

Servizi di modellistica numerica per lo studio dell'idrodinamica,  
del trasporto di sedimenti e della morfodinamica delle aree  
costiere dei porti di La Spezia e di Marina di Carrara

CIG 7543732494

# S6

## STUDIO MORFODINAMICO STUDIO MODELLISTICO DI MORFODINAMICA COSTIERA PER IL PORTO DI MARINA DI CARRARA

1 9 0 0 3 S R 6 0 1 2

### Committente

AdSP  
Mar Ligure Orientale  
R.U.P.  
ing. Davide VETRALA

### Associazione Temporanea di Imprese (A.T.I.)

Capogruppo (Mandataria)  
**MODIMAR S.r.l.**



Via Monte Zebio 40 - 00195 ROMA  
06.3269461 - www.modimar.it

Mandante  
**TECHNITAL S.p.a.**



Via Carlo Cattaneo, 20 - 37121 VERONA  
www.technital.it

28.11.2022	2	Emissione Finale	Tittonel	Del Bianco	Contini
04.10.2022	1	Integrazioni nell'ambito della procedura VAS	Tittonel	Del Bianco	Contini
01.02.2022	0	Emissione per commenti del Cliente	Tittonel	Del Bianco	Contini
Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:



## Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Orientale

ACCORDO QUADRO PER IL SERVIZIO DI MODELLISTICA NUMERICA PER LO STUDIO DEL CLIMA METEOMARINO, DELL'IDRODINAMICA, DEL TRASPORTO DEI SEDIMENTI E DELLA MORFODINAMICA NELLE AREE COSTIERE DEI PORTI DI LA SPEZIA E MARINA DI CARRARA

# S6

# Studio modellistico di morfodinamica costiera

**ANALISI DEI DATI, SET-UP DEI MODELLI ED ANALISI MORFODINAMICHE**

A.T.I. MODIMAR s.r.l. Via Monte Zebio 40, Roma  
TECHNITAL s.p.a. Via Carlo Cattaneo, 20 Verona

CODICE DOCUMENTO 19 003 SR 601 2

REVISIONI DATA  
2 21/11/2022 Emissione finale

**INDICE**

<b>Capitolo 1</b>	<b>Premesse.....</b>	<b>1</b>
1.1	Introduzione .....	1
1.2	Obiettivi dello studio .....	1
1.3	Contenuto del presente rapporto .....	2
<b>Capitolo 2</b>	<b>Quadro conoscitivo del litorale di Marina di Carrara .....</b>	<b>3</b>
2.1	Dati batimetrici e topografici .....	3
2.2	Dati sedimentologici.....	4
2.3	Dati sulla linea di costa.....	5
2.4	Il clima meteomarinario .....	6
2.5	Portate dei fiumi e apporti sedimentari .....	6
<b>Capitolo 3</b>	<b>Inquadramento generale del sito .....</b>	<b>7</b>
3.1	Limiti geografici di riferimento .....	7
3.2	Livelli e correnti .....	9
3.3	Il clima meteomarinario (vento ed onde).....	10
3.4	Caratteristiche dei sedimenti .....	12
3.5	Apporti dei corsi d'acqua .....	18
3.6	Sintesi degli studi precedenti sulle tendenze evolutive del litorale .....	25
3.7	Analisi delle tendenze evolutive della linea di riva dal 2010 al 2020 .....	30
<b>Capitolo 4</b>	<b>Set-up del modello di calcolo idrodinamico e di trasporto dei sedimenti ....</b>	<b>46</b>
4.1	Il codice di calcolo Delft3D .....	46
4.2	Schematizzazione del dominio di calcolo .....	48
4.3	Le condizioni al contorno .....	52
<b>Capitolo 5</b>	<b>Modellazioni dei flussi sedimentari litoranei .....</b>	<b>53</b>
5.1	Il metodo di studio .....	53
5.2	Le configurazioni portuali analizzate.....	56
5.3	Campi di moto e trasporto solido potenziale.....	58
5.4	Valutazione dei flussi sedimentari lungo la costa .....	66
<b>Capitolo 6</b>	<b>Modellazioni della morfodinamica litoranea a scala di mareggiata .....</b>	<b>70</b>
6.1	Gli scenari di studio simulati .....	70
6.2	Analisi dei risultati delle simulazioni .....	71
<b>Capitolo 7</b>	<b>Modellazioni della morfodinamica con eventi di piena del Carrione .....</b>	<b>80</b>
7.1	Gli scenari di studio simulati .....	80
7.2	Analisi dei risultati delle simulazioni .....	82
<b>Capitolo 8</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>96</b>
<b>Capitolo 9</b>	<b>Riferimenti bibliografici .....</b>	<b>100</b>

# Capitolo 1 Premesse

## 1.1 Introduzione

A seguito dell'espletamento di una gara con procedura aperta ed offerta economicamente più vantaggiosa l'Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Orientale ha stipulato con l'A.T.I. tra le Società Modimar S.r.l. e Technital S.p.A. il contratto avente per oggetto un Accordo Quadro quadriennale per i Servizi di modellistica numerica per gli studi del clima meteomarino, dell'idrodinamica, del trasporto dei sedimenti e della morfodinamica nelle aree costiere dei porti di La Spezia e Marina di Carrara.

Il presente documento è relativo al Servizio S6 ed ha per oggetto lo Studio modellistico di morfodinamica costiera per la valutazione degli effetti (variazioni) indotti, nel tempo e nello spazio, dalle nuove opere esterne di assetto plano-altimetrico previste dal PRP del porto di Marina di Carrara sulla costa adiacente e l'analisi dell'eventuale apporto di materiale solido all'imboccatura portuale. Detto studio, avviato nell'ambito della Commessa d'ordine n°2 dal Responsabile Unico del Procedimento, ai sensi di quanto disposto dall'articolo secondo del Contratto di Accordo Quadro del 03/04/2019, n.32/2019 di Repertorio, è stato redatto secondo le modalità e i contenuti di cui all'art.4 del Capitolato Speciale Descrittivo e Prestazionale (allegato 2 "D" del Contratto) e del punto 1.1.6 dell'Offerta Tecnica presentata in sede di gara. Si è altresì tenuto conto di quanto emerso in seguito alla conclusione della fase di Scoping di cui all'art. 13 comma 1 del D.Lgs. 152/2006 relativa alla VAS del PRP del porto di Marina di Carrara.

## 1.2 Obiettivi dello studio

Questo **Studio modellistico di morfodinamica costiera** ha l'obiettivo di valutare gli effetti indotti dalle nuove opere esterne della proposta di PRP del porto di Marina di Carrara in termini di assetto plano-altimetrico, sulla costa adiacente e l'analisi dell'eventuale apporto di materiale solido all'imboccatura portuale.

In conformità con le specifiche contrattuali lo studio ha riguardato: nella fase conoscitiva tutta l'unità fisiografica compreso tra Bocca di Magra ed il porto di Livorno; nella fase di modellazione l'analisi di dettaglio degli effetti, nel tempo e nello spazio, sui processi di idrodinamica e morfodinamica litoranea riconducibili sia alla configurazione attuale del porto di Marina di Carrara sia alle possibili conformazioni delle opere foranee portuali previste dal nuovo PRP.

Per queste finalità si è utilizzata specifica modellistica numerica in grado di riprodurre con elevata accuratezza spaziale la complessa morfologia dell'area e le diverse configurazioni planimetriche delle opere foranee portuali oggetto di studio simulando in modo dettagliato soprattutto gli effetti e le interferenze delle nuove opere sulla propagazione del moto ondoso e di conseguenza sulla idrodinamica e sul trasporto solido litoraneo sia a scala locale, nelle adiacenze del porto, che sull'intera sub-unità fisiografica compresa tra le foci dei fiumi Magra e il porto di Viareggio.

Alla luce di queste considerazioni si è quindi utilizzato un modello numerico per la simulazione del "campo" idrodinamico e del trasporto ad alta risoluzione spaziale, con una schematizzazione 2D con una risoluzione spaziale planimetrica variabile e nell'ordine di 30 m lungo tutto il dominio litoraneo lungo tutto il tratto di interesse che si sviluppa dalla foce del Magra fino a Viareggio <sup>(1)</sup>.

---

<sup>1</sup> Impostando le "forzanti di moto ondoso" su un dominio di calcolo che si sviluppa dal promontorio delle Cinque Terre (La Spezia) sino alle Secche di Vada (Livorno).

La scelta di avvalersi di un modello idrodinamico 2D ha pertanto permesso un'analisi esaustiva dei fenomeni di circolazione litoranea e di trasporto solido a scala locale e globale su tutta l'area di studio considerato. Attraverso questa modellazione è infatti stato possibile riprodurre e studiare il sistema di correnti e di circolazioni locali dovuto alla presenza di opere rigide, altrimenti non propriamente riproducibili con modelli numerici come quelli "monodimensionali" (1D) che comportano una semplificazione nella trattazione fisica e numerica dei processi idrodinamici e morfologici lungo la costa.

### 1.3 Contenuto del presente rapporto

Nello specifico i contenuti sviluppati nel corso delle attività specialistiche del presente studio, in conformità alle specifiche contrattuali, si sono articolate nei punti descritti di seguito.

- Analisi del quadro conoscitivo del litorale della Toscana settentrionale, compreso tra la foce del fiume Magra ed il Porto di Livorno, per un primo inquadramento generale dell'intera unità fisiografica in cui ricade il Porto di Marina di Carrara sulla base di precedenti studi morfodinamici e dei dati acquisiti per i seguenti elementi:
  - Dati batimetrici e topografici con particolare riferimento alle variazioni diacroniche della linea di riva;
  - Caratteristiche dei sedimenti e degli apporti solidi;
  - Condizioni di esposizione meteomarina (venti, onde, livelli marini e correnti) lungo la fascia litoranea oggetto di studio.
- Analisi dell'attuale trend evolutivo della morfologia litoranea con particolare riferimento all'effetto sulle variazioni nel tempo della posizione della linea di riva riconducibile alla presenza delle opere di protezione costiera oltre che delle dighe foranee dei porti di Marina di Carrara e di Viareggio; questa specifica attività è stata ulteriormente aggiornata in seguito alla conclusione della fase di verifica preliminare (ex art.13, comma 1, del D.Lgs.152/2006) nell'ambito della procedura di VAS tenendo conto in particolare dei contributi pervenuti dai Soggetti Competenti in materia Ambientale (SCA) facendo specifico riferimento alla linea di riva del 2020 desunta dalle attività di monitoraggio costiero condotte dalla Regione Toscana.
- Impostazione (set-up) del modello idrodinamico a larga scala per la modellazione combinata della propagazione del moto ondoso, delle correnti litoranee e del trasporto solido associato a queste forzanti.
- Identificazione delle condizioni meteomarine rappresentative del sito per la valutazione del trasporto solido.
- Applicazione del modello idrodinamico per lo studio del trasporto solido nella configurazione attuale del porto di Marina di Carrara.
- Applicazione del modello idrodinamico per l'ottimizzazione e definizione del layout della proposta di PRP del Porto di Marina di Carrara.
- Applicazione del modello idrodinamico e morfologico per lo studio del trasporto solido e dell'interferenza della suddetta proposta di configurazione portuale di PRP sul trasporto solido litoraneo sui flussi sedimentari litoranei.
- Applicazione del modello idrodinamico e morfologico per la valutazione a scala di mareggiata degli effetti morfologici della proposta di PRP per la configurazione portuale.

## Capitolo 2 Quadro conoscitivo del litorale di Marina di Carrara

Nei seguenti paragrafi è riportata una sintesi dei dati raccolti e resi disponibili nell'ambito del presente studio sul tratto di litorale oggetto di studio che si estende dalla Foce del fiume Magra fino a Viareggio.

Per chiarezza di esposizione i dati sono organizzati in funzione della loro tipologia.

### 2.1 Dati batimetrici e topografici

Si riporta nella seguente tabella l'elenco dei dati batimetrici e topografici acquisiti e analizzati ai quali si è fatto riferimento per definire i fondali, la linea di costa e le opere costiere che caratterizzano le zone oggetto di studio e per la successiva implementazione dei modelli numerici di idrodinamica, trasporto solido ed evoluzione della linea di costa.

**Tabella 2-1. Fonte e descrizione dei dati batimetrici e topografici utilizzati**

Fonte dati	Descrizione	Anno
Istituto Idrografico Marina Militare	Carta Nautica CN-03 Carta Nautica CN-04 Carta Nautica CN-115 Carta Nautica CN-60	
GEBCO	carta batimetrica generale degli oceani	
AdSP del Mar Ligure Orientale	Da Marinella di Sarzana a Fosso Lavello	1998
AdSP del Mar Ligure Orientale	"Da Marinella di Sarzana a Fosso Lavello	2003
AdSP del Mar Ligure Orientale	Da Marinella di Sarzana a Fosso Lavello	2005
AdSP del Mar Ligure Orientale	Da Marinella di Sarzana a Fosso Lavello	2007
AdSP del Mar Ligure Orientale	Da Marinella di Sarzana a Fosso Lavello	2009
AdSP del Mar Ligure Orientale	Porto M. Carrara e canale accesso	2011
AdSP del Mar Ligure Orientale	Porto M. Carrara e canale accesso	2015
AdSP del Mar Ligure Orientale	Porto M. Carrara	Aprile 2015
AdSP del Mar Ligure Orientale	RILIEVI_AREA_VERSAMENTO_2015 (Fosso Lavello – Fosso Poveromo)	2015
AdSP del Mar Ligure Orientale (da Regione Toscana rif. Nota del 18/12/2019 prot. 24265)	"RILIEVI_MASSA_2017_UNITI_UTM_32 Rilievo batimetrico tratto compreso tra Porto di Carrara e la foce del T. Versilia"	2017
AdSP del Mar Ligure Orientale	Porto M. Carrara e canale accesso	Marzo 2019
AdSP del Mar Ligure Orientale	Rilievo batimetrico rada di La Spezia	Aprile 2019
AdSP del Mar Ligure Orientale (da Regione Toscana rif. Nota del 18/12/2019 prot. 24265)	batimetrie rilevate tra il 1997 ed il 1998 per il litorale compreso tra Bocca di Magra e Tirrenia ed utilizzate nello studio Regione - ARPAT 2001	1997 – 1998

## 2.2 Dati sedimentologici

Tabella 2-2. Fonte e descrizione dei dati sedimentologici utilizzati

Fonte dati	Descrizione
<p>Studio della dinamica dei sedimenti nell'intorno del Porto di Marina di Carrara" Prof E. Pranzini (2009) , Autorità Portuale Marina di Carrara, Dipartimento Scienze della Terra Uni Firenze</p>	<p>1. Analisi sull'evoluzione morfologica dei fondali nel lungo che nel breve periodo; 2. analisi tessiturale dei sedimenti.</p>
<p>Università degli studi di Genova Dipartimento di scienze della terra, dell'ambiente e della vita</p>	<p>Caratterizzazione ambientale dei fondali del canale di accesso del porto di Marina di Carrara: Analisi Granulometriche</p>
<p>Lavori di dragaggio finalizzato al mantenimento dell'efficienza del porto di Marina di Carrara Progetto Esecutivo (2015)</p>	<p>Caratterizzazione dei fondali del porto, del canale di accesso e dell'area di riallocazione del materiale</p>
<p>Regione Toscana Settore protezione e valorizzazione fascia costiera e ambiente marino (rif. Nota del 18/12/2019 prot. 24265)</p>	<p>Quadro conoscitivo per la Gestione dei Sedimenti Costieri Rapporto finale</p>

## 2.3 Dati sulla linea di costa

Tabella 2-3. Informazioni sulle linee di costa rilevate

Fonte dati	Descrizione	Anno
AdSP del Mar Ligure Orientale	Shapefile Linea di costa dalla foce del Magra fino a Viareggio da Dipartimento Scienze della Terra Uni Firenze	1878 1919 2005
AdSP del Mar Ligure Orientale (da Regione Toscana rif. Nota del 18/12/2019 prot. 24265)	Linee di riva per l'intera unità fisiografica relative agli anni 1938, 1954, 1967, 1976, 1978, 1981, 1985, 1993, 1995, 1996, 1997, 1998, 2001, 2002, 2003 ed al rilievo del 2005 effettuato durante lo Studio e ricerca per l'implementazione del quadro conoscitivo della costa toscana nell'ambito del Piano Regionale di Gestione Integrata della Costa	1938, 1954, 1967, 1976, 1978, 1981, 1985, 1993, 1995, 1996, 1997, 1998, 2001, 2002, 2003, 2005
Piattaforma WebGIS Google Earth	Digitalizzazione della linea di riva tra le foci del Magra (Liguria) e Arno (Toscana).	2015
AdSP del Mar Ligure Orientale (da Regione Toscana rif. Nota del 18/12/2019 prot. 24265)	Linea di riva dell'intero litorale toscano acquisita nel 2017 tramite estrazione da immagine satellitare durante l'attività di monitoraggio a scala regionale della linea di riva.	2017
Portate Cartografico Regione Toscana	Shapefile Linea di costa della Toscana	2010 2017
AdSP del Mar Ligure Orientale (da Regione Toscana rif. Nota del 18/12/2019 prot. 24265)	Documento Operativo per il recupero e riequilibrio della fascia costiera. (L.R.80/2015) "Monitoraggio a scala regionale dell'evoluzione della linea di riva da remoto"	2017
Portate Cartografico Regione Liguria	Shapefile Linea di costa della Liguria	1973 1983 1993 2003 2013
Regione Toscana Settore regionale di Tutela Acqua Territorio e Costa	Linea di riva dell'intero litorale toscano acquisita nel 2020 con le attività di monitoraggio a scala regionale	2020

## 2.4 Il clima meteomarinario

Le informazioni disponibili per la caratterizzazione delle “forzanti” meteomarine, in particolare del moto ondoso, cui si è fatto riferimento per la modellazione dei processi di morfodinamica della fascia litoranea in cui ricade il porto di Marina di Carrara, sono costituiti da un set molto ampio di dati storici desunti sia dalle stazioni di misura ondometriche, mareografiche e meteorologiche, che dai modelli di calcolo numerico di ultima generazione per la ricostruzione degli stati di mare riferiti ad un arco di tempo sufficientemente ampio.

Il set di dati utilizzati riguardano i parametri meteo marini dei livelli, correnti, vento e onde nel paraggio oggetto di indagine che si estende dal Golfo di La Spezia fino alla Gorgona (Livorno).

L'elenco completo dei dati meteomarini raccolti nell'ambito del servizio S1, cui si è fatto esplicito riferimento nel presente studio specialistico, è fornito nel report “Studio Meteomarinario – Volume 1: condizioni meteomarine al largo. Acquisizione, validazione e analisi dei dati”. [1]

In particolare per la finalità delle modellazioni condotte nell'ambito del presente studio specialistico si è fatto riferimento alla serie storica oraria, implementata dal DICCA dell'Università di Genova, che copre un ampio arco temporale (dal 1979 al 2018) ed è quindi più che rappresentativa delle condizioni di esposizione meteomarina nel lungo termine.

## 2.5 Portate dei fiumi e apporti sedimentari

Le informazioni disponibili per definizione sui deflussi e gli apporti sedimentari dei fiumi e torrenti che sfociano nel tratto settentrionale del litorale toscano compreso tra la foce del Fiume Magra ed il porto di Viareggio sono state desunte da studi\rapporti recentemente eseguiti in precedenza e direttamente da dati messi a disposizione da enti ed istituti pubblici attraverso portali web. Le principali fonti considerate nello studio sono state:

- Il Servizio idrologico della Regione Toscana ([www.sir.toscana.it](http://www.sir.toscana.it));
- Gli studi eseguiti da Delft Hydraulics oggi Deltares per la valutazione delle tendenze evolutive del litorale di Carrara “Carrara Coastal Study” redatto nel 2006 per il Ministero dell'ambiente [2];
- I dati forniti nei portali e desunti da studi condotti per conto delle Autorità di Bacino del Magra, Arno e Serchio;
- Gli studi eseguiti dal CERAFRI (Centro per la Ricerca e l'Alta Formazione per la Prevenzione del Rischio Idrogeologico) per la “Realizzazione del primo e secondo stralcio del monitoraggio del trasporto solido nei corsi d'acqua della Toscana” [3];
- Lo “Studio idraulico del Torrente Carrione con analisi dei possibili interventi per la mitigazione del rischi” redatto dal DICCA (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale) dell'Università di Genova per conto della Regione Toscana [4];
- Lo studio specialistico “Recupero e riequilibrio del litorale di Massa fra le foci del Lavello e del Frigido” redatto dal Settore Genio civile Toscana Nord- Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile (Maggio 2019).

L'elenco completo delle fonti e dei riferimenti utilizzati è riportato nel Capitolo 9

## Capitolo 3 Inquadramento generale del sito

### 3.1 Limiti geografici di riferimento

Il litorale in esame in cui ricade il porto di Marina di Carrara appartiene all'Unità Fisiografica della Toscana settentrionale che deve la sua alimentazione ai sedimenti immessi nel sistema costiero dal Fiume Magra.

In Figura 3-1 è riportato l'inquadramento dell'unità fisiografica in cui ricade il Porto di Marina di Carrara con l'indicazione della direzione dei flussi sedimentari.

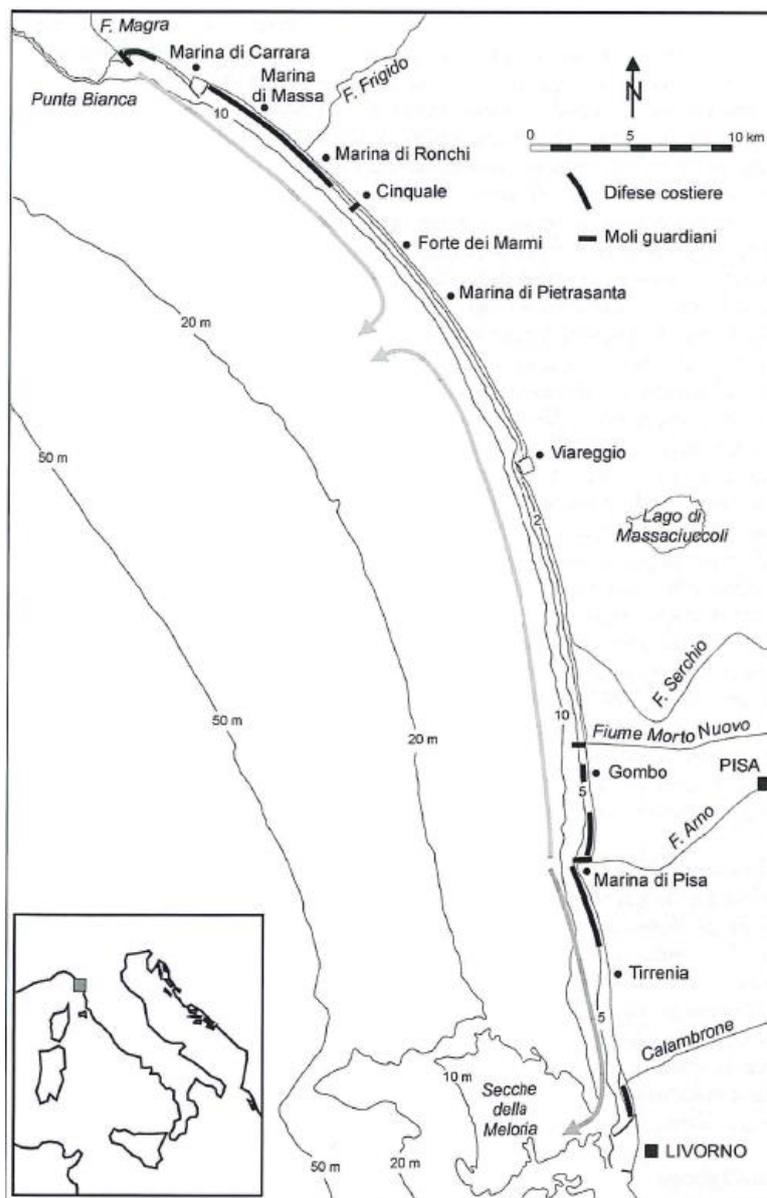


Figura 3-1. Unità Fisiografica della Toscana settentrionale con indicate le direzioni del flusso sedimentario associate alle cellule di primo ordine [5].

In particolare, per le motivazioni in seguito indicate, essa ricade all'interno della sub-unità fisiografica compresa tra la foce del fiume Magra e il Porto di Viareggio.

Gli studi dell'ENEA del 2003 (cfr. "Elementi di Gestione Costiera", 2003), classificano il tratto di litorale in esame corrispondente al morfotipo "Costa di litorale dritto".

A tale morfotipo corrisponde un litorale in cui il contatto terra-mare avviene su spiaggia sabbiosa

ampia e diritta; il profilo sottomarino è a bassissima pendenza, con presenza di barre. Il retrospiaggia si presenta con campi dunari, stagni costieri e l'eventuale presenza di laghi costieri. Gli apporti dalla terraferma provengono da corsi d'acqua a basso gradiente con presenza di foci non aggettanti in mare e/o con eventuali ali ciottolose [6].

Questi limiti geografici dell'Unità Fisiografica di riferimento sono stati confermati anche dal più recente studio condotto (2010) dall'ISPRA [7], nell'ambito dei compiti istituzionali di monitoraggio dell'ambiente marino e costiero, che si è concluso con la classificazione e suddivisione del litorale italiano in 235 UF in funzione della conformazione morfologica e delle condizioni di esposizione al moto ondoso, queste ultime definite in termini di "Profondità di Chiusura" associate a condizioni di esposizione ondosa annuale, quinquennale e decennale calcolate sulla base delle serie di misure di moto ondoso della Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dallo stesso ISPRA. L'Unità Fisiografica in esame, denominata "Viareggio", è classificata come morfotipo F (Falcata ovvero ampio tratto di costa bassa debolmente arcuata).

Dati Ondamet	Unità Fisiografica	Sub Unità Fisiografica	Limiti laterali		Morfotipo	Profondità di chiusura (PdC)			Orientam. (° Nord)	Estensione (km)	
			ponente	levante		PdC <sub>1</sub>	PdC <sub>5</sub>	PdC <sub>10</sub>		Sub UF	Totale
RON La Spezia	VIAREGGIO	Magra-Cinquale	Punta Bianca	Diga della Vegliaia	F Falcata	9,6	11,2	11,9	215	15,1	68,1
		Cinquale-P. Viareggio				9,8	11,5	12,1	235	15,2	
		P. Viareggio-F. Arno				8,1	9,2	10,1	265	21,3	
		F. Arno-P. Livorno				8,2	9,6	10,2	261	16,5	

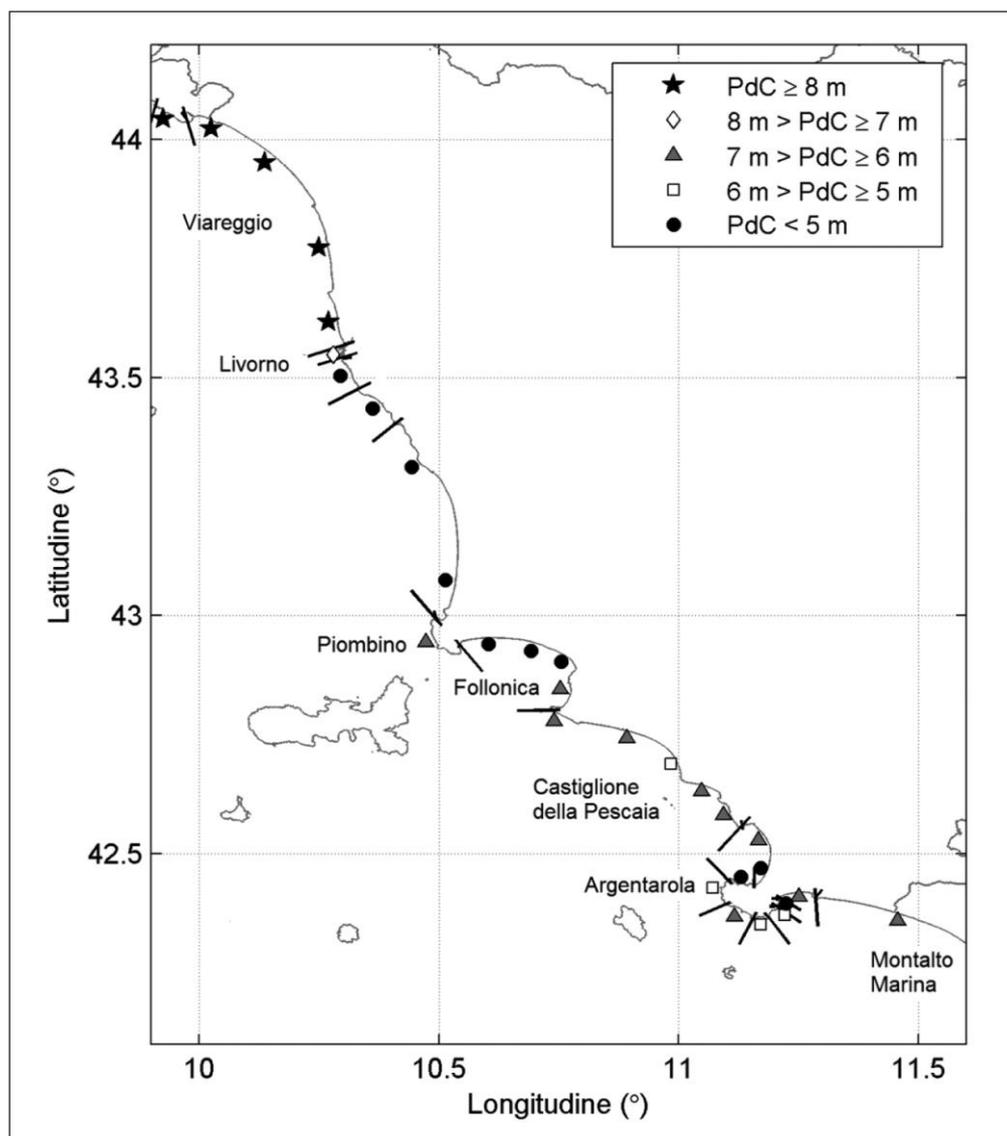


Figura 3-2. Limiti delle Unità Fisiografiche e relative Profondità di Chiusura individuate per la Regione Toscana [7]

Più in dettaglio, prendendo a riferimento il Quadro Conoscitivo delineato dalla Regione Toscana nel PIT 2005-2010, i settori in cui può essere ulteriormente suddivisa la porzione del litorale oggetto di studio i sono compresi tra la Foce del Magra ed il Porto di Viareggio e così distinti [8]:

- Da Bocca di Magra alla foce del Fiume Parmignola (Settore 1);
- Dalla foce del Fiume Parmignola al porto di Marina di Carrara (Settore 2);
- Dal porto di Marina di Carrara al porto di Viareggio (Settori 3 - 5).

In Figura 3-3 è riportato uno stralcio delle tendenze evolutive del litorale toscano limitatamente all'Unità Fisiografica della Toscana settentrionale.

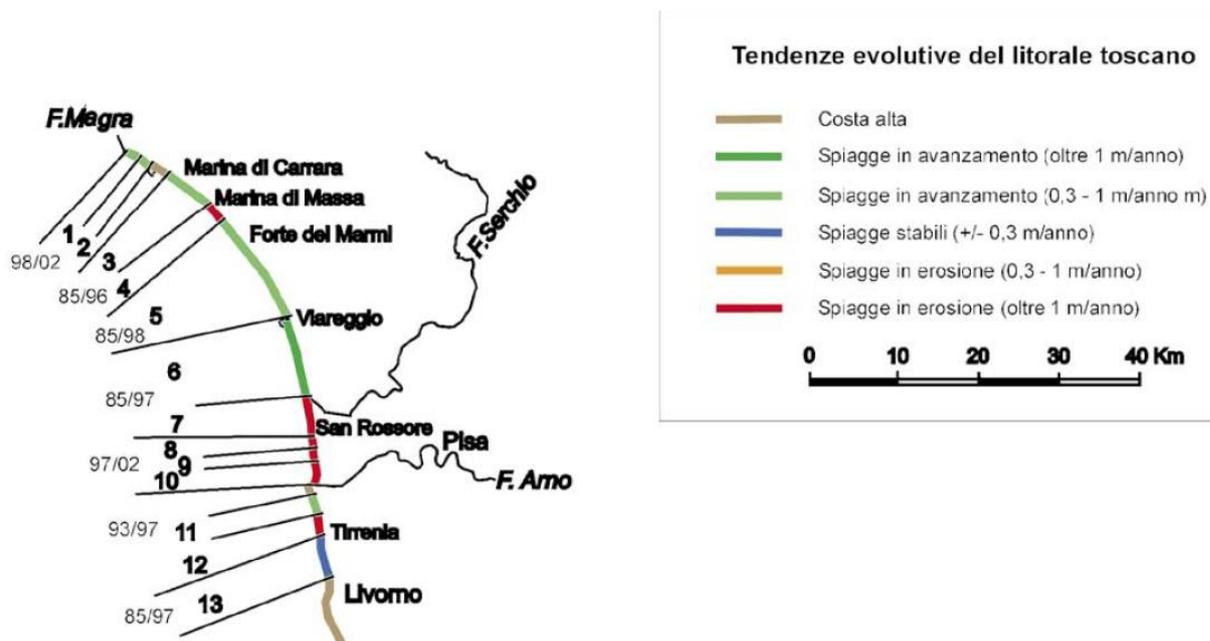


Figura 3-3. Tendenze evolutive delle spiagge della toscana continentale espresse sulla base del tasso di spostamento medio della linea di riva derivante dal confronto fra i due più recenti rilievi. [8]

### 3.2 Livelli e correnti

Le variazioni dei livelli di marea lungo il litorale toscano sono contenute. L'escursione della marea astronomica è nell'ordine di 0.2 m compreso tra i massimi e minimi delle maree sizigiali, il MLWS (Mean Low Water Spring) ed il MHWS (Mean High Water Springs) (vedi Tabella 3-1).

Tabella 3-1. Escursioni di marea astronomica media (Admiralty Tide tables)

	Level, above CD (in m)	
	La Spezia	Livorno
MHWS	0.3	0.3
MHWN	0.3	0.2
MSL	0.2	0.2
MLWN	0.1	0.1
MLWS	0.1	0.1

Sulla base delle analisi condotte sulle misure del mareografo del Porto di Marina di Carrara si è riscontrato che la componente astronomica delle variazioni del livello marino è di tipo misto semidiurno con due alte e due basse maree, di ampiezza diversa. L'ampiezza di marea risulta comunque molto contenuta con escursioni di livello comprese mediamente tra +/- 8 cm. Nelle fasi sizigiali l'ampiezza della marea può raggiungere occasionalmente +/-14 cm.

Assumendo, rispetto ad una pressione atmosferica media di 1013 mb, condizioni estreme di minimo barico (legate al passaggio dei centri di bassa pressione tipici dei vortici ciclonici) pari a 975 mb e di massimo barico (legate al passaggio dei centri di alta pressione caratterizzanti gli anticicloni) pari a 1044 mb è possibile stimare rispettivamente un effetto di sovrizzo marino massimo pari a +0.38 m ed un abbassamento massimo del livello marino pari a -0.31 m.

Il contributo del sovrizzo del livello marino sotto costa (alla profondità di -5.0 m s.l.m.) dovuto all'azione del vento può invece essere assunto pari a circa 15 cm. [1]

### 3.3 Il clima meteomarino (vento ed onde)

Il paraggio costiero in cui ricade il porto di Marina di Carrara, è situato sulla costa occidentale della penisola italiana che si affaccia sul Mar Ligure Orientale quindi geograficamente esposto agli eventi meteomarini (moto ondoso e vento) provenienti dal II° e dal III° quadrante (da Sud Est a Sud, e da Sud Ovest ad Ovest) (vedi Figura 3-4). [1]

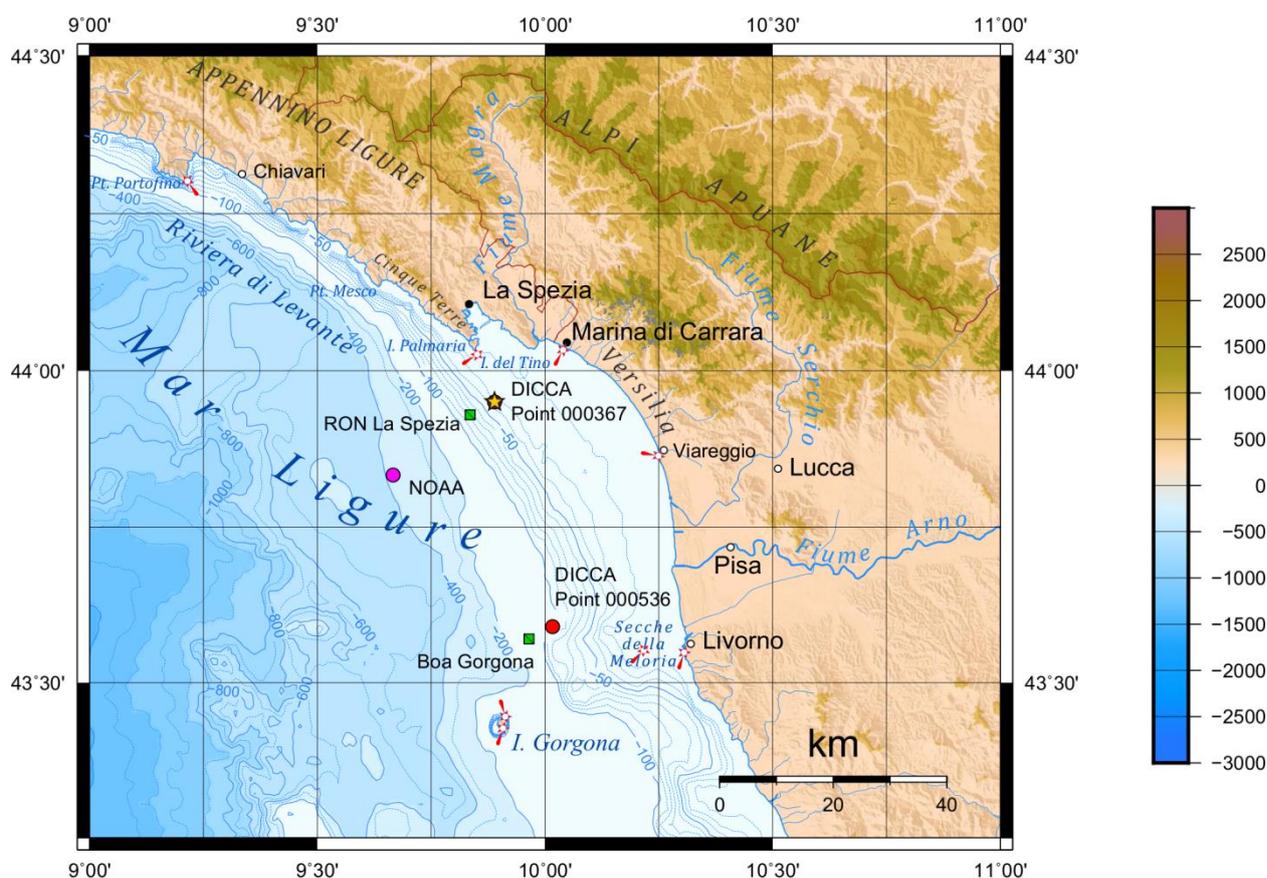


Figura 3-4. Inquadramento geografico del Mar Ligure Orientale con indicazione del punto di ricostruzione del moto ondoso DICCA 000367 (43.95°N-9.88°E) utilizzato per la definizione del clima di moto ondoso al largo [1]

Per la definizione del regime dei venti che caratterizzano il paraggio geografico in esame sono stati acquisiti diversi dati di vento, sia al largo che in costa, provenienti sia da misure dirette che da modelli numerici di circolazione atmosferica.

