettilinea distaccata lunga circa 450 m.

La protezione del bacino della Piattaforma Europa è completata da due opere, che delimitano l'imboccatura interna, delle quali quella a sud, ad andamento curvilineo, lunga circa 750 m, ha origine dall'estremo nord della diga curvilinea, mentre l'altra, anch'essa ad andamento curvilineo, radicata alla diga nord, pressappoco alla fine del tratto rettilineo, è lunga circa 950 m e orientata secondo la direzione NNW-SSE.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

All'interno del bacino nord del nuovo avamposto esterno è prevista la realizzazione del terminal petrolifero mentre nel bacino interno della Piattaforma Europa è prevista la realizzazione di una darsena operativa per navi porta contenitori e/o ro-ro di lunghezza pari a 1200 m, larga 300 m, attraccabile sui due lati ed orientata secondo la direzione più favorevole, che è quella di libeccio-grecale. Il terrapieno settentrionale, destinato ai traffici ro-ro, ha una larghezza di 550 m, fino al limite della nuova diga di protezione; mentre il terrapieno meridionale, destinato al traffico dei containers, ha una larghezza di 650 m.

Per consentire l'ingresso in porto del canale dei Navicelli lungo il tratto iniziale della diga nord, in corrispondenza dell'argine nord della seconda vasca di contenimento, è stata prevista la realizzazione di una darsena (denominata darsena dei Navicelli), ricavata all'interno del piazzale nord della Piattaforma Europa, dotata di una banchina di attracco lunga circa 500 m con un piazzale operativo a tergo largo 50 m (superficie 2.5 ha).

Alla foce del canale Scolmatore, sulla sponda nord, è inoltre indicata un'opera a scogliera ad andamento curvilineo lunga circa 600 m, prevista nel progetto di adeguamento idraulico del canale scolmatore d'Arno redatto nell'ambito dell'accordo di programma per la progettazione dello sviluppo dell'area costiera Pisa-Livorno, che raggiunge profondità dell'ordine di 3.5 m e completa l'intervento di armatura della foce del canale necessario anche per garantire l'uscita diretta in mare aperto alle imbarcazioni da diporto che utilizzano il canale dei Navicelli.

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR

3 APPLICAZIONE DEL MODELLO DI PROPAGAZIONE STWAVE

Il modulo STWAVE è un modello spettrale alle differenze finite, basato sull'equazione di bilancio dell'energia associata al moto ondoso, che consente di propagare stati di moto ondoso all'interno di un dominio di calcolo rappresentativo di una generica batimetria con valori del tirante idrico $d = d(X,Y)$. Il modello utilizza come condizione al contorno, lungo il bordo esposto verso largo, gli spettri di energia precedentemente generati a partire dagli eventi di moto ondoso in ingresso. Il modulo STWAVE simula i principali fenomeni di propagazione per fondale variabile, come gli effetti di rifrazione e shoaling e gli effetti dissipativi dovuti al frangimento.

3.1 Definizione delle griglie di calcolo

Il primo passo per l'applicazione del modello è la definizione della griglia di calcolo a passo regolare che viene creata a partire da una serie di punti X,Y,Z.

Nel caso in esame è stato necessario definire due distinte griglie di calcolo: una relativa allo scenario attuale, l'altra relativa al nuovo scenario di assetto planimetrico delle opere foranee previste dalla proposta di revisione del piano regolatore del 2010.

Le griglie sono state costruite a partire dai dati batimetrici desumibili dalle Carte Nautiche (foglio CN 4 – Dal Gombo al Canale di Piombini e CN 120 – litorale di Livorno) opportunamente georeferenziate e convertite in coordinate piane Gauss-Boaga. La griglia così generata rappresentativa dello "scenario ATTUALE" è stata modificata georeferenziando sulla base cartografica le nuove opere foranee previste dal PRP e definendo la seconda griglia rappresentativa dello "scenario di PRP".

In Figura 4 e in Figura 5 sono riportate le due griglie di calcolo utilizzate rispettivamente per le simulazioni dello scenario attuale e di PRP. In rosso sono riportati i punti sottocosta (*station point*), impostati sulla batimetria -6.0 m s.l.m., in corrispondenza dei quali sono stati registrati i risultati delle simulazioni di propagazione sottocosta.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

Come è possibile osservare dal confronto delle due griglie l’inserimento delle opere foranee è tale che i punti sottocosta più a sud, prossimi alle attuali opere foranee del porto, nel caso del scenario di PRP, sostanzialmente ricadono all’interno dei nuovi ambiti portuali e quindi “a terra” rispetto al dominio geografico di calcolo della fascia litoranea oggetto del presente studio che si sviluppa a nord del margine delle opere foranee. Per tali punti le caratteristiche del moto ondoso (altezza, direzione e periodo) come risultato delle simulazioni di propagazione viene ovviamente imposto identicamente nullo dal codice di calcolo.

Le griglie si estendono per 24.000 m lungo l’asse X e di 36.000 m lungo l’asse Y; l’angolo tra il Nord e l’asse X del sistema di riferimento di STWAVE è pari a 80°; il passo di discretizzazione adottato è pari a 50 metri. Complessivamente la griglia contiene un totale di 345.600 nodi di calcolo (480×720).

3.2 Propagazione degli spettri d’onda associati agli eventi significativi

I 71 stati di mare precedentemente definiti come “significativi” per rappresentare l’esposizione medio climatica del sito in esame, sono stati successivamente propagati da largo verso riva con STWAVE in modo da ottenere negli station point le caratteristiche del moto ondoso sottocosta (in termini di altezza, direzione e periodo). Essendo STWAVE un modello di propagazione spettrale è stato necessario definire per tutti gli eventi significativi uno spettro rappresentativo variabile in frequenza e direzione. Con l’applicazione SPECGEN, interna al software NEMOS, si possono generare diverse tipologie di spettri (JONSWAP, Pierson-Moskowitz,TMA). La distribuzione direzionale dell’energia viene valutata utilizzando la formula di Mitsuyashu. I diversi spettri, rappresentativi dei 71 stati, sono stati così propagati con STWAVE sulle griglie di calcolo.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

3.3 Risultati della propagazione

In allegato dalla Figura 6 alla Figura 14 sono riportati, a titolo illustrativo, i risultati ottenuti per 3 dei 71 eventi propogati relativi ai seguenti eventi:

- Evento 37: Hs:1.75 m– T:6.67 s – Dir:10° X (250°N), rappresentativo dell’onda morfologica al largo di Livorno.
- Evento 40: Hs:1.75 m– T:6.67 s – Dir:-20° X (280°N), rappresentativo degli stati di mare provenienti da maestrale.
- Evento 71: Hs: 5.25 m – T:10.0 s – Dir:10°X (250°N), rappresentativo di un evento di mareggiata con frequenza annuale.

I risultati riportano il campo di altezza d’onda, ottenuto all’interno del dominio di calcolo, in cui è possibile apprezzare la variazione di direzione e la variazioni di altezza che l’onda propagata subisce a causa dei fenomeni di rifrazione e shoaling dovuti al fondale variabile. I grafici di Figura 7, Figura 9, e Figura 11 riportano i risultati, in termini di altezza d’onda e direzione, registrati in corrispondenza degli station points, alla profondità di 6.0 m sul l.m.m..

Dall’analisi dei risultati si può dedurre che il moto ondoso sottocosta presenta una forte variabilità, in termini di altezza d’onda e direzione, lungo il tratto di costa in esame rispetto alle caratteristiche dell’onda al largo. Ciò è riconducibile alla particolare conformazione dei fondali e al singolare orientamento della linea di costa.

In particolare, i calcoli condotti evidenziano che la presenza delle secche della Meloria esercita un effetto di “filtro” con comportamento d’insieme dei fenomeni di propagazione del moto ondoso variabile in funzione del valore dell’altezza d’onda. Per onde di ampiezza sino a 3.0 m le secche esasperano l’effetto di shoaling, processo per il quale, per il principio di conservazione dell’energia, le onde su bassi fondali tendono a ridurre la loro lunghezza aumentando in altezza. Altezze d’onda superiori a 3.0 m sono invece limitate ed alterate nel percorso di propagazione perché i bassi fondali delle secche inducono il frangimento delle stesse onde.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

Allo stesso tempo i fronti d'onda, sempre a causa della variazione dei fondali, subiscono in corrispondenza delle secche un marcato effetto di rifrazione come testimoniato dalla generale convergenza in termini di direzione di propagazione dei fronti d'onda.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

4 CALCOLO DEL FLUSSO DI ENERGIA LONGITUDINALE ASSOCIATO AL MOTO ONDOSO

In generale la componente longitudinale del trasporto solido potenziale Q_l (il pedice l sta per “longshore” ossia lungo costa) è data dal prodotto di un termine “sedimentario”, cioè funzione delle caratteristiche del sedimento che costituisce la matrice detritica della fascia attiva del litorale, e di un termine “motore” funzione della componente longitudinale del lavoro compiuto dal moto ondoso (forzante), riferita all’unità di metro della spiaggia.

Il termine “motore” è rappresentato quindi dal flusso di energia longitudinale associato al moto ondoso, parallelo alla costa in ogni punto.

Prescindendo dal termine sedimentario, è possibile valutare le caratteristiche del trasporto solido litoraneo osservando come varia lungo la costa il flusso di energia longitudinale.

4.1 Flusso di energia longitudinale associato ad ogni evento

A seguito della propagazione degli spettri d’onda rappresentativi del clima di moto ondoso a largo di Livorno è stato calcolato in ogni punto di registrazione sottocosta il flusso di energia associato al moto ondoso.

L’energia del moto ondoso per unità di superficie è data dalla seguente relazione:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad \left[\frac{M}{T^2} \right] (\times L^2)$$

in cui ρ è la densità dell’acqua, g l’accelerazione di gravità e H l’altezza d’onda dell’evento di moto ondoso.

Il flusso di energia P , per unità di fronte d’onda, è dato dalla seguente espressione:

$$\vec{P} = E \vec{C}_g = E n \vec{C} \quad \left[\frac{ML^2}{T^2} \cdot \frac{1}{T} \right] (\times L)$$

In cui C_g rappresenta la celerità di gruppo, definita come il prodotto tra il numero n , funzione del numero d’onda e della profondità h , e la celerità di fase C .

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR

$$C_g = nC = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(kh)} \right)$$

Il trasporto solido litoraneo dei sedimenti è direttamente correlato al flusso longitudinale di energia del moto ondoso per unità di lunghezza di spiaggia.

Con riferimento allo schema di calcolo di Figura 14, la componente longitudinale P_l del flusso di energia del moto ondoso è data dalla relazione:

$$P_l = P \cdot \sin \alpha = (E \cdot C_g) \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha = \frac{1}{2} (E \cdot C_g) \cdot \sin(2\alpha)$$

in cui entra in gioco l'angolo α formato dalla normale alla linea di riva e il moto ondoso incidente.

Per le finalità del presente studio è possibile utilizzare una formulazione semplificata per il flusso di energia. Utilizzando la relazione di dispersione:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

È possibile semplificare, sotto l'ipotesi che siano verificate le condizioni di acqua profonda, la relazione della celerità di gruppo:

$$C = 1.56 \times T$$

Utilizzando le comuni funzioni di correlazione tra altezza e periodo è possibile dimostrare che il flusso di energia risulta correlabile all'altezza d'onda:

$$\vec{P} = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^{2.5} \hat{n}$$

Sostituendo nella relazione del flusso di energia longitudinale si ottiene infine il risultato cercato:

$$P_l = K \cdot H^{2.5} \cdot \sin(2\alpha)$$

In cui il termine K racchiude tutte le costanti precedentemente descritte presenti nell'equazioni.

Per effettuare il calcolo è stata utilizzata una procedura automatica che in ogni station points e per ogni evento propagato, ha calcolato l'angolo α , come differenza tra la direzione del moto

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

ondoso e l'orientamento della linea di riva, per poi calcolare il flusso longitudinale utilizzando la precedentemente relazione.