In riferimento alla serie storica oraria di dati di vento ricostruiti in rianalisi dal DICCA dell'Università di Genova (vedi Figura 3-5) avente una durata di 40 anni, è stata eseguita un'analisi statistica al fine di analizzare la distribuzione dei venti e la correlazione con il moto ondoso generato.

In termini di frequenza di accadimento i venti regnanti (più frequenti) provengono dai settori di Levante (75-105 °N) e da Scirocco (120-150 °N) con una frequenza di accadimento degli stati di

vento con velocità superiore a 2.0 m/s rispettivamente pari al 22.4% e al 18.3%.

Le calme (stati di vento con velocità inferiore a 2 m/s) di scarso interesse ai fini della generazione del moto ondoso, si verificano con frequenza pari al 16.1%.

I venti dominanti (più intensi), con velocità del vento superiori a 14 m/s (vento forza 7 superiore a 30 nodi), si verificano in media poche ore anno e provengono prevalentemente dal settore di Grecale (30-60 °N) e dal settore di Libeccio (210-240 °N) e da Levante. In misura minore si possono verificare venti intensi dai settori di Ponente e Tramontana, rari sono gli eventi intensi provenienti dagli altri settori.

Il confronto tra il clima anemometrico ottenuto da questi dati e quelli ricostruiti in re-analisi al largo della NOAA, mostra chiaramente l'effetto che l'orografia locale esercitata su questi dati.

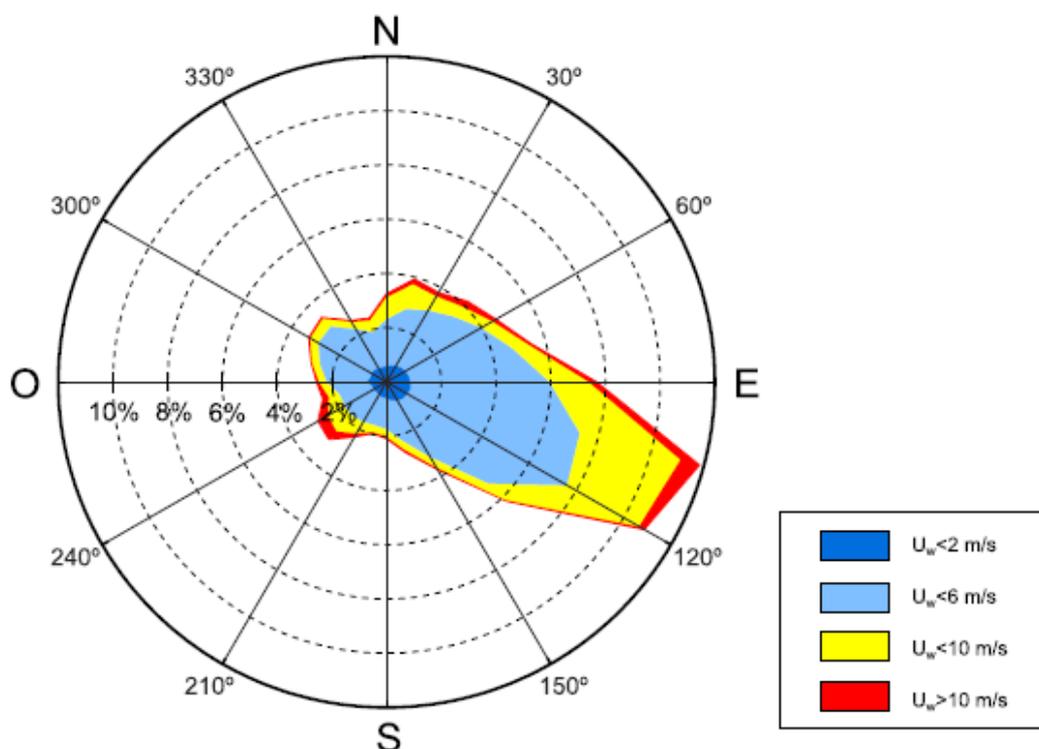


Figura 3-5. Distribuzione direzionale dei venti ricostruiti dal DICCA al largo di La Spezia e Marina di Carrara (periodo di riferimento 1979 - 2018) [1]

Per la definizione delle caratteristiche del moto ondoso al largo del paraggio in esame si è fatto riferimento ai dati di moto ondoso provenienti da diverse sorgenti tra cui

- dati di moto ondoso ricostruiti in re-analisi dall'istituto americano NOAA;
- dati di moto ondoso ricostruiti in re-analisi tra il 1979 ed il 2018 del DICCA;
- registrazioni ondamiche direzionali alla Boa di La Spezia;
- registrazioni ondamiche direzionali alla Boa di Gorgona.

In Figura 3-6 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  ricavata dall'analisi dei dati forniti dal DICCA da cui si può osservare, al pari di quanto osservato per i dati registrati dalla boa di La Spezia, una forte prevalenza degli eventi di moto ondoso provenienti da Libeccio [210-240°N] che rappresentano complessivamente il 30.9% degli stati di mare.

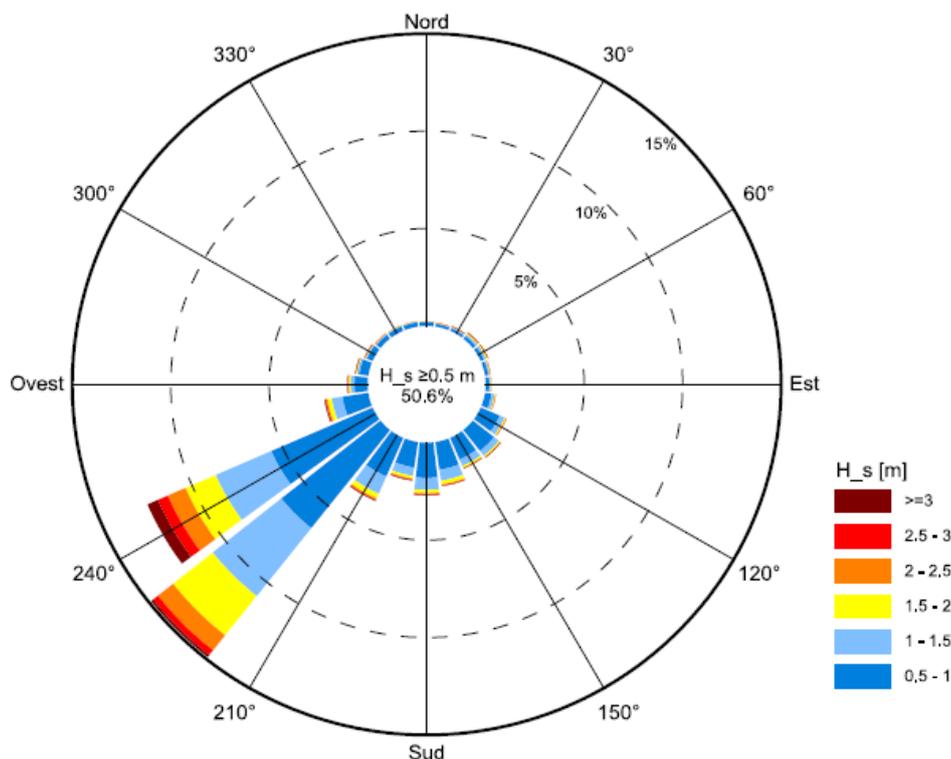


Figura 3-6 Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  ricostruita dal DICCA nel punto P\_000367 al largo di La Spezia - periodo di riferimento 1979-2018. [1]

In termini generali, sulla base dei dati e degli studi disponibili si può concludere che i venti primaverili ed estivi predominanti nella regione provengono da Ovest/Sud-Ovest e i venti predominanti dell'autunno e dell'inverno da Nord-Nord-Est. Si osserva inoltre un'evidente influenza dell'orografia locale sul regime dei venti in prossimità della costa, con una sensibile variazione sia delle intensità che delle direzioni dei venti rispetto alle condizioni al largo.

In riferimento al moto ondoso le onde più frequenti e con le altezze d'onda maggiori sono quelle provenienti dal settore da sud-ovest (Libeccio) e da SSO (Scirocco). In termini di venti caratteristici, il vento invernale predominante sulla costa toscana è la Tramontana, mentre quelli che forzano le onde predominanti sono il Libeccio e lo Scirocco.

Pertanto il clima d'onda nell'area in cui ricade il Porto di Marina di Carrara non è definito solo dalle onde generate localmente, ma anche con frequenza più alta, da onde provenienti dall'esterno della regione.

Per ulteriori approfondimenti sul clima meteomarinario si rimanda allo «Studio meteomarinario S1». [1] redatto nell'ambito dello stesso Accordo Quadro.

### 3.4 Caratteristiche dei sedimenti

Per la caratterizzazione della composizione dei sedimenti dei fondali sono stati acquisiti ed analizzati dati ed informazioni reperite da diverse sorgenti come elencato in Tabella 2-2.

Dall'analisi di questi dati si evidenzia che in generale il sedimento è moderatamente ben classato (ovvero con granulometrie relativamente omogenee) lungo il tratto di costa a sud di Marina di Massa. Lungo la costa a nord di Marina di Massa il sedimento è più vario con una distribuzione granulometrica molto poco classata.

In generale si osserva una relazione inversa tra le dimensioni medie dei sedimenti e le profondità dei fondali con materiali più grossolani sulla battigia e sedimenti di dimensioni progressivamente

minori procedendo verso profondità maggiori. I primi mostrano una variabilità assai maggiori, tanto da occupare quasi completamente il range dimensionale prima descritto, anche se la maggior parte di essi si colloca tra 1 e 2.5 phi. [9]

Lungo la fascia litoranea posta al di sopra di -5 m s.l.m.m. le percentuali di limo sono generalmente inferiori al 5%, mentre a profondità un po' maggiori questa percentuale di limo aumenta (anche se a -8 m s.l.m.m. la maggior parte dei campioni esaminati da Cipriani et al. [9] mostrano ancora percentuali di limo inferiori al 10%).

Nel tratto a nord del Porto di Marina di Carrara, compreso tra la foce del Magra e quella del Parmignola, la composizione granulometrica è influenzata dalla presenza delle opere di difesa, in prevalenza scogliere trasversali alla linea di riva (pennelli) in corrispondenza delle quali si ha una concentrazione delle correnti di rip con dispersione delle sabbie fini verso il largo. Tutta la zona negli ultimi 10 anni è stata comunque interessata da una serie di ripascimenti che hanno modificato localmente la distribuzione dei sedimenti naturali.

Per la caratterizzazione dei sedimenti nel tratto compreso tra il Parmignola ed il Lavello entro il quale ricade il Porto di Marina di Carrara, si è fatto riferimento sia agli studi di Pranzini (2009) [5] che alle indagini per la caratterizzazione dei fondali eseguite nel 2015 dall'Università di Genova di cui nel seguito si riportano le conclusioni principali.

La carta della distribuzione della media mostra la naturale diminuzione delle dimensioni dei sedimenti grossolani verso il largo (a causa dei gradienti energetici che regolano il fenomeno della sedimentazione) e la localizzazione lungo lo "step" (termine usato dal redattore dello studio per indicare la fascia prospiciente la battigia a massima pendenza). I sedimenti più fini si trovano al largo, entro la batimetrica dei -14,00 m s.l.m.m.; inoltre, a sud lo spostamento dell'isolinea tra sabbie fini e molto fini verso riva è causato dalla presenza del torrente Carrione, il quale apporta materiale fine soprattutto nei periodi di piena. [5]

Anche i sedimenti di spiaggia emersa mostrano qui dimensioni inferiori rispetto a quelle del lato di ponente, a causa della presenza delle scogliere parallele che abbattano l'energia del moto ondoso incidente. La classazione è l'indice che misura l'omogeneità nelle dimensioni dei granuli che compongono il sedimento e si assume tanto migliore quanto più il sedimento ha subito il processo di trasporto.

I sedimenti meno classati si ritrovano lungo la battigia e lo "step". I sedimenti di spiaggia sommersa sono caratterizzati da un range leggermente più ampio; tra la battigia e lo "step" si ritrovano campioni grossolani e scarsamente classati, mentre le sabbie molto fini e ben classate sono presenti oltre la batimetrica dei -6,00 m s.l.m.m..

Il materiale grossolano da "molto ben classato" a "moderatamente classato" si trova su fondali minori e sulla spiaggia emersa.

Lungo la diga foranea si identifica una lingua di sedimenti ben classati, mentre all'imboccatura i sedimenti sono moderatamente classati a causa della caduta dell'energia del moto ondoso. A sud, presso le scogliere, i sedimenti sono meno classati che a nord.

I granuli delle particelle leggere (argille e limi) non si trovano in ambienti ad elevata energia perché sono da questi facilmente asportati e tendono ad accumularsi su fondali profondi, proprio come avviene a Marina di Carrara.

Aumenti locali si ritrovano in prossimità della foce del Torrente Carrione per via del materiale fine trasportato durante gli eventi di piena. Si osserva l'allontanamento e dispersione del materiale fine per riflessione del moto ondoso lungo la diga foranea.

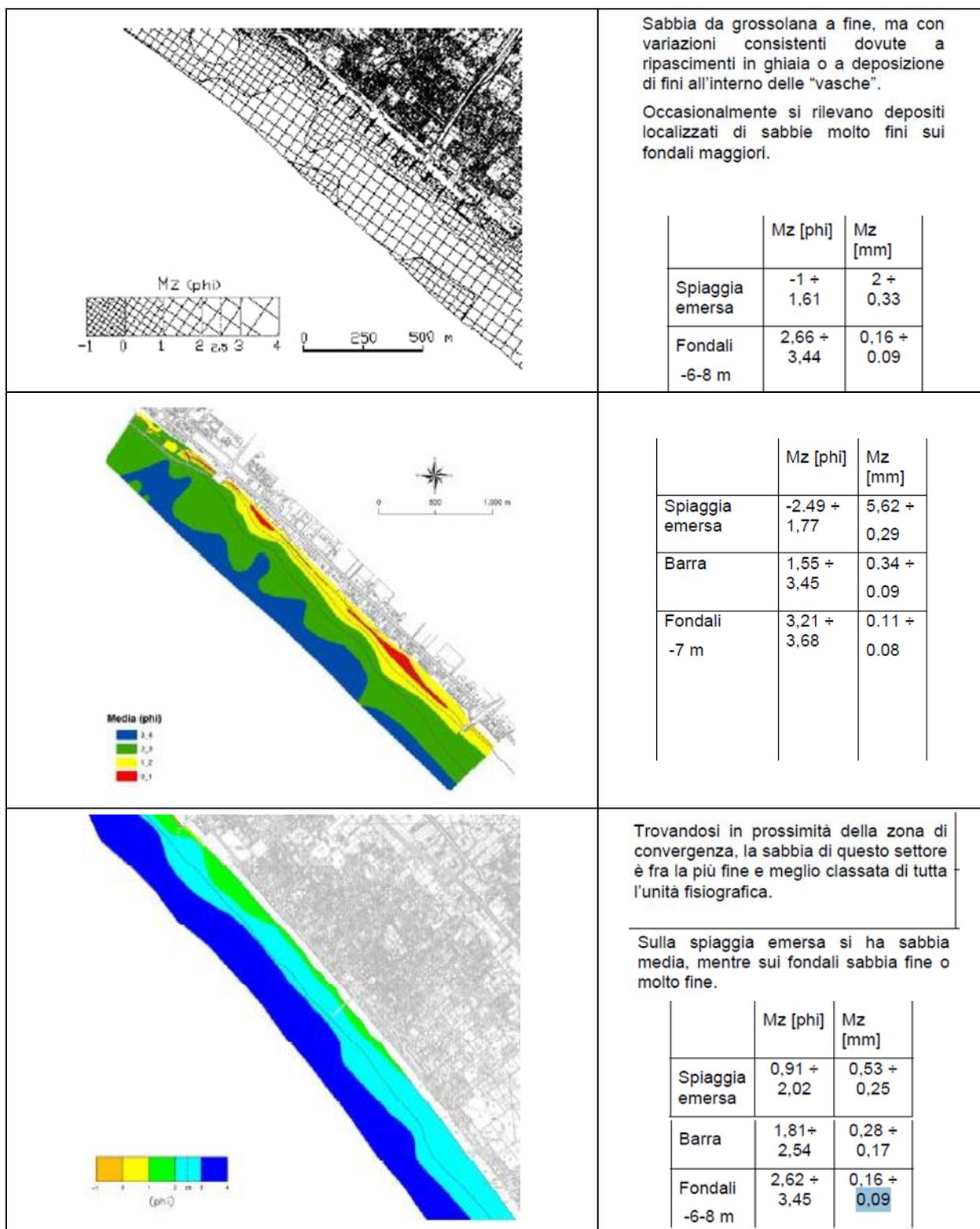
In Tabella 3-2 è riportata la sintesi del quadro conoscitivo della distribuzione spaziale dei sedimenti lungo il litorale toscano compreso tra la Bocca di Magra ed il porto Viareggio con l'indicazione della distribuzione del fuso granulometrico per i diversi settori in cui è suddiviso il litorale. [10]

Tabella 3-2. Quadro conoscitivo della sedimentologia dei litorali della Versilia (fonte Regione Toscana) [10]

	<p>I sedimenti presenti sul litorale nel tratto toscano sono caratterizzati da sabbia medio-grossolana con ghiaia in cuspidi e occasionalmente sulle barre.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Mz [phi]</th> <th>Mz [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Spiaggia emersa</td> <td>-1,08 +1,95</td> <td>2,11 0,26</td> </tr> <tr> <td>Barra</td> <td>+1,96</td> <td>0,26</td> </tr> <tr> <td>Fondali -7-8 m</td> <td>+2,93 +3,16</td> <td>0,13 0,11</td> </tr> </tbody> </table>		Mz [phi]	Mz [mm]	Spiaggia emersa	-1,08 +1,95	2,11 0,26	Barra	+1,96	0,26	Fondali -7-8 m	+2,93 +3,16	0,13 0,11
	Mz [phi]	Mz [mm]											
Spiaggia emersa	-1,08 +1,95	2,11 0,26											
Barra	+1,96	0,26											
Fondali -7-8 m	+2,93 +3,16	0,13 0,11											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Mz [phi]</th> <th>Mz [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fondali Antistanti foranea 3 - 6 m</td> <td>2,36 +</td> <td>0,19 +</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3,08</td> <td>0,12</td> </tr> </tbody> </table>		Mz [phi]	Mz [mm]	Fondali Antistanti foranea 3 - 6 m	2,36 +	0,19 +		3,08	0,12			
	Mz [phi]	Mz [mm]											
Fondali Antistanti foranea 3 - 6 m	2,36 +	0,19 +											
	3,08	0,12											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Mz [phi]</th> <th>Mz [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Spiaggia emersa</td> <td>-1,90 + 2,43</td> <td>3,73 + 0,18</td> </tr> <tr> <td>Zona retro-barriere</td> <td>-3,40 + 2,24</td> <td>10,56 + 0,21</td> </tr> <tr> <td>Zona antistante le barriere</td> <td>2,13 + 3,52</td> <td>0,23 + 0,09</td> </tr> </tbody> </table>		Mz [phi]	Mz [mm]	Spiaggia emersa	-1,90 + 2,43	3,73 + 0,18	Zona retro-barriere	-3,40 + 2,24	10,56 + 0,21	Zona antistante le barriere	2,13 + 3,52	0,23 + 0,09
	Mz [phi]	Mz [mm]											
Spiaggia emersa	-1,90 + 2,43	3,73 + 0,18											
Zona retro-barriere	-3,40 + 2,24	10,56 + 0,21											
Zona antistante le barriere	2,13 + 3,52	0,23 + 0,09											

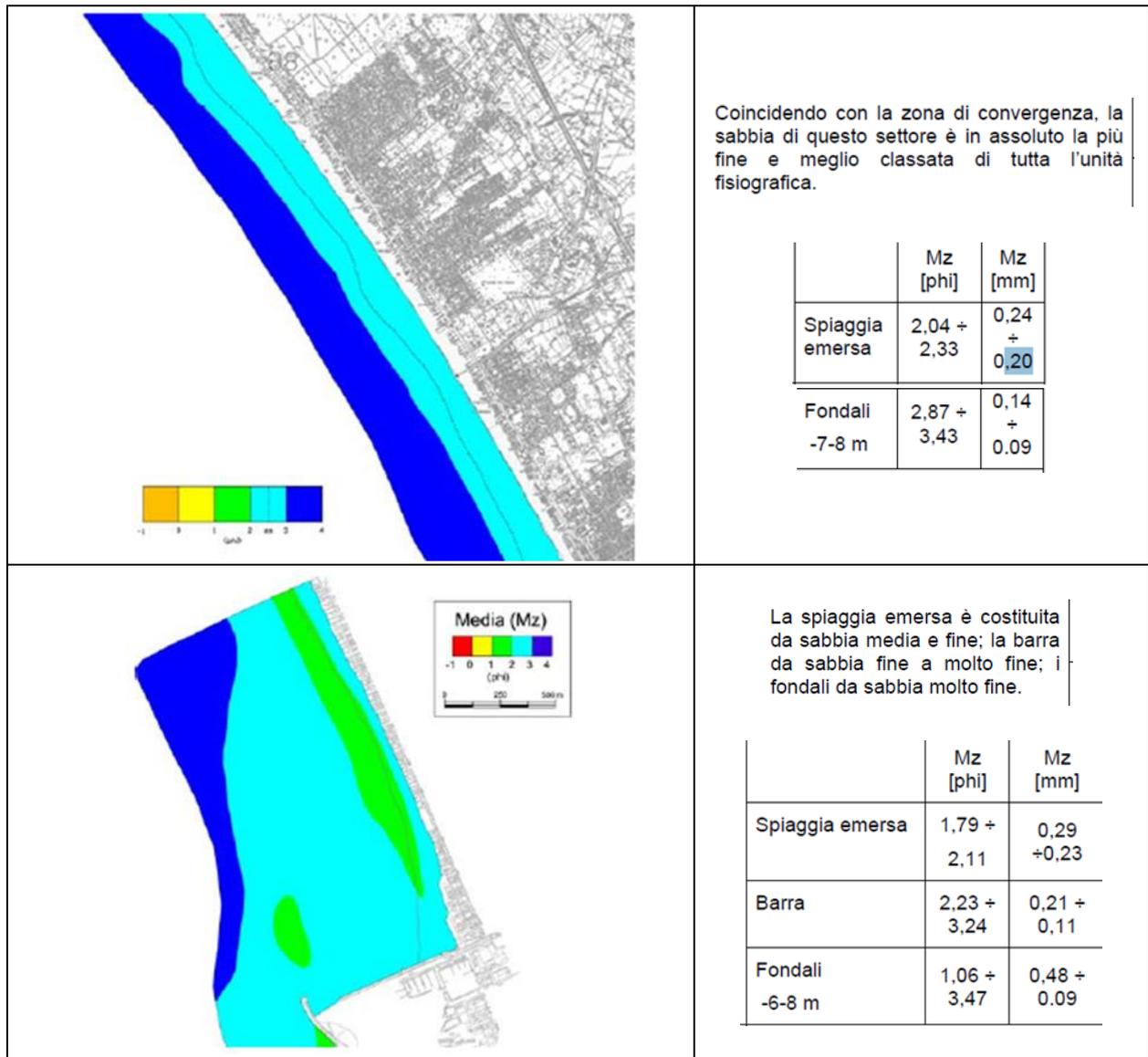
Segue Tabella 3-3

Prosegue Tabella 3-4



Segue Tabella 3-5

Prosegue Tabella 3-6



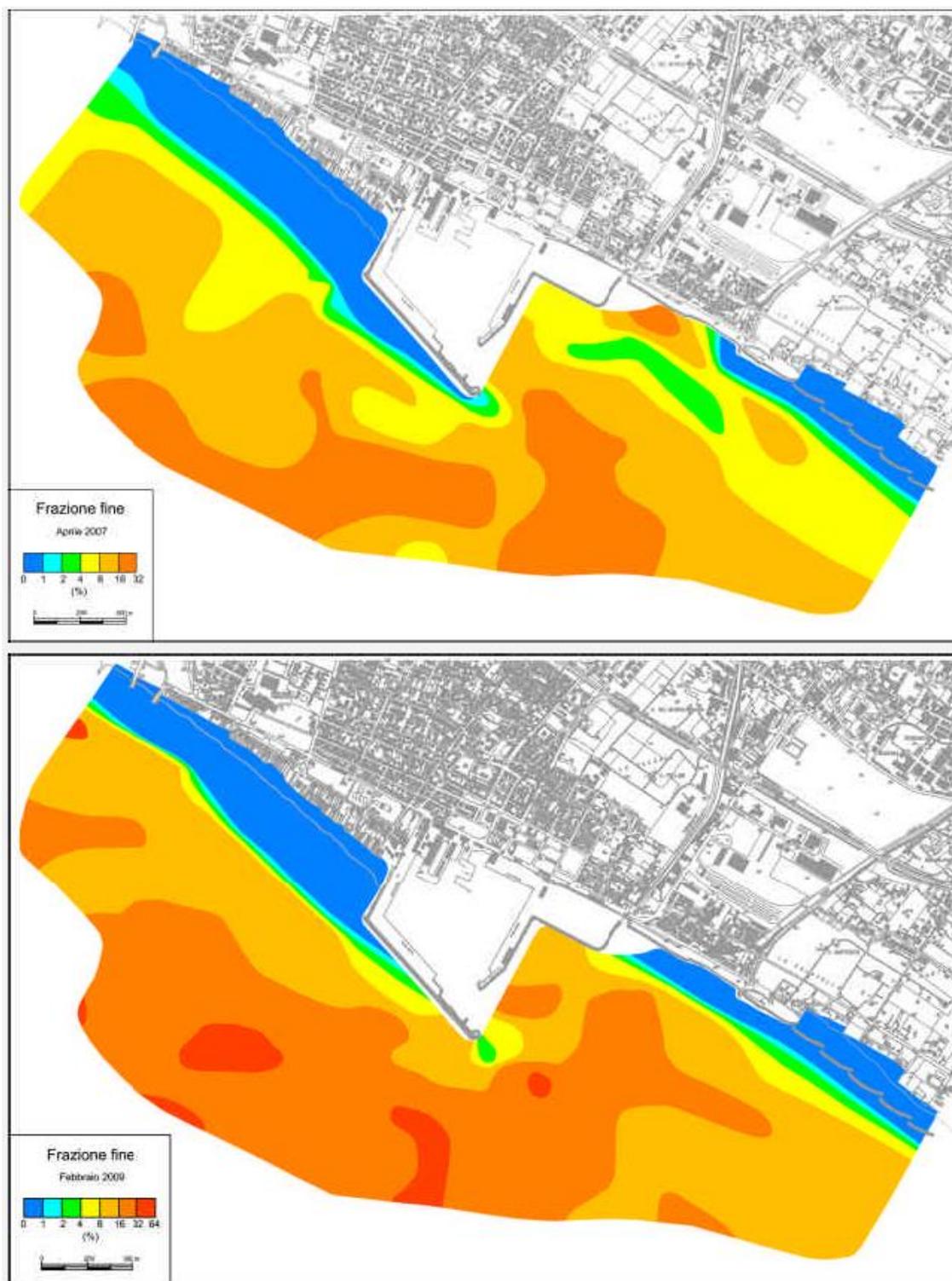


Figura 3-7 Distribuzioni areali della Percentuale della frazione fine dei sedimenti (Mz) ad Aprile 2007 (in alto) e Febbraio 2009 (in basso) [5]

Nella zona centrale del litorale versiliese da Forte dei Marmi fino a Marina di Pietrasanta si osserva una distribuzione molto regolare dei sedimenti con sabbia fine anche lungo la battigia. Nella zona a nord del Porto di Viareggio si conferma la presenza di materiale sottile, dovuta alla bassa energia del moto ondoso nel tratto immediatamente sopraflutto della diga foranea. Sul suo prolungamento si ha comunque un lobo di sabbie medie in continuità con quello presente a sud, a riprova del fatto che sedimenti di provenienza meridionale riescono ad oltrepassare il porto.

### 3.5 Apporti dei corsi d'acqua

Il sistema litoraneo in cui ricade l'area litoranea di interesse è compresa tra la foce Magra ed il porto di Viareggio che costituisce una discontinuità fisica con il tratto litoraneo posto più a sud.

I corsi d'acqua che sfociano in questo tratto costiero appartengono all'area omogenea del bacino idrografico denominata UoM (Unit of Management) Toscana Nord che appartiene al Distretto Appennino Settentrionale e si estende per una superficie complessiva pari a circa 375 Km<sup>2</sup>. Dal punto di vista fisico la UoM Toscana Nord insiste sul territorio compreso tra il bacino del fiume Magra a nord, il Bacino del fiume Serchio ad est e sud-est ed il mar Tirreno ad ovest [11].

Procedendo da Nord verso Sud (vedi Figura 3-8) i corsi d'acqua sono:

- Fiume Magra;
- Torrente Parmignola;
- Torrente Carrione;
- Torrente Ricortola;
- Fiume Frigido;
- Fiume Versilia;
- T. Baccatoio;
- Fiume Camaiole.

A questi si devono aggiungere i canali artificiali:

- Fossa Maestra;
- Fosso Lavello;
- Fosso Brugiano;
- Fosso Magliano;
- Fosso Poveromo;
- Fosso Fiumetto-Tonfano.



della Regione Toscana, nel seguito per brevità SIR Toscana (<https://www.sir.toscana.it/>).

Complessivamente il set di dati a disposizione ha riguardato un periodo temporale compreso tra il 2006 ed il 2019, con una copertura tuttavia non omogenea per tutti i fiumi considerati. Per il solo Fiume Versilia i dati di portata media giornaliera hanno coperto un periodo più esteso dal 1940 al 2008.

A titolo di esempio in Figura 3-9 è riportato l'andamento delle portate dei corsi d'acqua della Versilia per l'anno 2006, nel quale è risultata maggiore la copertura di dati. In Tabella 3-7 sono riportate le portate medie giornaliere dei torrenti\fiumi sfocianti della Nord della Toscana, incluso il Fiume Magra derivati sulla base dei dati messi a disposizione dal SIR Toscana.

In Tabella 3-8 è infine presentato il quadro di sintesi per ciascun corso d'acqua con la valutazione delle portate medie defluenti e delle caratteristiche morfologiche dei bacini idrografici afferenti.

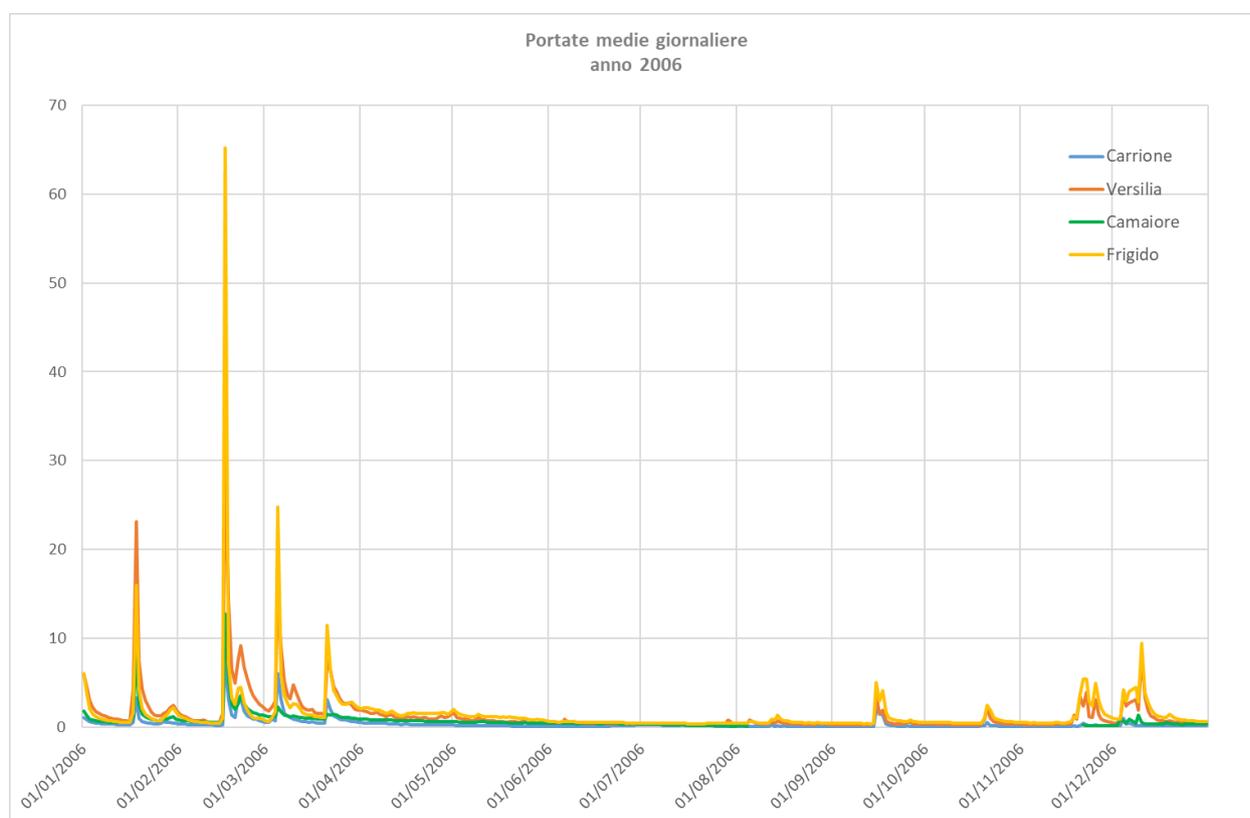


Figura 3-9 Andamento delle portate medie giornaliere nei corsi d'acqua della Versilia nel 2006 (sorgente dati SIR Toscana)

Tabella 3-7. Portate medie giornaliere dei torrenti \ fiumi sfocianti della Nord della Toscana (dati da SIR Toscana)

anno	Corso d'acqua	Bacino Idrografico Km <sup>2</sup>	Rendimento	Q media [m <sup>3</sup> /s]	Q max [m <sup>3</sup> /s]	Vol annuale Mil m <sup>3</sup>
2013	Magra	1686	17%	58.9	647.0	315.4
2014			98%	44.3	532.9	1369.0
2015			99%	13.3	177.9	413.7
2016			97%	24.2	337.2	739.3
2017			99%	25.9	727.3	807.0
2018			97%	31.2	348.7	956.2
2019			91%	30.8	591.0	881.5
2006	Carrione	46.6	93%	0.4	7.8	11.1
2006	Versilia	91	100%	1.4	30.4	43.7
2009			100%	1.3	25.0	42.2
2010			98%	1.8	23.1	56.2
2011			96%	0.7	13.8	21.2
2012			100%	1.2	40.5	37.6
2013			100%	1.9	29.1	59.0
2014			100%	2.5	29.5	80.3
2015			100%	1.6	8.7	49.9
2018			100%	1.1	11.3	36.2
2006			Camaioire	50.2	70%	0.8
2018	89%	0.3			3.8	8.8
1996	100%	4.8			88.6	152.8
2004	98%	2.5			34.5	77.9
2005	100%	1.1			59.4	33.9
2006	100%	1.5			65.2	47.9
2007	100%	2.1			12.4	67.0
2008	100%	3.2			87.1	99.8

Tabella 3-8. Valori medi annui defluiti dei torrenti \ fiumi sfocianti della Nord della Toscana (dati da SIR Toscana)

Fiume	Bacino idrografico [km <sup>2</sup> ]	lunghezza [km]	Q media [m <sup>3</sup> /s]	Volume annuale [mil m <sup>3</sup> ]
<b>Magra</b>	1686	70	35	1104
<b>T. Parmignola</b>	15	11	-	?
<b>T. Carrione</b>	46.6	15.4	0.4	12
<b>Fosso Lavello</b>	3.7	2.7	7 (da depuratori)	220 (da depuratori)
<b>T. Ricortola</b>	6.9	8	?	?
<b>F. Frigido</b>	63.2	17.5	2.1	66
<b>T. Versilia</b>	91	24	1.5	47
<b>Camaioire (Fosso dell'abate)</b>	50.19	8.34	0.5	12.8
<b>Serchio</b>	1565	111	55	1734
<b>Arno</b>	8228	241	110	3469

Come è possibile osservare da Tabella 3-8 tutti i corsi d'acqua della Versilia hanno un carattere tipicamente torrentizio con valori di portata media molto contenuta e picchi di portata consistenti in occasione degli eventi di piena.

I corsi d'acqua a carattere non stagionale sono invece il Magra, il Serchio e l'Arno che hanno delle portate medie nell'ordine di 30-110 m<sup>3</sup>/s con picchi di portata notevolmente superiori.

In riferimento al trasporto solido alla foce, si osserva che generalmente l'apporto solido dei corsi d'acqua della Versilia è mediamente poco significativo date le modeste portate medie in gioco; è comunque possibile un significativo apporto di sedimenti in occasione degli eventi di piena come rilevato dal SIR Toscana nell'ambito di una serie di misure ad hoc eseguite nell'ambito dello studio "Realizzazione del secondo stralcio del monitoraggio del trasporto solido nei corsi d'acqua della Toscana (2001)" [3].

Sulla base delle misure di trasporto solido condotte sui principali corsi d'acqua tra cui i Fiumi Versilia, Serchio ed Arno è stato possibile ottenere anche la caratterizzazione del fuso granulometrico in sospensione stabilendo, sulla base di dati sperimentali e teorici, la scala di deflusso delle portate liquide e solide.

In riferimento al Fiume Versilia, il più importante tra i corsi d'acqua minori del litorale della toscana settentrionale, i risultati dello studio illustrano che il trasporto in sospensione costituisce la parte più rilevante del flusso sedimentario con una frazione nell'ordine del 70% sul totale. Il rimanente 30 % è attribuibile a forme di trasporto di fondo. Il trasporto in sospensione è caratterizzato in larga parte (circa 84%) da frazioni fine di limo e argilla, mentre il restante 16% è attribuibile al trasporto di fondo (sabbia-ghiaia). Le concentrazioni di solidi in sospensione sono variabili in un range compreso tra 120 - 5400 mg/l con valori tipici mediamente nell'ordine di 1000 mg/l.

Si evidenzia che il trasporto di fondo rappresenta una frazione minore (circa il 30%) del trasporto totale ed è caratterizzato da materiale grossolano (ghiaie e sabbie) che tendono comunque a depositarsi vicino alla foce.

In Figura 3-10 e Figura 3-11 sono riportate le scale di deflusso delle portate liquide e solide ottenute sulla base dei suddetti rilievi sperimentali.

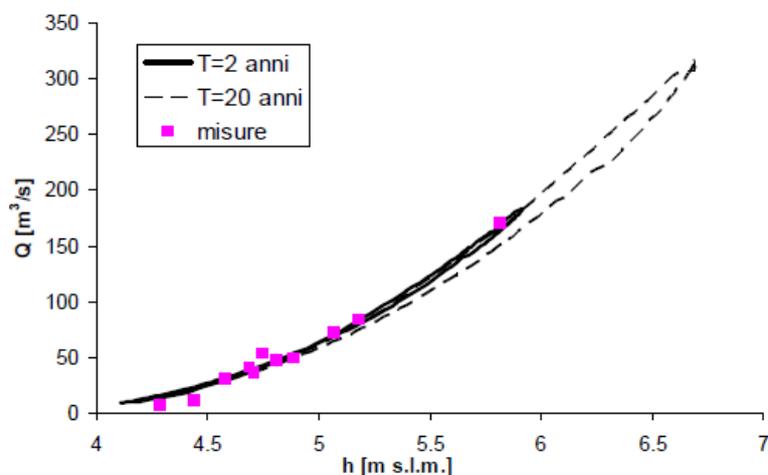


Figura 3-10 La scala di deflusso delle portate liquide del Fiume Versilia nel caso di eventi di piena con tempo di ritorno

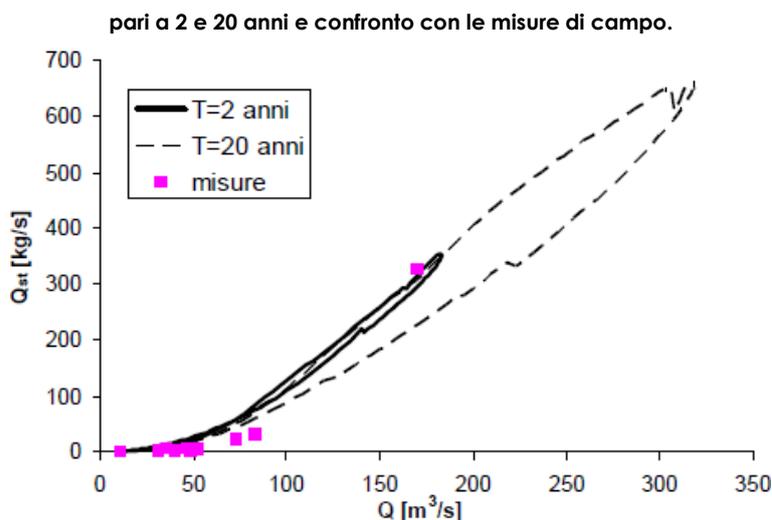


Figura 3-11 La scala di deflusso delle portate solide del Fiume Versilia nel caso di eventi di piena con tempo di ritorno pari a 2 e 20 anni e confronto con le misure di campo.

Per la valutazione della capacità di trasporto solido dei Fiumi Magra, Serchio ed Arno, responsabili dei maggiori apporti di materiale in sospensione per l'unità fisiografica oggetto di studio, si è fatto riferimento alle informazioni bibliografiche reperite ed in particolar modo allo studio eseguito da Delft Hydraulics (oggi Deltares) nel 2006 "Carrara Coastal Study" [2] e negli studi del DICEA (Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze) di "Studio geomorfologico del Fiume Magra e del Fiume Vara finalizzato alla gestione dei sedimenti e della fascia di mobilità" del 2006 [12] e lo "Studio geomorfologico dei principali alvei fluviali nel bacino del fiume Magra finalizzato alla definizione di linee guida di gestione dei sedimenti e della fascia di mobilità funzionale" del 2007. [12]

Nell'analisi dei dati di trasporto solido effettuata da Delft Hydraulics è evidenziato che, a partire dal 1800, la generale antropizzazione dei bacini idrografici ed in particolare gli interventi di protezione idraulica, la costruzione di dighe e le attività estrattive negli alvei fluviali, hanno modificato il regime delle portate liquide e solide dei corsi d'acqua con una generale drastica riduzione degli apporti solidi fluviali ed il conseguente deficit per il bilancio dei sedimenti nei processi di morfodinamica litoranea.

In particolare, il suddetto studio condotto da Delft Hydraulics indica per il fiume Magra l'estrazione di circa 25 milioni di m<sup>3</sup> di sedimenti nel periodo 1958-1973 (pari a una media di circa 1,6 m<sup>3</sup>/anno) stimando, per il periodo 1939-2000, un apporto solido medio totale dell'ordine di 500.000 m<sup>3</sup>/anno, di cui circa un'aliquota compresa tra il 10% e il 25% è costituito da sabbia, mentre la parte restante da limo e argilla. Ciò implica un potenziale da 50.000 a 125.000 m<sup>3</sup>/anno di apporti di sabbia per il bilancio solido del litorale in esame.

Stime simili sono riportate nella relazione dell'Università di Firenze [12], in cui è anche presentata una sintesi delle indagini e studi precedentemente eseguiti.

A completamento delle analisi eseguite sulla dinamica dei corsi d'acqua sfocianti lungo il litorale versiliese, si riporta infine una sintesi dello studio per la mitigazione del rischio idraulico del Torrente Carrione eseguito dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università di Genova nel 2016 [4] a sua volta basato anche su uno precedente studio modellistico condotto dall'Università di Firenze.

Questi aspetti, come riportato nel seguito del presente rapporto, sono stati considerati nell'ambito dello studio modellistico per la definizione e l'ottimizzazione della proposta di PRP di Marina di Carrara.

Sulla base delle informazioni reperite si può concludere che la massima portata idraulica in grado di defluire in condizioni di sicurezza (con franco di almeno 1 m) attraverso il centro di Carrara e nel tratto terminale del Carrione è nell'ordine di  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ , la massima portata idraulica contenuta in alveo nelle attuali condizioni risulta pari a  $320 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le sezioni critiche per il deflusso sono: il Ponte Giovanni da Verrazzano, in cui per tale portata il pelo libero del corso d'acqua arriva ad interessare l'impalcato, e una sezione localizzata ad una distanza di circa 270 m dallo sbocco in cui la difesa spondale in sinistra viene sormontata. [4].

Nell'ambito del medesimo studio è inoltre fornito l'Idrogramma di piena del Carrione nella sezione di chiusura del bacino per tempi di ritorno da 2 a 200 anni (vedi Figura 3-12 e Figura 3-13). Questi elementi sono stati utilizzati nell'ambito del presente studio specialistico per la definizione delle forzanti idrauliche da utilizzare nella modellistica numerica.

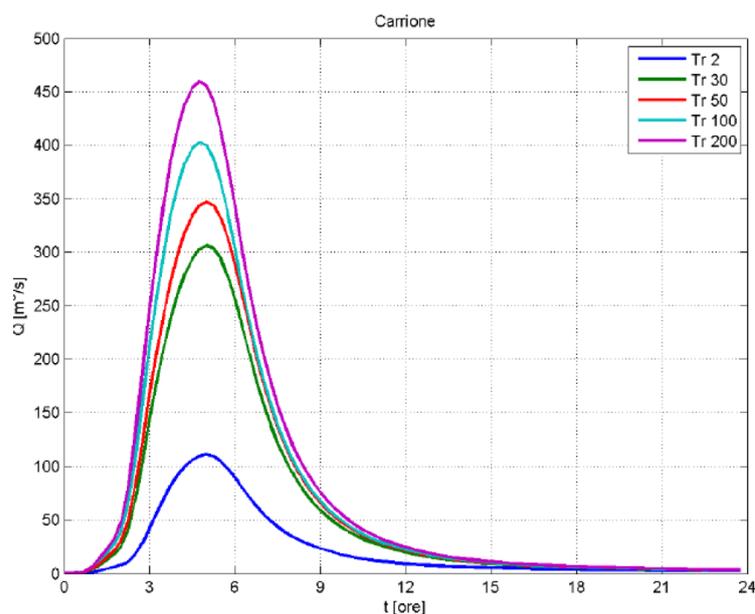


Figura 3-12. Idrogramma di piena del Carrione per diversi tempi di ritorno [4]



Figura 3-13. Valori massimi delle portate stimate nei rami principali della rete per i diversi periodi di ritorno ([Castelli et al. (2014)])

### 3.6 Sintesi degli studi precedenti sulle tendenze evolutive del litorale

L'evoluzione morfologica del litorale tra la foce del Magra e la foce dell'Arno è stata oggetto negli ultimi decenni di numerosi studi condotti da enti di ricerca ed autorità pubbliche tra cui il Delft Hydraulics (oggi Deltares), il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, il Consorzio ricerche LaMMA ed il Servizio idrografico della Regione Toscana.

Nel seguito è riportato uno stralcio del quadro di sintesi degli studi pregressi riassunti nello "Studio Morfodinamico dello stato attuale" predisposto dal Settore Genio Civile Toscana Nord nel Maggio 2019 in funzione della pianificazione degli interventi per il Recupero e riequilibrio del litorale di Massa fra le foci del fosso Lavello e del torrente Frigido. [2].

Gli studi condotti su questo tratto di litorale concordano nell'identificare due flussi litoranei di sedimenti uno diretto dalla foce dell'Arno verso nord e l'altro dalla foce del Magra verso sud, con una zona di convergenza (o zona neutra) che si colloca sul tratto di litorale versiliese compreso tra Forte dei Marmi e Marina di Pietrasanta. In particolare, in corrispondenza di Marina di Pietrasanta, nel lungo periodo, si ha il massimo e continuo avanzamento della linea di riva con la presenza dei sedimenti più fini e meglio classati di tutta l'unità fisiografica. Questi elementi morfologici indicano oggettivamente che in questa zona convergono i due flussi sedimentari. Si precisa che questa attuale tendenza nel lungo termine non esclude periodiche oscillazioni della "zona neutra" che avrebbe quindi nel punto indicato la sua posizione "media".

Anche lo studio condotto da Delft Hydraulics (oggi Deltares [2]) nel 2006 per il Ministero dell'Ambiente, concorda sull'esistenza dei due flussi sedimentari che si incontrano nella sottocella 3, compresa tra la foce del fosso Magliano ed il Porto di Viareggio (vedi Figura 3-14). In particolare, secondo tale studio, in base ai dati del periodo 1938-1998, il trasporto solido sedimentario netto (diretto da nord verso sud) è stimato in circa 60.000 m<sup>3</sup>/anno in corrispondenza della foce del Fosso Magliano, mentre risulta pari a 70.000 m<sup>3</sup>/anno (con direzione opposta) all'altezza del Porto di Viareggio [2].

Nel 2007 la società DEAM, per conto del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, ha stimato in 62.000 m<sup>3</sup>/anno (diretto da nord verso sud) il trasporto solido netto lungo il litorale compreso tra il fosso Magliano ed il fiume Versilia confermando di fatto l'ordine di grandezza delle portate solide indicate dal suddetto studio svolto da Deltares [2]. Nello studio condotto da Deltares sono state eseguite specifiche modellazioni numeriche dell'evoluzione del litorale apuo-versiliese esaminando differenti scenari, in presenza/assenza del Porto di Marina di Carrara e considerando diversi volumi di apporto sedimentario dai fiumi Magra e dall'Arno.

I risultati dello studio hanno messo in evidenza che le tendenze evolutive del litorale apuo-versiliese denotano un andamento simile in tutti gli scenari studiati ed è caratterizzato da un flusso sedimentario dalla foce del Magra verso Sud-Est nella parte del litorale che si estende a nord di Forte dei Marmi e da un flusso sedimentario in direzione opposta nel tratto compreso tra Forte dei Marmi e Viareggio. L'influenza delle opere portuali di Marina di Carrara sul trasporto solido e sulle tendenze evolutive del litorale è limitata ad un tratto di qualche kilometro a sud del porto, mentre non si rilevano apprezzabili differenze nei tratti successivi.

Le tendenze evolutive di lungo termine dell'unità fisiografica sono state studiate anche dall'Università di Firenze, ricostruendo l'evoluzione della linea di riva dal 1938 al 1997/98 (vedi Figura 3-15).

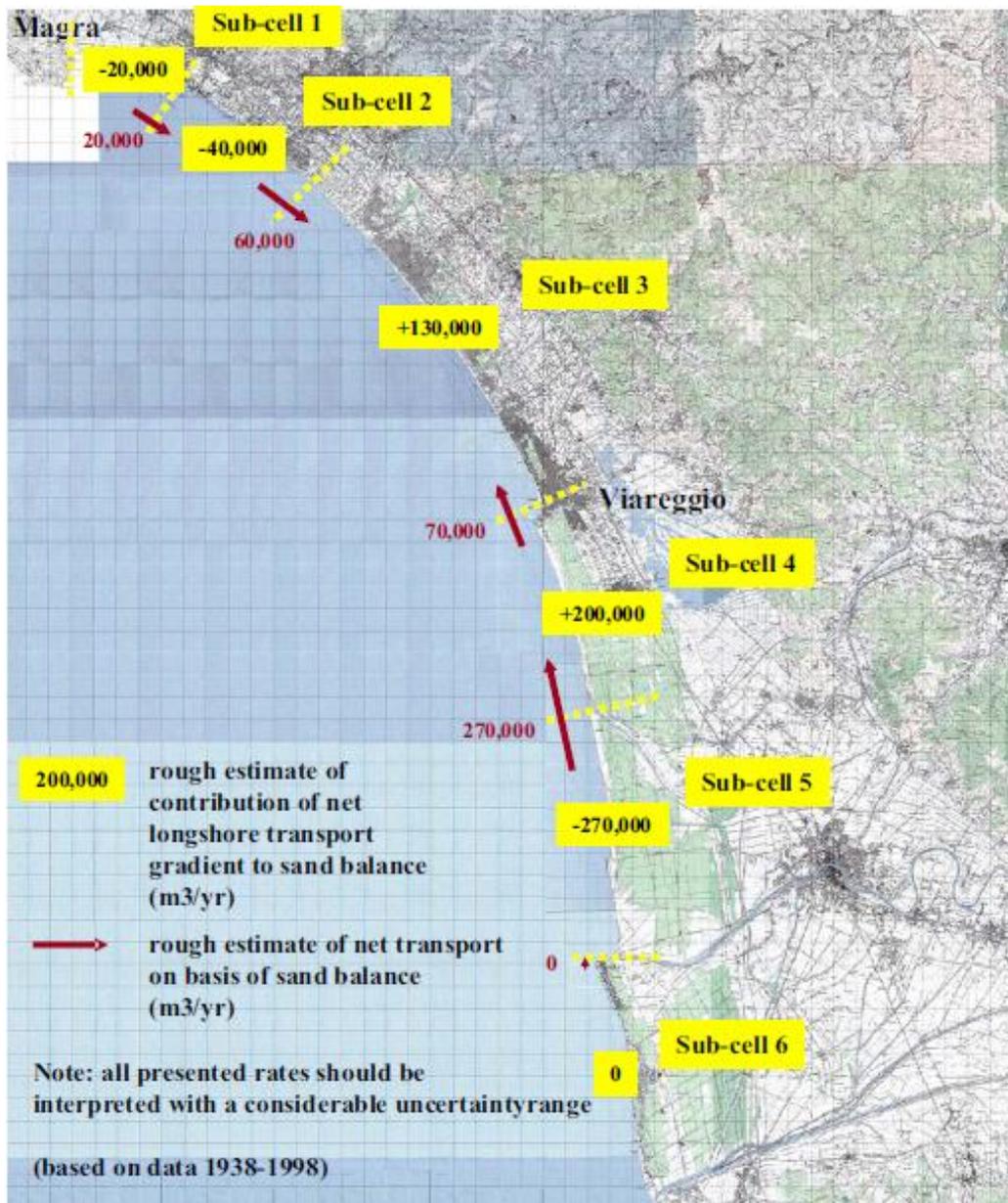


Figura 3-14. Stima a larga scala del flusso sedimentario litoraneo della Toscana settentrionale (Delft Hydraulics, 2006)

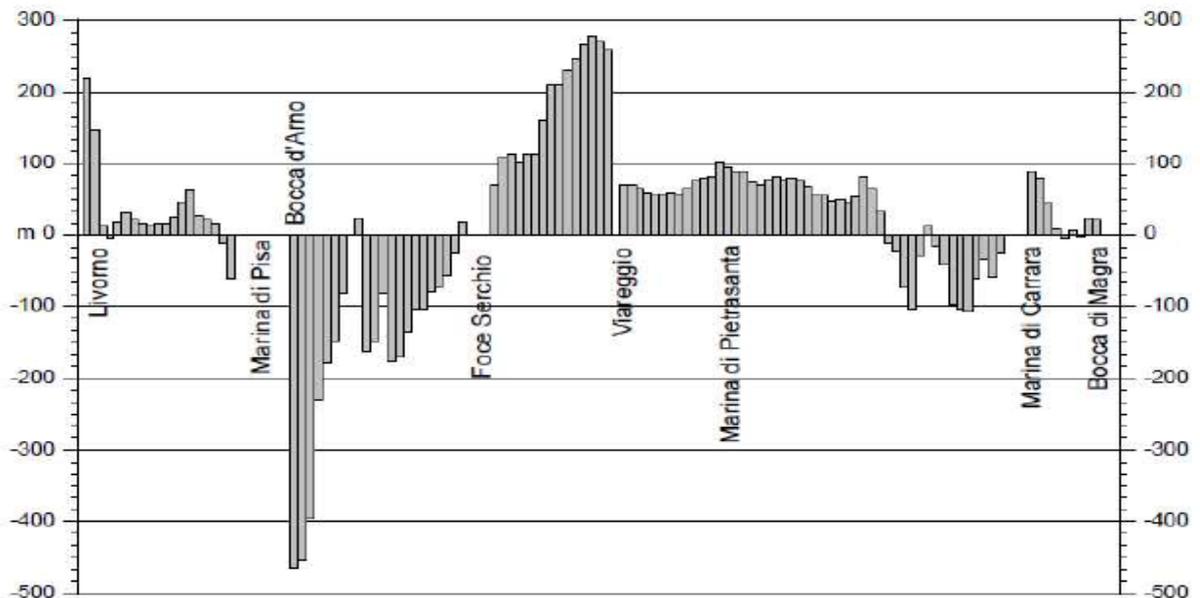


Figura 3-15. Spostamento medio della linea di riva (settori di 500 m) dell'unità fisiografica della Toscana Settentrionale dal 1938 al 1997/98 (Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze 2009) [9]

La storia evolutiva del tratto settentrionale del litorale toscano indica che l'accumulo è oggi stabilizzato dalla presenza del porto di Carrara e che comunque tutto il settore non riceve più che una modesta alimentazione da parte del Fiume Magra a causa della drastica riduzione degli apporti solidi di questo bacino idrografico. Nel tratto meridionale, fino a Viareggio, l'alimentazione è garantita a nord dall'erosione del segmento settentrionale e a sud, oltre Marina di Pietrasanta, dal flusso sedimentario meridionale alimentato dagli apporti del Serchio e dell'Arno, che riesce a superare il porto di Viareggio. L'effetto del porto Viareggino sulla dinamica sedimentaria è chiaramente documentato dall'avanzamento della spiaggia posta a levante di quasi 300 m negli ultimi 60 anni.

Al riguardo, prendendo spunto da quanto riportato nel Piano di indirizzo territoriale, con valenza di piano paesaggistico, della Regione Toscana per l'Ambito "02 - Versilia e costa Apuana" [13], in merito ai "processi storici di territorializzazione" del periodo contemporaneo (a partire dalla seconda metà del XIX secolo), è stata georeferenziata (Figura 3-16) la Carta della Toscana risalente al 1830, sovrapponendo la posizione più recente della "linea di riva" del 2020 (2) la cui morfologia è condizionata non solo dai due insediamenti portuali di Viareggio a sud-est e Marina di Carrara a nord-ovest ma anche dalle opere di difesa litoranea presenti a nord-ovest dalla foce del fiume Magra sino a Marina dei Ronchi e a sud-est dalla foce del fiume Arno sino alla foce armata del fiume Morto Nuovo (tenuta di San Rossore).

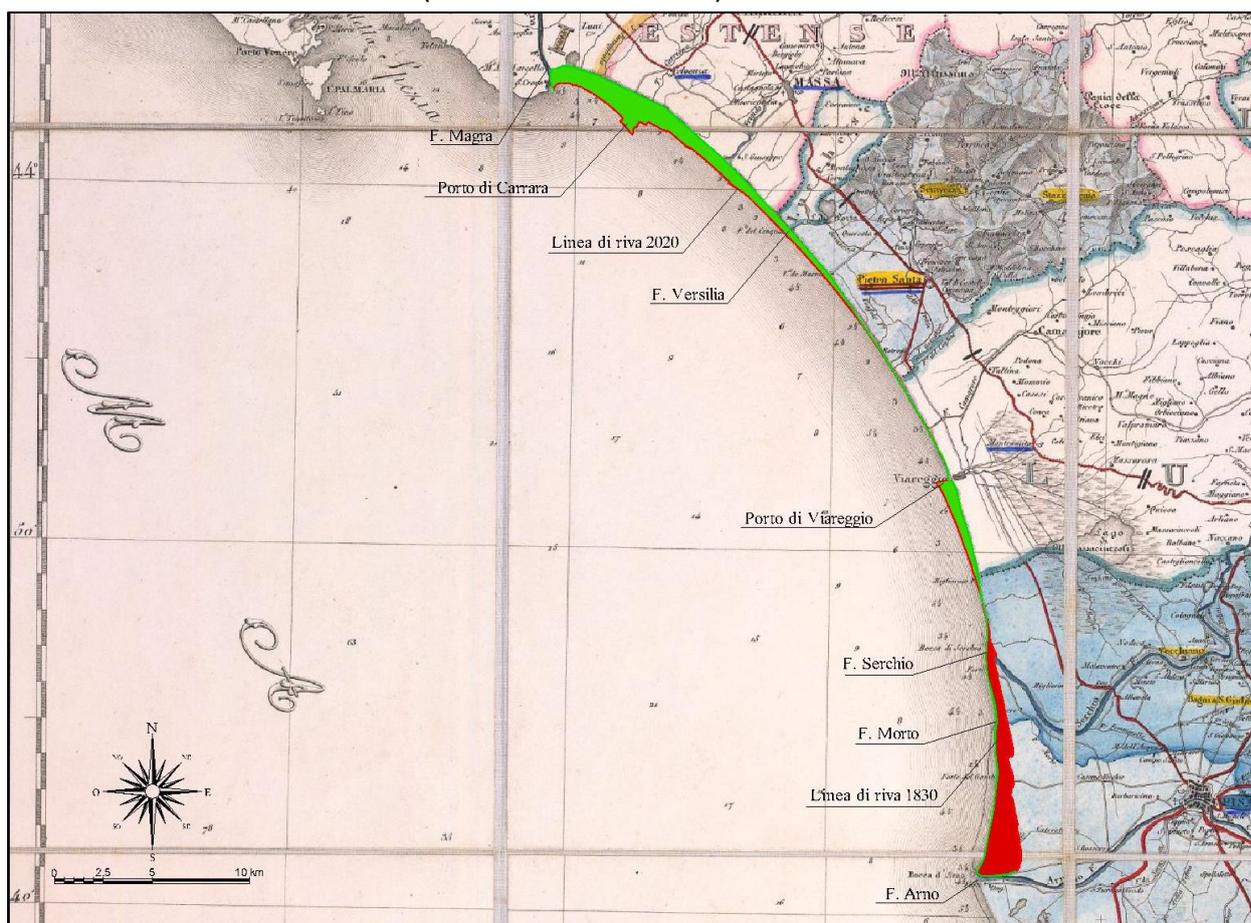


Figura 3-16. Analisi d'insieme della variazione della posizione della linea di riva tra il 1830 ed il 2020 [14].  
(campitura verde per le zone dove la linea di riva è avanzata e rossa per quelle dove è arretrata)

La comparazione tra le linee di riva del 1830 e del 2020 evidenzia che la fascia litoranea compresa tra le foci del Magra e del Versilia è quella dove negli ultimi due secoli si sono registrati i maggiori

<sup>2</sup> Afferente le attività di monitoraggio a scala regionale promosse dalla Regione Toscana e resa disponibile dal Settore regionale di Tutela Acqua e Territorio e Costa

accrescimenti della fascia litoranea, molto più accentuati sino al porto di Marina di Carrara. Invece per la zona compresa tra le foci dei fiumi Arno e Serchio si sono registrati arretramenti cospicui molto più elevati in termini di variazioni areali rispetto all'accrescimento che si riscontra dalla foce del Serchio sino al porto di Viareggio. Per il tratto di litorale compreso tra Viareggio e Forte dei Marmi le variazioni tra le due linee di riva esaminate (1830-2020) sono trascurabili.

Focalizzando l'attenzione sul tratto compreso fra le due infrastrutture portuali di Carrara e di Viareggio (vedi Figura 3-17) e limitando l'analisi al più recente periodo 1985-2005, la zona posta immediatamente a sud del porto di Carrara, per uno sviluppo di circa 3 km, era caratterizzata da un'erosione, comunque contenuta, cui seguiva un secondo tratto di circa 3 km mediamente contraddistinto da accrescimenti. Invece il tratto successivo, per uno sviluppo di circa 4 km, presentava marcati arretramenti di entità comunque gradualmente decrescente annullandosi procedendo a sud-est della foce del Versilia. Dall'altezza di Forte dei Marmi la fascia di spiaggia risultava in evidente accrescimento raggiungendo ampiezze massime a sud di Marina di Pietrasanta, che come detto essendo la zona di convergenza media dei flussi sedimentari del Magra (proveniente da nord) e dell'Arno (proveniente da sud) è interessata da processi di ripascimento naturale che coinvolgono la spiaggia emersa e sommersa.

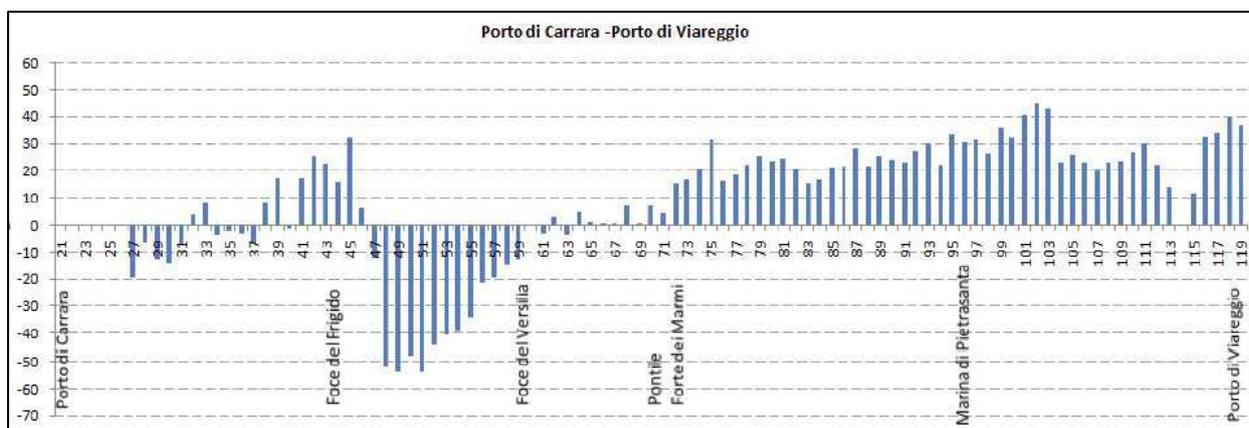


Figura 3-17. Evoluzione della linea di riva in 98 settori (lunghi 250 m) dal 1985 al 2005 nel tratto compreso tra il Porto di Carrara ed il Porto di Viareggio (DST UNIFI, 2011) [13]

Tale quadro conoscitivo è stato recentemente implementato ed aggiornato dal Consorzio Lamma per conto della Regione Toscana nell'ambito dell'attività di monitoraggio a scala regionale della linea di riva, analizzando, in particolare, anche i tassi evolutivi dell'ultimo periodo 2005 - 2017 (vedi Figura 3-18 e Figura 3-19) [15].

Settore		Lunghezza (m)	Diff. 2005-2010 (m)	Diff. 2010-2017 (m)	Diff. 2005-2017 (m)
01	Magra - Porto di Carrara	4389			7,2
02	Porto di Carrara	2359			
03	Porto di Carrara - Marina di Massa	2081	-5,1	-1,0	-6,1
04	Marina di Massa - Foce Magliano	2511	-3,5	5,0	1,4
05	Foce Magliano - Foce Versilia	3125	-7,8	5,2	-2,6
06	Foce Versilia - Fiumetto	5836	-0,8	7,6	6,7
07	Fiumetto - Lido di Camaiole	4187	9,3	11,0	20,3
08	Lido di Camaiole - Porto di Viareggio	5019	4,2	13,6	17,8
09	Porto di Viareggio	725			

Figura 3-18. Variazioni lineari medie per ciascun settore (RT - Lamma, 2018) [15]

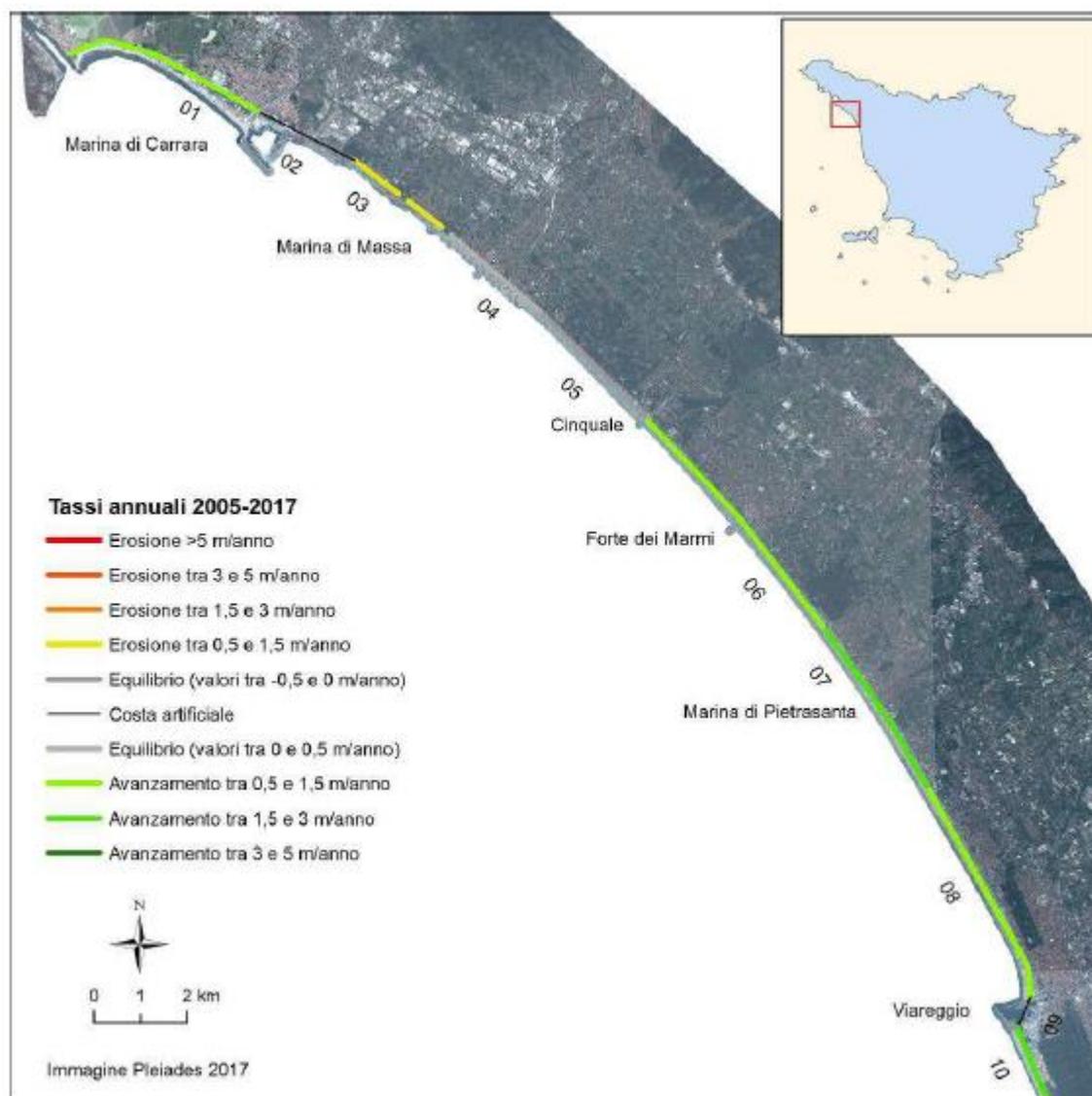


Figura 3-19. Tendenze evolutive da Carrara a Viareggio nell'ultimo periodo (RT - Lamma, 2018) [15]

Dalla Figura 3-19, che sintetizza i risultati della più recente variazione diacronica delle linee di riva dal 2005 al 2017, si evidenzia che:

- le spiagge a sud del porto di Carrara, in località Partaccia, risultano ancora in leggera erosione;
- il litorale compreso tra la foce del Frigido e del Versilia è in sostanziale equilibrio;
- gli arenili che vanno dalla foce del Versilia fino al porto di Viareggio risultano in avanzamento, con tassi maggiori nel tratto più vicino all'infrastruttura portuale viareggina.

Partendo dall'estremo sud dell'area di interesse, cioè dal porto di Viareggio, le tendenze evolutive nel breve periodo confermano un deciso avanzamento di tutto il litorale fino al punto di convergenza. Tale tendenza, che risulta ben visibile da ormai più di 30 anni, deve essere posta in correlazione anche con l'incremento dei dragaggi annuali eseguiti dal soggetto gestore del porto (prima Comune di Viareggio, oggi Autorità Portuale Regionale) per mantenere funzionali i fondali all'imboccatura portuale. I sedimenti dragati dai fondali nella zona di accesso al porto vengono destinati al ripascimento delle spiagge poste a ponente a tutto beneficio del bilancio solido litoraneo e quindi del mantenimento dell'equilibrio dinamico di questo tratto di litorale.

Proseguendo verso nord-ovest, il rateo di accrescimento della spiaggia diminuisce gradualmente fino a raggiungere una condizione di equilibrio nel tratto dalla foce del Versilia fino oltre il Frigido. Risulta invece in lieve erosione (seppur con tassi abbastanza contenuti) il tratto immediatamente a sud del porto di Carrara, la cui linea di riva, nonostante le numerose opere di difesa presenti, continua ad arretrare. [13]

La realizzazione di molteplici interventi di protezione costiera nel tratto a sud del porto di Marina di Carrara non ha arrestato l'arretramento della linea di riva (vedi i dati del periodo 2005-2017) anzi il fenomeno erosivo si è concentrato sui fondali antistanti e in corrispondenza dei varchi tra le barriere emerse. L'arretramento della linea di riva nell'area protetta dalle scogliere emerse della Partaccia è ben visibile anche osservando la Figura 3-20, ottenuta sovrapponendo le linee di riva del 1985, 2005 e 2017 alle immagini ottenute dal drone ad inizio 2018.