4.2 Risultante del flusso di energia longitudinale

Per determinare la risultante annuale del flusso longitudinale di energia è stata associata ad ogni evento la sua frequenza di accadimento annuale relativa all'anno climatico medio.

È stato così possibile determinare in ogni station points la risultante del flusso longitudinale, distinguendo inoltre la componente positiva e la componente negativa.

L'andamento della risultante del flusso longitudinale ottenuta sulla base dei dati di moto ondoso propagati sottocosta è riportata nei grafici di Figura 15 e Figura 17 dove sono riportati rispettivamente i risultati relativi alla configurazione attuale e a quella di PRP.

Secondo la convenzione adottata un flusso di energia positivo è causa di un trasporto solido litoraneo diretto nel verso concorde all'asse di riferimento, mentre un flusso negativo è indice di un trasporto con verso contrario all'asse di riferimento.

Nel caso in esame ciò si traduce in un trasporto potenziale diretto verso nord nel caso di flusso positivo (indotto prevalentemente dagli stati di mare provenienti dal III quadrante) e un trasporto potenziale diretto verso sud nel caso di flusso negativo (indotto dagli stati di mare provenienti dal IV quadrante).

Nei grafici di Figura 16 e Figura 18 sono rappresentati oltre alla risultante del flusso longitudinale anche le due componenti positiva e negativa rispettivamente per lo scenario attuale e quello di PRP.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

5 CONCLUSIONI

Da una prima analisi delle due serie di simulazioni condotte non si osservano sostanziali variazioni qualitative a conferma che comunque le nuove opere foranee contemplate dal PRP non introducono sostanziali alterazioni rispetto alle attuali condizioni di morfodinamica litoranea associata alle condizioni di esposizione rispetto al clima d'onda medio.

L'insieme delle simulazioni condotte, in funzione del clima medio di moto ondoso assunto come rappresentativo al largo Livorno, ed i risultati ottenuti in termini di flusso potenziale del trasporto solido litoraneo e rappresentato nelle suddite figure consente di trarre in modo oggettivo le seguenti considerazioni di morfodinamica litoranea.

- Il tratto di litorale che si estende dal margine nord del sistema portuale di Livorno per circa 18 km è contraddistinto da due zone ove si registrano condizioni potenziali di "divergenza" dei flussi di trasporto solido litoraneo così distinti:
 - quella più a nord si colloca in corrispondenza della foce del fiume Arno ed è associato alla conformazione deltizia della linea di riva ancorché ormai condizionata dalla presenza di elementi antropici di "armatura" dell'apparato di foce e di difesa del litorale di Marina di Pisa a sud;
 - quella più a sud si colloca sulla destra idrografica del Canale Scolmatore ed è associato all'effetto di "schermo" indotto dalle secche della Meloria che determina una tendenza alla migrazione in senso negativo dei sedimenti dal margine sud della spiaggia del Calambrone come peraltro testimoniato dalla tendenza alla formazione di una barra di sabbia che tende storicamente ad occludere la foce del Canale Scolmatore.
- Lungo il litorale compreso tra queste due zone, contraddistinte da condizioni di divergenza del flusso solido litoraneo, si hanno condizioni di convergenza dei flussi risultando positivi (quindi diretti verso nord) procedendo dalla spiaggia del Calambrone lungo tutta la spiaggia di Tirrenia per registrare poi un flusso negativo (diretto verso sud) procedendo lungo la

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

spiaggia di Marina di Pisa. Nel suo insieme riflette quindi condizioni di tendenza di migrazione dei sedimenti dalle due estremità per convergere verso la zona centrale.

- In termini di variazione differenziale del trasporto solido potenziale che si registra lungo questo tratto di litorale i valori massimi si hanno per:
 - il tratto sud della spiaggia del Calambrone, per circa 4 km a partire dalla foce del Canale Scolmatore ove effettivamente negli ultimi decenni si sono registrati i fenomeni di erosione più marcati;
 - l'altra zona di estremità che ricade lungo il litorale di Marina di Pisa per la quale pur essendo ormai sostanzialmente "cinturata" da un articolato insieme di opere di difesa litoranea continua a far registrare fenomeni di progressivo depauperamento del bilancio solido litoraneo.
- il tratto di litorale intermedio è quello che ovviamente beneficia delle condizioni di convergenza del trasporto solido litoraneo come peraltro testimoniato dal progressivo generale avanzamento della linea di riva registrato negli ultimi decenni per questa zona del litorale in esame.

Al fine di rendere più esplicitivi l'insieme delle simulazioni condotte i risultati relativi ai due scenari "ATTUALE" e "PRP" sono riportati sovrapposti nel grafico di Figura 19 e come differenza relativa ($Q_{PRP} - Q_{ATTUALE}$) nella Figura 20.

Da queste figure si evince che, al netto del primo tratto a sud del dominio di calcolo (interessato dalla realizzazione delle nuove opere foranee del porto di Livorno) il tratto della fascia litoranea posta a nord che potenzialmente può risentire della presenza delle nuove opere è comunque limitato ad un "intorno" inferiore a 4 km ove si registra una generale riduzione del trasporto solido potenziale in ragione dell'effetto di ridosso che le nuove opere foranee esercitano sottoflutto rispetto agli stati di mare prevalenti (per intensità e frequenza) provenienti dal III quadrante.

Le variazioni che si possono registrare a seguito della realizzazione delle nuove opere previste dal PRP non comportano fenomeni di inversione della componente longitudinale del trasporto

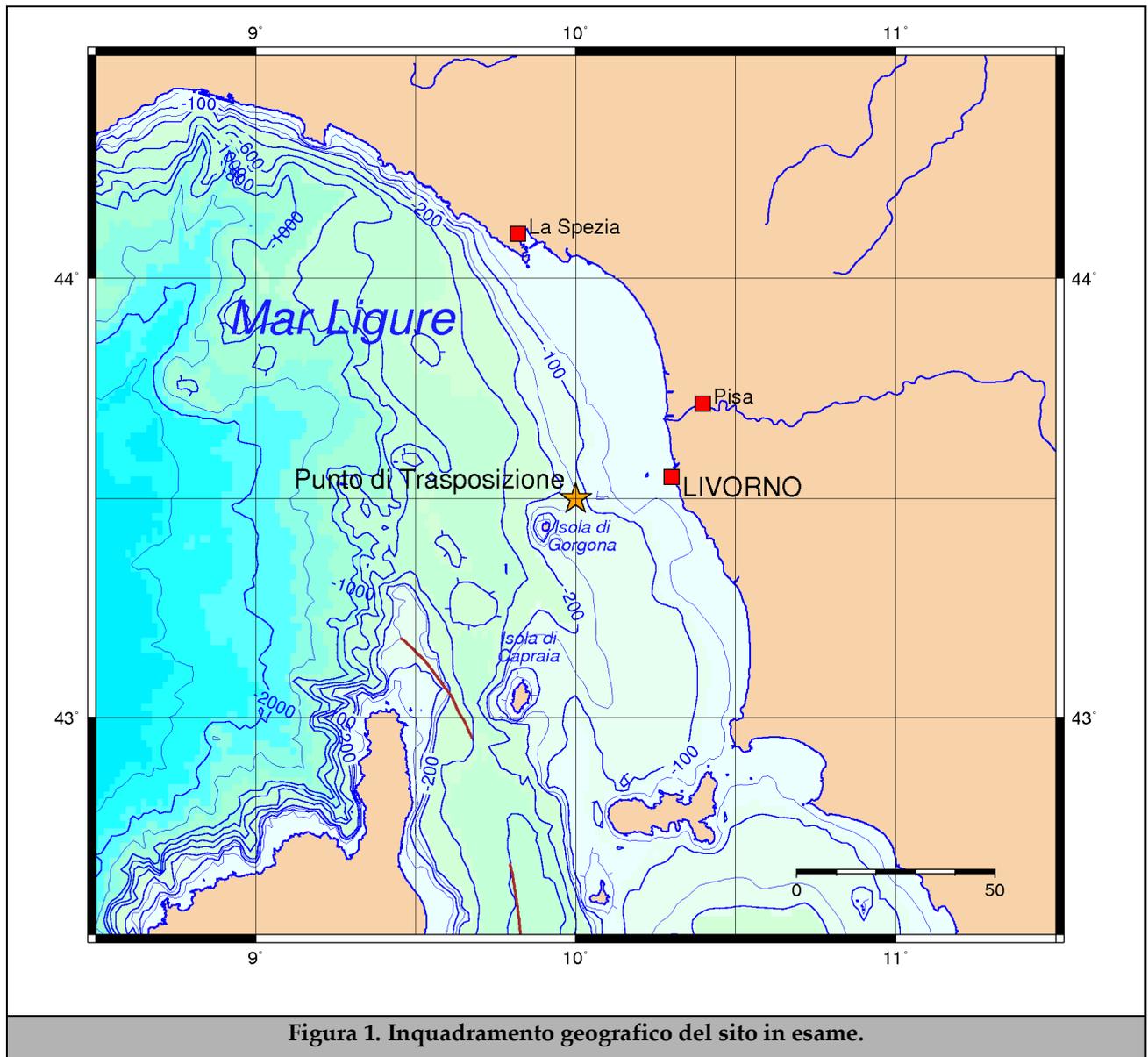
 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

solido e comunque con una generale attenuazione degli attuali valori potenziali di trasporto solido per il tratto di litorale che si estende per circa 4 km dalla foce del Canale Scolmatore lungo la spiaggia del Calambrone. Queste variazioni sono comunque limitate anche in termini differenziali relativi e pertanto sulla base dei dati oggettivi esaminati possono escludersi possibili impatti negativi imputabili al nuovo assetto planimetrico contemplato dal PRP (2010) sui processi di morfodinamica dei litorali adiacenti.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

APPENDICE A

Figure



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

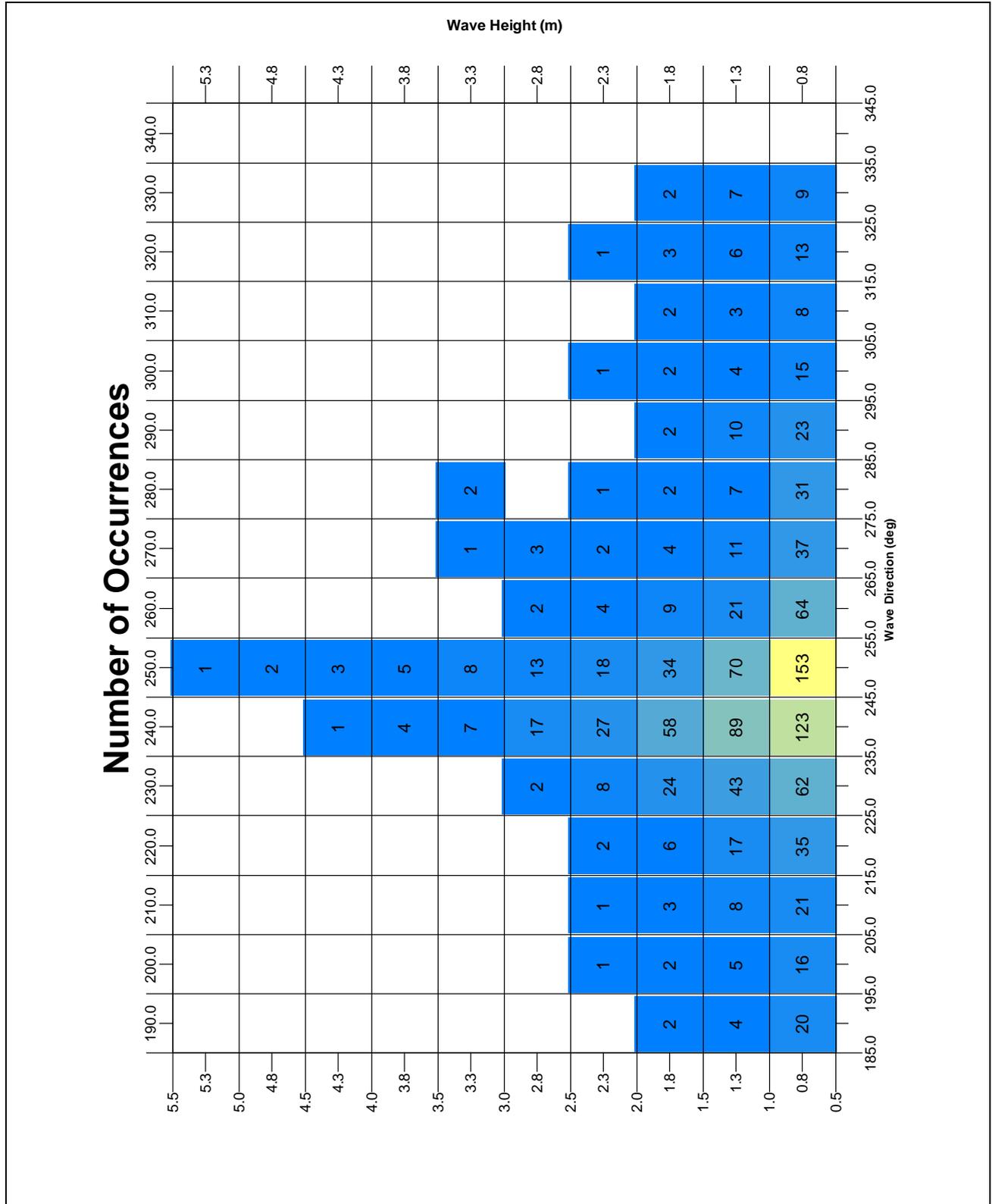


Figura 2. Definizione dell'anno climatico medio per il moto ondoso al largo di Livorno.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR

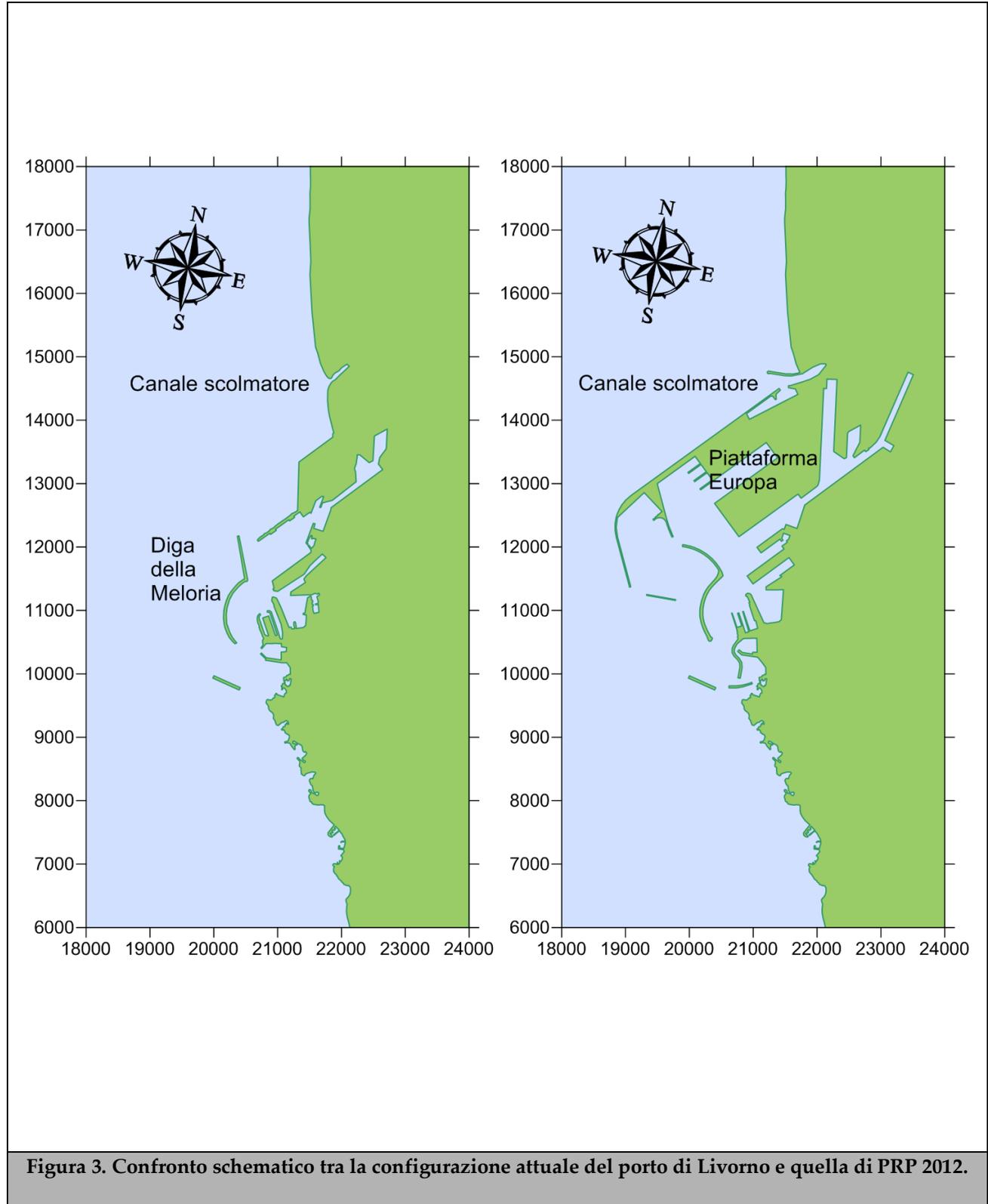
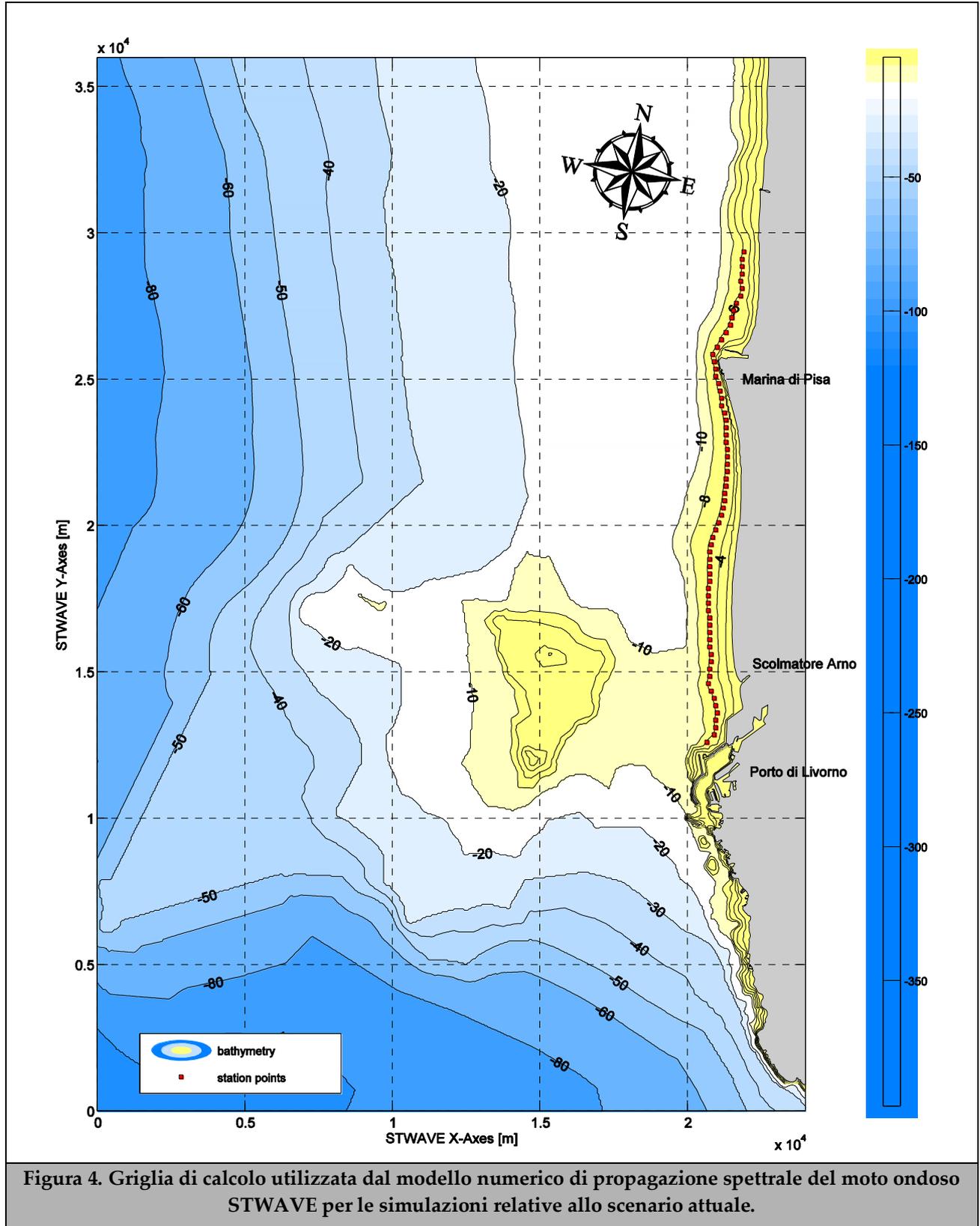
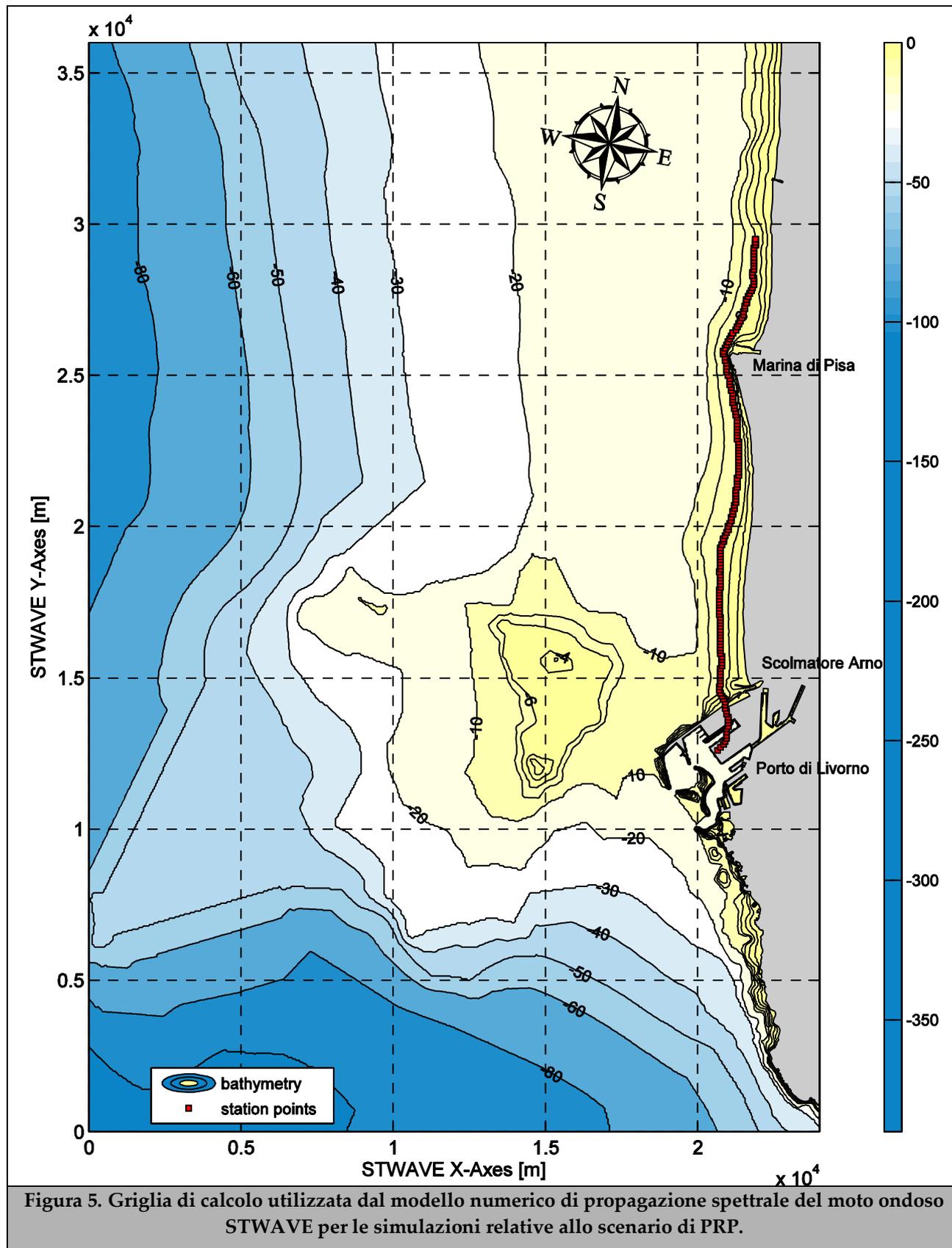


Figura 3. Confronto schematico tra la configurazione attuale del porto di Livorno e quella di PRP 2012.