Figura 3-20. Evoluzione delle linee di riva dall'1985 al 2017 nel tratto dalla Partaccia alla colonia Ugo Pisa [13]

### 3.7 Analisi delle tendenze evolutive della linea di riva dal 2010 al 2020

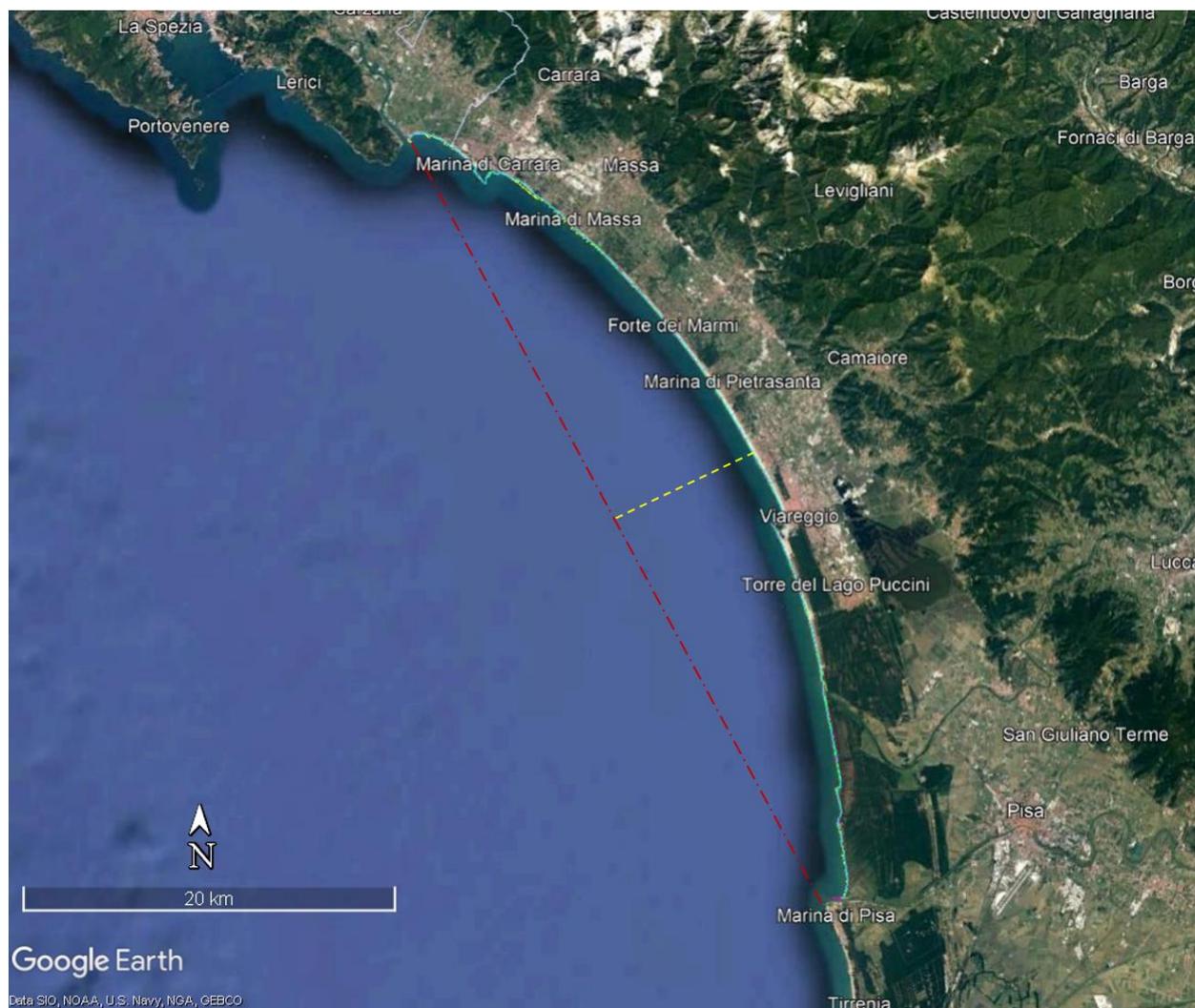
In questo paragrafo sono illustrati i risultati delle attività di verifica ulteriore dei parametri morfologici di riferimento per la corretta calibrazione della modellistica applicata nell'ambito dello studio specialistico in epigrafe. Queste attività sono state condotte per fornire riscontri oggettivi alle osservazioni formulate dalla Regione Toscana <sup>(3)</sup> nell'ambito della fase di Scoping della procedura di VAS sulla proposta di Piano Regolatore Portuale del Porto di Marina di Carrara <sup>(4)</sup>. In analogia con gli studi illustrati nel paragrafo precedente questa verifica suppletiva è stata condotta assumendo la "linea di riva" quale indicatore di riferimento per l'analisi oggettiva della tendenza evolutiva del litorale sabbioso in esame nel recente periodo dal 2010 al 2020.

<sup>3</sup> Determinazione n.4/SCA/2022 riguardante l'espressione del NURV in data 16/03/2022.

<sup>4</sup> Pratica MiTE ID 7961, data di avvio 07/02/2022.

A tal scopo, ad integrazione delle linee di riva del 2010 e 2017 già acquisite ed esaminate <sup>(5)</sup>, si è fatto riferimento non solo alla linea di riva del 2020 (desunta dalle attività di monitoraggio a scala regionale attuate dalla Regione Toscana <sup>6)</sup> ma anche a quella del 2015, disponibile sul WebGIS di Google Earth, al fine di incrementare la “significatività” delle analisi statistiche condotte in questa attività integrativa.

Nella seguente Figura 3-21 è rappresentato l'intero contesto geografico compreso tra le foci dei fiumi Arno e Magra oggetto dell'analisi diacronica delle linee di riva del 2010, 2015, 2017 e 2020.



**Figura 3-21. Inquadramento generale del tratto di litorale oggetto dell'analisi diacronica di aggiornamento**

Questa fascia litoranea a matrice sabbiosa ha una forma d'insieme molto arcuata con uno sviluppo di oltre 50 km ed una “corda” di circa 47 km orientata a circa 151° N dalla foce del fiume Arno sino a quella del Magra con una freccia di 8 km che si colloca nel litorale di Camaiore.

Per evidenziare gli aspetti morfologici più significativi riscontrati lungo questa unità fisiografica ed oggetto dell'analisi diacronica, nelle figure seguenti, procedendo per tratti dalla foce del fiume Arno sino a quella del fiume Magra, sono riportati e commentati alcuni stralci aerofotografici, desunti dalla piattaforma WebGIS di Google Earth sulla quale sono state materializzate anche le linee di riva (differenziandole cromaticamente: 2010=verde; 2015=magenta; 2017=ciano;

<sup>5</sup> Riferimento Nota di trasmissione da parte della Regione Toscana n. prot. 24265 del 18/12/2019.

<sup>6</sup> Resa disponibile dal Settore regionale di Tutela Acqua e Territorio e Costa nell'ambito del procedimento di VAS sul PRP del porto di Marina di Carrara.

2020=rosso; scogliere=giallo).



Figura 3-22. Dalla foce del fiume Arno verso nord (Parco Regionale di San Rossore, località Gombo)

In questo primo tratto il litorale oggetto di studio, è vistosamente arretrato (almeno di 1 km) rispetto a quello posto in sinistra idraulica della foce del fiume Arno (Marina di Pisa). Le opere di difesa realizzate negli ultimi decenni (pennelli trasversali parzialmente sommersi e barriere longitudinali distaccate) contengono solo in parte il processo erosivo in atto almeno dal secondo dopoguerra come documentato dalla seguente immagine stralciata dal "Portale Coste ISPRA".



Figura 3-23. Dettaglio del litorale a nord della foce del fiume Arno (fonte <https://sinacloud.isprambiente.it/>)

Lungo questo tratto di litorale la morfologia a "festoni" delle "barre" sommerse, indice di una morfodinamica particolarmente attiva, è condizionata dalla presenza dei pennelli di difesa, parzialmente sommersi nel tratto lato mare, che tendono a concentrare e rafforzare le correnti di riflusso verso il largo (rip-current) favorendo la dispersione dei sedimenti verso le profondità maggiori a discapito della spiaggia emersa. Nell'ultimo decennio la linea di riva è arretra in media di 40 m, interessando anche i radicamenti degli stessi pennelli, con un'asimmetria che è indice della deriva del trasporto solido verso nord.



Figura 3-24. Dettaglio dei processi erosivi in atto (2010-2020)

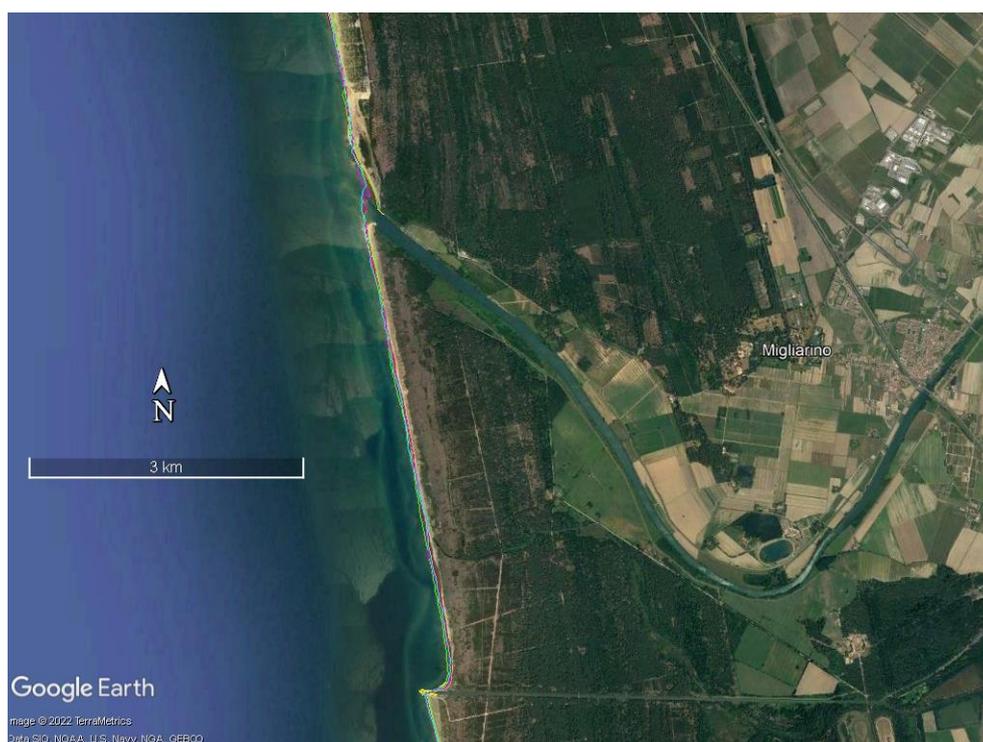
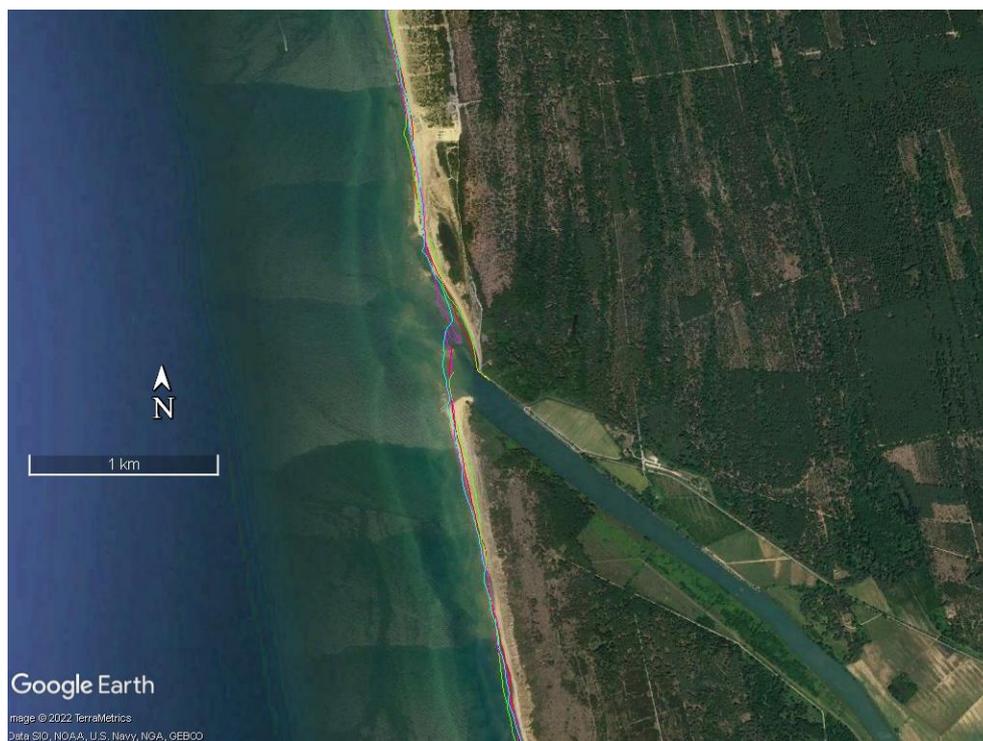
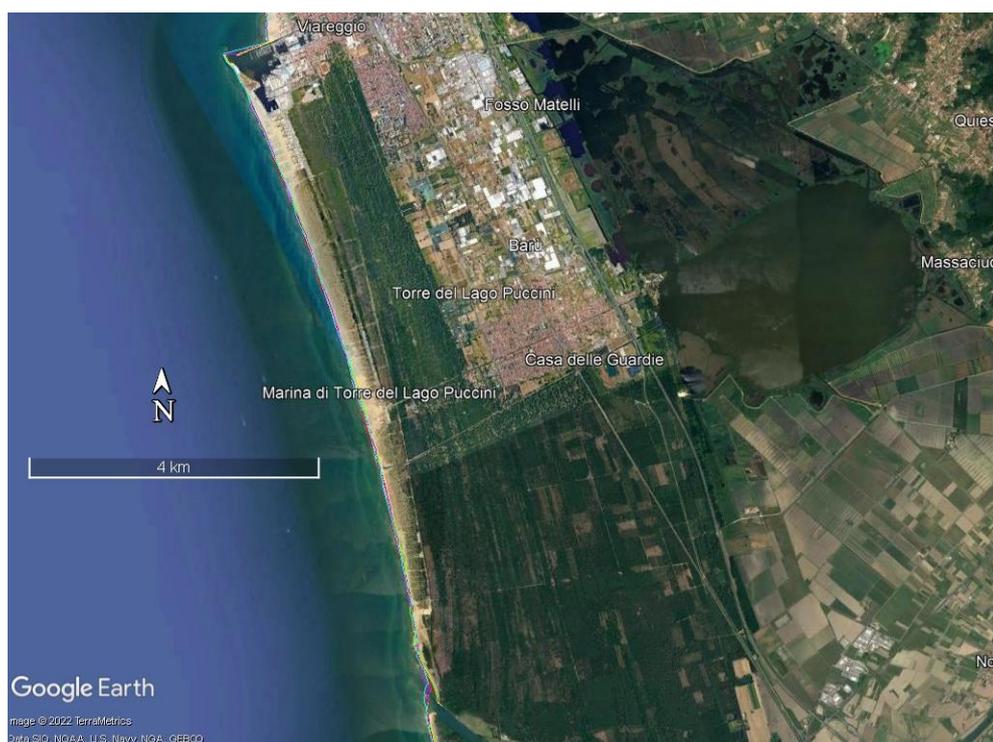


Figura 3-25. Dalla foce del fiume Morto Nuovo a quella del Serchio (Parco Regionale di San Rossore, località Migliarino)

La spiaggia ed il retrospiaggia sono sostanzialmente privi di elementi di antropizzazione, fatta eccezione per la foce del canale di bonifica del fiume Morto Nuovo. Dal 2010 al 2020 si sono registrate variazioni relative della linea di riva anche significative (mediamente superiori a 20 m) in prevalenza in arretramento e più accentuate nell'ultimo triennio. L'orientamento a nord-est dell'asta terminale del fiume Serchio, è indice di una deriva storica del trasporto solido litoraneo da sud verso nord che trova conferma non solo nella marcata erosione a nord (sottoflutto) della sua foce ed in misura più evidente di quella del fiume Morto Nuovo (canale di bonifica) ma anche nelle asimmetrie delle barre della spiaggia sommersa.



**Figura 3-26. Dettaglio della foce del fiume Serchio (2010-2020)**



**Figura 3-27. Dalla foce del fiume Serchio sino al porto di Viareggio (Marina di Torre del Lago)**

Lungo questo tratto la spiaggia ed in particolare il retrospiaggia presentano segni di antropizzazione (stabilimenti balneari e relativi collegamenti viari) anche a discapito degli apparati dunali e retrodunali. La morfologia a “festoni” delle “barre” sommerse soprattutto per quella di “tempesta” posta più al largo è comunque abbastanza regolare indice di una morfodinamica particolarmente attiva ma con una deriva dei sedimenti contenuta come confermato anche dalla limitata divagazione del tratto di sbocco a mare del canale di bonifica (in località Bufalina) solitamente occluso da un’ampia barra emersa e comunque leggermente deviato verso nord. Le variazioni della linea di riva dal 2010 al 2020 sono in accrescimento con una media di 30 m che si riduce a 10 m per il tratto prospiciente il porto di Viareggio.

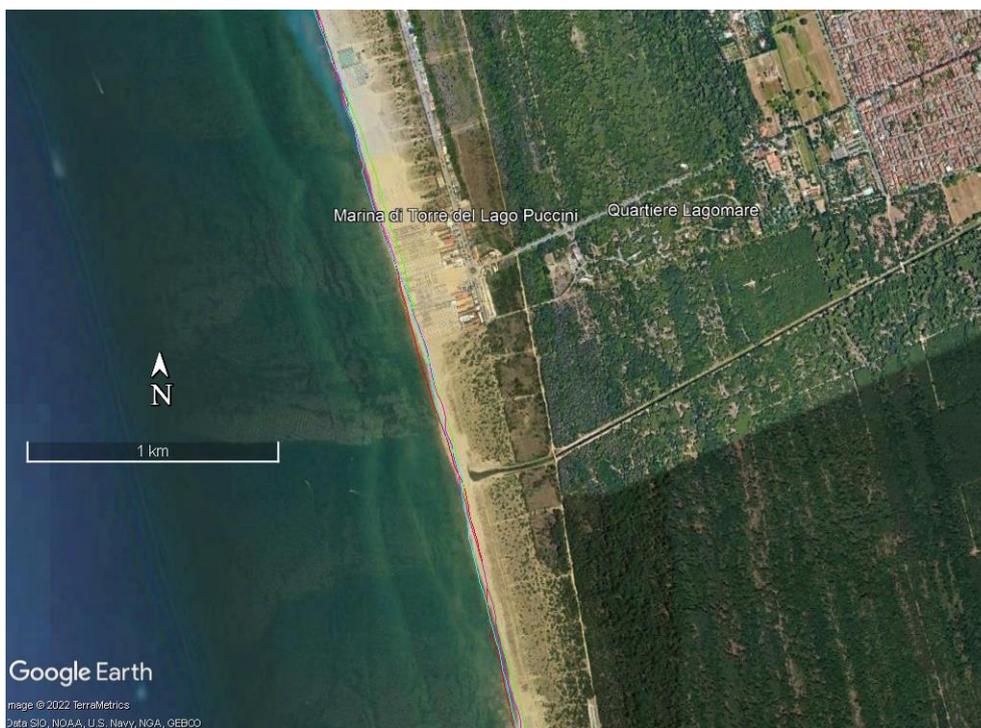


Figura 3-28. Dettaglio del litorale parzialmente antropizzato ed in debole accrescimento (2010-2020)

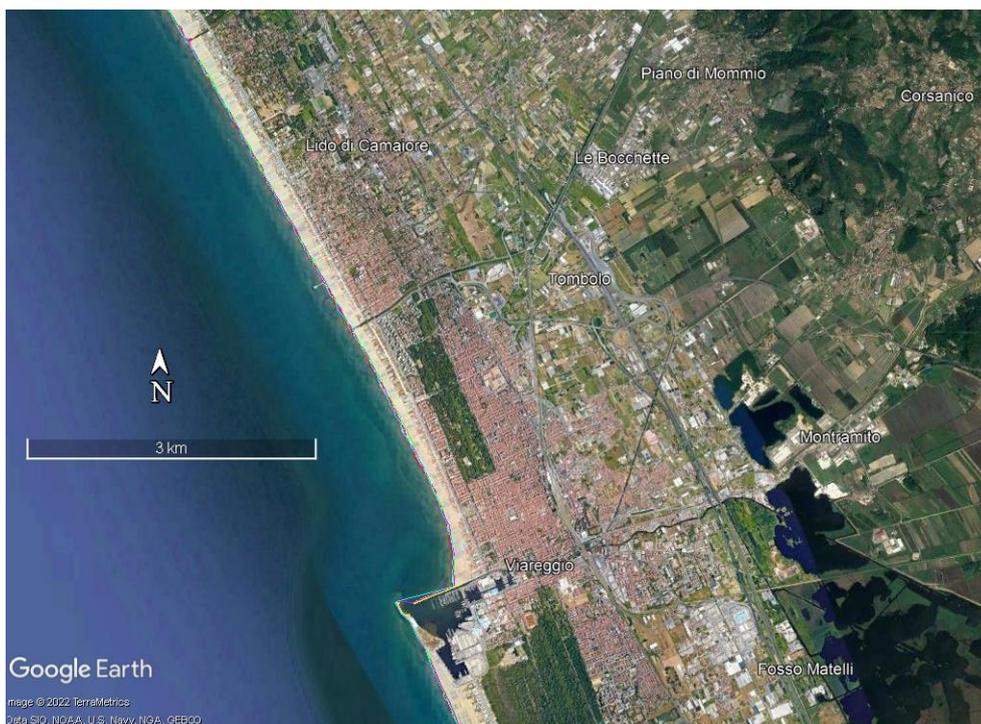


Figura 3-29. Dal porto di Viareggio verso nord-ovest (Lido di Camaiore)

La spiaggia posta a sud-est del porto di Viareggio ne sopravanza la diga di sopraflutto la cui testata di estremità è aggirata da un'ampia barra sommersa. La spiaggia di Camaiore ha una fascia sommersa contraddistinta da una serie di barre sommerse "festonate" molto articolate e frammentate con un aspetto caotico d'insieme che si riscontra anche nell'andamento sinusoidale della linea di riva. Ciò è indice di una morfodinamica molto attiva associata ad una idrodinamica con correnti di riflusso comunque alternate e instabili che quindi tendono a disperdersi ed esaurirsi entro la profondità di chiusura a beneficio del bilancio solido litoraneo d'insieme. L'ampia spiaggia emersa (in media 150 m) è densamente antropizzata. Il tratto di sbocco a mare del canale di bonifica "fossa dell'Abate" ha l'asse ortogonale alla linea di riva, indice di una deriva longitudinale "neutra" con bilancio nullo nel lungo termine.

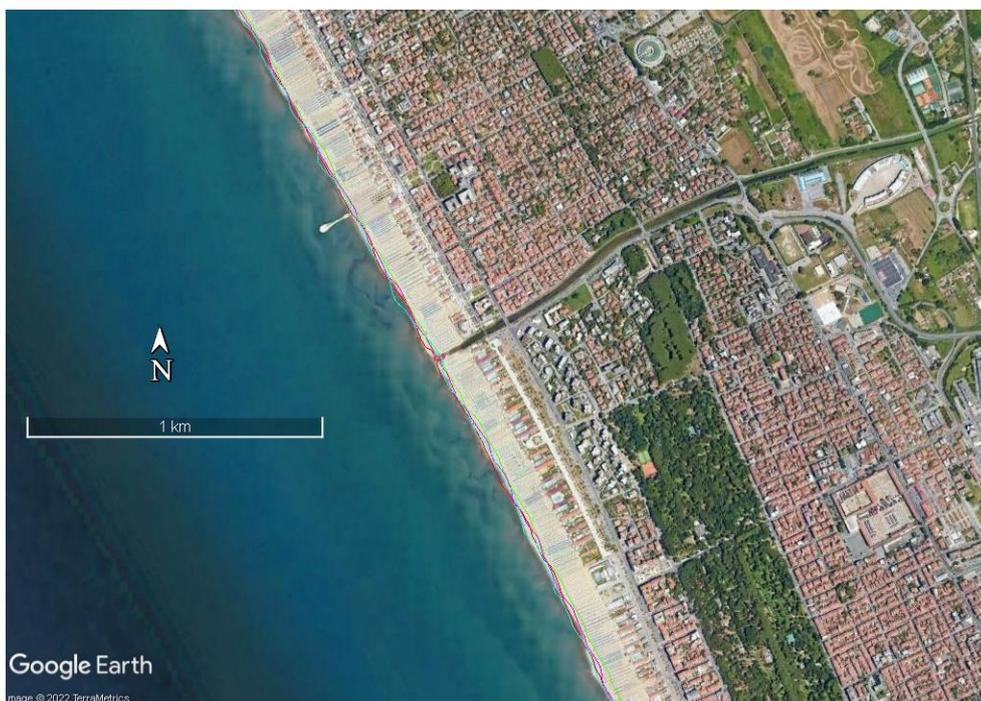


Figura 3-30. Dettaglio della morfologia emersa e sommersa della spiaggia di Camaiore (2010-2020)

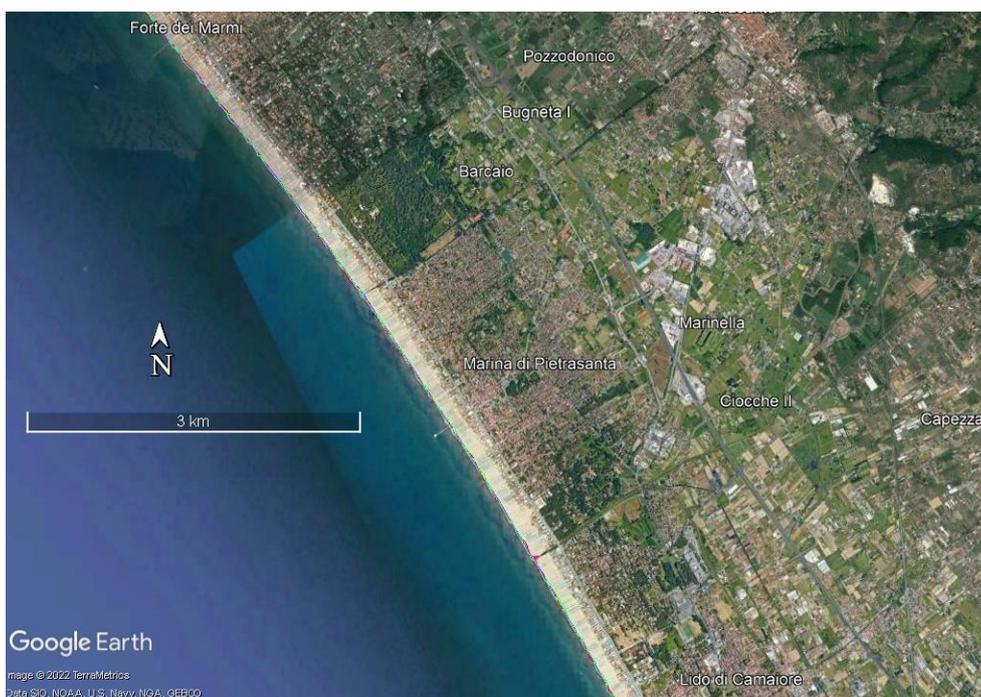


Figura 3-31. Dal Lido di Camaiore a Forte dei Marmi

La fascia di spiaggia emersa è molto ampia (con una larghezza media di almeno 180 m) ed è totalmente occupata dagli “arredi” degli stabilimenti balneari che mediamente, con le loro infrastrutture fisse, interessano una fascia di 60 m. La presenza di molteplici barre sommerse “festonate” con aspetto caotico d’insieme, combinato all’andamento sinusoidale della linea di riva, è indice di una idrodinamica litoranea, con rip-currents comunque non regolari e instabili confinate entro la profondità di chiusura a beneficio del bilancio solido litoraneo d’insieme. Le variazioni relative della linea di riva dal 2010 al 2020 anche sino a 30 m lungo lo stesso transetto, proprio per l’alternanza di “cavi” e “creste” nell’andamento sinusoidale delle linee di riva hanno comunque risultante nulla. Anche la regolarità dei tratti di sbocco a mare dei canali di bonifica, pressoché ortogonali alla linea di riva, conferma che la risultante della deriva longitudinale del trasporto solido litoraneo è sostanzialmente “neutra”.



Figura 3-32. Dettaglio delle linee di riva (2010-2020) a Forte dei Marmi, indice di stabilità d'insieme

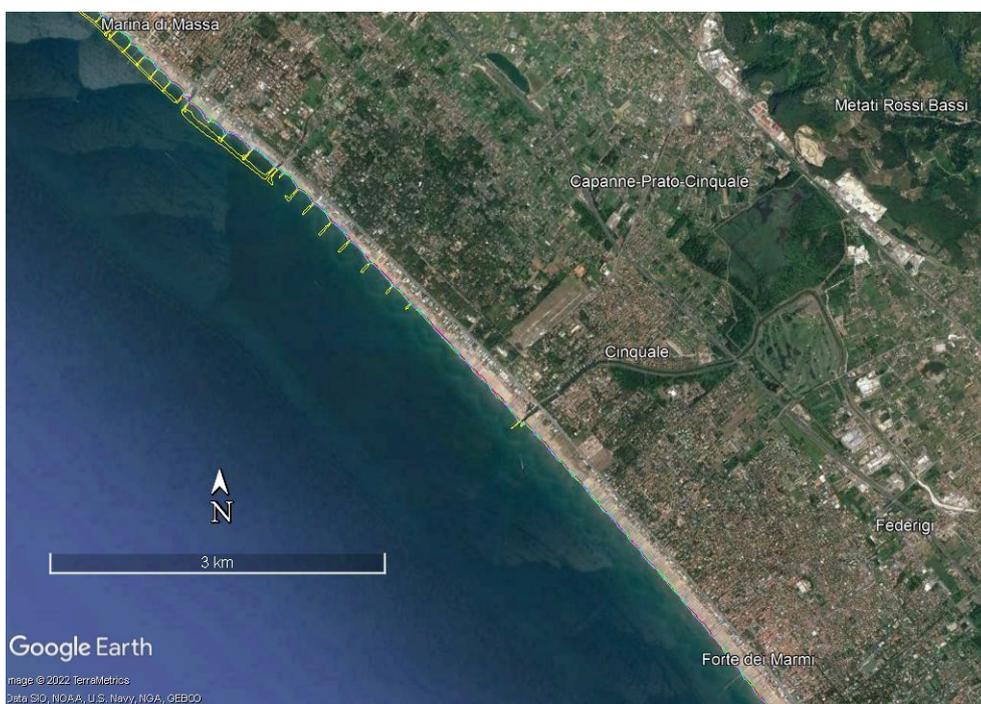


Figura 3-33. Da Forte dei Marmi a Marina di Massa (foce del fiume Versilia in località Cinquale)

In questo tratto, anche mantenendosi la larghezza della spiaggia emersa mediamente a 180 m, almeno sino ad 1 km a nord-ovest della foce del fiume Versilia, si registra un drastico incremento del carico antropico presente lungo la spiaggia. In particolare le infrastrutture degli stabilimenti balneari in località Marina dei Ronchi, dalla strada del lungomare si protendono verso mare mediamente sino a 90 m. Procedendo verso nord-ovest l'ampiezza della spiaggia emersa si riduce gradualmente sino ad una larghezza media di 80 m occupata però almeno per il 50% dalle infrastrutture fisse degli stabilimenti balneari. Le scogliere di difesa (pennelli semisommersi), realizzate recentemente a Marina dei Ronchi interferiscono con la morfodinamica della spiaggia sommersa limitando solo parzialmente l'erosione della spiaggia emersa nei tratti interclusi con effetti sottomarino comunque contenuti.



Figura 3-34. Dettaglio delle linee di riva (2010-2020) a Marina dei Ronchi in presenza dei pennelli di difesa



Figura 3-35. Da Marina di Massa al porto di Marina di Carrara

Questo tratto di litorale è contraddistinto da una serie di scogliere (barriere longitudinali radenti, frangiflutti distaccati in prevalenza debolmente sommerse, pennelli trasversali semisommersi) che, a partire dalla foce del torrente Carrione e per uno sviluppo longitudinale di circa 8 km, sono state realizzate e più volte riqualificate (dal secondo dopoguerra ad oggi). Queste opere di fatto suddividono questo tratto di litorale in tante sub-unità contraddistinte da processi di morfodinamica a se stanti. Le variazioni della linea di riva dal 2010 al 2020 soprattutto nella zona della "Partaccia" sono comunque contenute, mediamente nell'ordine di 10 m.

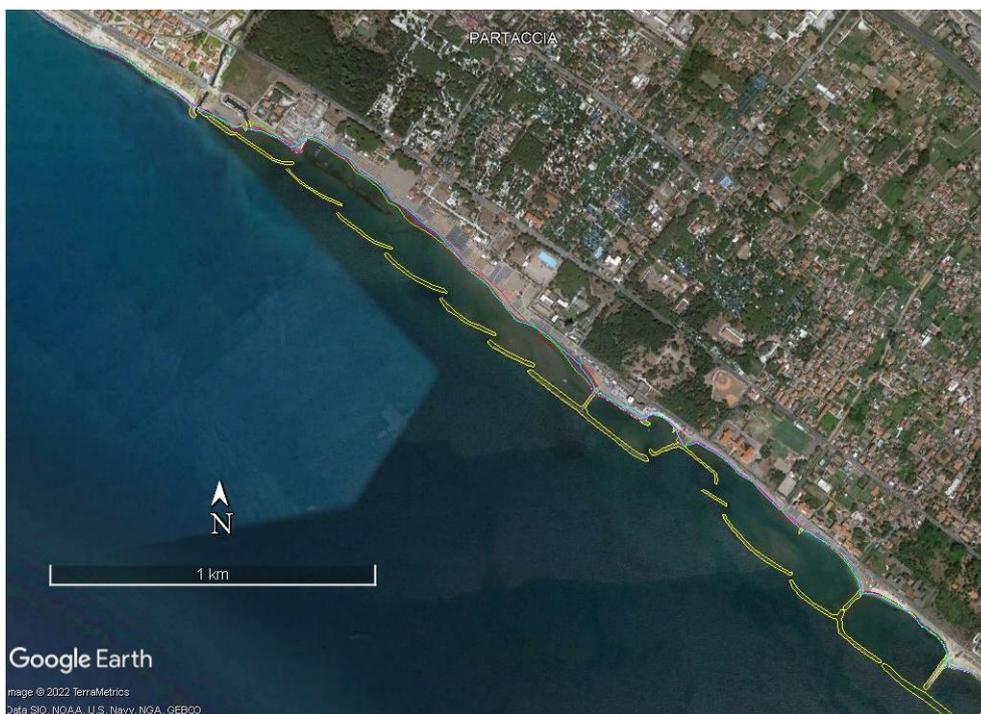


Figura 3-36. Dettaglio delle linee di riva (2010-2020) a Marina di Massa (località Partaccia)



Figura 3-37. Dal porto di Marina di Carrara alla foce del fiume Magra

Nel tratto di litorale compreso tra la foce del fiume Magra ed il porto commerciale di Marina di Carrara la linea di riva ha una conformazione parabolica d'insieme, in sostanziale equilibrio negli ultimi decenni. Il tratto di Marina di Carrara, posto più a levante tra il braccio di radicamento del molo sopraflutto del porto e la foce del Parmignola (canale di bonifica confine tra Liguria e Toscana), per uno sviluppo di circa 1,8 km è privo di opere di difesa ed ha un andamento d'insieme pressoché rettilineo. La spiaggia sommersa presenta più serie di barre sommerse "festonate" con ampi archi pseudo-regolari, indice di una condizione di equilibrio dinamico del trasporto solido litoraneo che trova riscontro anche nell'andamento sinusoidale delle linee riva esaminate con una risultante delle variazioni relative nel tempo pressoché nulla. In questo tratto l'ampiezza della spiaggia emersa, mediamente di 80 m, è occupata dagli "arredi" degli stabilimenti balneari le cui infrastrutture fisse occupano il retrostante sedime storico della spiaggia e retrospiaggia con larghezze trasversali da 55 m (lato Parmignola) sino anche a 180 m a ridosso del porto.

Procedendo verso ponente, il litorale è contraddistinto da una serie di scogliere (in prevalenza pennelli semisommersi, rimaneggiati anche nell'ultimo decennio) che, per uno sviluppo longitudinale di circa 2,5 km a partire dalla foce del Magra sino a quella del Parmignola, sono finalizzate a stabilizzare la ormai esigua fascia di spiaggia emersa al netto della fascia retrostante occupata dalle infrastrutture fisse degli stabilimenti balneari.

La presenza delle suddette scogliere di difesa litoranea, ovviamente condiziona i processi di idrodinamica e la conseguente evoluzione morfodinamica della spiaggia.

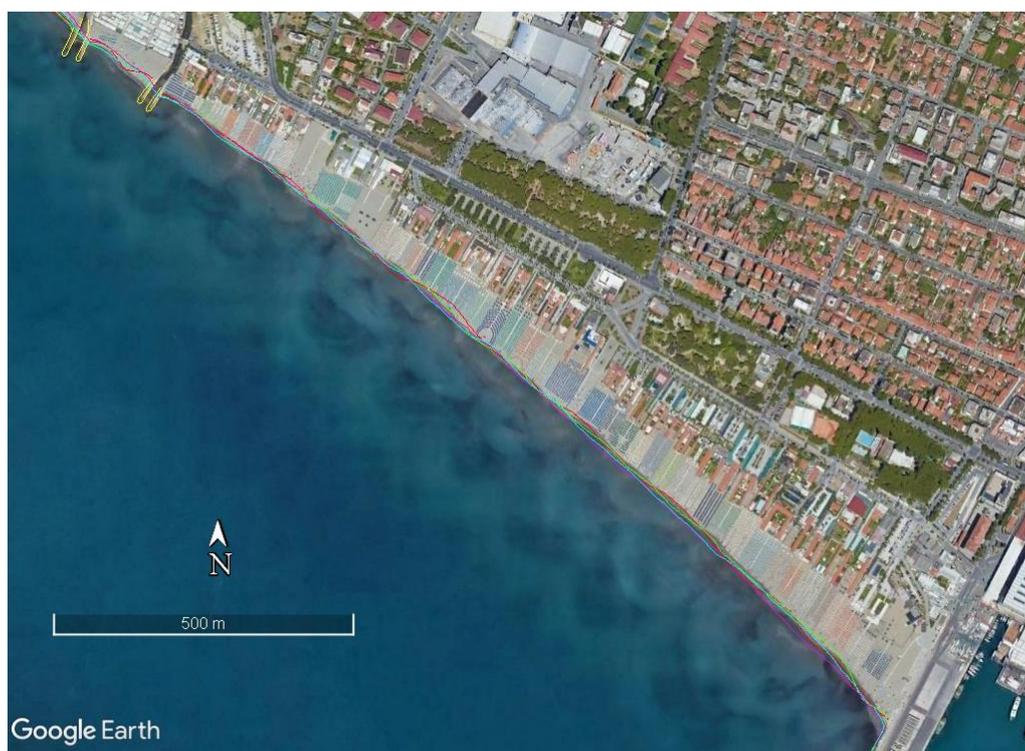


Figura 3-38. Dettaglio delle linee di riva (2010-2020) a Marina di Avenza (dal porto sino al torrente Parmignola)



Figura 3-39. Dettaglio delle linee di riva (2010-2020) a Marinella di Sarzana

In particolare nel tratto in località Marinella di Sarzana i pennelli trasversali determinano una conformazione a “pocket beach” della spiaggia emersa con variazioni della linea di riva dal 2010 al 2020 comunque contenute nell'ordine di 10 m con una debole tendenza all'avanzamento sottoflutto nell'ultimo periodo (2017-2020).

Nel restante tratto più prossimo alla scogliera di “armatura” in sinistra idraulica della foce del Magra, le variazioni della linea di riva dal 2010 al 2020 sono decisamente più marcate ma complessivamente in accrescimento.