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciuro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR





 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR

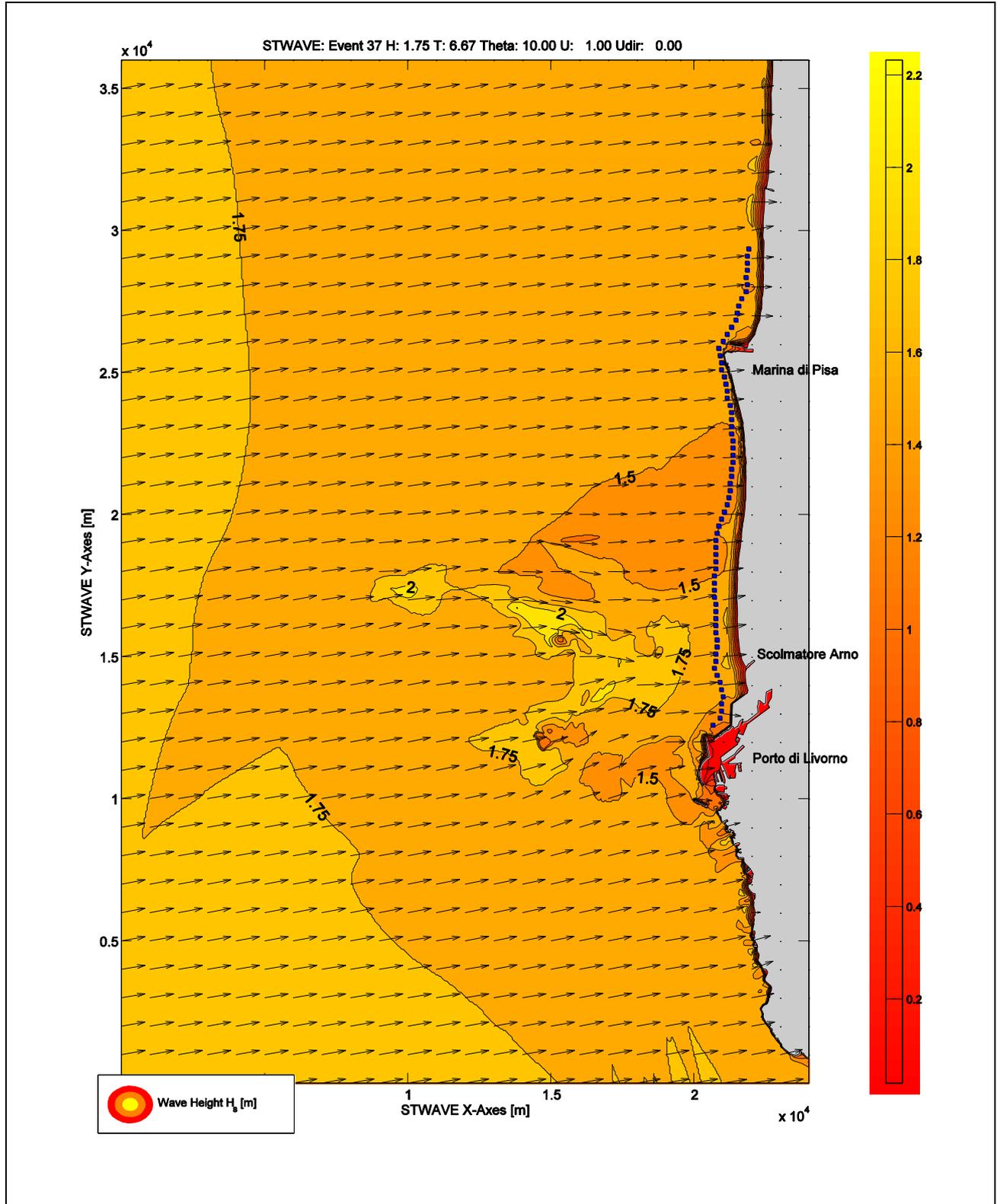


Figura 6. Rappresentazione del campo di altezza d'onda relativo alla propagazione dell'evento rappresentativo dell'onda morfologica annuale [$H_s = 1.75$ T = 6.7 s Dir = 10° X (250° N)].



Autorità Portuale di Livorno

Piano Regolatore Portuale 2012

Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera

Data: marzo 2013

10 010 RR 015 -0 MAR

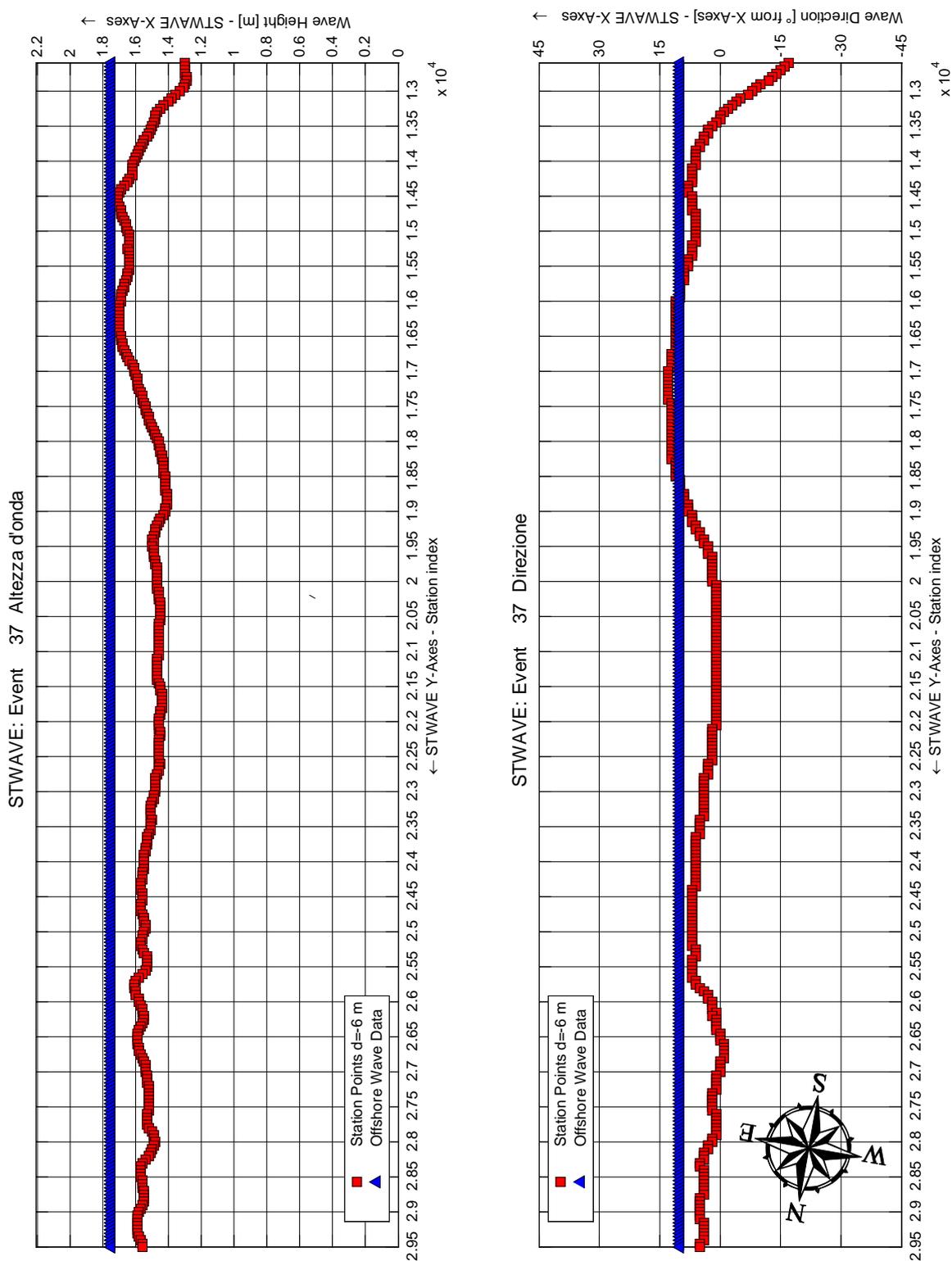
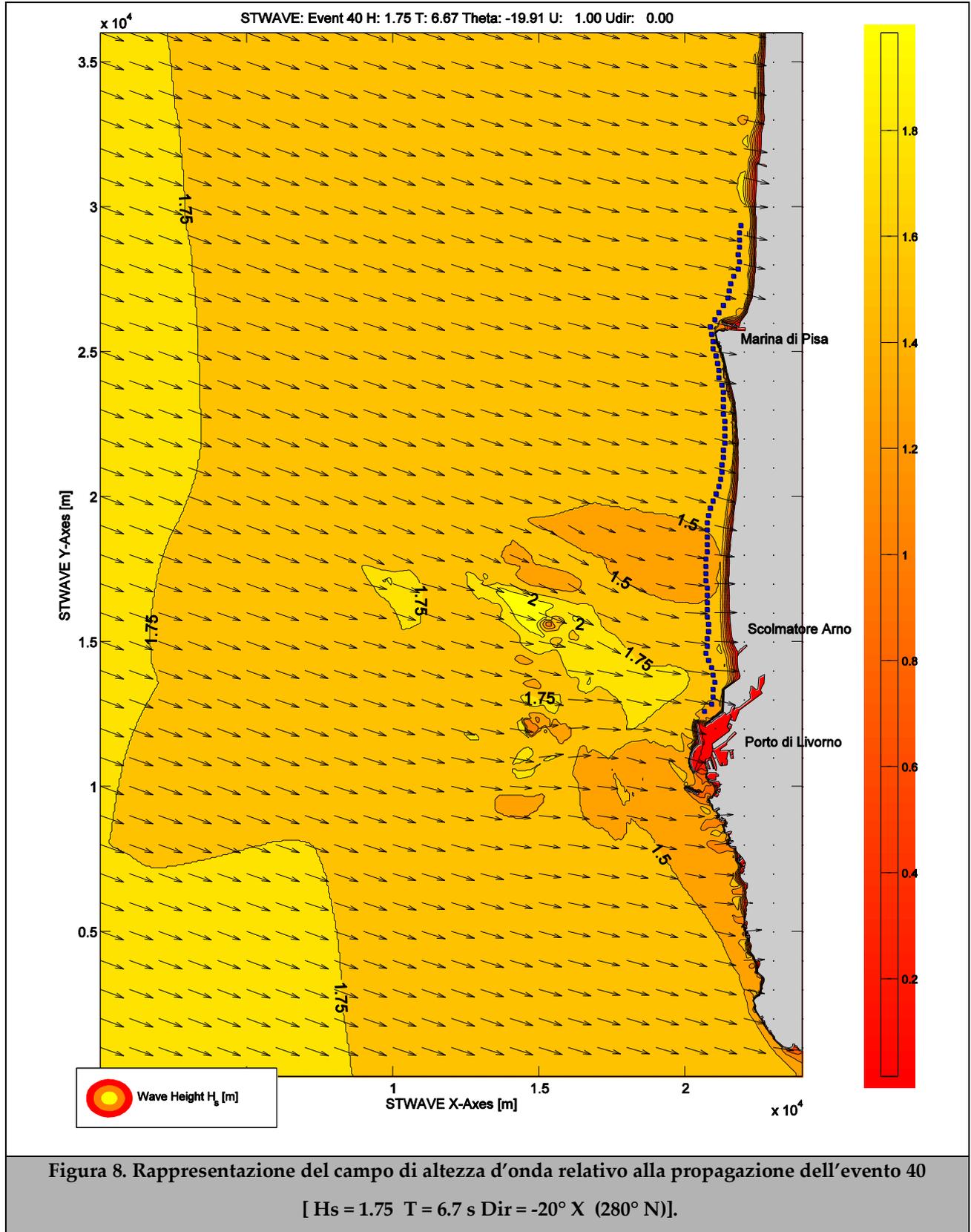


Figura 7. Altezza d'onda e direzione registrate negli station points per l'evento 37

[$H_s=1.75$ m $T=6.67$ s $Dir = 10^\circ$ X (250° N)].