Figura 3-40. Dettaglio delle linee di riva (2010-2020) a fiumaretta di Ameglia (foce del fiume Magra)

### 3.7.1 Analisi diacronica della linea di riva dal 2010 al 2020

Per un riscontro con dati oggettivi della tendenza evolutiva nell'ultimo decennio della morfologia del litorale in esame che si sviluppa per oltre 46 km dalla foce del fiume Arno sino a quella del Magra, le linee di riva già disponibili, relative al 2010 e 2017 <sup>(7)</sup>, sono state integrate con quelle del 2015 <sup>(8)</sup> e 2020 <sup>(9)</sup> utilizzando il software freeware QGIS per estrapolare, secondo il sistema di coordinate piane WGS84/UTM 34N, le coordinate XY dei vertici che compongono le quattro polilinee rappresentative degli anni 2010, 2015, 2017 e 2020.

Queste linee di riva, uniformate allo stesso sistema di riferimento geografico, sono state discretizzate ed interpolate considerando un passo di discretizzazione longitudinale ( $\Delta s$ ) di 5 m lungo un asse di riferimento (Baseline) che si sviluppa dalla foce del Fiume Arno sino a quella del Fiume Magra, assumendo come origine il punto di coordinate X;Y = 613305 est ; 4845870 nord (metri) ed un orientamento a 320°N.

Le linee di riva così discretizzate sono rappresentate, in scala distorta, nella seguente Figura 3-41.

<sup>7</sup> Già fornite nel 2019 dalla Regione Toscana ed utilizzate per l'impostazione del presente studio ed in particolare per l'analisi dei parametri morfologici di riferimento per la calibrazione della modellistica numerica.

<sup>8</sup> Appositamente digitalizzata sulla base dell'immagine, datata 10 ottobre 2015, disponibile sulla piattaforma WebGIS di Google Earth.

<sup>9</sup> Polilinea risultante dalla campagna di monitoraggio del 2020, condotta a scala regionale e resa disponibile dalla Regione Toscana nell'ambito della procedura di VAS sul PRP del porto di Marina di Carrara.

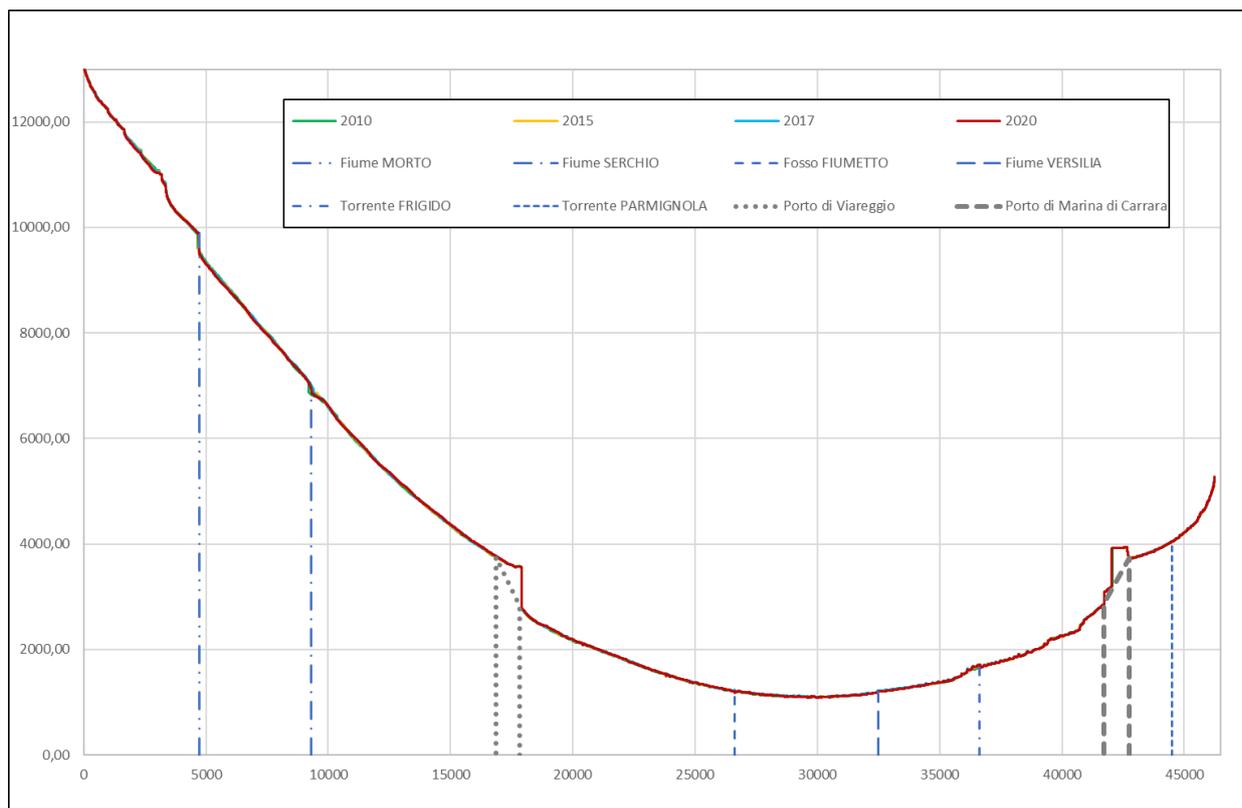


Figura 3-41. Rappresentazione in scala distorta delle linee di riva tra le foci dei fiumi Arno ( a sinistra) e Magra (a destra)

L'inclinazione dell'asse di riferimento corrisponde all'orientamento medio della linea di riva nel tratto di litorale tra Forte dei Marmi e Marina di Pietrasanta, più "attenzionato" per l'analisi delle variazioni della posizione della linea di riva in quest'ultimo decennio.

Nella seguente Figura 3-42 è riportato il grafico di dettaglio delle linee di riva rilevate dal 2010 al 2020 per il solo tratto compreso tra le progressive 25.000 m e 35.000 m, rispetto al sistema di riferimento relativo considerato, ovvero per le spiagge che interessano i comuni di Massa (frazione di Marina dei Ronchi), Montignoso, Forte dei Marmi e Marina di Pietrasanta (località Fiumetto).

Questa figura di dettaglio evidenzia, in scala distorta, che tutte le linee di riva considerate sono contraddistinte da "oscillazioni localizzate", con cavi e creste variabili negli anni esaminati per ubicazione ed ampiezze, ma che nel complesso "delineano" un andamento medio della linea di riva che comunque presenta lo stesso andamento curvilineo d'insieme.

Nel tratto che ricade circa 1,5 km a nord-ovest del fiume Versilia (nel comune di Massa in località Ronchi dei Legionari) queste "oscillazioni" risultano più regolari e stabili negli anni in ragione della presenza delle scogliere trasversali (pennelli) realizzate nell'ultimo decennio.

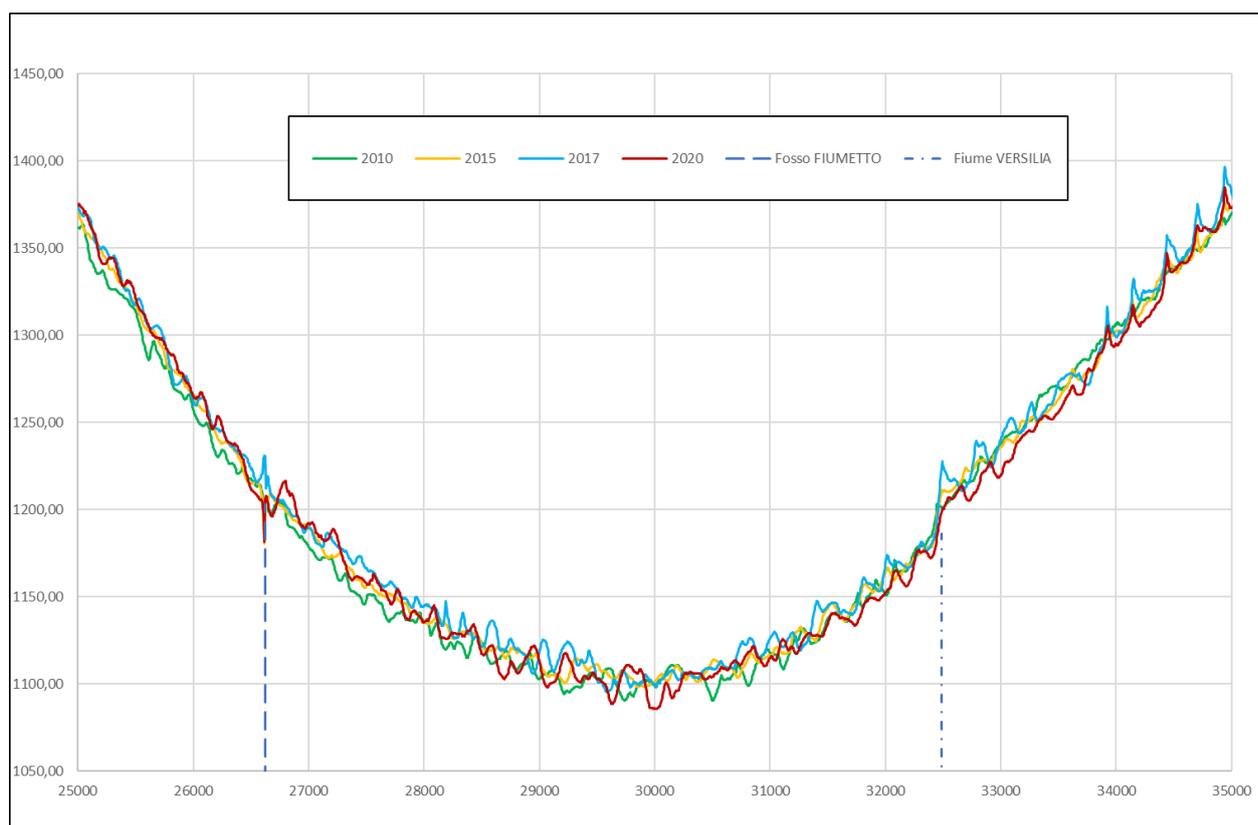


Figura 3-42. Andamento delle linee di riva tra Marina di Pietrasanta e Marina di Massa nel periodo 2010-2020

Per ogni  $i$ -esimo passo di discretizzazione e per ogni intervallo temporale di riferimento delle quattro linee di riva esaminate, si sono calcolati i ratei annuali di variazione della linea di riva mediante la relazione:

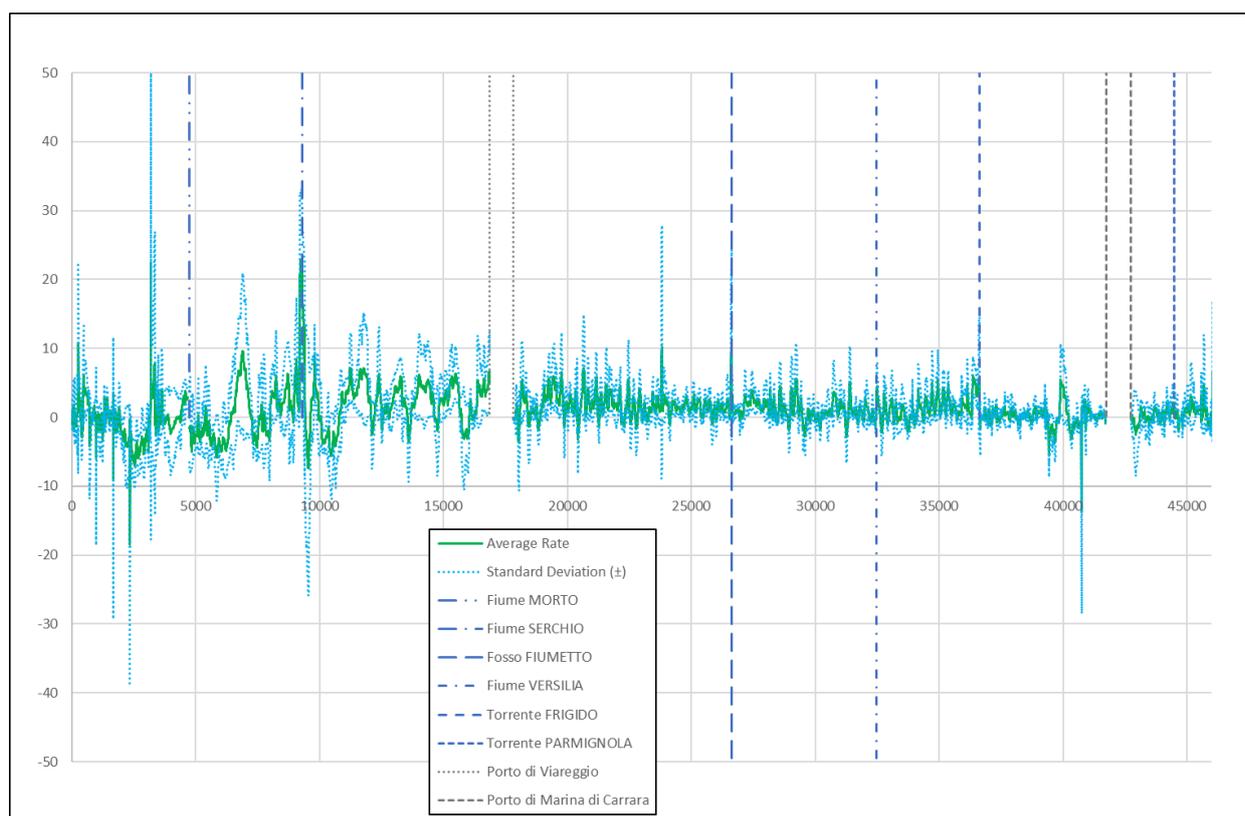
$$\varphi_{j,j+1} = \frac{\Delta y_{j,j+1}}{\Delta t_{j,j+1}} = \frac{(y_{j+1} - y_j)}{t_{j+1} - t_j}$$

in cui  $\Delta t_{j,j+1}$  è l'intervallo, espresso in anni, tra due anni successivi di osservazione per i quali viene valutato il rateo di variazione.

In accordo con il riferimento adottato, valori negativi di  $\Delta y$  indicano un arretramento della linea di riva mentre valori positivi un avanzamento.

I risultati di questa fase dell'analisi diacronica sono riportati nella Figura 3-43 dalla quale si evidenzia che, al netto delle oscillazioni in corrispondenza degli apparati di foce, il tratto di litorale compreso tra la foce del fiume Arno ed il porto di Viareggio è quello che presenta le maggiori variazioni relative, indice di una intensa morfodinamica litoranea con una evidente tendenza erosiva nella zona della riserva di San Rossore con ratei anche pari a -5 m/anno ed una media dell'ordine di -2,0 m/anno.

Questa tendenza evolutiva di erosione tende ad invertirsi procedendo verso il porto di Viareggio con ratei di avanzamento anche superiori a +5 m/anno ed una media di 3 m/anno. Per tutto il restante tratto di litorale a nord-ovest del porto di Viareggio sino alla foce del fiume Magra il rateo medio di variazione della linea di riva pur presentando una forte variabilità longitudinale si riduce gradualmente presentando comunque valori mediamente positivi.



**Figura 3-43. Rateo medio e deviazione standard delle linee di riva tra i fiumi Arno e Magra (analisi statistica cumulata delle linee di riva 2010, 2015, 2017 e 2020)**

Focalizzando l'attenzione sul tratto di litorale compreso tra Marina di Pietrasanta e Marina di Massa, l'analisi statistica dei ratei annui calcolati per le distinte possibili combinazioni delle possibili coppie delle quattro linee di riva esaminate (2010, 2015, 2017 e 2020) conferma che la tendenza evolutiva in atto tra il 2010 ed il 2020 (Figura 3-44) per il tratto a sud-est della foce del Versilia è complessivamente in lieve "accrescimento" con un rateo positivo, mediamente dell'ordine di 0,5 m/anno.

Questa tendenza evolutiva è ancora più evidente se, sempre per il tratto di maggiore interesse compreso tra Marina di Pietrasanta e Marina di Massa, si limita l'analisi alle sole due linee di riva 2010 e 2020 calcolando e rappresentando graficamente il rateo annuo e quantificandone con il criterio statistico della media mobile la permutazione ad 1 km. Dalla Figura 3-45 si evince che il tratto di litorale posto immediatamente sottoflutto delle opere di difesa (pennelli trasversali) presenti in località Marina dei Ronchi è in arretramento (mediamente - 0,5 m/anno con massime regressioni comunque inferiori a -2,0 m/anno). Per contro il restante tratto di litorale procedendo dalla foce del fiume Versilia verso sud-est è mediamente stabile con una tendenza di accrescimento molto evidente, intorno alla foce del fosso Fiumetto, dell'ordine di circa + 1,0 m/anno.

In sintesi questa attività suppletiva di analisi delle tendenze evolutive del litorale compreso tra le foci dei fiumi Arno e Magra conferma pienamente con dati oggettivi la validità dei parametri considerati ed i relativi valori numerici assunti nell'applicazione dei modelli numerici applicati come descritti nei capitoli seguenti cui si rimanda per i dettagli.

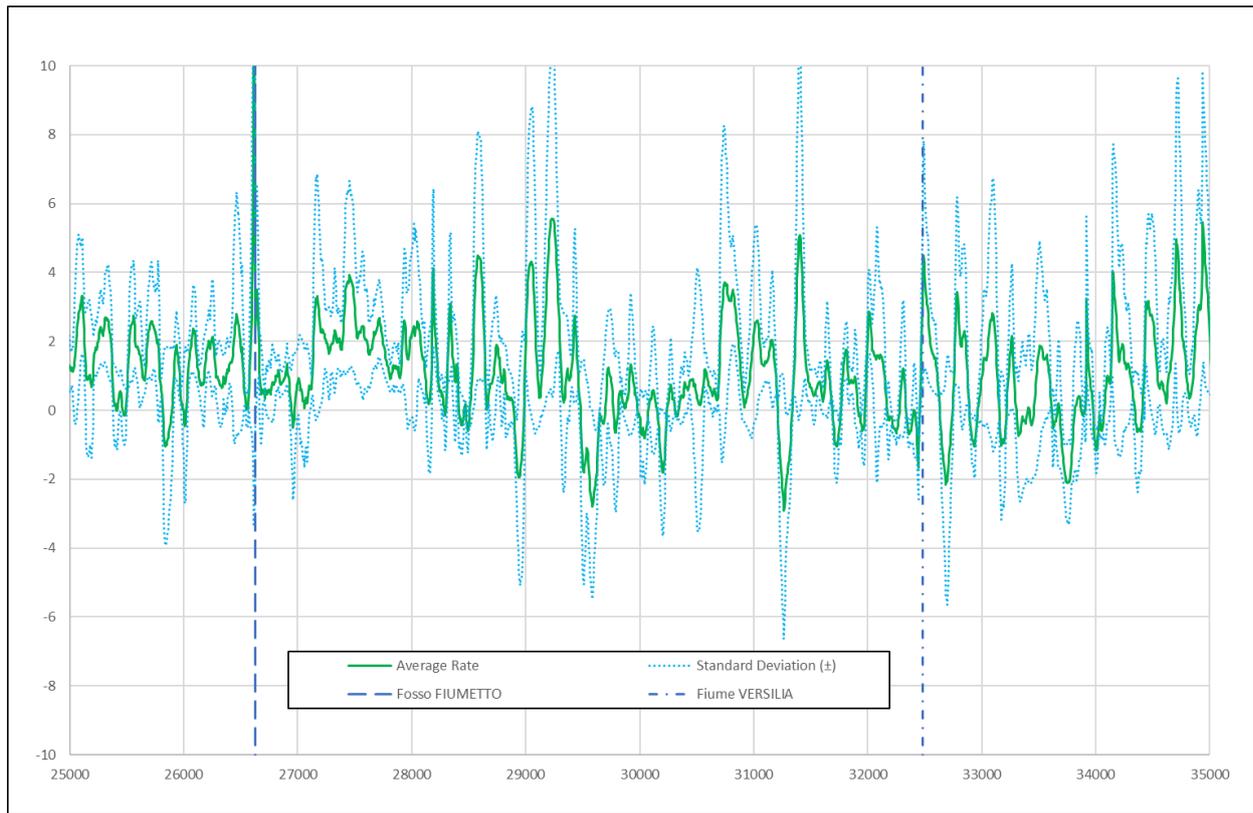


Figura 3-44. Rateo medio e deviazione standard dall'analisi cumulata dal 2010 al 2020 nel tratto tra Pietrasanta e Massa

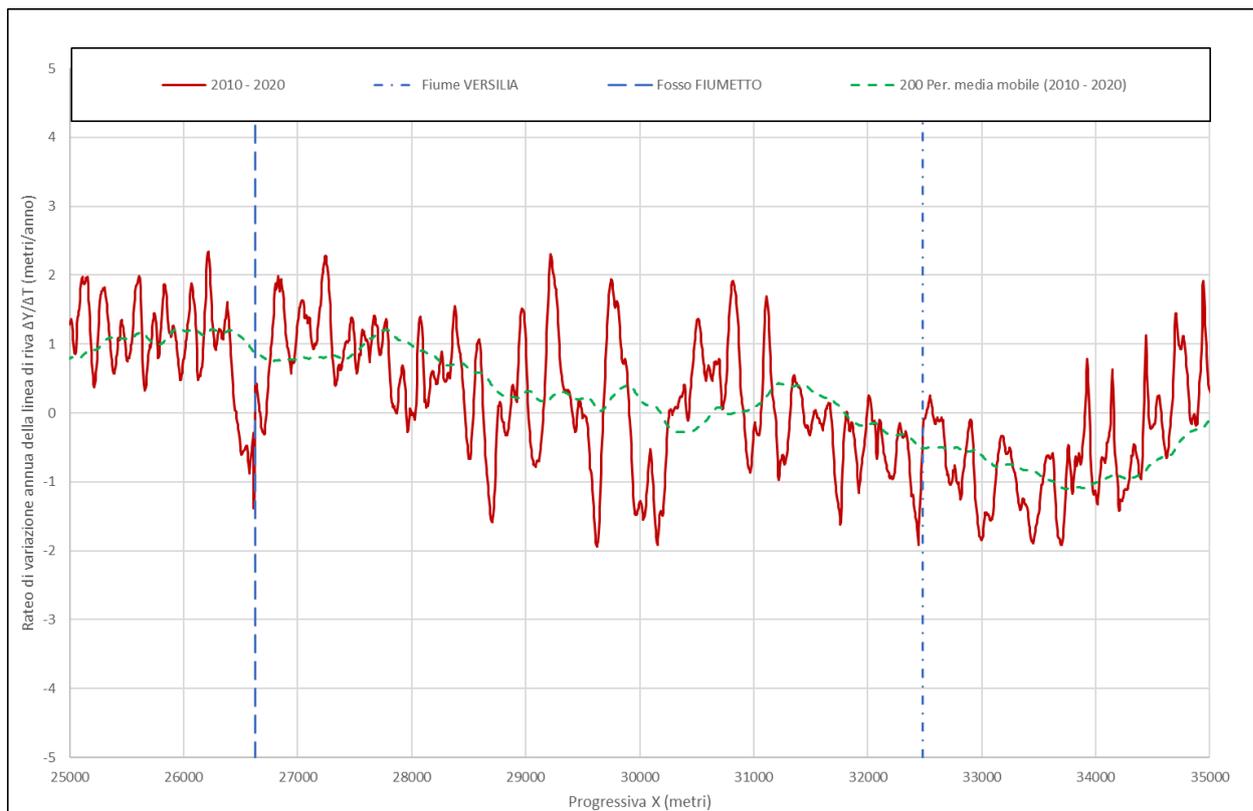


Figura 3-45. Rateo di variazione annua della linea riva nel periodo 2010-2020

## Capitolo 4 Set-up del modello di calcolo idrodinamico e di trasporto dei sedimenti

### 4.1 Il codice di calcolo Delft3D

Il codice di calcolo numerico utilizzato nell'ambito del presente studio è il Delft3D, un sistema integrato di modelli matematici per la modellazione idrodinamica, dei processi di trasporto, morfologici, biologici e di qualità delle acque in un generico ambiente acquatico di tipo fluviale, lacustre o costiero.

Il software Delft3D è costituito da una serie di moduli interconnessi ognuno dei quali preposto a trattare ed a risolvere un particolare aspetto dei processi in esame. I vari moduli possono essere utilizzati in modo indipendente oppure in modo combinato. In questo caso lo scambio dinamico di informazioni tra le diverse componenti è gestito in modo automatico dal software.

Il cuore del software è costituito dal modulo idrodinamico **Delft3D-FLOW**, elemento di base per tutti gli altri moduli, in grado di risolvere le equazioni del moto di fluidi a superficie libera per simulare l'idrodinamica di aree costiere in presenza delle principali forzanti di interesse (moto ondoso, venti, maree, apporti liquidi e solidi delle foci fluviali) il comportamento idrodinamico in termini di flussi e livelli di un ambiente acquatico sottoposto a diversi tipi di forzanti esterne.

Il modello Delft3D-FLOW, inoltre, può simulare i processi di trasporto di traccianti conservativi e non, e la dinamica del trasporto dei sedimenti in sospensione e sul fondo, includendo anche l'evoluzione morfologica dei fondali.

Questo modello idrodinamico simula flussi e fenomeni di trasporto indotti dal regime mareale o da particolari situazioni meteorologiche in regime di moto stazionario vario sia con schematizzazioni bidimensionali che tridimensionali. Il modello può trattare fluidi non omogenei caratterizzati da densità variabili in funzione della temperatura e della salinità.

Le equazioni del moto sono risolte con uno schema numerico implicito alle differenze finite, su una griglia curvilinea che permette di seguire bene le variazioni batimetriche del fondale ed i contorni del dominio di calcolo modificando le dimensioni degli elementi di discretizzazione spaziale nelle zone dove sono attesi i maggiori gradienti delle variabili idrodinamiche.

Il modello risolve le equazioni idrodinamiche e del trasporto dei sedimenti nelle versioni tridimensionale (3D) oppure integrata sulla verticale (2D).

Il modello di trasporto solido è in grado di simulare contemporaneamente sedimenti sia coesivi che non coesivi.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla descrizione del modulo Delft3D-FLOW disponibile sul sito web : [https://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW\\_User\\_Manual.pdf](https://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf)

Un ulteriore modulo utilizzato nello studio è il **Delft3D-WAVE** per lo studio della propagazione del moto ondoso su fondali variabili.

Nel presente studio, la modellazione delle onde è stata simulata utilizzando il modello di terza generazione **SWAN** (Simulating WAVes Nearshore) che simula l'evoluzione spazio-temporale di stati di mare rappresentati da spettri con energia dispersa in frequenza e direzione.

Il modello simula la dissipazione di energia per frangimento e attrito sul fondo e tiene conto anche della rifrazione indotta dalle correnti.

Nel caso in esame il modello SWAN è stato utilizzato accoppiandolo con i moduli FLOW e WAVE di Delft3D in modalità dinamica (on-line coupling) simulando sia la generazione delle correnti indotte dal moto ondoso frangente sia l'interferenza delle stesse correnti sulla propagazione delle onde.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla descrizione del modulo Delft3D-WAVE disponibile sul sito web: [https://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-WAVE\\_User\\_Manual.pdf](https://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-WAVE_User_Manual.pdf)

## 4.2 Schematizzazione del dominio di calcolo

Nel presente studio è stato utilizzato un modello matematico con dominio di calcolo a maglia curvilinea con una risoluzione planimetrica adeguata ai fenomeni oggetto di studio.

Per le analisi sono stati sviluppati due diversi set di griglie di calcolo; uno per le simulazioni morfodinamiche (Deflt3D-FLOW) ed un altro per le simulazioni idrodinamiche con il modello delle onde (Deflt3D-WAVE).

L'estensione spaziale dei domini di calcolo del modello morfodinamico è presentata in Figura 4-1 mentre in Figura 4-2 viene presentata una visione di dettaglio della griglia nell'area del porto di Marina di Carrara.

Il modello generale copre l'area che si estende dalle Cinque Terre fino a Livorno ed ha una risoluzione tra 100 e 200 m. Sul dominio del modello generale è inserito il dominio di dettaglio del litorale che ha una risoluzione di circa 30 m e copre tutta la fascia litoranea dalla foce del Magra fino a Viareggio per un numero totale di circa 200.000 celle di calcolo.

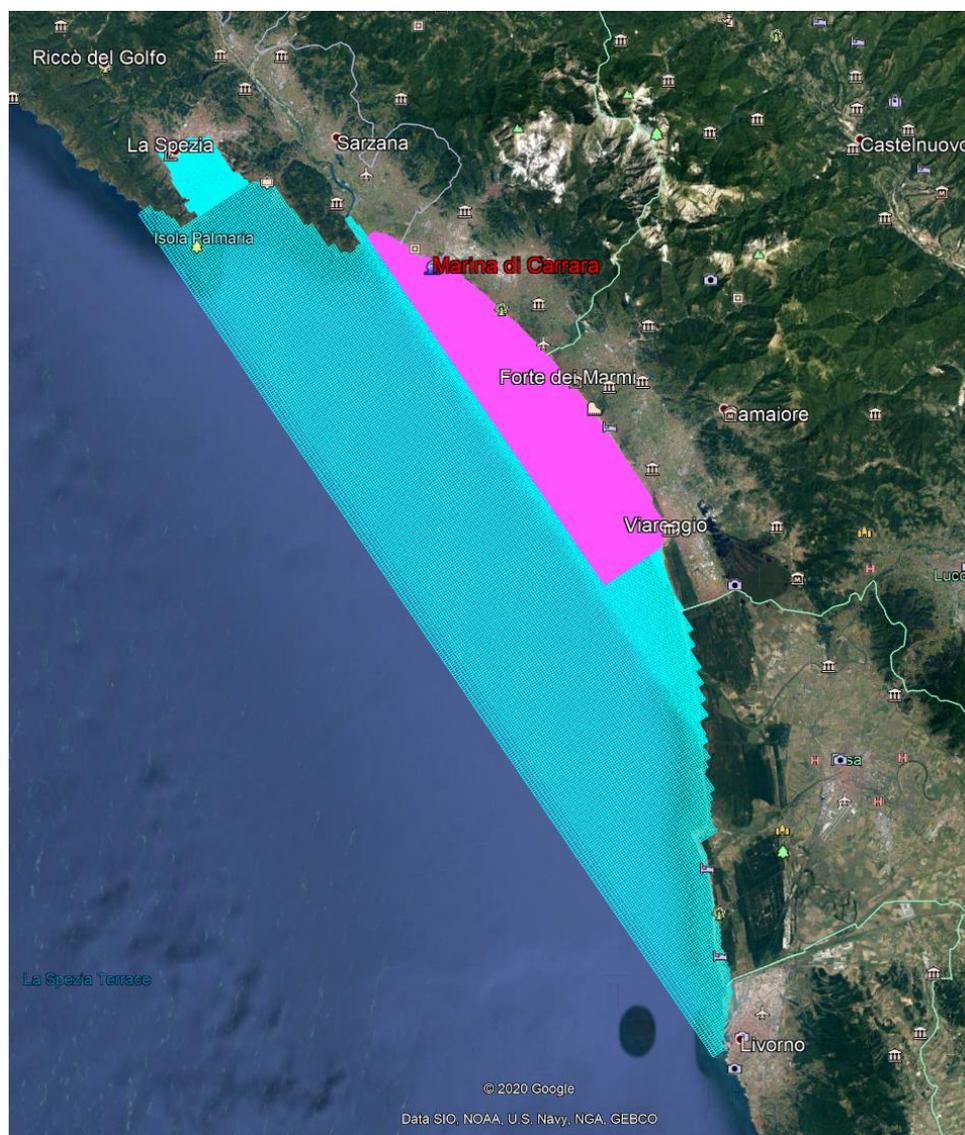
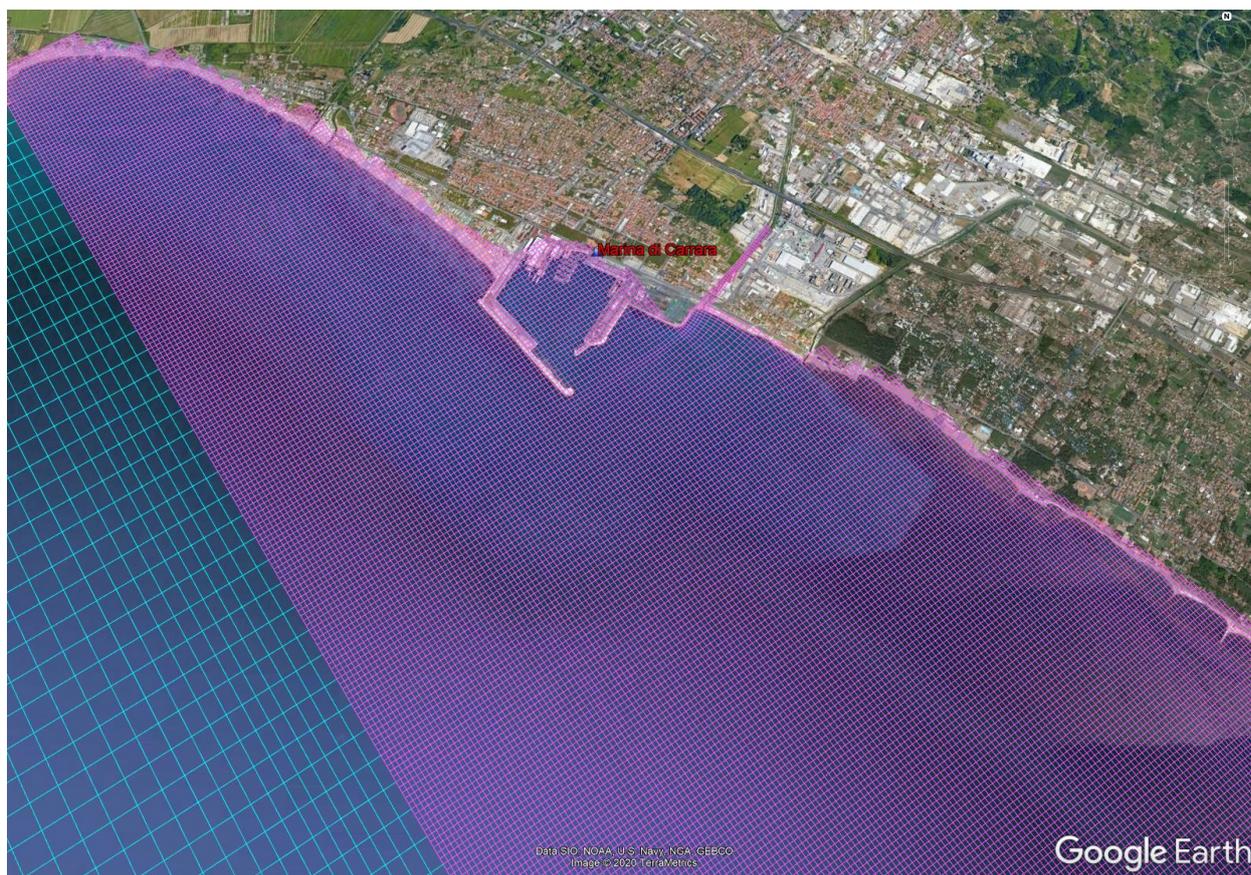


Figura 4-1. Il dominio di calcolo modello idrodinamico.



**Figura 4-2. Dettaglio del modello nell'area del porto di Marina di Carrara.**

I dati batimetrici, poi interpolati sulla maglia di calcolo, sono stati desunti dai dati GEBCO 2019 (General Bathymetric Chart of the Oceans), integrati, ove disponibili, dai rilievi batimetrici più recenti (vedi Paragrafo 2.1).

L'insieme di questi dati ha consentito di definire con dettaglio la batimetria della fascia litoranea, che è anche la più importante da un punto di vista idrodinamico essendo quella caratterizzata dalle correnti generate dal moto ondoso frangente.

Il dominio di calcolo così definito ha consentito di rappresentare adeguatamente non solo i fondali ma anche l'insieme delle opere di difesa presenti lungo il litorale del Comune di Massa. La successiva fase di revisione ed aggiornamento del presente studio specialistico, condotta nell'ambito della fase di Scoping della procedura di VAS sul PRP del porto di Marina di Carrara, ha confermato la piena validità del dominio di calcolo utilizzato nel presente studio di morfodinamica come esplicitato nei capitoli seguenti in cui vengono illustrati i risultati delle simulazioni condotte.

La batimetria associata a tali griglie, con riferimento alla situazione attuale è riportata in Figura 4-3 per il dominio generale e in Figura 4-4 per il dettaglio dell'area del porto di Carrara.

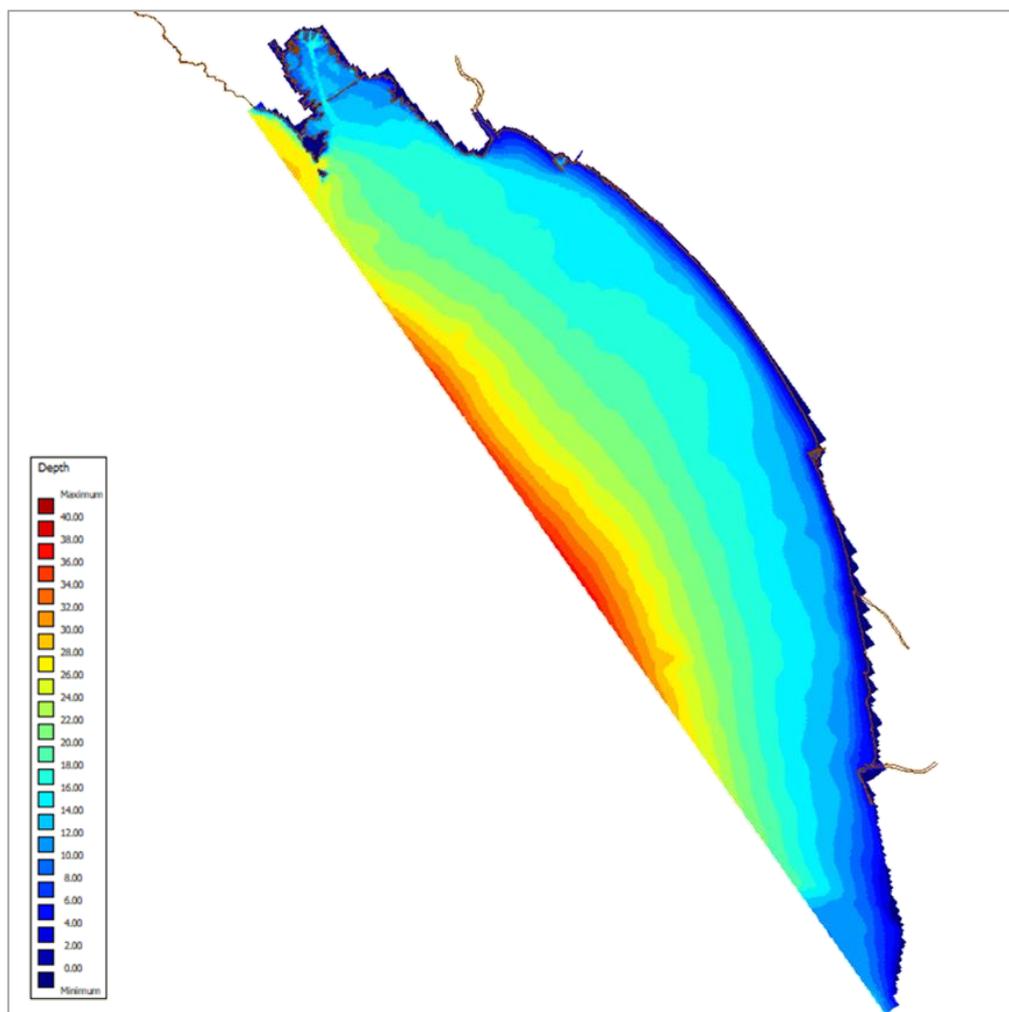


Figura 4-3. Schematizzazione batimetrica del modello idrodinamico [m s..m.m.].

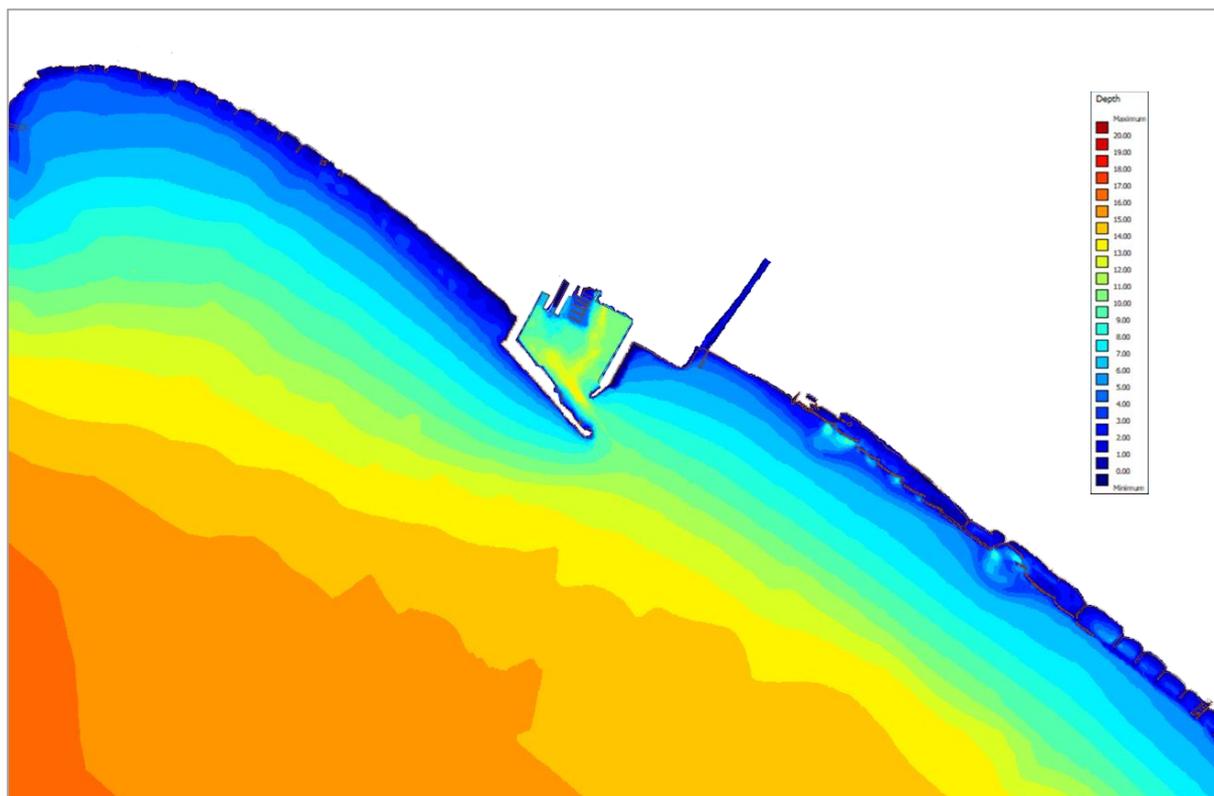


Figura 4-4 Schematizzazione batimetrica della situazione attuale del porto di Carrara [m s.m.m.].

Per le griglie di calcolo del modello d'onda si è fatto riferimento a quelle del modello idrodinamico, la cui risoluzione è stata scelta in modo opportuno per simulare il fenomeno combinato moto ondoso-idrodinamica.

Per consentire la corretta definizione delle condizioni al contorno, è stato deciso di adottare una terza griglia, con risoluzione di circa 500 m, prolungando così l'estensione del dominio di calcolo lato mare di oltre 60 km dalla linea di costa.

Per garantire una accurata modellizzazione della propagazione delle onde nell'area del porto di Carrara e lungo tutto il litorale, si è deciso di utilizzare la stessa griglia di dettaglio del modello idrodinamico.

L'estensione spaziale dei domini di calcolo del modello delle onde è presentata in Figura 4-5.

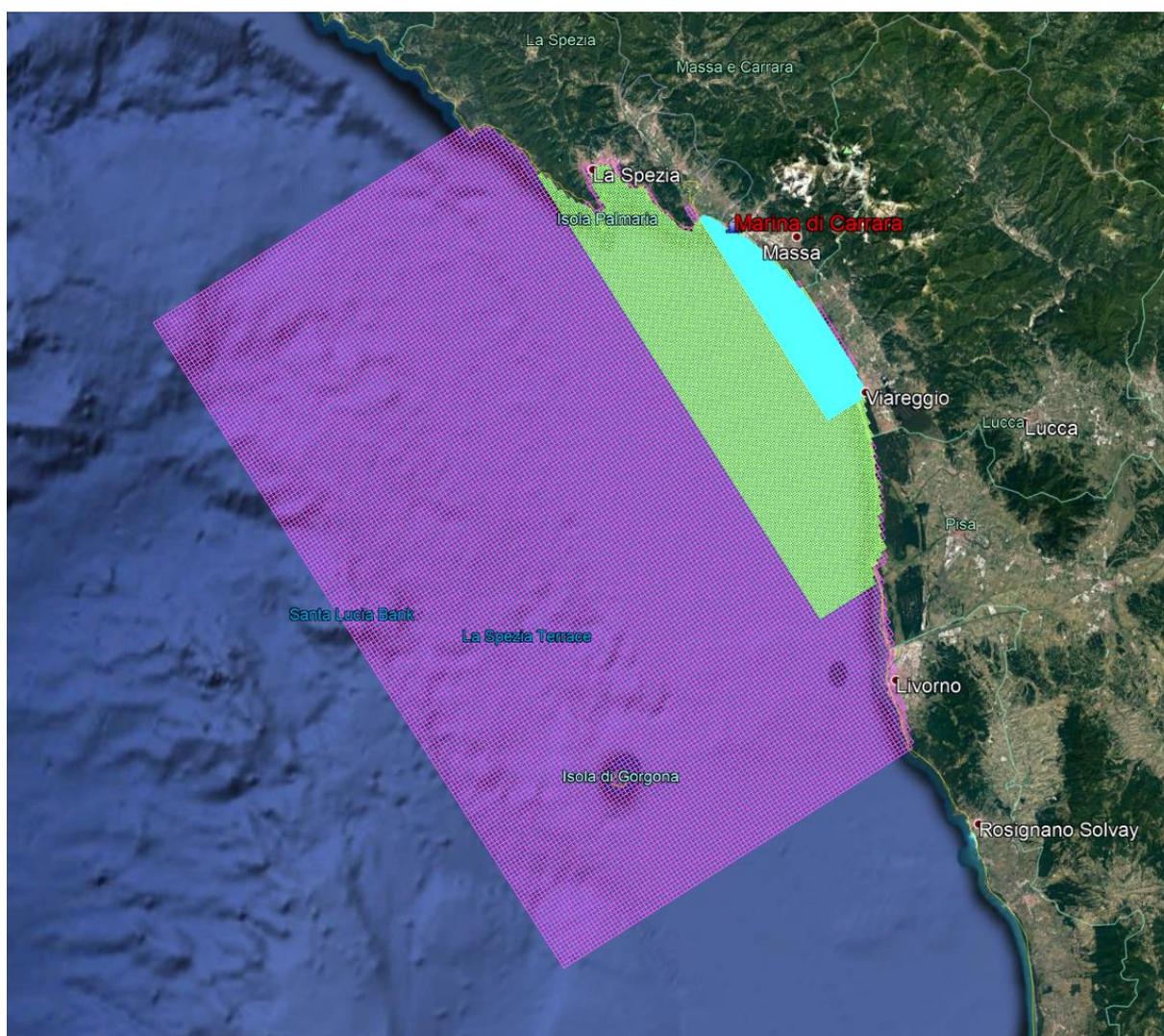


Figura 4-5. Il dominio di calcolo del modello delle onde.

### 4.3 Le condizioni al contorno

Una volta definita le griglie di calcolo dei modelli numerici, è essenziale, come descritto in precedenza, identificare e quantificare le principali forzanti esterne che condizionano la circolazione idrodinamica del Golfo della Spezia e, in particolare, della zona del porto di Carrara.

Le forzanti prese in esame sono:

- Marea;
- Vento;
- Moto ondoso incidente;
- Afflussi liquidi e solidi dei principali corsi d'acqua.

Come già evidenziato, le caratteristiche meteorologiche e idrodinamiche sono fondamentali nella valutazione della circolazione idrodinamica e del comportamento morfodinamico dell'area di studio e quindi sono state considerate diverse condizioni di marea e meteorologiche nelle simulazioni effettuate.

Le forzanti meteo-marine applicate per le simulazioni sono state:

- Marea semidiurna (periodo di 12 ore) con escursione di 20 cm (+/- 10 cm l.m.m.), applicata al limite esterno del dominio di calcolo;
- Vento di caratteristiche variabili con intensità e direzione costante (condizioni stazionarie) in relazione ai diversi scenari analizzati;
- Moto ondoso incidente da largo in condizioni stazionarie con caratteristiche variabili in relazione agli scenari analizzati;
- Afflussi liquidi e solidi dei corsi d'acqua che si immettono nella zona in esame con portate liquide e solide variabili in relazione ai diversi scenari analizzati.

Il modello idrodinamico richiede inoltre la definizione di altri parametri fisici, idraulici e numerici.

Nei punti seguenti si riportano i principali parametri idrodinamici utilizzati nelle simulazioni:

- Intervallo di integrazione (time step) pari a 3 secondi;
- Scabrezza dei fondali uniforme (secondo la formulazione di Manning) di  $0.028 \text{ s/m}^{1/3}$ ;
- Il coefficiente di viscosità turbolenta orizzontale ("horizontal eddy viscosity") uniforme per ogni dominio di calcolo e pari a  $3 \text{ m}^2/\text{s}$  per il dominio esterno e  $1 \text{ m}^2/\text{s}$  per quello di dettaglio;
- Le profondità sono state riferite al livello medio marino (l.m.m.).

## Capitolo 5 Modellazioni dei flussi sedimentari litoranei

### 5.1 Il metodo di studio

Uno dei principali obiettivi del presente studio è la valutazione delle possibili interferenze del nuovo assetto planimetrico delle opere foranee nella proposta di PRP del porto di Marina di Carrara, sulla morfodinamica costiera a larga scala ed in particolare sulla capacità potenziale di variare i flussi sedimentari che attualmente avvengono lungo il litorale.

Il metodo seguito per la valutazione oggettiva delle suddette interferenze è consistito inizialmente nell'identificazione di una serie di condizioni meteomarine rappresentative delle forzanti idrodinamiche del paraggio in esame e soprattutto significative per la dinamica litoranea. Successivamente le simulazioni sono state condotte considerando la conformazione planimetrica delle opere foranee del porto di Marina di Carrara sia nella situazione attuale che in quella di assetto prevista dalla proposta di PRP confrontandone i risultati al fine di evidenziare in modo oggettivo le differenze e quindi le relative interferenze sui processi di idrodinamica e morfodinamica.

In generale, i metodi utilizzati per definire le condizioni di moto ondoso incidente al largo di un litorale, cui fare riferimento nelle modellazioni numeriche, consistono nella schematizzazione in classi direzione (Dir) e di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) di una serie ondometrica rappresentativa dell'esposizione medio climatica del sito in esame assegnando a ciascuna classe (Dir- $H_s$ ) la relativa frequenza di accadimento.

Nel presente studio di modellazione per la schematizzazione del clima d'onda si è fatto riferimento al metodo del "Flusso di energia" (Energy Flux Method, EFM) che considera il flusso di energia di un'onda progressiva calcolato con la seguente formula

$$E_f = \frac{(\rho g H_s^2)}{8} c_g$$

In cui:  $E_f$  = flusso di energia [W/m]

$\rho$  = densità dell'acqua marina [ $\text{kg/m}^3$ ];

$H_s$  = l'altezza d'onda [m] significativa della classe di appartenenza;

$c_g$  = la celerità di gruppo [m/s].

L'energia totale media annuale da associare a ciascuna classe (Dir- $H_s$ ) è calcolata sulla base dell'effettiva frequenza di occorrenza dello stato di mare considerato secondo la formula:

$$E_{tot,i} = E_{f,i} \cdot freq_i$$

In cui  $freq_i$  è la frequenza di accadimento annuale (in secondi) della classe i-esima considerata e  $E_{i,tot}$  è l'energia totale annuale in kWh della classe.

Per la definizione del set di condizioni di moto ondoso rappresentative del clima paraggio del è stato fatto riferimento al EFM ("Energy Flux Method". Le condizioni di onda rappresentative sono state quindi calcolate in riferimento ai settori direzionali con le maggiori frequenze di accadimento e definendo l'ampiezza (ovvero l'altezza d'onda) in modo tale da avere classi ad uguale contenuto energetico.

Nel caso in esame i dati di base sono riferiti al clima d'onda ricostruito nel punto DICCA al largo (vedi Figura 3-6 e la seguente Tabella 5-1) relativo al periodo 1979-2018 e suddiviso in settori direzionali con ampiezza di 15° ed intervalli di altezza d'onda di 0.5 m. I risultati delle elaborazioni sono presentati nella Tabella 5-2. Nelle tabelle seguenti sono riportati solo i settori di traversia tra 135° e 300° escludendo quelli relativi alle onde dirette verso il largo che non frangono lungo il litorale e quindi non sono associate alle correnti litoranee responsabili dei processi di morfodinamica.

Tabella 5-1. Distribuzione della frequenza di accadimento media annuale delle onde (Dir-Hs) nel punto al largo DICCA.

classi di Hs [m]	Classi direzionali (° Nord) di provenienza del moto ondoso al largo												Totale
	135°N	150°N	165°N	180°N	195°N	210°N	225°N	240°N	255°N	270°N	285°N	300°N	
0.25 0.50	1.87%	1.70%	1.45%	1.91%	1.56%	1.74%	3.85%	4.46%	1.52%	1.14%	1.10%	0.70%	22.99%
0.50 1.00	1.61%	1.35%	1.53%	1.93%	1.44%	2.20%	6.25%	5.66%	1.44%	0.77%	0.57%	0.38%	25.14%
1.00 1.50	0.38%	0.42%	0.62%	0.71%	0.48%	1.08%	4.34%	3.14%	0.59%	0.22%	0.13%	0.09%	12.18%
1.50 2.00	0.12%	0.15%	0.26%	0.25%	0.19%	0.39%	2.99%	1.90%	0.27%	0.11%	0.06%	0.04%	6.71%
2.00 2.50	0.03%	0.04%	0.08%	0.08%	0.08%	0.12%	1.36%	1.06%	0.11%	0.06%	0.03%	0.01%	3.04%
2.50 3.00	0.01%	0.01%	0.03%	0.04%	0.04%	0.04%	0.51%	0.68%	0.05%	0.02%	0.01%	0.01%	1.44%
3.00 3.50	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.16%	0.41%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.65%
3.50 4.00	0.00%	-	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.05%	0.23%	0.01%	0.00%	0.00%	-	0.32%
4.00 5.00	-	-	-	0.00%	0.01%	0.00%	0.03%	0.17%	0.00%	-	-	-	0.21%
5.00 6.00	-	-	-	0.00%	-	0.00%	0.02%	0.00%	-	-	-	-	0.03%
>6	-	-	-	-	-	-	0.00%	-	-	-	-	-	0.00%
<b>Totale</b>	<b>4.01%</b>	<b>3.66%</b>	<b>3.97%</b>	<b>4.95%</b>	<b>3.80%</b>	<b>5.60%</b>	<b>19.54%</b>	<b>17.73%</b>	<b>4.03%</b>	<b>2.32%</b>	<b>1.90%</b>	<b>1.22%</b>	<b>72.73%</b>

Tabella 5-2. Distribuzione in frequenza percentuale dell'energia del moto ondoso per classe d'onda rispetto al totale dell'energia incidente nel settore di esposizione del paraggio (135°N-300°N) nel punto al largo DICCA.

classi di Hs [m]	Classi direzionali (° Nord) di provenienza del moto ondoso al largo												Totale
	135°N	150°N	165°N	180°N	195°N	210°N	225°N	240°N	255°N	270°N	285°N	300°N	
0.25 0.50	0.09%	0.10%	0.10%	0.16%	0.14%	0.17%	0.37%	0.45%	0.15%	0.10%	0.09%	0.05%	1.97%
0.50 1.00	0.42%	0.41%	0.53%	0.75%	0.62%	0.99%	2.82%	2.83%	0.75%	0.36%	0.25%	0.16%	10.89%
1.00 1.50	0.36%	0.45%	0.73%	0.88%	0.65%	1.51%	6.19%	5.09%	1.00%	0.36%	0.20%	0.12%	17.54%
1.50 2.00	0.25%	0.37%	0.69%	0.66%	0.55%	1.16%	9.08%	6.36%	0.95%	0.40%	0.19%	0.10%	20.76%
2.00 2.50	0.12%	0.17%	0.39%	0.37%	0.38%	0.62%	7.28%	5.99%	0.66%	0.34%	0.15%	0.07%	16.54%
2.50 3.00	0.06%	0.04%	0.24%	0.33%	0.28%	0.37%	4.27%	5.89%	0.51%	0.17%	0.10%	0.05%	12.31%
3.00 3.50	0.01%	0.00%	0.03%	0.15%	0.11%	0.14%	2.01%	5.10%	0.33%	0.10%	0.03%	0.04%	8.05%
3.50 4.00	0.00%	0.00%	0.01%	0.09%	0.10%	0.16%	0.90%	3.93%	0.25%	0.02%	0.01%	0.00%	5.47%
4.00 5.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.13%	0.10%	0.64%	4.12%	0.12%	0.00%	0.00%	0.00%	5.16%
5.00 6.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.16%	0.83%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	1.08%
>6	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.23%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.23%
<b>Totale</b>	<b>1.31%</b>	<b>1.55%</b>	<b>2.72%</b>	<b>3.42%</b>	<b>2.97%</b>	<b>5.22%</b>	<b>33.70%</b>	<b>40.82%</b>	<b>4.82%</b>	<b>1.85%</b>	<b>1.02%</b>	<b>0.60%</b>	<b>100.00%</b>

La maggior parte dell'energia associata al moto ondoso, a sua volta direttamente correlata con la capacità di trasporto solido potenziale, è concentrata nei due settori 225° e 240°N (evidenziati in verde chiaro) e rappresenta circa il 75%. I contributi provenienti dai settori 135°N - 210°N (scirocco e mezzogiorno) è circa il 17% del totale mentre il rimanente 8% è associato agli stati di mare provenienti dal settore 255°N - 300°N (ponente).

In riferimento ai due settori predominanti (225°N e 240°N), tramite il metodo 'Energy Flux', sono state calcolate le altezze d'onda significativa Hs ipotizzando una suddivisione con due classi di altezza per ciascun settore. Nelle analisi sono state escluse le onde con Hs < 0.5m perché non influenti sulla capacità di trasporto solido litoraneo. Una volta identificate l'altezza significativa

e le direzioni dell'onda incidente, sono stati calcolati i periodi e le velocità del vento da associare sulla base delle relazioni vento-onda e  $T_p$ - $H_s$  definiti in precedenza nell'ambito dello studio meteomarino.

I risultati delle analisi sono presentati nella seguente tabella; nel caso in esame sono state definite quattro condizioni d'onda al largo come rappresentative per lo studio della dinamica del litorale provenienti dai settori di Libeccio ( $225^\circ$  e  $240^\circ$ N).

**Tabella 5-3. Scenari di moto ondoso rappresentativi del paraggio derivati mediante il 'Energy Flux method'.**

Scenario	Onda			Vento		Freq
	$H_s$	Dir	$T_p$	$V_v$	$D_v$	
1	$H_s = 1.16$ m	Dir = $225^\circ$ N	$T_p = 8.4$ s	$V_v = 7$ m/s	$D_v = 224^\circ$ N	13.1%
2	$H_s = 1.33$ m	Dir = $240^\circ$ N	$T_p = 8.6$ s	$V_v = 7.2$ m/s	$D_v = 252^\circ$ N	11.7%
3	$H_s = 2.42$ m	Dir = $225^\circ$ N	$T_p = 9.8$ s	$V_v = 9$ m/s	$D_v = 224^\circ$ N	2.6%
4	$H_s = 3.35$ m	Dir = $240^\circ$ N	$T_p = 10.5$ s	$V_v = 10.9$ m/s	$D_v = 252^\circ$ N	1.5%

Nelle simulazioni eseguite per la valutazione del trasporto solido potenziale lungo il litorale è stato seguito un approccio di tipo parametrico; al fine di garantire una normalizzazione ed uniformità delle condizioni di input, nelle simulazioni eseguite è stata pertanto considerata una durata dell'evento pari a 36 ore e la stazionarietà delle forzanti di onda e vento ed una marea semidiurna con escursione di 20 cm (+/- 10 cm s.m.m.), applicata al limite esterno del dominio di calcolo.

In questo set di simulazioni non è stata attivata l'opzione di aggiornamento morfologico dei fondali nel calcolo della circolazione idrodinamica così da ottenere il trasporto potenziale dei sedimenti. Questa scelta è stata fatta al fine di eliminare gli effetti cumulativi morfologici conseguenti ad ogni simulazione e in modo tale da assicurare che gli effetti prodotti dalla simulazione di ogni singolo scenario meteomarino non fossero dipendenti dalle condizioni iniziali e dal caso precedente. In ragione di questa scelta, il risultato finale non risulta dipendente dalla sequenza degli stati di mare simulati.

Sulla base dei risultati delle simulazioni è stato infine calcolato l'andamento del trasporto solido lungo il litorale integrando i campi di trasporto spaziale in corrispondenza di una serie di transetti ortogonali alla linea di costa distribuiti lungo tutto l'arco litoraneo di interesse.

## 5.2 Le configurazioni portuali analizzate

Le analisi modellistiche per la valutazione dei flussi sedimentari hanno riguardato:

- l'attuale conformazione del porto di Marina di Carrara da utilizzare come termine di riferimento (Figura 5-1);
- l'assetto planimetrico delle opere foranee contemplate dalla proposta di PRP (Figura 5-2).

Quest'ultima configurazione è caratterizzata da:

- una limitata estensione verso levante dell'attuale molo sopraflutto;
- un nuovo molo sottoflutto radicato al margine della sponda in destra idraulica della foce del Torrente Carrione;
- un pennello in sinistra idraulica della foce del Carrione che ne completa il sistema di armatura dello sbocco a mare;
- il canale di accesso, nella configurazione della proposta di PRP, con il fondale sino alla quota di -12 m l.m.m.

Nei paragrafi seguenti sono illustrate le condizioni al contorno e i risultati delle simulazioni condotte per i suddetti scenari di assetto planimetrico "attuale" e di "PRP" delle opere foranee del porto di Carrara, precisando che nell'ambito del presente studio specialistico, al fine di ottimizzare, per gli aspetti di interferenza con il limitrofo sbocco a mare del Torrente Carrione, l'assetto planimetrico del nuovo molo sottoflutto previsto dal PRP sono state condotte molteplici analoghe simulazioni i cui risultati sono riportati nell'Allegato I cui si rimanda per i dettagli.

Per ulteriori dettagli sull'assetto planimetrico delle opere foranee considerate nella impostazione e selezione della conformazione della proposta di PRP si rimanda a quanto disposto e indicato dal DPSS (Documento di Pianificazione Strategica di Sistema) e successivamente verificato e selezionato nell'ambito dello studio specialistico S5 "Studio modellistico dell'agitazione ondosa", cui si rimanda per maggiori dettagli.

Al riguardo si precisa che per la selezione ed impostazione dell'assetto planimetrico delineato dal nuovo Piano Regolatore Portuale del porto di Marina di Carrara, già nell'ambito del suddetto studio S5 si è fatto riferimento non solo agli aspetti precipui di sicurezza alla navigazione e stazionamento all'ormeggio delle imbarcazioni afferenti al porto commerciale ma anche alle potenziali interferenze con la morfodinamica della limitrofa fascia litoranea e con la funzionalità idraulica della adiacente foce del Torrente Carrione.

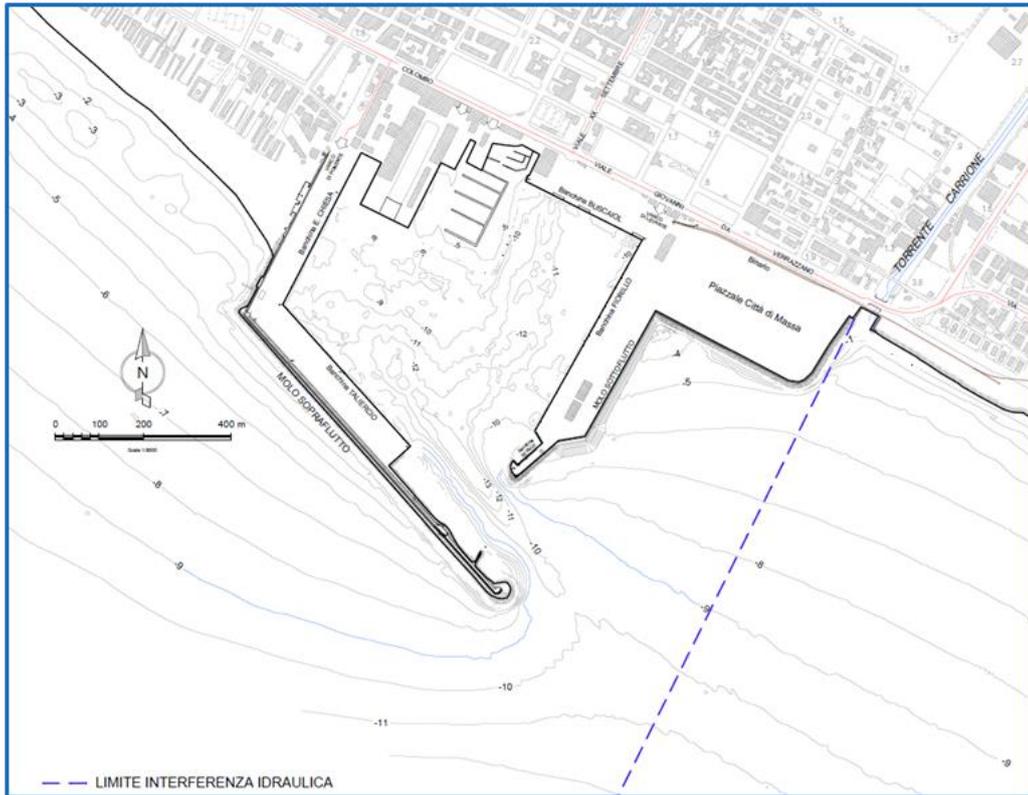


Figura 5-1 Layout Configurazione attuale del Porto di Marina di Carrara

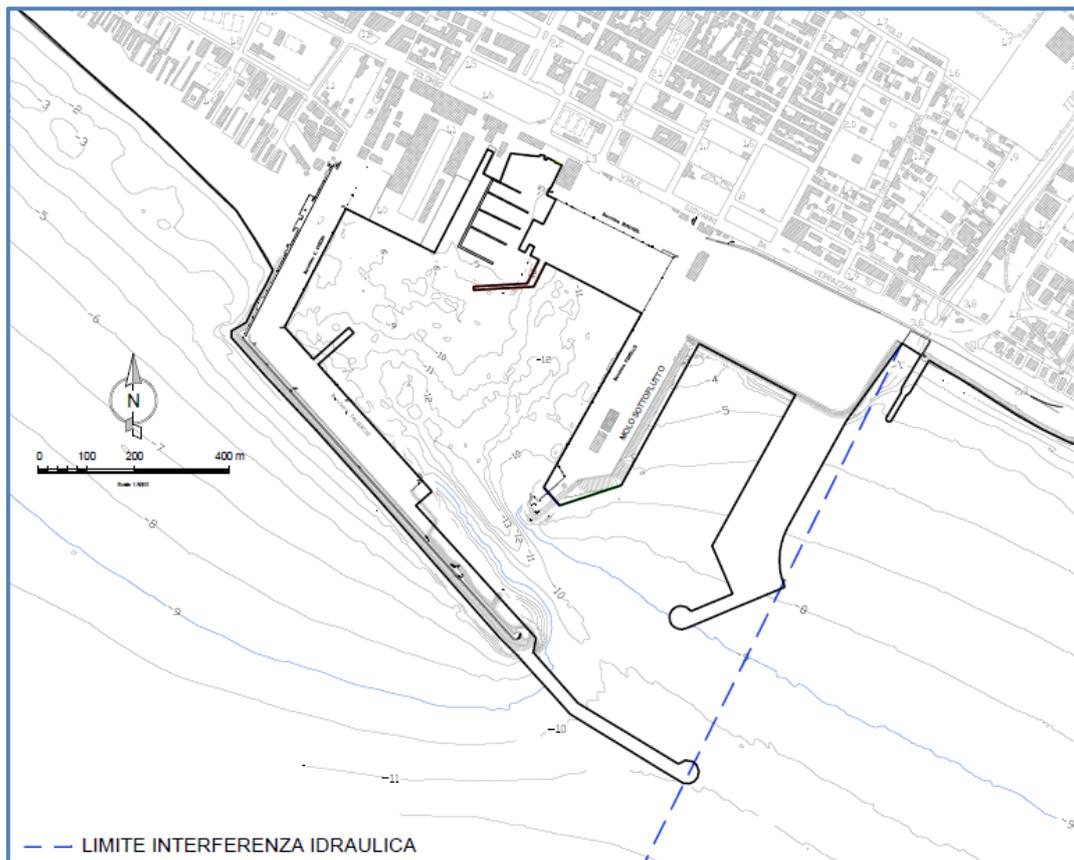


Figura 5-2 Layout Configurazione della proposta di PRP del Porto di Marina di Carrara

### 5.3 Campi di moto e trasporto solido potenziale

Per la valutazione dell'effetto delle nuove opere portuali sui flussi sedimentari lungo il litorale sono state analizzati 4 diversi scenari meteo-marini.

Per tutti gli scenari, come precedentemente detto, è stata considerata una marea semidiurna con escursione di 20 cm (+/- 10 cm l.m.m.), applicata al limite esterno del dominio di calcolo.

Nella seguente Tabella 5-4 vengono riassunte le condizioni meteo-marine al largo considerate per ogni scenario simulato.

Scenario	Configurazione	Onda	Vento
1	- Attuale - proposta PRP	Hs = 1.16 m Dir = 225°N Tp = 8.4 s	Vv = 7 m/s Dv = 224°N
2	- Attuale - proposta PRP	Hs = 1.33 m Dir = 240°N Tp = 8.6 s	Vv = 7.2 m/s Dv = 252°N
3	- Attuale - proposta PRP	Hs = 2.42 m Dir = 225°N Tp = 9.8 s	Vv = 9 m/s Dv = 224°N
4	- Attuale - proposta PRP	Hs = 3.35 m Dir = 240°N Tp = 10.5 s	Vv = 10.9 m/s Dv = 252°N

Tabella 5-4 Condizioni al contorno al largo applicate per ogni scenario

Dai dati disponibili risulta che per la maggior parte dei campioni di sedimenti il diametro mediano ( $D_{50}$ ) è compreso nell'intervallo 100 - 300  $\mu\text{m}$  (vedi paragrafo 3.4). Lungo la costa, in generale, il sedimento può essere considerato da moderatamente a ben classato (relativamente omogeneo) anche se in alcuni tratti della fascia litoranea in esame sono presenti zone ghiaiose vicino alla linea di battigia.

Per la valutazione dei flussi sedimentari si sono considerati due tipi di sedimenti non-coesivi (sabbie) uniformemente distribuiti sul fondo rappresentativi della frazione fine con  $D_{50} = 200 \mu\text{m}$  e molto fine  $D_{50} = 100 \mu\text{m}$  e rappresentativi dei diametri medi dei sedimenti lungo il tratto in esame (vedi Paragrafo 2.2)

Per l'analisi di questi scenari sono stati considerati gli apporti dei principali corsi d'acqua che sfociano nel dominio di studio. L'unico corpo idrico minore che è stato considerato è il Torrente Carrione data la sua vicinanza al porto.

Le portate liquide (medie annuali) e le concentrazioni per le due frazioni di sedimento applicate nelle simulazioni sono riportate nella Tabella 5-5. I valori delle portate sono stati desunti sulla base dei dati di letteratura disponibili e delle informazioni sulle portate giornaliere resi disponibili da Servizio Idrologico delle Toscana (vedi Par 3.5).

Fiume \ Torrente	Portata media annuale	Concentrazione Sed1 ( $D_{50}=100 \mu\text{m}$ )	Concentrazione Sed2 ( $D_{50}=200 \mu\text{m}$ )
Torrente Carrione	1 $\text{m}^3/\text{s}$	0.1 $\text{kg}/\text{m}^3$	0.1 $\text{kg}/\text{m}^3$
Fiume Magra	35 $\text{m}^3/\text{s}$	0.1 $\text{kg}/\text{m}^3$	0.1 $\text{kg}/\text{m}^3$
Fiume Serchio	55 $\text{m}^3/\text{s}$	0.1 $\text{kg}/\text{m}^3$	0.1 $\text{kg}/\text{m}^3$
Fiume Arno	110 $\text{m}^3/\text{s}$	0.1 $\text{kg}/\text{m}^3$	0.1 $\text{kg}/\text{m}^3$

Tabella 5-5 Portate e concentrazioni dei sedimenti considerate nelle simulazioni.

Ogni scenario è stato inizializzato a partire dai risultati forniti da una simulazione di riferimento ottenuta con una “partenza a freddo” del modello (valori iniziali nulli) e con condizioni al contorno rappresentative di una situazione media annuale. Questa simulazione, della durata di 5 gg, ha consentito di raggiungere condizioni stazionarie. A partire da queste condizioni idrodinamiche iniziali si sono eseguite le simulazioni morfodinamiche contraddistinte ciascuna da una durata di 36 ore.

Nelle pagine seguenti sono presentati i risultati forniti dalle simulazioni in termini di campi di velocità mediati sulla verticale e di trasporto solido potenziale per ciascuno degli scenari analizzati.

Al fine di permettere un confronto agevole ed immediato tra la situazione attuale e quella della proposta di PRP, per ogni parametro è stato predisposto una rappresentazione grafica in cui vengono presentate sovrapposte le immagini nelle due situazioni oggetto di confronto ottenute con le medesime condizioni meteomarine.

In Allegato I sono riportati in dettaglio tutti i risultati, per ogni parametro, ottenuti nella simulazione di ogni singolo scenario. Dalla combinazione dei risultati sulla base della frequenza di accadimento di ogni condizione d'onda simulata, è stato calcolato il flusso di trasporto medio, come riportato nelle seguenti figure. In particolare, considerando la configurazione attuale e quella della proposta di PRP, nella Figura 5-3 e nella Figura 5-4 viene riportata la distribuzione spaziale del trasporto potenziale specifico nell'area di interesse, espresso in  $m^3/s/m$ .

Dall'esame dei risultati ottenuti appare evidente che i campi di moto nell'area in esame presentano un comportamento, in termini di intensità, sostanzialmente stazionario nel tempo ed indipendente dalla fase di marea (condizioni di flusso o di riflusso di marea). La circolazione idrodinamica nella fascia litoranea è in sostanza determinata in modo preponderante dalla presenza di correnti litoranee dovute al moto ondoso frangente, mentre la forzante mareale non è in grado di generare correnti significative.

Dal confronto delle due figure, ed in particolare dal riquadro di dettaglio della zona più prossima al porto di Marina di Carrara, si può notare come la distribuzione spaziale del trasporto non subisca variazioni significative per la presenza delle nuove opere. Nella situazione attuale, infatti, si nota come il trasporto litoraneo, che si sviluppa da Nord-Ovest verso Sud-Est, risulta contenuto per la presenza della diga foranea del porto e lo stesso trasporto si rigenera nella zona immediatamente a sud del porto per poi svilupparsi lungo tutto il litorale fino a Viareggio.

Tale tendenza non viene modificata nella configurazione della proposta di PRP e, in particolare, non si riscontra una diminuzione del trasporto solido in corrispondenza della nuova diga foranea; analogamente alla situazione precedente, si rigenera immediatamente a sud del porto. Dal confronto dei riquadri si nota infatti che, già alle prime scogliere radenti a sud della foce del Torrente Carrione, la distribuzione del trasporto potenziale è praticamente identica a quella della situazione attuale e, quindi, non si riscontrano variazioni significative del parametro lungo la rimanente parte di litorale.

In Figura 5-5 e nella Figura 5-6 sono presentate le mappe di sedimentazione\erosione annua dei fondali stimata combinando la frequenza di accadimento delle diverse condizioni d'onda simulate. Dall'esame dei risultati si osserva che anche il bilancio solido medio annuo nelle sezioni di interesse non subisce variazioni di rilievo. In queste figure, infatti, si nota che il pattern di sedimentazione/erosione non presenta variazioni per la configurazione di PRP, se non una

minore sedimentazione nell'area prospiciente la foce del Carrione a beneficio di una migliore officiosità del torrente stesso.