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR





Autorità Portuale di Livorno

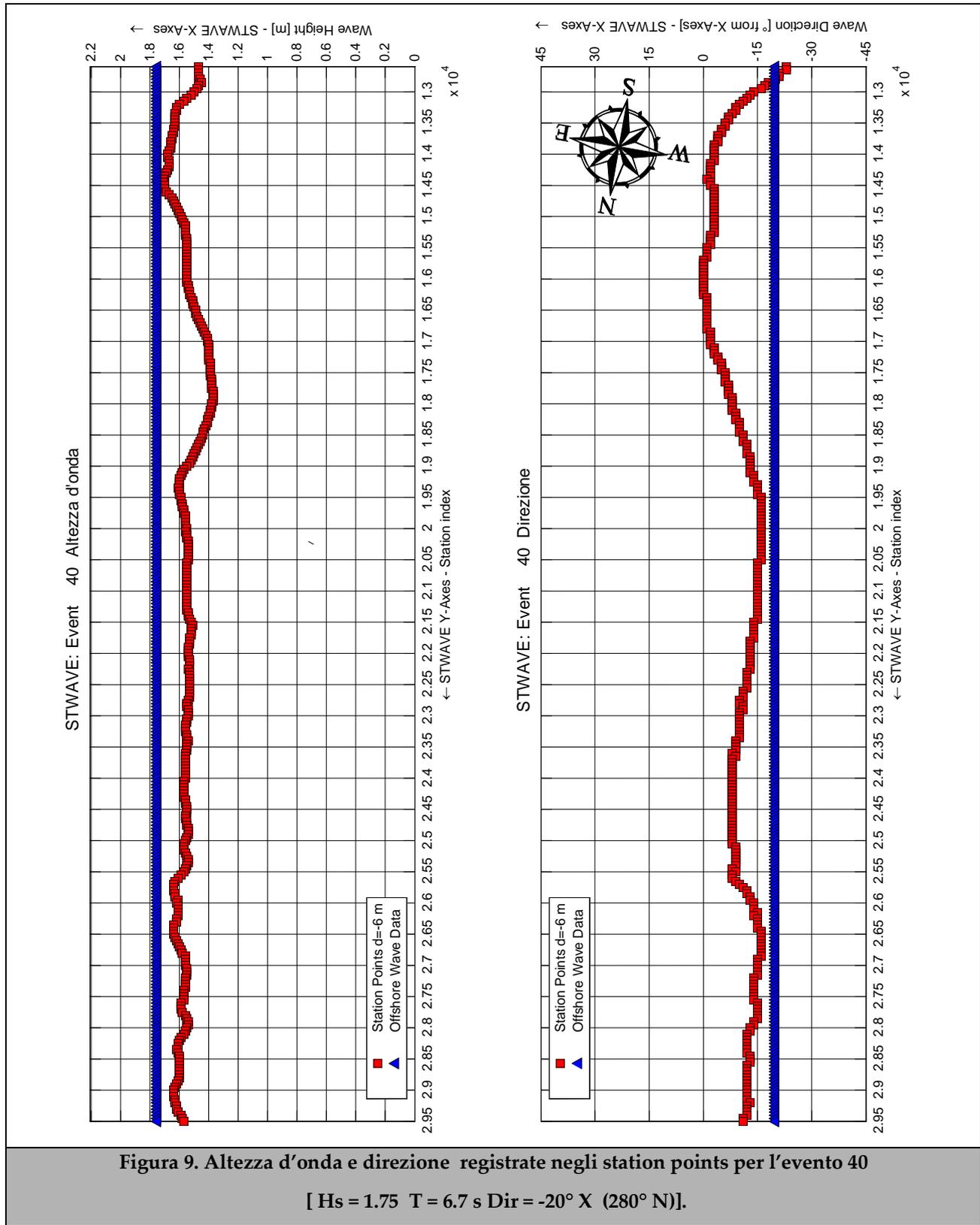
Piano Regolatore Portuale 2012

Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera

Data: marzo 2013

10 010 RR 015 -0 MAR



 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
	Piano Regolatore Portuale 2012	Data: marzo 2013	10	010	RR	015	-0

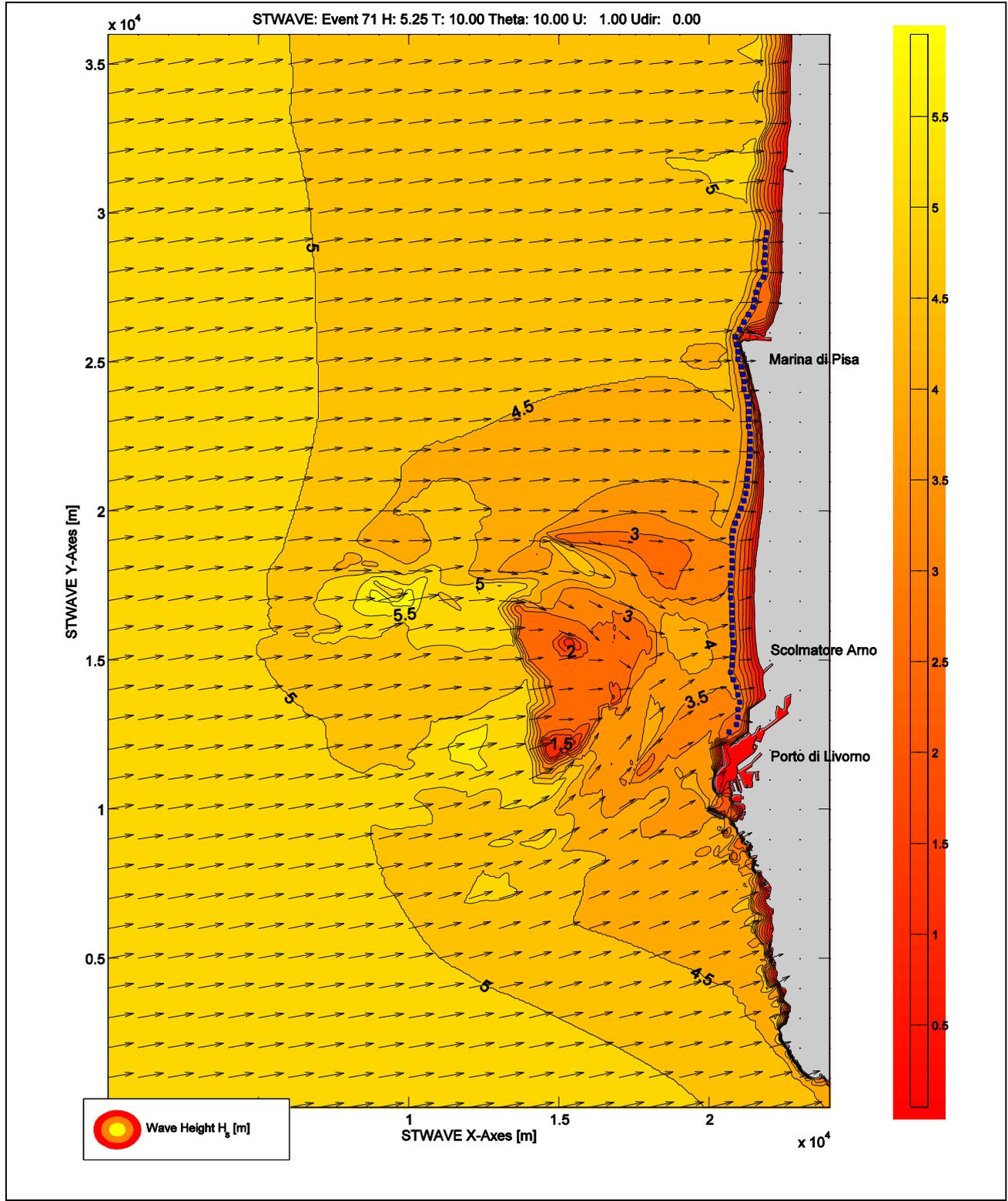


Figura 10. Rappresentazione del campo di altezza d'onda relativo alla propagazione dell'evento 71

[$H_s = 5.25$ T = 10.0 s Dir = 10° X (250° N)].

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera				
		Data: marzo 2013				
	10	010	RR	015	-0	MAR

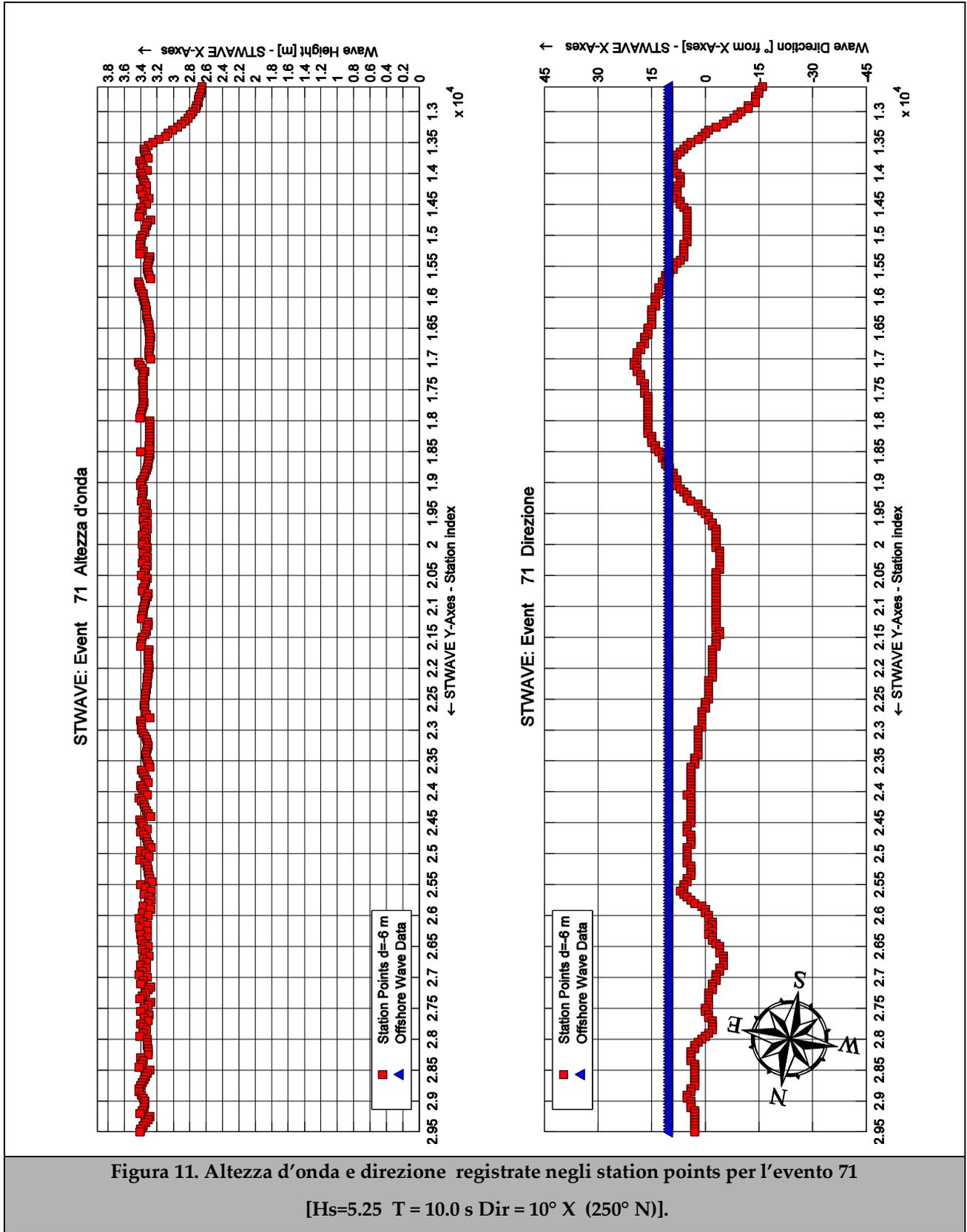


Figura 11. Altezza d'onda e direzione registrate negli station points per l'evento 71

[$H_s=5.25$ $T = 10.0$ s $Dir = 10^\circ$ X (250° N)].