Immediatamente a sud del Torrente Carrione, per poche centinaia di metri prospicienti l'attuale difesa radente del secondo Piazzale di Levante e comunque non oltre la foce del fosso Lavello, si osserva un lieve incremento del pattern di erosione che tendenzialmente è compensata dagli apporti di sedimenti indotti dalle piene del torrente stesso (vedasi capitoli seguenti).

Questo fenomeno viene messo in particolare evidenza nella Figura 5-7 dove viene visualizzata la mappa spaziale con le differenze tra la situazione attuale e quella relativa alla proposta di PRP in termini di trasporto potenziale medio annuo. Dall'immagine si osserva che la zona compresa tra l'attuale molo di levante (sottoflutto) e il tratto immediatamente a sud est (sinistra idraulica) del Carrione è caratterizzato da un'attenuazione del trasporto solido potenziale che tende a ripristinarsi nel successivo tratto che si estende verso levante fino alla foce del Lavello.

Da questa zona procedendo verso levante, ovvero sottoflutto rispetto alla risultante della deriva longitudinale del trasporto solido litoraneo, le differenze rispetto alla situazione attuale sono sostanzialmente trascurabili.

Come già evidenziato in precedenza, quindi anche in termini di distribuzione spaziale delle differenze relative tra le conformazioni delle opere foranee per gli scenari "attuale" e di "PRP" le simulazioni condotte indicano con dati oggettivi che comunque il pattern del trasporto solido lungo tutto il resto del litorale sottoflutto rimane del tutto simile a quello attuale.

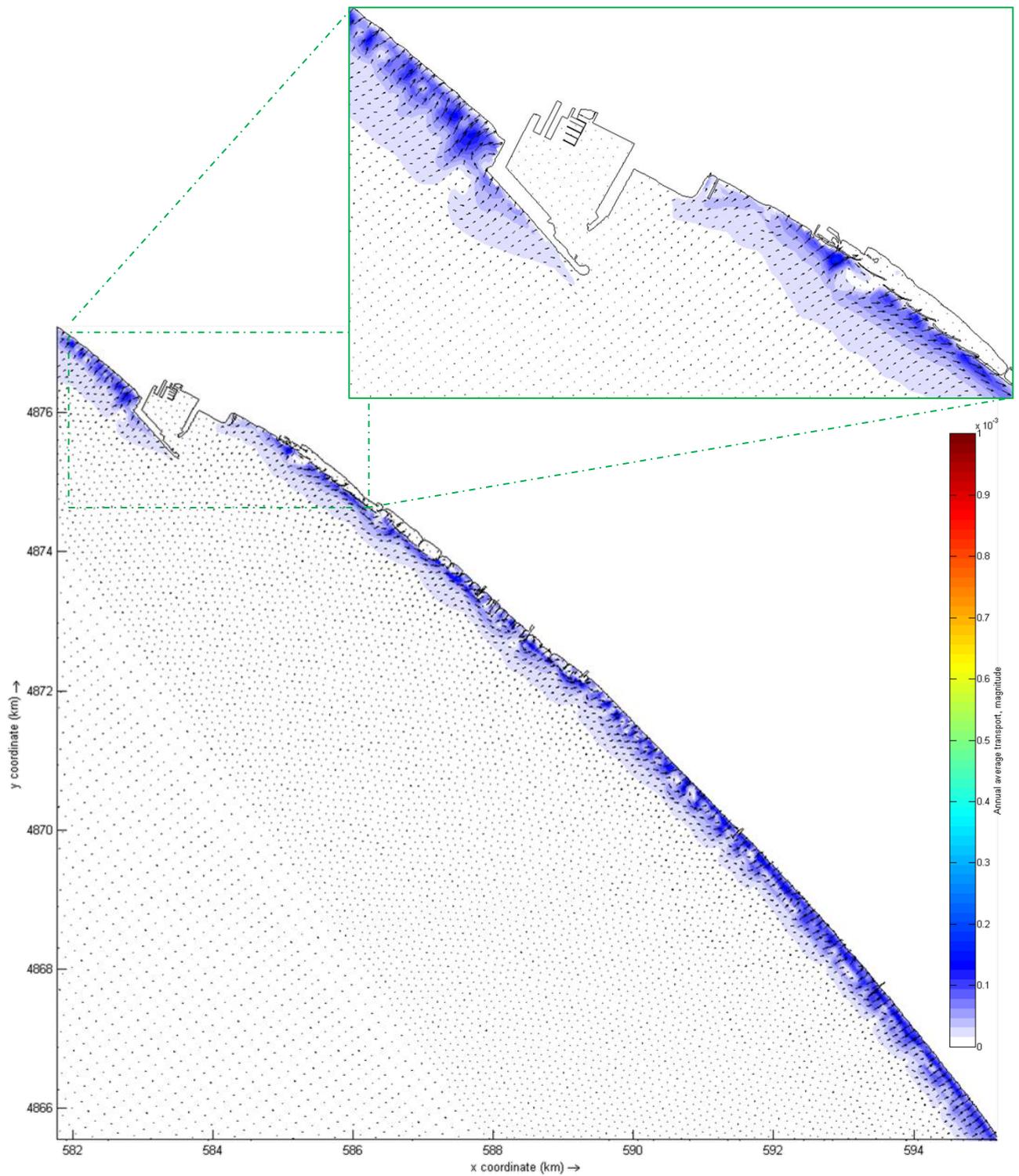


Figura 5-3 Configurazione attuale - Trasporto potenziale medio annuo [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ]

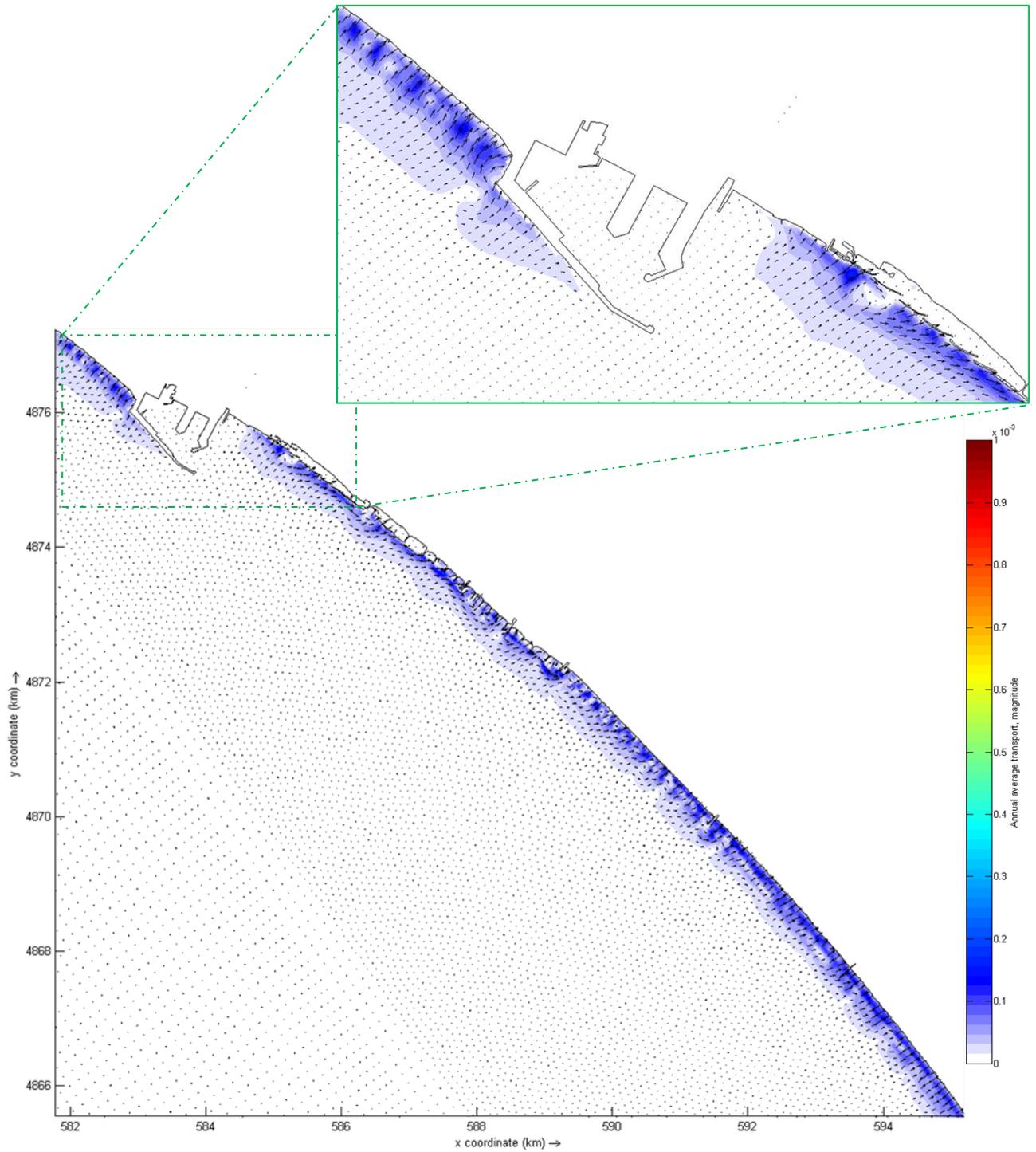


Figura 5-4 Configurazione proposta PRP - Trasporto potenziale medio annuo [m<sup>3</sup>/s/m]

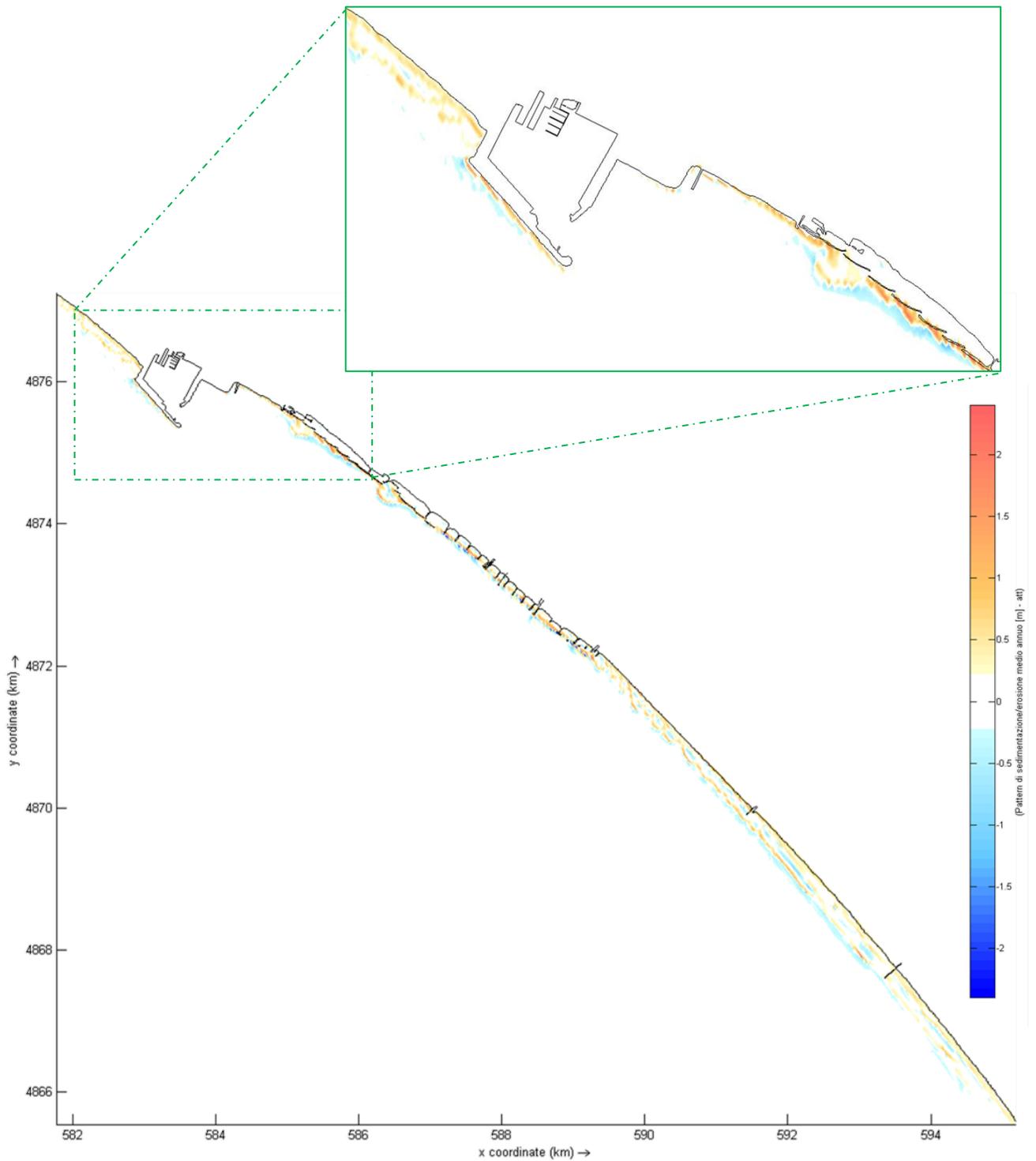


Figura 5-5 Configurazione attuale – Patterni di sedimentazione/erosione medio annuo [m]

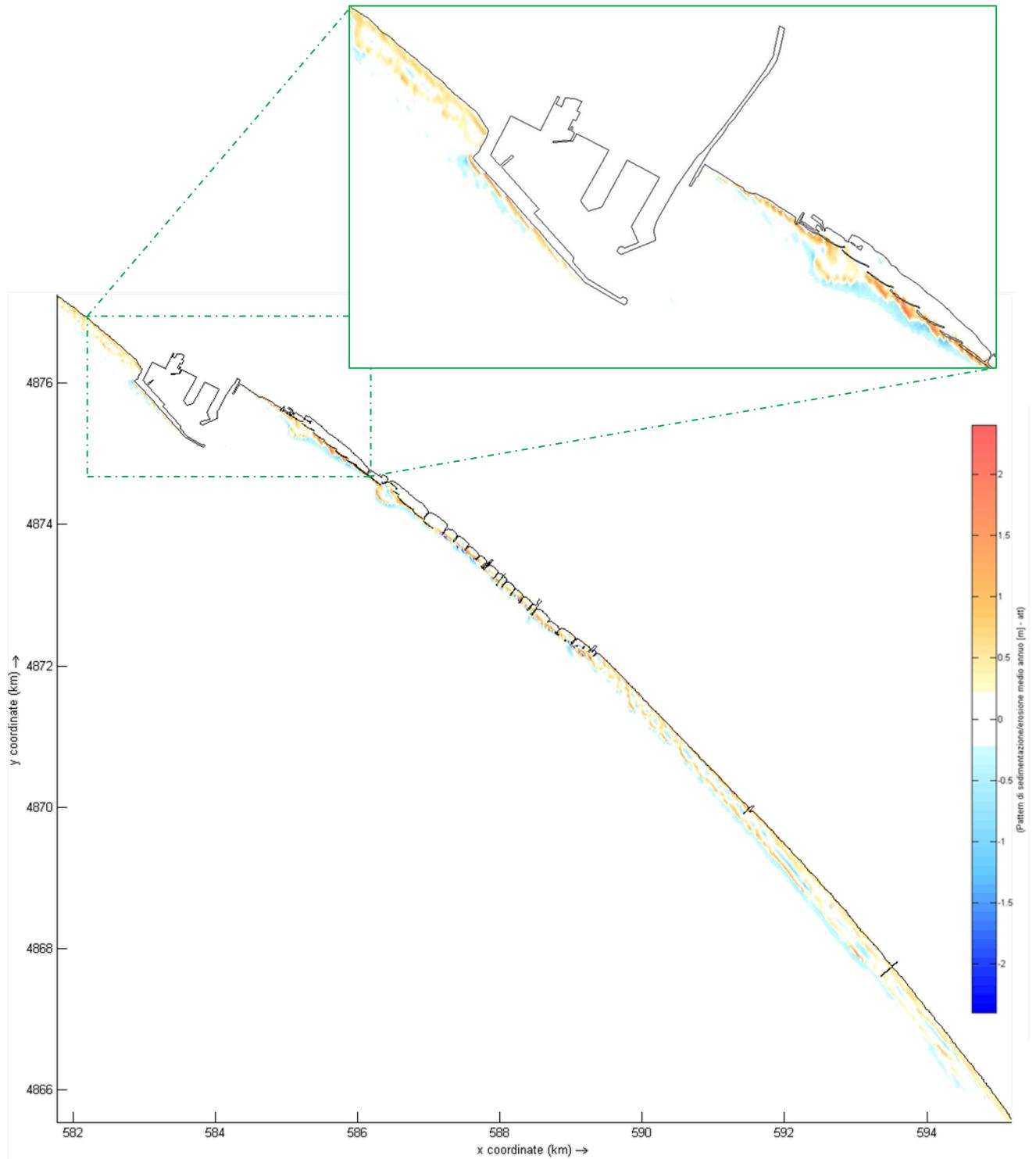
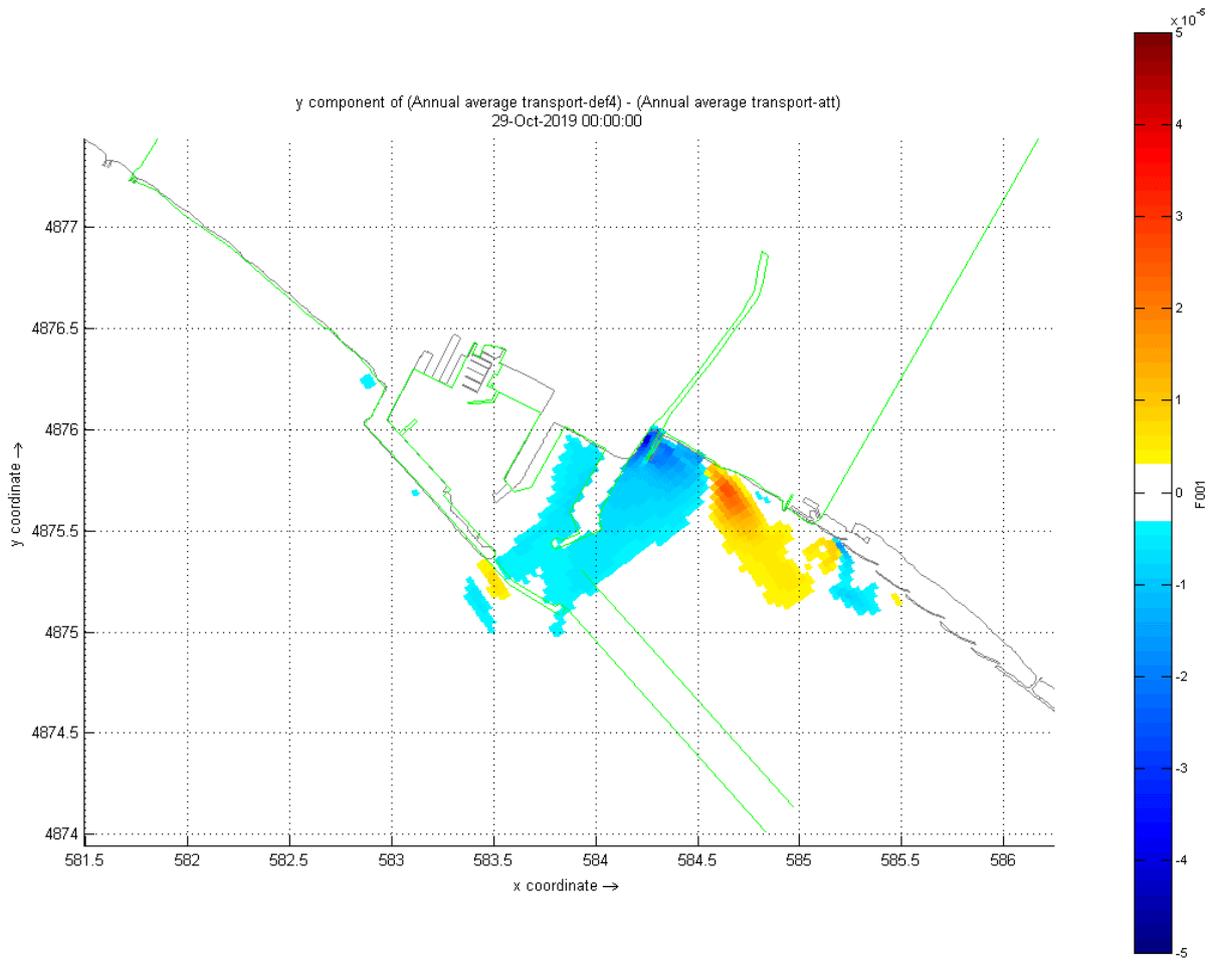


Figura 5-6 Configurazione proposta PRP – Pattern di sedimentazione/erosione medio annuo [m]



**Figura 5-7 Differenze del pattern del trasporto medio annuale [m]  
(Configurazione proposta PRP – Configurazione attuale)**

## 5.4 Valutazione dei flussi sedimentari lungo la costa

I risultati delle simulazioni eseguite hanno costituito la base di riferimento per il calcolo dell'andamento dei flussi di trasporto sedimentario lungo tutto il litorale investigato dal Bocca di Magra sino al porto di Viareggio per uno sviluppo complessivo di oltre 30 km. I flussi di trasporto solido potenziale risultanti sono stati ottenuti integrando, lungo una serie di transetti ortogonali alla linea di costa, i flussi associati ad ogni scenario meteomarino simulato ed eseguendo un'operazione di up-scaling sulla base della frequenza di accadimento di ciascuno scenario per ottenere il trasporto cumulato annuale.

In Figura 5-8 sono rappresentate le posizioni dei 38 transetti disposti ortogonalmente lungo l'arco litoraneo. In Figura 5-9 e Figura 5-10 sono riportati i grafici con l'andamento del trasporto potenziale per le due frazioni di sedimenti; in ordinata è rappresentato il valore del trasporto solido in  $m^3$ , in ascissa la progressiva km rispetto al punto iniziale. In entrambe le figure sono sovrapposti gli andamenti del trasporto solido per la configurazione attuale e per la configurazione proposta di PRP.

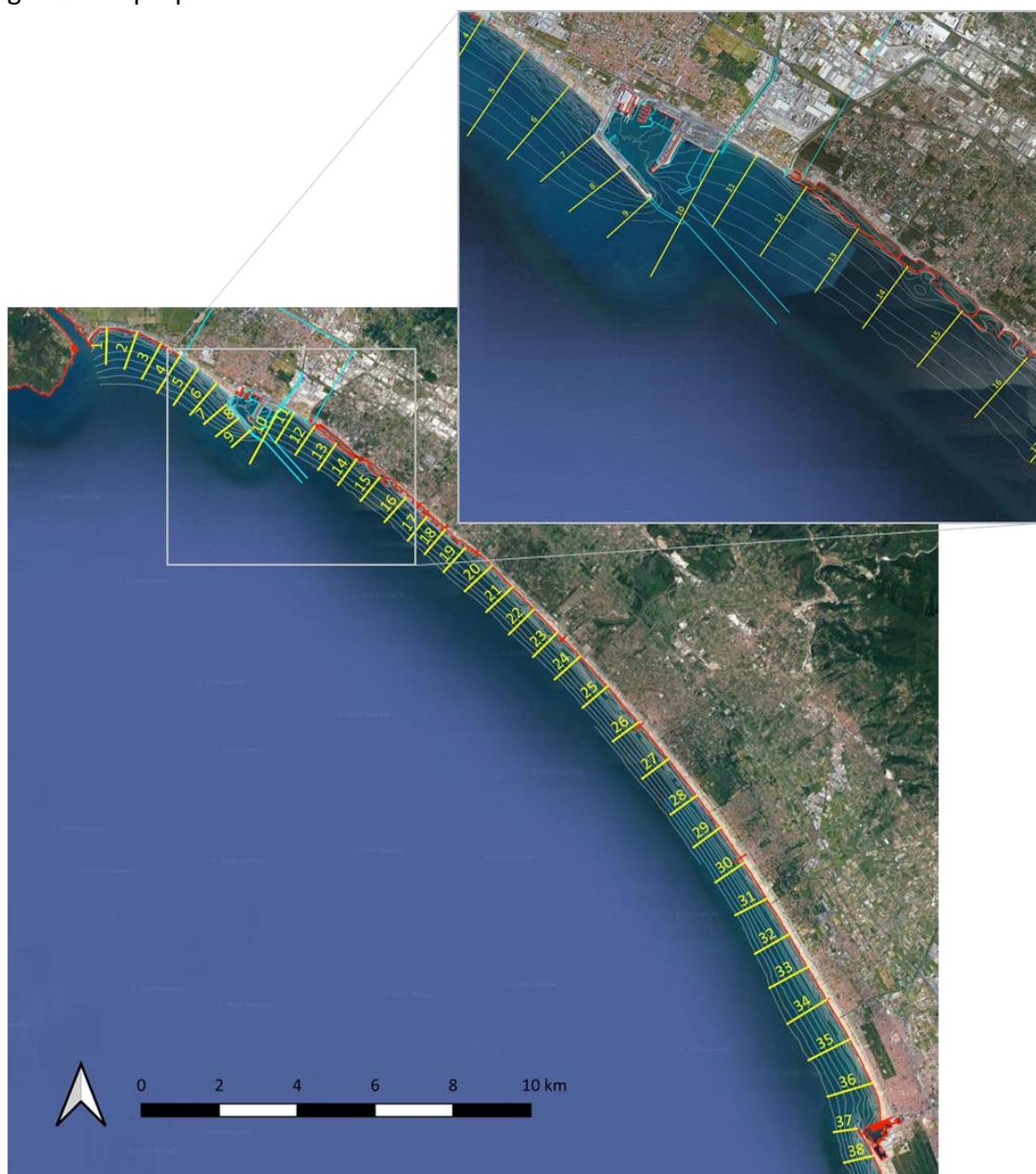


Figura 5-8 Posizione dei transetti per il calcolo dei flussi sedimentari

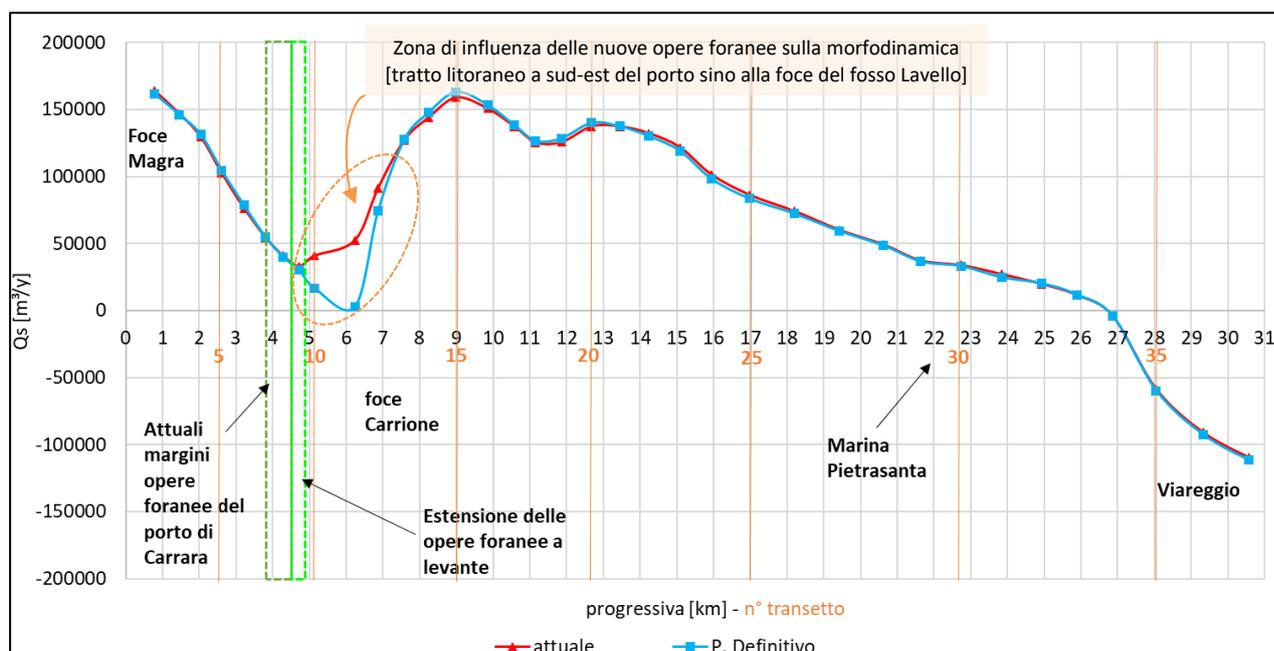


Figura 5-9 Flussi sedimentari annuali – configurazione attuale vs configurazione proposta PRP (d = 100 µm)

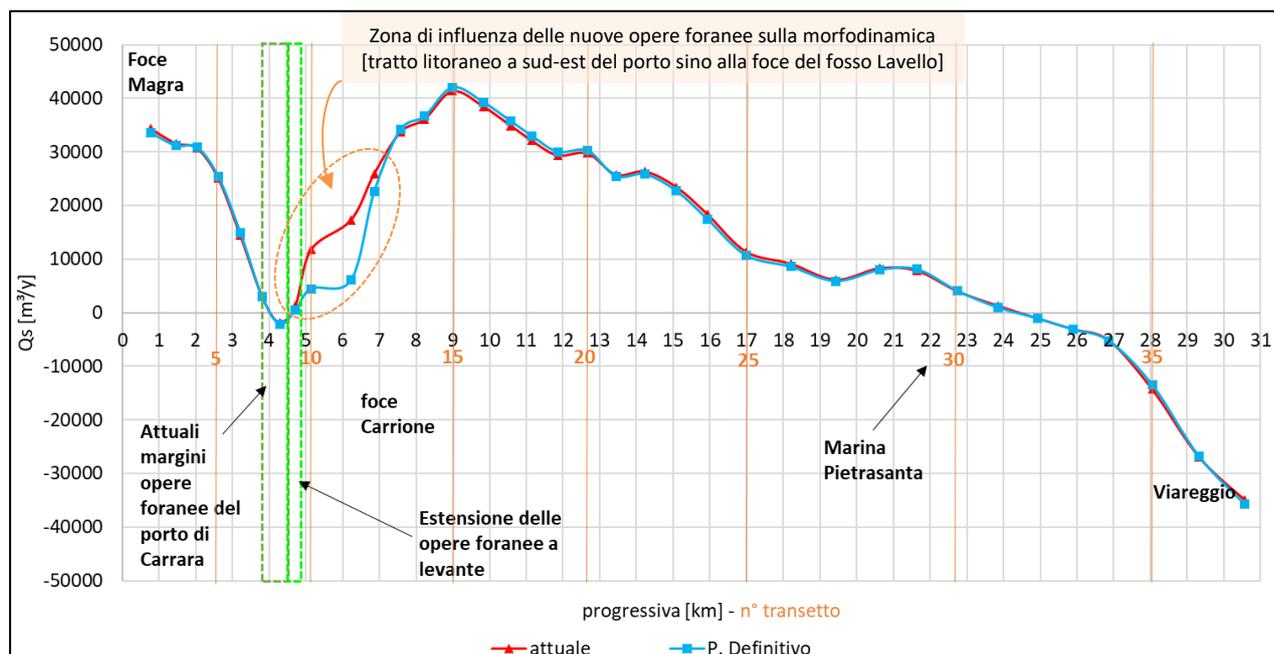


Figura 5-10 Flussi sedimentari annuali – configurazione attuale vs configurazione proposta di PRP (d= 200 µm )

L'analisi dei risultati evidenzia come i flussi di trasporto solido calcolati dal modello siano congruenti ed in linea con tutte le informazioni bibliografiche e gli studi eseguiti in precedenza confermando di fatto che il flusso sedimentario risultante è diretto verso SE a partire dalla foce del Magra con una graduale diminuzione fino ad annullarsi approssimativamente all'altezza di Marina di Pietrasanta. Nella parte meridionale del litorale versiliese a nord di Viareggio, invece il flusso sedimentario è diretto verso NO fino alla zona di convergenza in tra Marina di Pietrasanta e Viareggio.

L'analisi dei risultati delle simulazioni condotte mettono inoltre in evidenza che la capacità di trasporto è significativamente diversa in funzione del diametro caratteristico della frazione di sedimento. Per i sedimenti fini ( $d = 100 \mu\text{m}$ ) il trasporto litoraneo è nell'ordine di 3-4 volte quello osservato per i sedimenti più grossolani ( $d = 200 \mu\text{m}$ ).

Concentrando l'attenzione sul tratto di litorale più prossimo al porto di Marina di Carrara:

- i grafici di Figura 5-9 e Figura 5-10 evidenziano che i flussi di trasporto potenziale all'esterno della diga sopraflutto sono molto più elevati per i sedimenti fini rispetto alle sabbie grossolane.
- la zona a nord del porto è in avanzamento; i flussi sedimentari risultanti sono diretti verso SE ma si riducono gradualmente lungo la diga di sopraflutto del porto;
- lungo il tratto compreso tra Marina di Carrara e Marina di Massa il flusso di sedimenti verso SE tende a ripristinarsi; in questa zona, caratterizzata da una varietà di difese costiere, si osserva l'instaurarsi di vortici e correnti in corrispondenza dei varchi litoranei di queste opere con la presenza di fenomeni di erosione\deposito localizzati;
- i flussi calcolati per le due configurazioni (attuale e proposta di PRP) sono comunque molto simili, risultando quindi con dati oggettivi che la zona di influenza della nuova diga foranea rimane confinata alla sola area che si sviluppa a sud-est del porto per un'estensione di circa 500 m fino alla foce del fosso Lavello;
- nella situazione attuale i flussi tendono a crescere nell'area a sud-est della foce del torrente Carrione (corrispondente al transetto 11), mentre per la configurazione proposta di PRP nella stessa area l'effetto di schermatura attribuibile al prolungamento della diga di sopraflutto comporta una diminuzione dell'intensità dei flussi sedimentari;
- in entrambe le configurazioni analizzate, a partire dal transetto 12, posto circa 500 m a sud-est della foce del torrente Carrione, i flussi sedimentari calcolati sono sostanzialmente gli stessi. Di conseguenza oltre questo transetto si può ritenere del tutto trascurabile l'interferenza dell'assetto planimetrico della proposta di PRP del porto di Marina di Carrara sui processi di morfodinamica litoranea che invece sono fortemente condizionati dalla presenza delle molteplici opere di difesa presenti lungo questo tratto di litorale;
- per le finalità di analisi a grande scala delle possibili interferenze esercitate dall'assetto planimetrico delle opere foranee delineate dal PRP i risultati delle simulazioni condotte, espressi in termini di flussi sedimentari, indicano che queste nuove opere portuali non sono in contrasto e non condizionano i nuovi interventi di riqualificazione e salvaguardia in fase di pianificazione da parte del Comune di Massa, contraddistinti da ripascimenti della fascia litoranea eventualmente combinati alla riqualificazione di alcune delle scogliere esistenti <sup>(10)</sup>.
- i flussi sedimentari che si sviluppano parallelamente alla diga di sopraflutto sono molto simili in entrambe le configurazioni studiate (attuale e proposta di PRP). In entrambi i casi una frazione del flusso sedimentario proveniente da nord-ovest tende a proseguire oltre

<sup>10</sup> Riferimento ed oggetto del "PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA - MASTERPLAN: Opere di difesa costiera tra il Fiume Frigido e il Fosso Lavello" redatto dal RTP DHI-DINAMICA (emissione gennaio 2022).

la diga foranea del porto di Marina di Carrara su fondali più profondi alimentando la fascia litoranea posta a sud-est.

## Capitolo 6 Modellazioni della morfodinamica litoranea a scala di mareggiata

### 6.1 Gli scenari di studio simulati

L'evoluzione morfologica di un litorale è determinata da effetti sia di medio-lungo periodo legati alla circolazione idrodinamica litoranea ed alle condizioni meteomarine prevalenti lungo il paraggio, sia di breve periodo, in grado di apportare significative alterazioni alla morfologia locale in occasione di forti eventi di mareggiata.

A complemento delle analisi sul trasporto litoraneo eseguite nel Capitolo 5, sono state eseguite delle ulteriori simulazioni con il modello Delft3D per analizzare nel breve periodo (singole mareggiate) gli effetti sulla morfologia dei fondali riconducibili alle opere foranee del porto di Marina di Carrara nella configurazione attuale ed in quella proposta di PRP.

L'evento di mareggiata considerato nelle analisi è rappresentativo di uno stato di mare da Libeccio di forte intensità anche se non estremo con una frequenza di accadimento nell'ordine di 2-3 eventi/anno.

Le forzanti applicate al modello morfodinamico sono:

- Vento: è stato applicato un vento con intensità costante di 14 m/s, direzione di provenienza 252°N distribuito uniformemente su tutto il dominio di calcolo e presente ininterrottamente per tutta la durata della simulazione.
- Onda: è stata applicata un'onda al largo con altezza significativa pari a 5.00 m, direzione di provenienza 240°N e periodo pari a 10.8 s.
- Marea: è stata applicata al limite esterno del dominio di calcolo una marea sinusoidale con periodo di 12 ore ed escursione di 20 cm (+/- 10 cm s.l.m.m.)

Anche per queste simulazioni sono stati considerati due tipi di sedimenti non-coesivi (sabbie) uniformemente distribuiti sul fondo rappresentativi della frazione fine con  $D_{50} = 200 \mu\text{m}$  e molto fine  $D_{50} = 100 \mu\text{m}$ .