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
	Piano Regolatore Portuale 2012	Data: marzo 2013	10	010	RR	015	-0

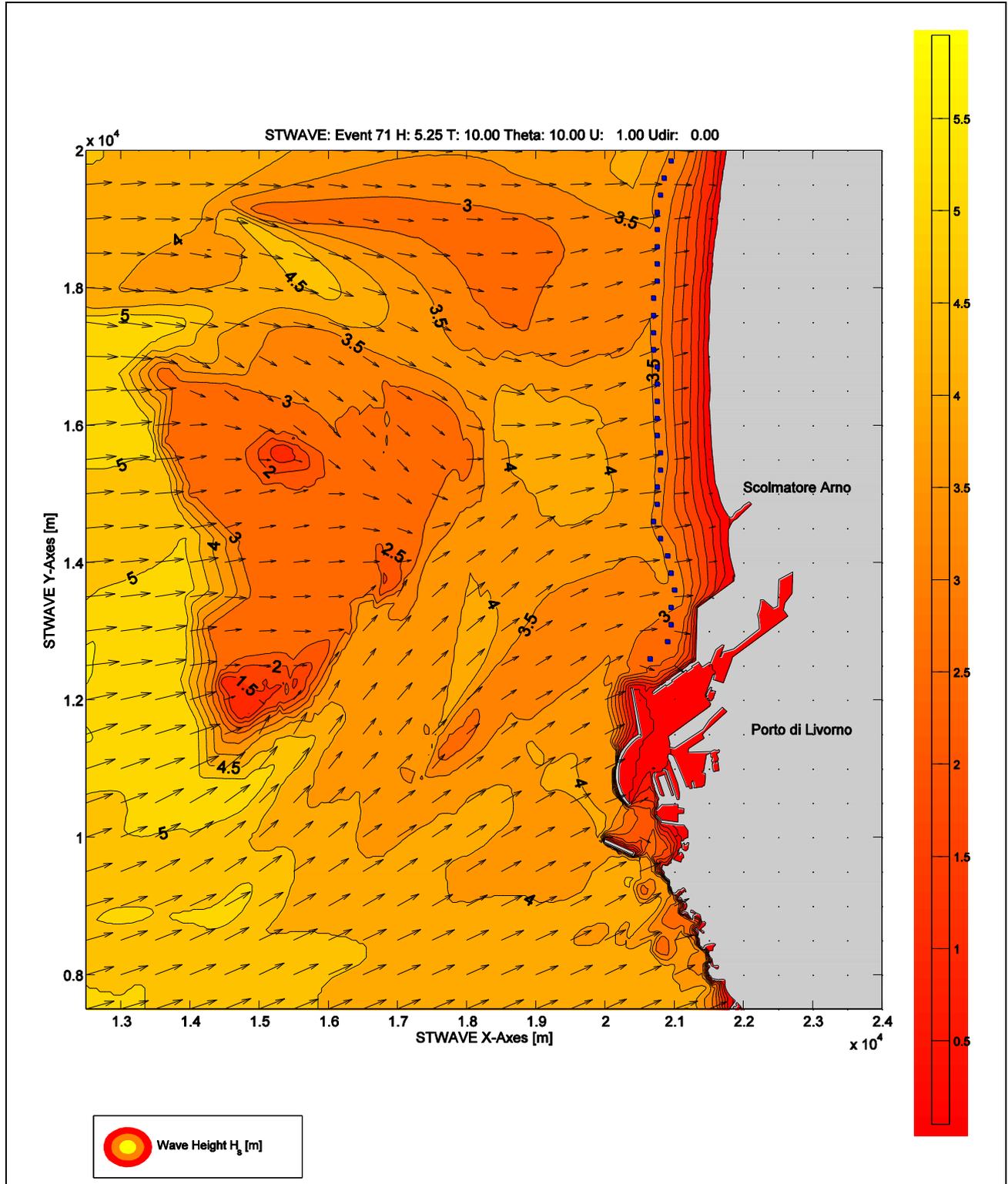
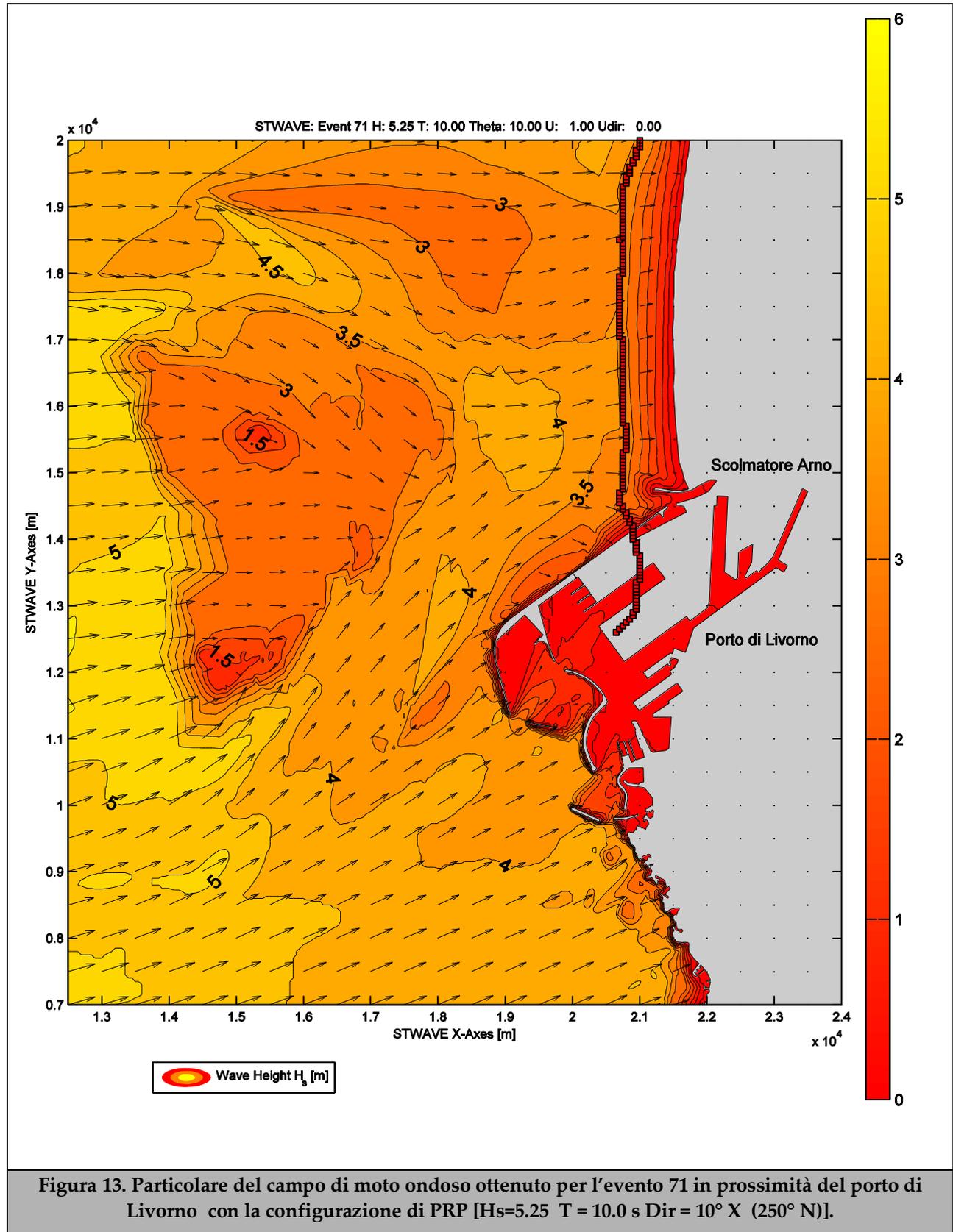
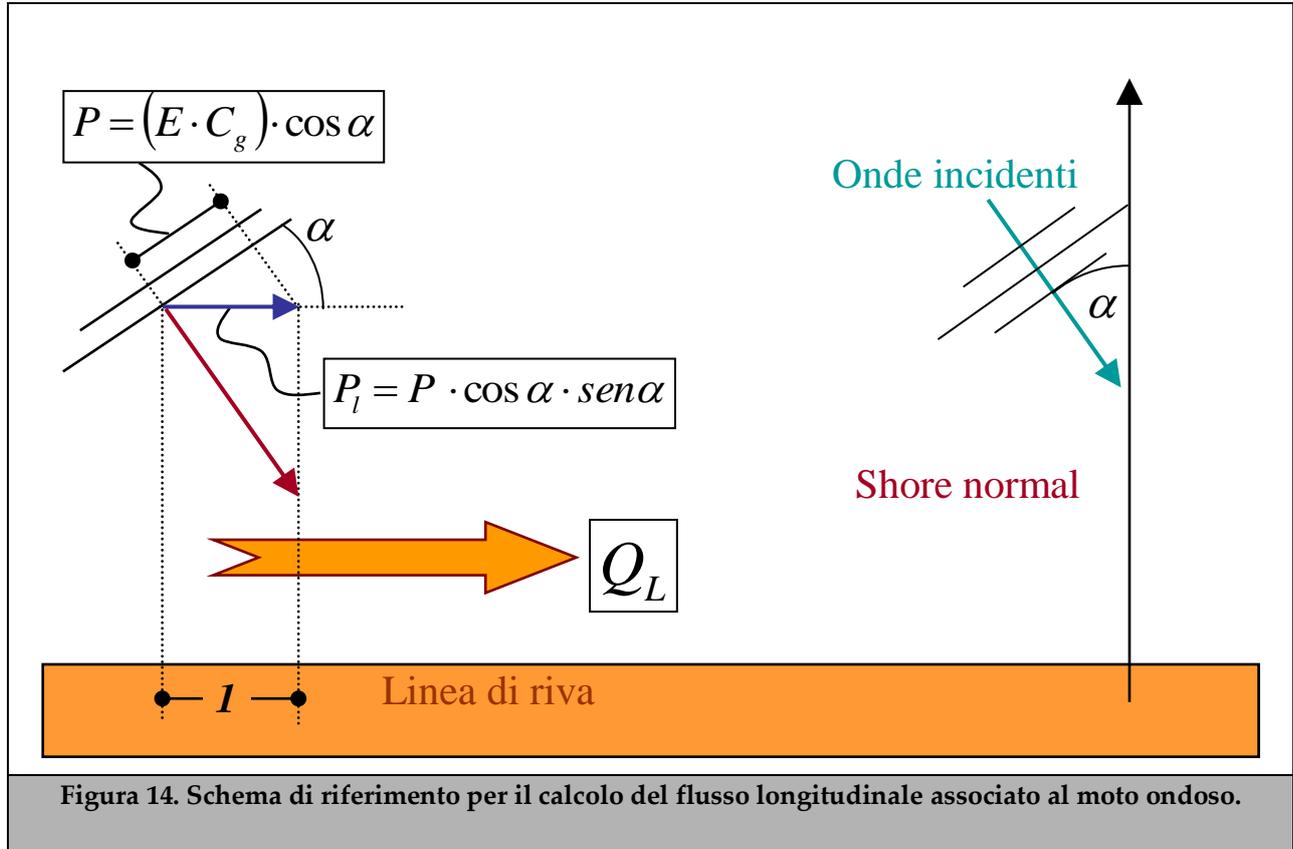


Figura 12. Particolare del campo di moto ondoso ottenuto per l'evento 71 in prossimità del porto di Livorno [$H_s=5.25$ T = 10.0 s Dir = 10° X (250° N)].

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	015	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
	Piano Regolatore Portuale 2012	Data: marzo 2013	10	010	RR	015	-0

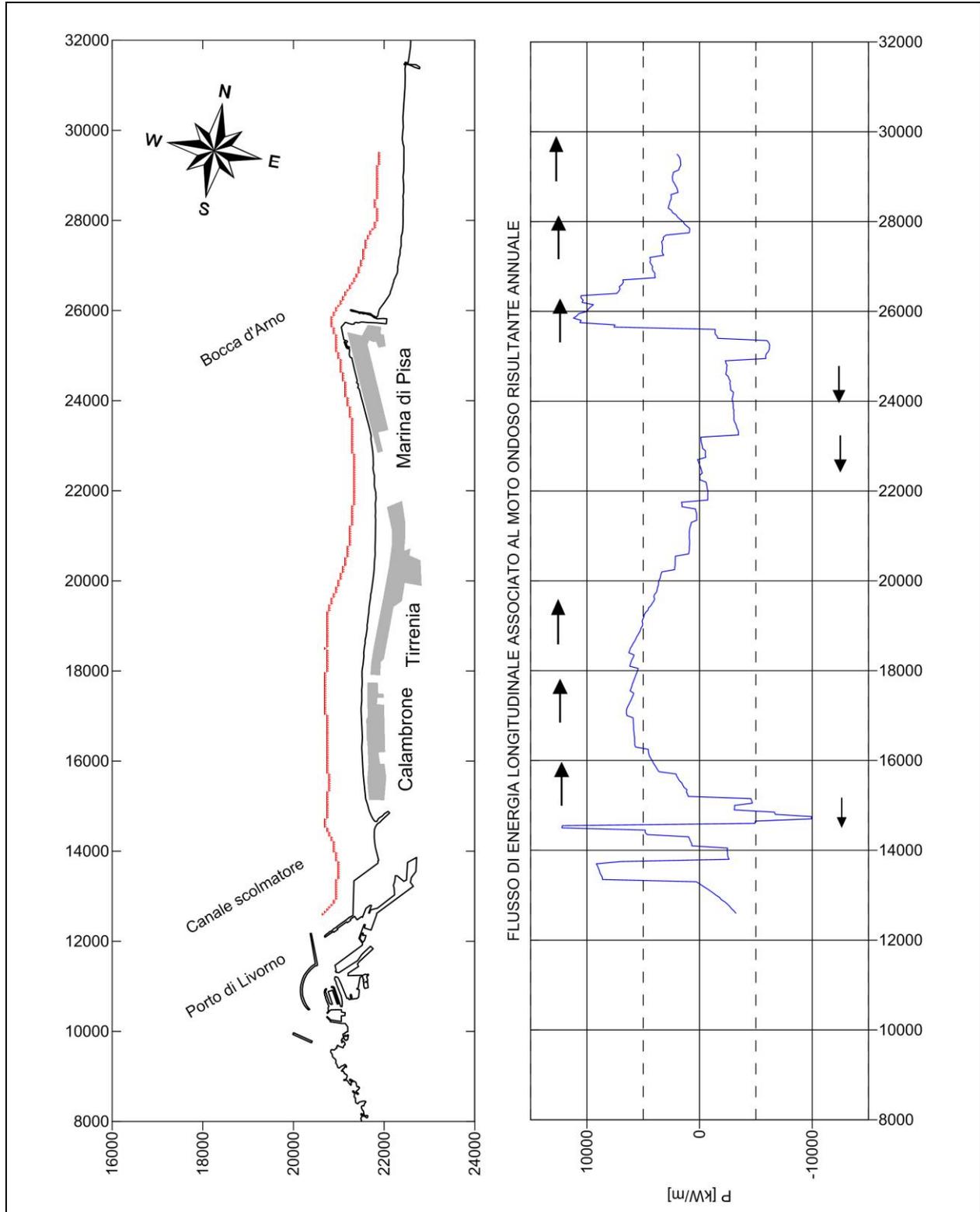


Figura 15. Risultante annuale del flusso di energia longitudinale ottenuta per lo scenario attuale.

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR

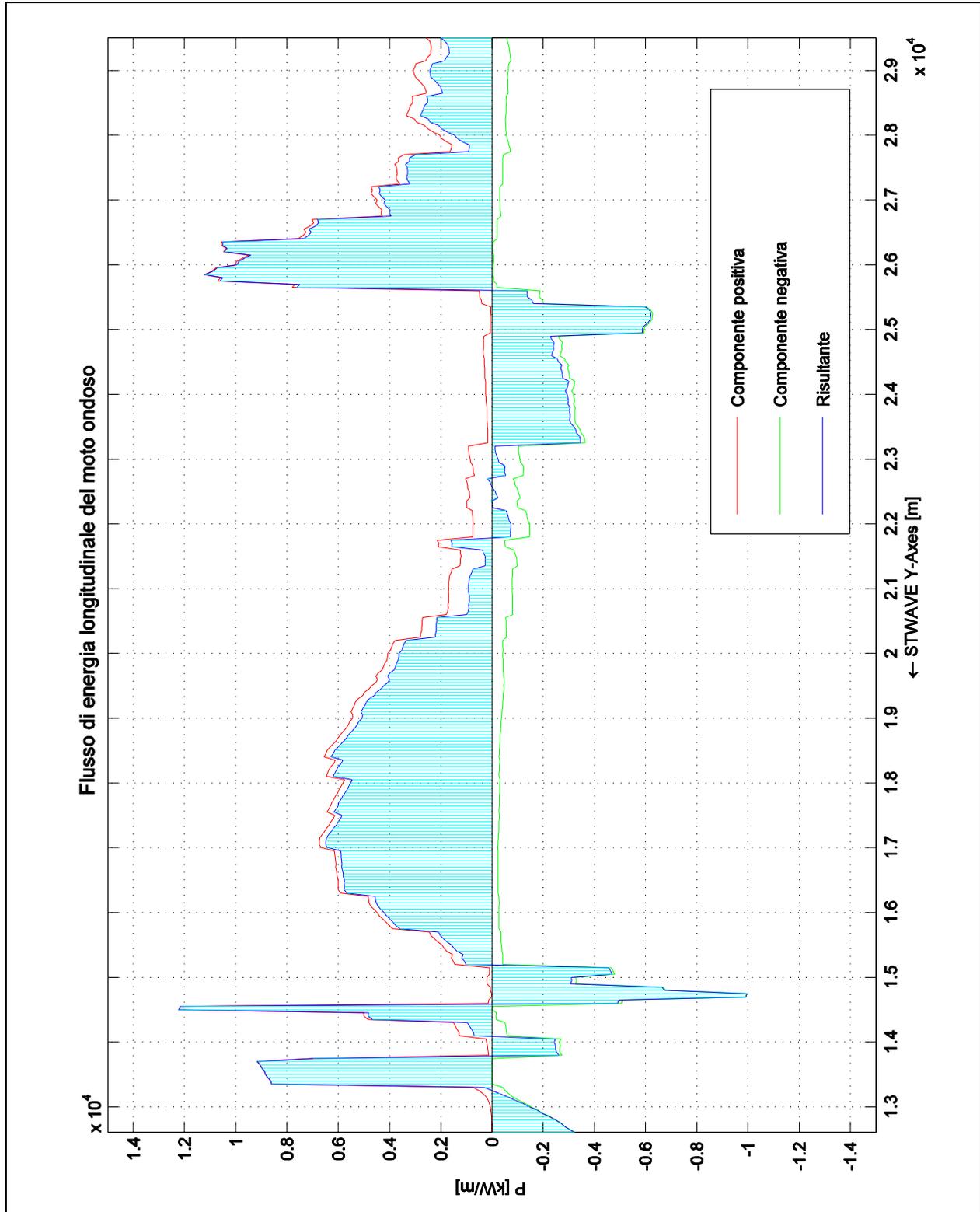


Figura 16. Scomposizione del flusso di energia longitudinale ottenuto per lo scenario attuale nelle due componenti, negativa e positiva.

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR

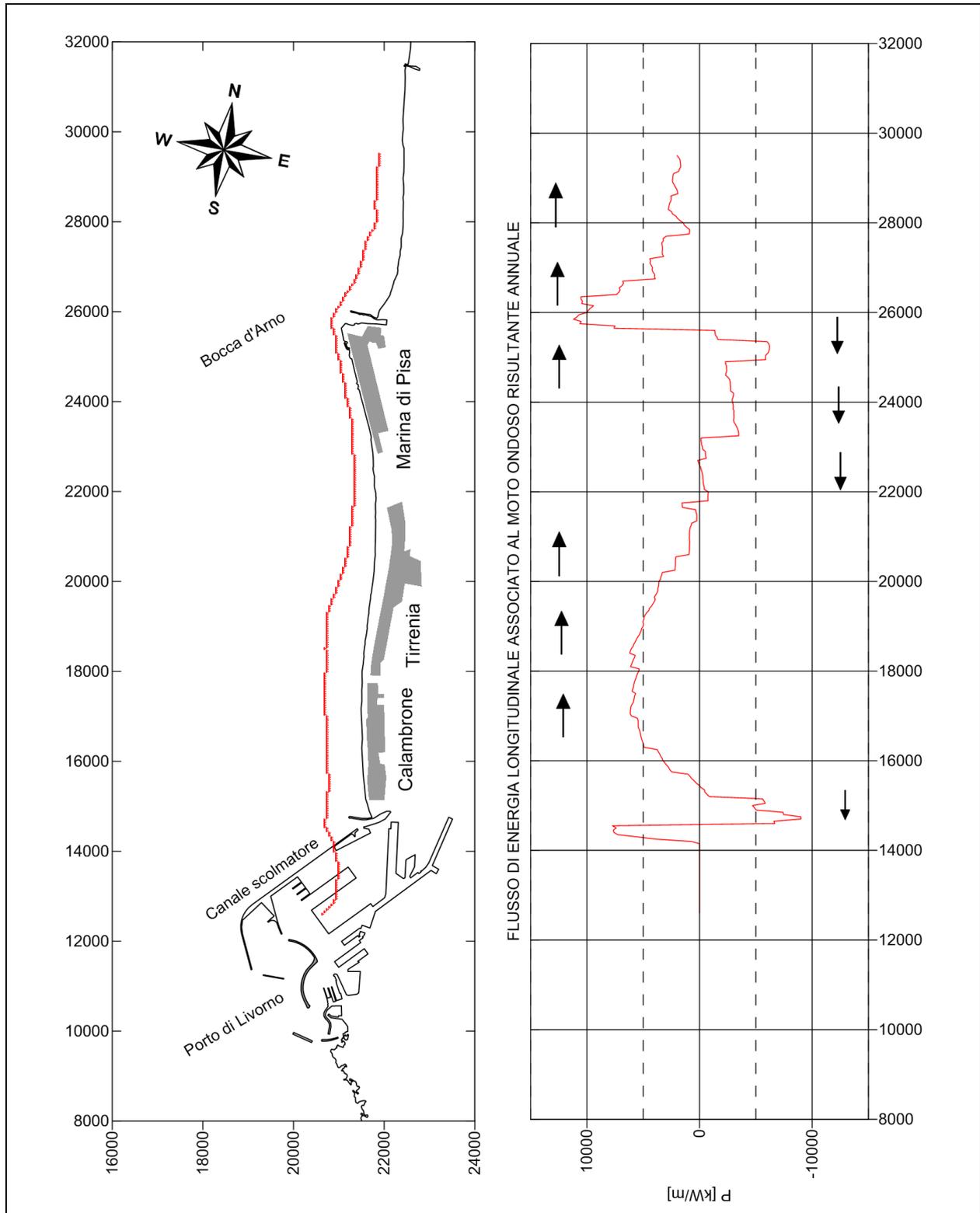


Figura 17. Risultante annuale del flusso di energia longitudinale ottenuta per lo scenario di PRP.

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR

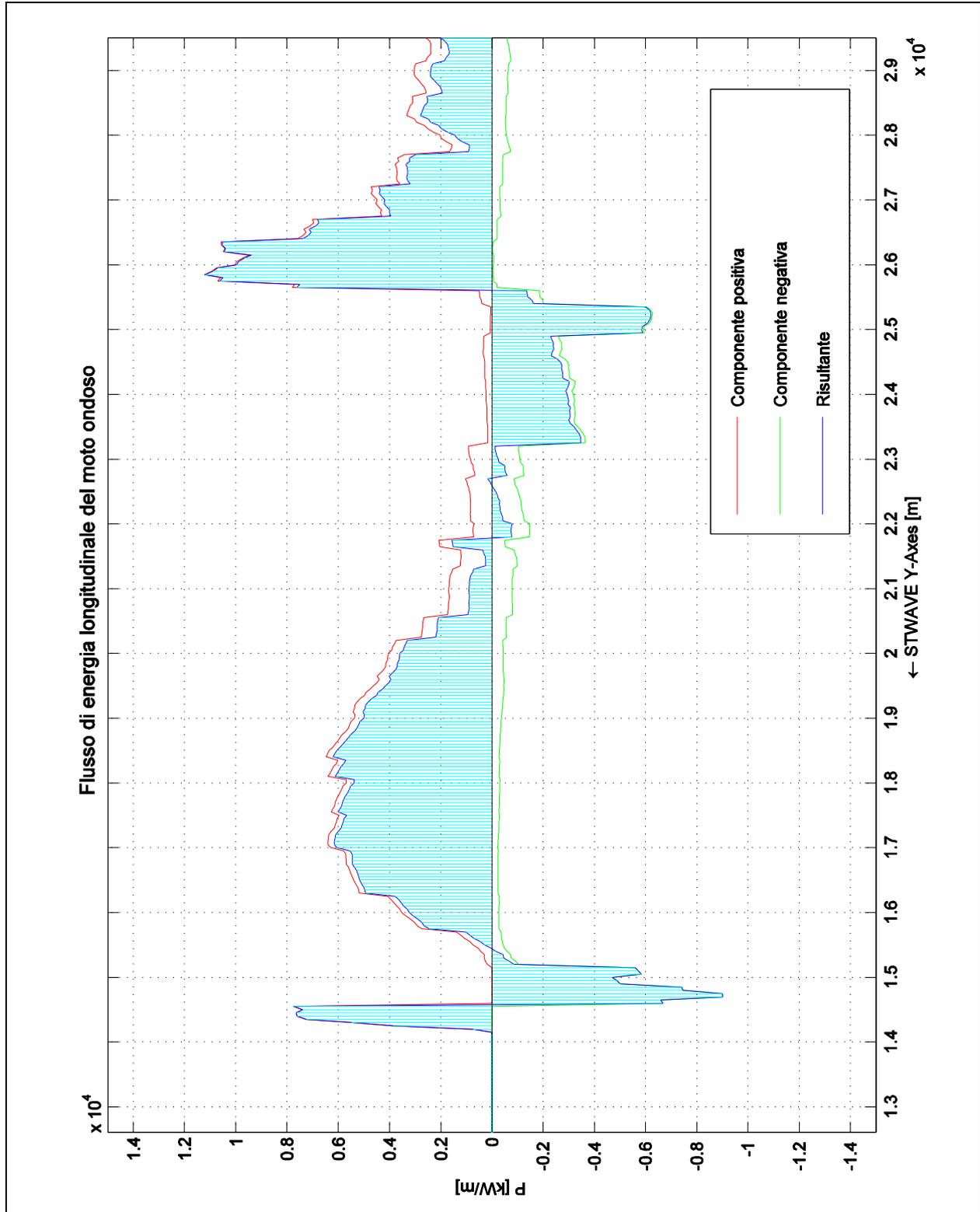


Figura 18. Scomposizione del flusso di energia longitudinale ottenuto per lo scenario di PRP nelle due componenti, negativa e positiva.

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR

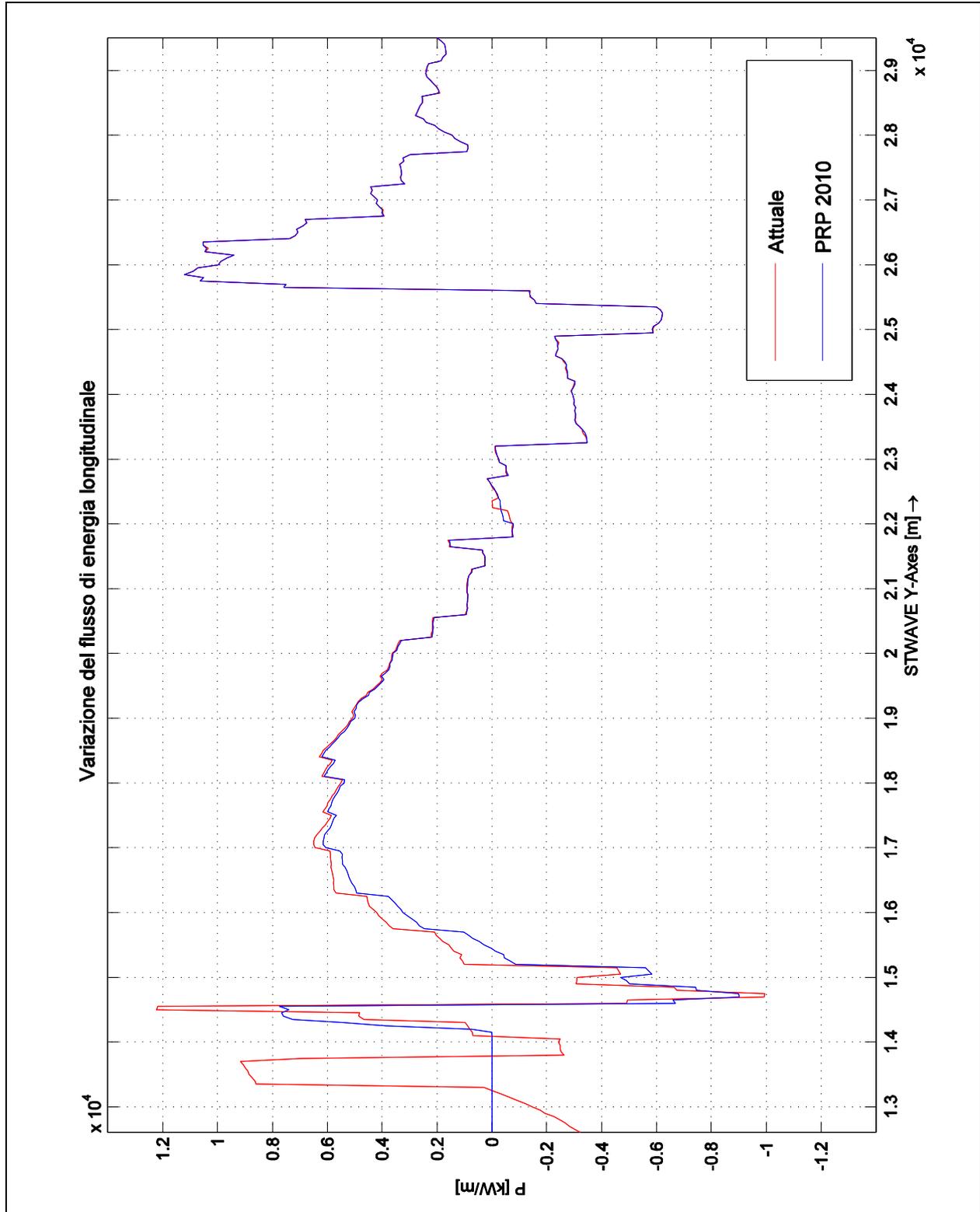


Figura 19. Confronto dei flussi longitudinali di energia ottenuti per la configurazione attuale e di PRP 2010

 Autorità Portuale di Livorno	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio della dinamica costiera					
		Data: marzo 2013					
Piano Regolatore Portuale 2012		10	010	RR	015	-0	MAR

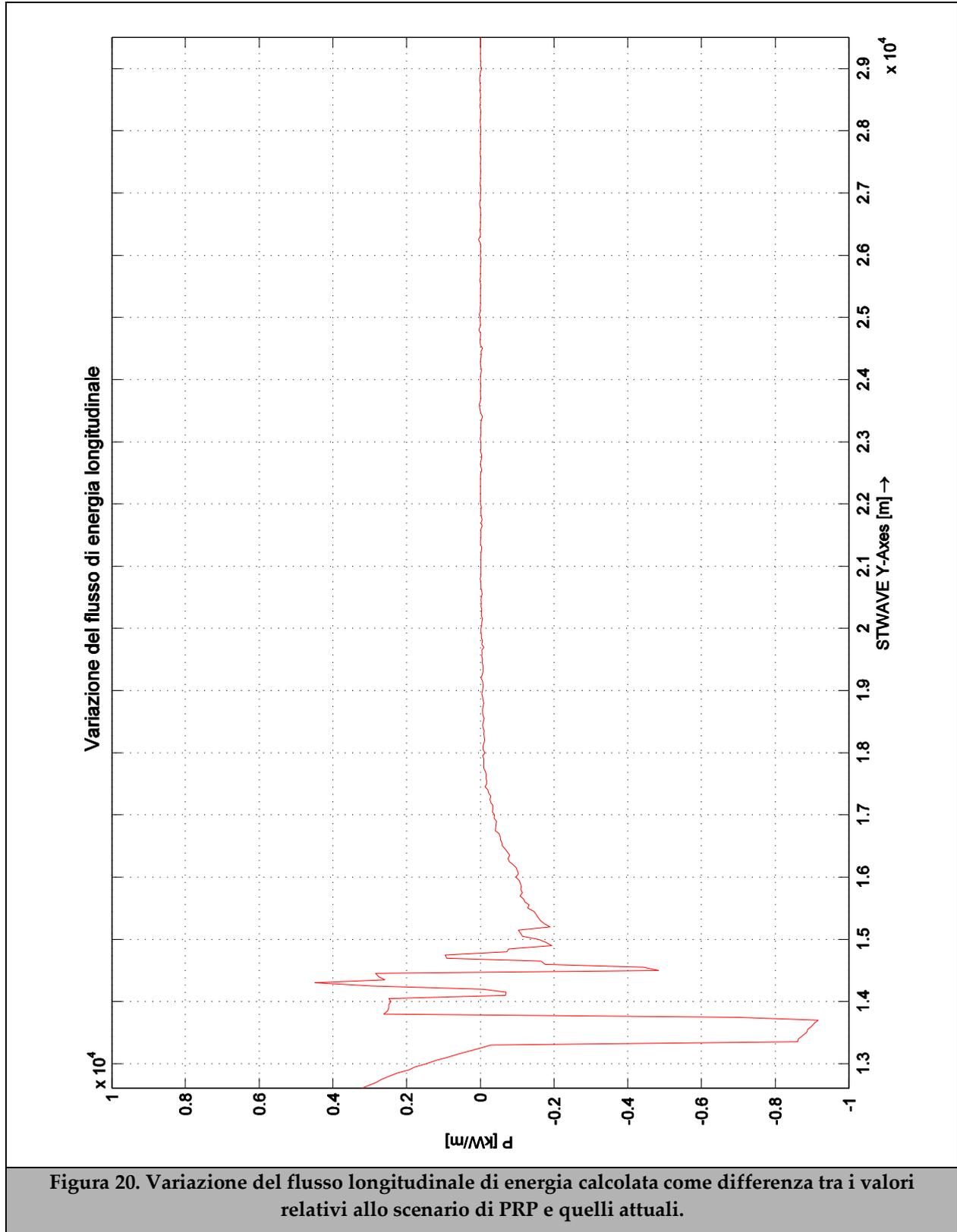


Figura 20. Variazione del flusso longitudinale di energia calcolata come differenza tra i valori relativi allo scenario di PRP e quelli attuali.