Le portate liquide dei corsi d'acqua e le concentrazioni per le due frazioni di sedimento considerate nelle simulazioni sono riportate nella Tabella 6-1 e sono rappresentative di condizioni medie annuali. [3]

Fiume \ torrente	Portata	Concentrazione Sed1 ( $D_{50}=100 \mu\text{m}$ )	Concentrazione Sed2 ( $D_{50}=200 \mu\text{m}$ )
Torrente Carrione	1 m <sup>3</sup> /s	0.1 kg/m <sup>3</sup>	0.1 kg/m <sup>3</sup>
Fiume Magra	35 m <sup>3</sup> /s	0.1 kg/m <sup>3</sup>	0.1 kg/m <sup>3</sup>
Fiume Serchio	55 m <sup>3</sup> /s	0.1 kg/m <sup>3</sup>	0.1 kg/m <sup>3</sup>
Fiume Arno	110 m <sup>3</sup> /s	0.1 kg/m <sup>3</sup>	0.1 kg/m <sup>3</sup>

Tabella 6-1 Portate medie annuali e concentrazioni dei sedimenti considerate nelle simulazioni -

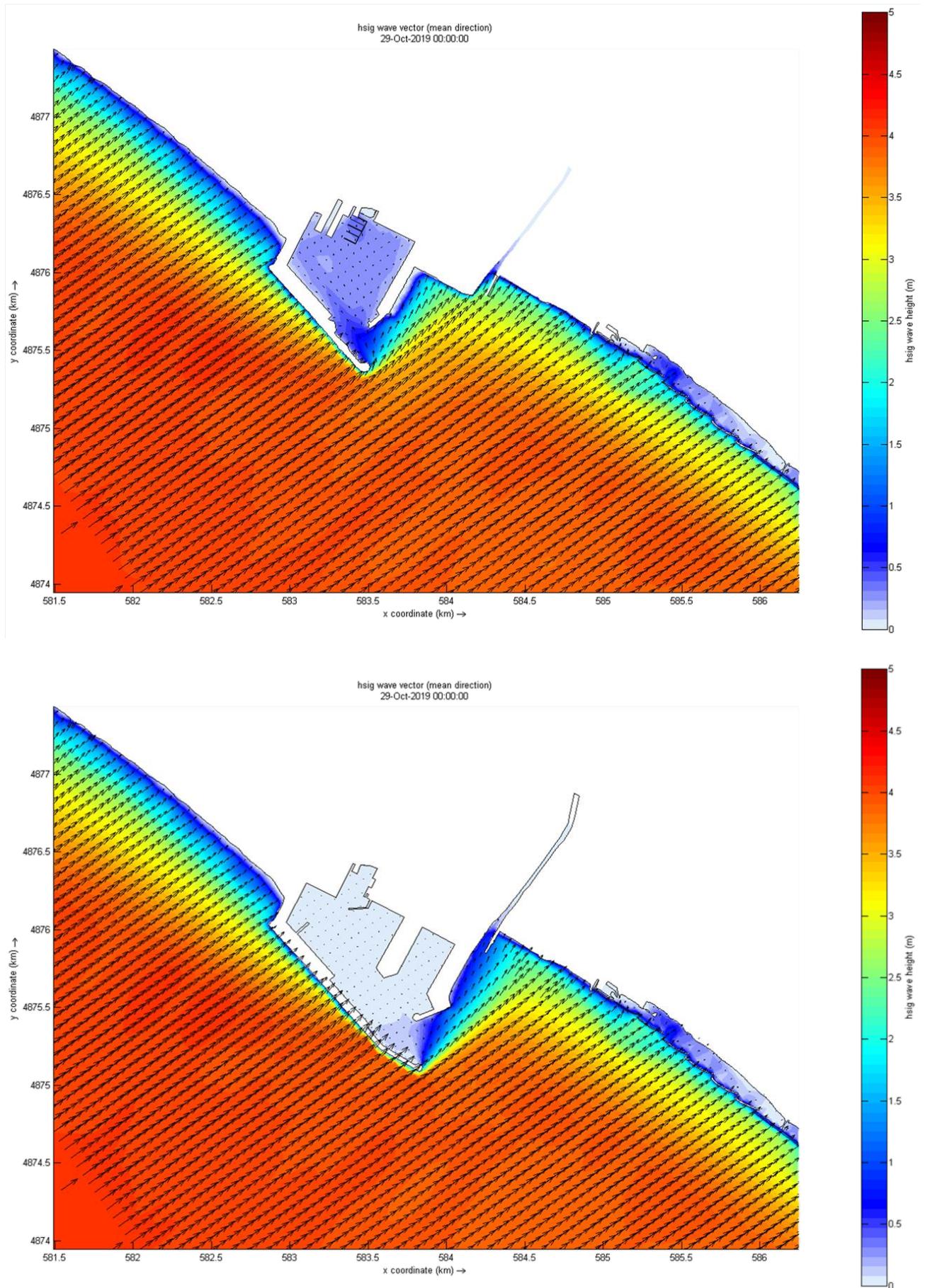
## 6.2 Analisi dei risultati delle simulazioni

La Figura 6-1 riporta in forma grafica il dettaglio dei risultati delle simulazioni di propagazione del moto ondoso (in termini di variazione dell'altezza e della direzione) lungo la fascia litoranea più prossima al porto di Marina di Carrara. Si può osservare come il prolungamento della diga di sopraflutto, ipotizzato dal nuovo PRP, introduca una "zona d'ombra" che ridossa dagli stati di mare, più intensi e frequenti provenienti libeccio, solo per un tratto limitato del litorale per un'estensione al massimo di 500 m a levante della foce del T. Carrione. Diversamente, con la configurazione attuale delle opere foranee del porto, questo tratto di litorale rimane esposto ad un moto ondoso residuo ancora intenso, stimabile in circa 2.5 m di altezza d'onda.

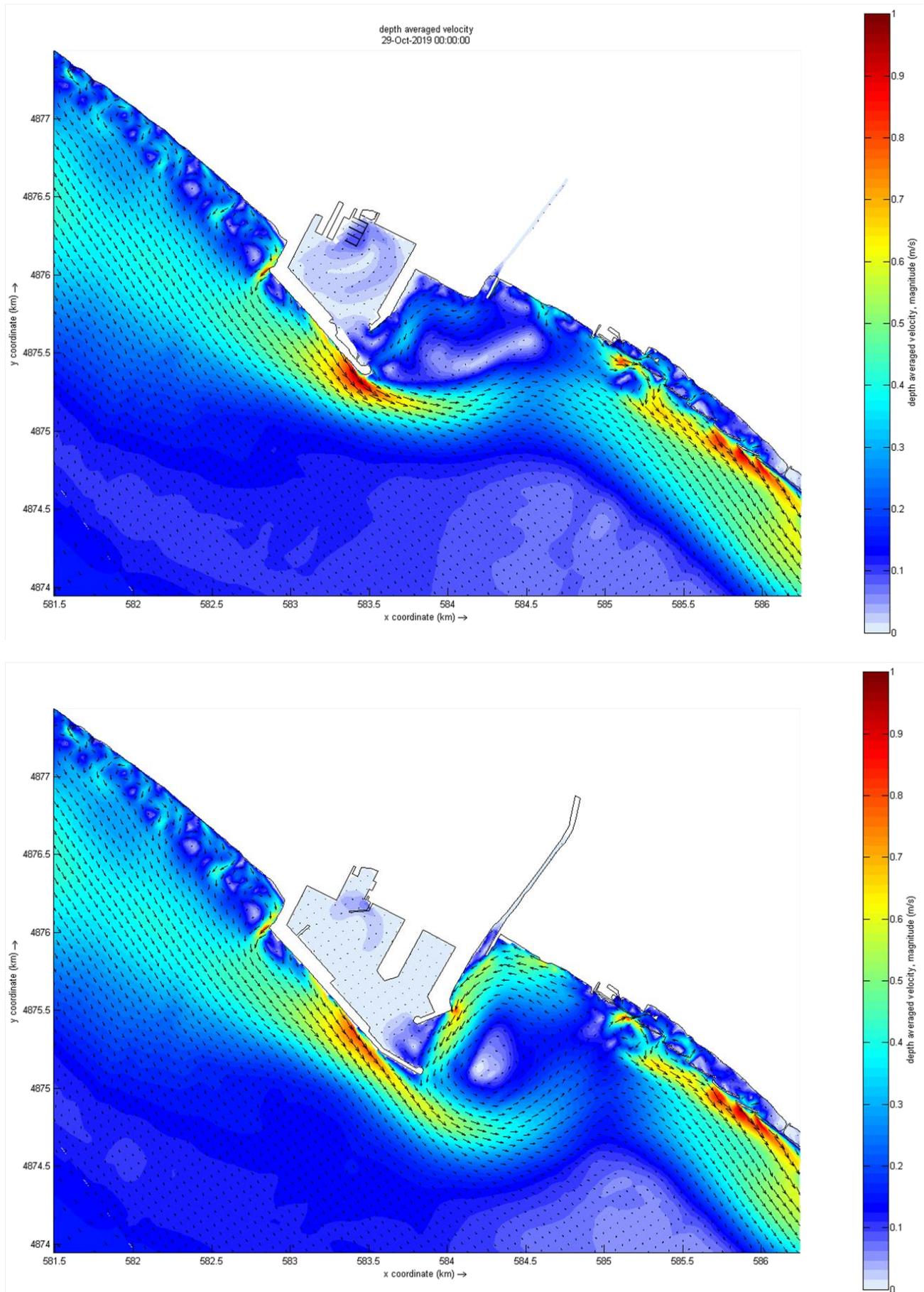
Come evidenziato nella Figura 6-2, questo effetto di "schermatura del moto ondoso", riconducibile al prolungamento della diga sopraflutto previsto dalla configurazione di proposta di PRP, determina una variazione delle correnti litoranee (integrata sulla verticale) associate alle diverse condizioni di distribuzione del moto ondoso lungo la fascia litoranea. Per la zona a ponente della diga sopraflutto del porto di Marina di Carrara i campi delle correnti litoranee simulate sono del tutto simili per entrambe le configurazioni (attuale e di PRP). La presenza della diga sopraflutto del porto determina la formazione di una corrente litoranea che si sviluppa in direzione Sud-Est e che raggiunge una velocità massima di circa 1.0 m/s in corrispondenza della testata del molo di sopraflutto.

Nella situazione attuale questa corrente litoranea non interessa la darsena portuale (che risulta ben protetta essendo caratterizzata da velocità di entità del tutto trascurabili); superata la testata di estremità della diga, la corrente litoranea ruota in senso antiorario deflettendosi verso levante e si riduce gradualmente di intensità (con velocità media inferiore a 0,5 m/s). All'altezza della foce del fosso Lavello tende a ricongiungersi alla corrente litoranea che, per la presenza eterogenea delle opere di difesa litoranea presenti (in prevalenza barriere frangiflutti distaccate debolmente emerse), è contraddistinta da un rinforzo della sua intensità raggiungendo nuovamente velocità massime di 1,0 m/s.

Nella configurazione di PRP questa corrente che si instaura a ridosso della diga sopraflutto è del tutto simile a quella della configurazione attuale sino al tratto di prolungamento previsto dal PRP, oltre il quale tende a distaccarsi dalla testata di estremità della diga con una leggera diminuzione delle velocità per deflettere decisamente all'altezza della foce del fosso Lavello combinandosi con una corrente litoranea, che si sviluppa in direzione nord-ovest a ridosso della scogliera radente posta tra il fosso Lavello e la foce del torrente Carrione e che si concentra anche a ridosso del nuovo molo sottoflutto previsto dal PRP. Complessivamente si ha la formazione di un vortice anti-orario che non ha alcun effetto per la parte interna del bacino portuale e, anche in termini di trasporto dei sedimenti in sospensione, non produce alterazioni sostanziali rispetto al pattern attuale.



**Figura 6-1 Moto ondoso [m] – condizioni di Libeccio – evento intenso ( $H_s = 5$  m,  $dir = 240^\circ N$ ,  $T_p = 10.8$  s).  
Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.**



**Figura 6-2 Campo di moto [m/s] – condizioni di Libeccio – evento intenso ( $H_s = 5$  m,  $dir = 240^\circ N$ ,  $T_p = 10.8$  s).  
Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.**

Come riportato in Figura 6-3, Figura 6-4 e Figura 6-5 la distribuzione delle concentrazioni dei sedimenti in sospensione simulate per la configurazione prevista dal PRP non si discosta in modo significativo da quella della situazione attuale.

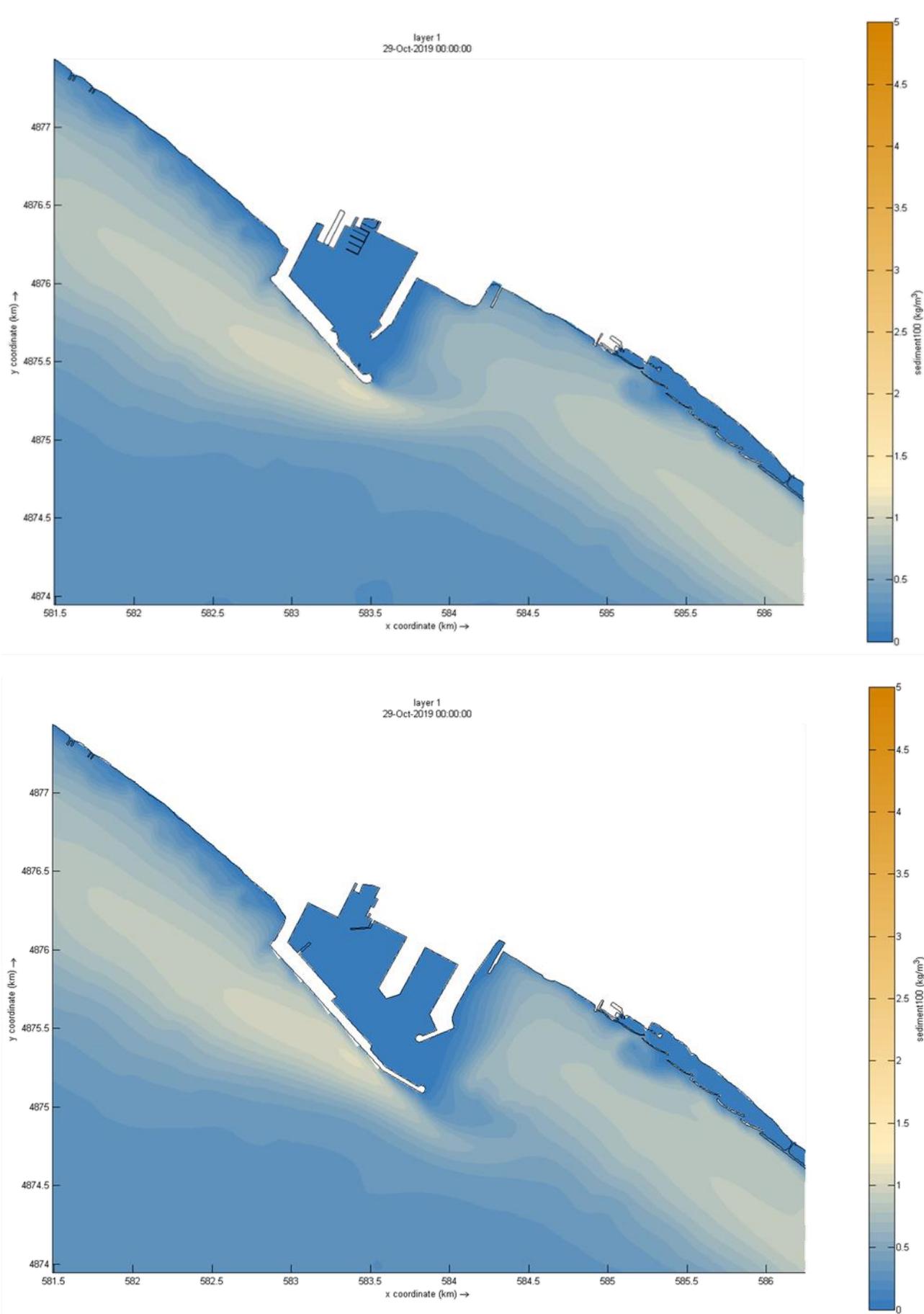
Le simulazioni condotte dimostrano per entrambi gli scenari (attuale e configurazione di PRP) una riduzione del trasporto solido immediatamente a sud della diga di sopraflutto dovuto al suddetto effetto "ombra". Nello scenario di PRP l'area interessata da tale riduzione è maggiore estendendosi sino alla foce del T. Carrione. Ciò conferma che le nuove opere possono contribuire, insieme al nuovo pennello di armatura della foce, peraltro considerato anche nella situazione attuale, ad una riduzione degli attuali fenomeni di trasporto solido associati alla formazione della barra di foce immediatamente antistante la foce.

Anche in termini di trasporto potenziale, come evidenziato nella Figura 6-6, appare evidente che il trasporto solido potenziale, associato al nuovo assetto planimetrico delle opere foranee (come ipotizzato dal PRP) rispetto a quello calcolato per la situazione attuale, è sostanzialmente lo stesso lungo la fascia litoranea posta a ponente del porto di Marina di Carrara mentre a levante si differenzia solo per la zona "schermata" dal prolungamento della diga sopraflutto. Il trasporto solido potenziale risulta più intenso e indirizzato verso sud-est a beneficio della fascia litoranea posta sottoflutto. La ridotta capacità di trasporto solido calcolata in corrispondenza della foce del torrente Carrione, è decisamente maggiore per la situazione attuale e ciò conferma che con la configurazione proposta di PRP si dovrebbe ridurre l'attuale tendenza al deposito dei sedimenti sui fondali prospicienti l'apparato di foce del Carrione che alimentano la formazione della barra di foce. Le simulazioni condotte dimostrano oggettivamente che le variazioni indotte dall'assetto planimetrico delle opere foranee previsto dalla proposta di PRP sono ininfluenti sui processi di morfodinamica del litorale posto a sud della foce del fosso Lavello e, di conseguenza, non interferiscono con le attuali tendenze evolutive del litorale Apuo-Versiliese

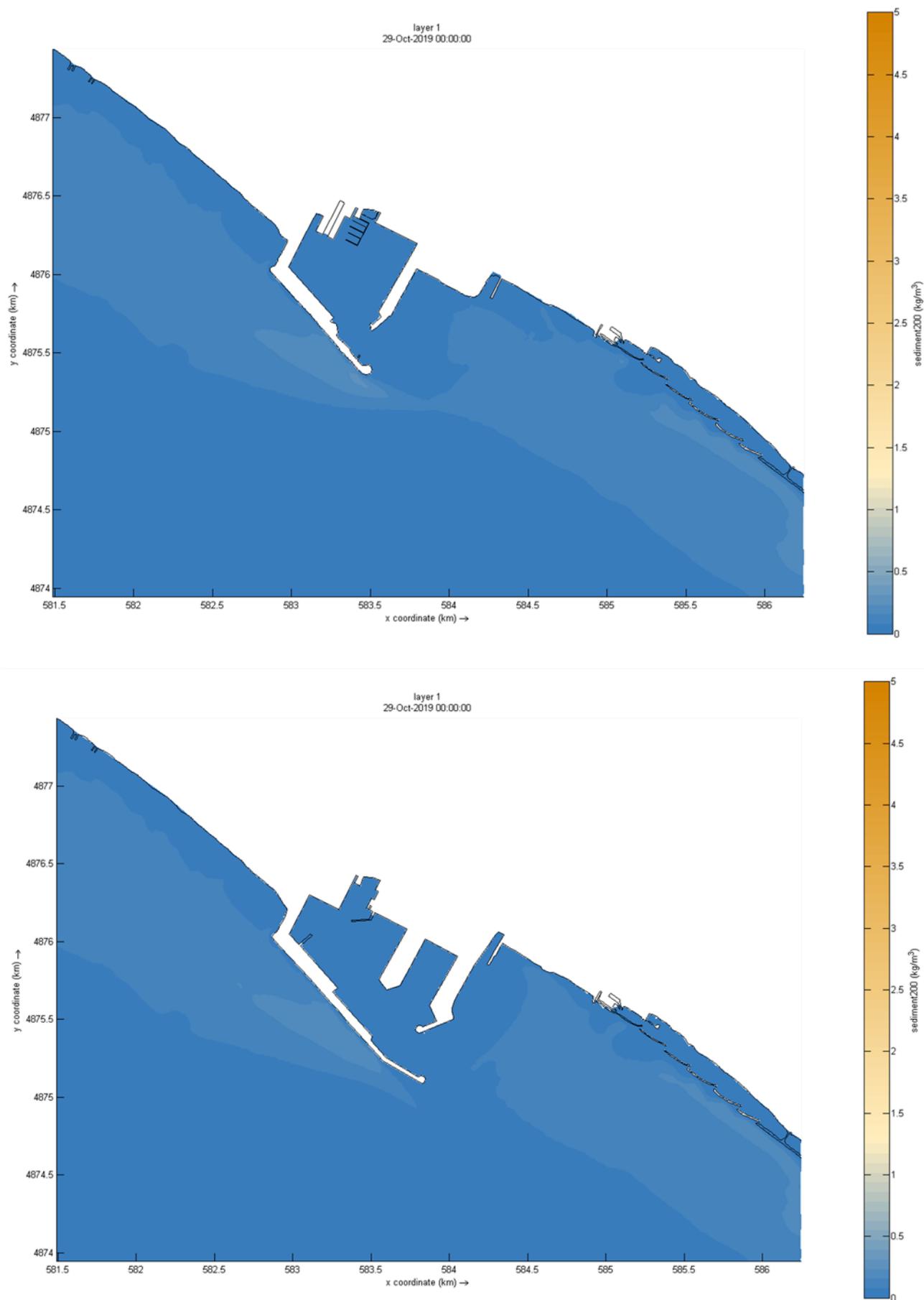
Come evidenziato nella Figura 6-7, dove sono riportati i ratei di sedimentazione ed erosione lungo i fondali del dominio di calcolo, appare evidente che l'unica sostanziale differenza introdotta dall'assetto planimetrico delle opere foranee della proposta di PRP rispetto a quello attuale si verifica solo per il tratto di prolungamento della diga di sopraflutto e nella zona più prossima compresa tra l'imboccatura portuale della proposta di PRP e la foce del torrente Carrione.

In sostanza si può confermare con dati oggettivi che l'assetto planimetrico delle opere foranee del Porto di Marina di Carrara previsto dalla proposta PRP introduce lievi modifiche sul trasporto solido potenziale e sul relativo bilancio litoraneo comunque contenute in un intorno molto prossimo alle zone di avamposto e imboccatura.

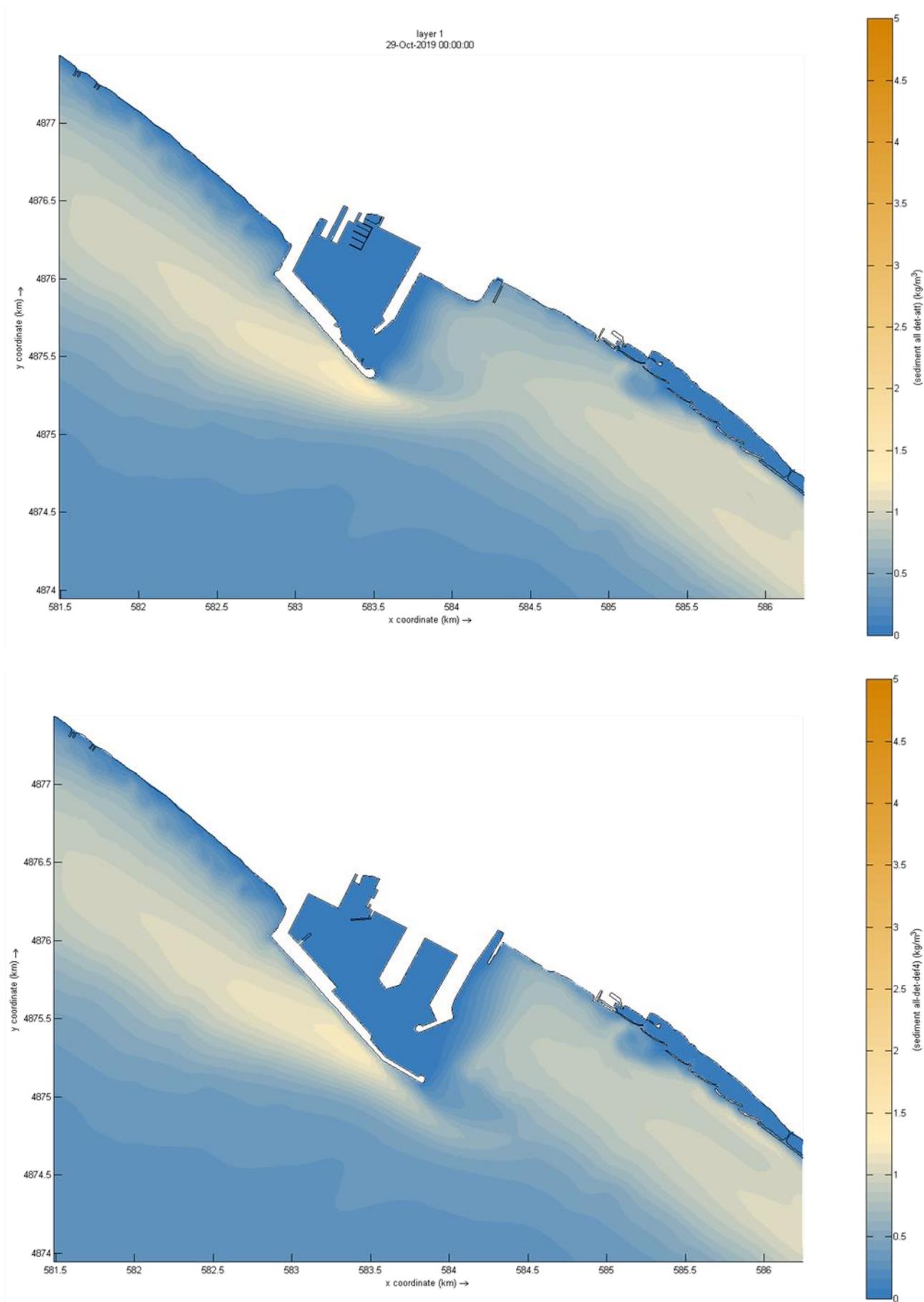
In particolare, per la zona posta sottoflutto al porto a partire dalla foce del fosso Lavello, la situazione in presenza delle opere foranee previste dalla proposta di PRP (prolungamento della diga di sopraflutto e nuovo molo sottoflutto in destra idraulica del Carrione) di fatto, per le finalità di analisi su scala ampia, rimane immutata rispetto a quella attuale in termini di trasporto solido litoraneo d'insieme nel medio e lungo termine. L'insieme delle simulazioni condotte indica che le suddette opere foranee portuali di PRP non sono in contrasto con gli obiettivi dei nuovi interventi di riqualificazione e salvaguardia in fase di pianificazione da parte del Comune di Massa, articolati in ripascimenti eventualmente combinati alla riqualificazione di alcune delle scogliere esistenti, proprio perché non introducono variazioni apprezzabili sui processi di trasporto e bilancio solido a sud-est del fosso Lavello.



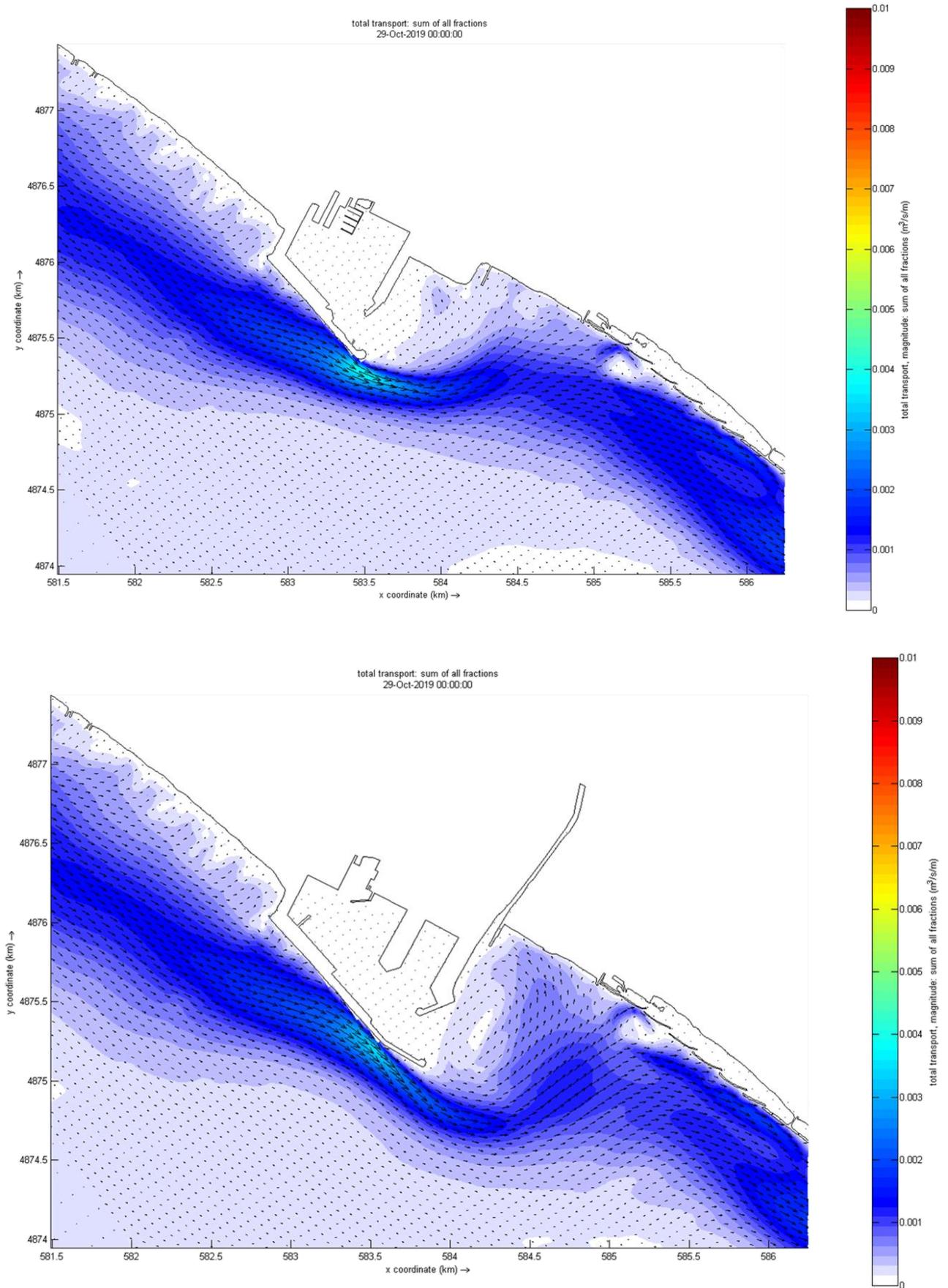
**Figura 6-3 Sedimenti in sospensione – frazione 100 µm [kg/m<sup>3</sup>]**  
**condizioni di Libeccio – evento intenso (Hs = 5 m, dir = 240°N, Tp = 10.8 s).**  
**Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta di PRP.**



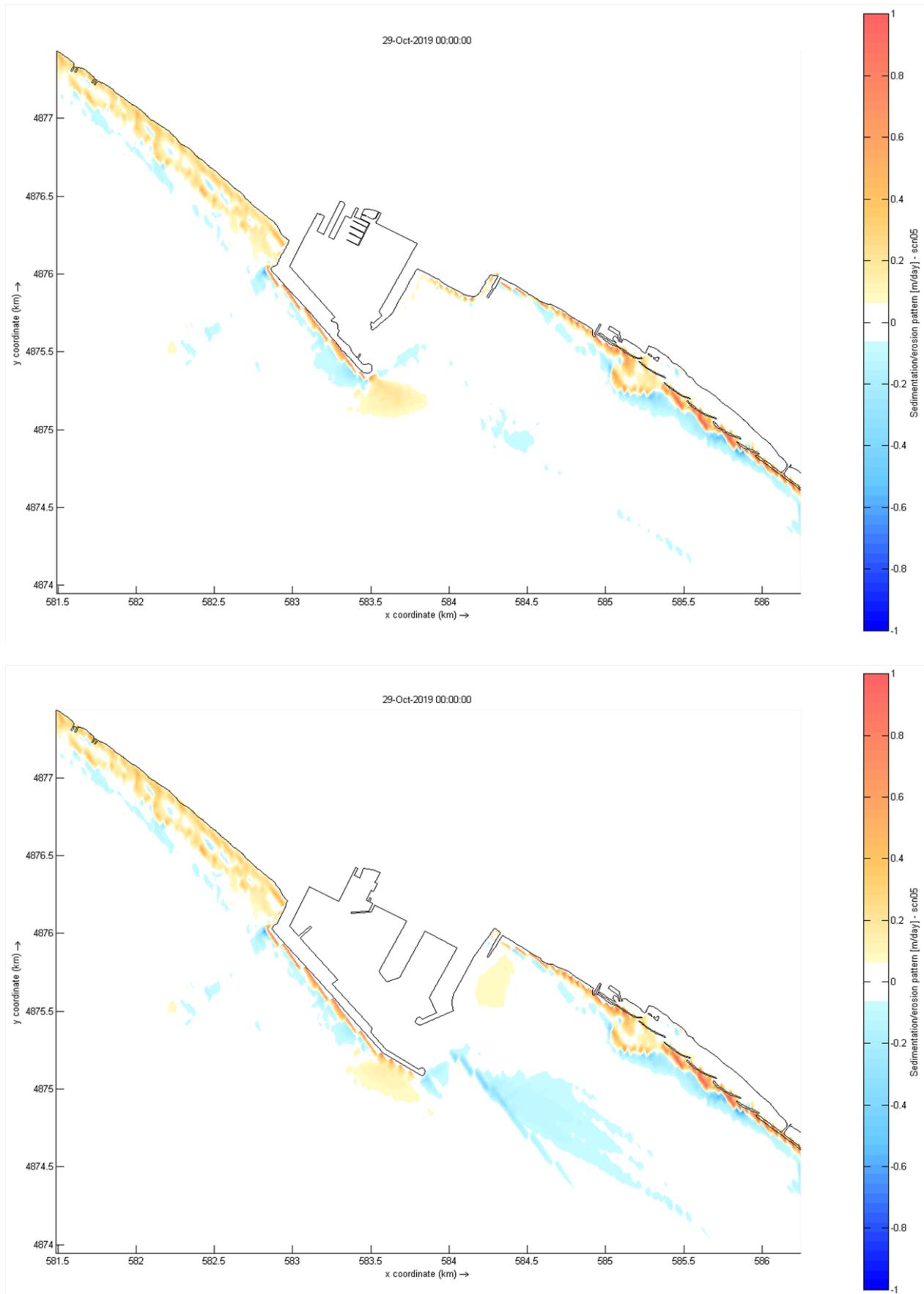
**Figura 6-4 Sedimenti in sospensione – frazione 200 µm [kg/m³]**  
**condizioni di Libeccio – evento intenso (Hs = 5 m, dir = 240°N, Tp = 10.8 s).**  
**Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta di PRP.**



**Figura 6-5 Sedimenti in sospensione ( $100 + 200 \mu\text{m}$ ) [ $\text{kg/m}^3$ ]  
condizioni di Libeccio – evento intenso ( $H_s = 5 \text{ m}$ ,  $\text{dir} = 240^\circ\text{N}$ ,  $T_p = 10.8 \text{ s}$ ).  
Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta di PRP.**



**Figura 6-6** Trasporto potenziale [m<sup>3</sup>/s/m] – condizioni di Libeccio – evento intenso (Hs = 5 m, dir = 240°N, Tp = 10.8 s).  
Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta di PRP.



**Figura 6-7** Ratei di sedimentazione/erosione [m/gg]  
condizioni di Libeccio – evento intenso ( $H_s = 5$  m,  $dir = 240^\circ N$ ,  $T_p = 10.8$  s).  
Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta di PRP.

## Capitolo 7 Modellazioni della morfodinamica con eventi di piena del Carrione

### 7.1 Gli scenari di studio simulati

Un ulteriore set di modellazioni numeriche ha riguardato la simulazione delle possibili interferenze degli eventi di piena significativa del Torrente Carrione sulla morfodinamica litoranea in termini di circolazione idrodinamica e di trasporto dei sedimenti di origine fluviale.

Per queste analisi si è fatto riferimento a due scenari rappresentativi degli eventi di piena del Torrente Carrione nell'ipotesi realistica che questi siano associati alla presenza di una perturbazione meteorologica dell'area in grado di determinare una concomitante mareggiata, proveniente da Libeccio oppure da Scirocco, significativa per la morfodinamica del litorale.

Per i due scenari identificati, come forzante mareale si è considerata una variazione sinusoidale del livello marino con periodo di 12 ore ed escursione di 20 cm (+/- 10 cm l.m.m.), applicata come condizione al contorno lungo il limite esterno (lato mare) del dominio di calcolo.

Le simulazioni condotte hanno riguardato un arco temporale di 48 ore con avvio da uno stato già in equilibrio dinamico (24 ore per l'evento di piena e 24 per la fase di esaurimento della piena) al fine di assicurare una adeguata simulazione dei processi di dispersione e la deposizione dei sedimenti trasportati dal Carrione lungo la fascia litoranea.

Nella Tabella 7-1 vengono riassunte le due condizioni meteo-marine di mareggiata considerate per gli scenari simulati in termini di "forzanti" di moto ondoso e vento.

Scenario	Configurazione planimetrica	Onda	Vento
Libeccio	- Attuale - Proposta di PRP	Hs = 3.50 m Dir = 225°N Tp = 10.4 s	Vv = 11.0 m/s Dv = 224°N
Scirocco	- Attuale - Proposta di PRP	Hs = 2.00 m Dir = 165°N Tp = 8.0 s	Vv = 9.0 m/s Dv = 130°N

Tabella 7-1 Condizioni al contorno applicate per ogni scenario

Per il Torrente Carrione si è considerata una portata in efflusso alla sezione di foce caratteristica di un evento di piena annuale e con un valore al colmo pari a 80 m<sup>3</sup>/s, valore rappresentativo della portata in grado di defluire in sicurezza nel tratto cittadino nelle condizioni attuali come riportato nello studio dell'Università di Genova. [4]

L'idrogramma di piena riportato in Figura 7-1 è stato definito sulla base degli studi idrologici elaborati dal DICCA di Genova mantenendo la stessa forma [4] (vedi Paragrafo 2.5).

La concentrazione dei solidi in sospensione è stata definita sulla base degli studi eseguiti dal Servizio Idrologico Regionale della Toscana (vedi Paragrafo 2.5) che indicano per le concentrazioni dei solidi in sospensione lungo i torrenti\fiumi dell'unità fisiografica Toscana Nord valori variabili nel range di 0.1 – 5 g/l ed un fuso granulometrico composto per il 15% da sedimento fine coesivo e per il restante 85% da sabbie sottili.

Di conseguenza per la valutazione della dispersione dei sedimenti in sospensione apportati dai corsi d'acqua si sono considerati due tipi sedimenti, uno coesivo (Sed1) rappresentativo del limo

grossolano con  $D_{50}=30\ \mu\text{m}$  e un altro non-coesivo (Sed2) rappresentativo della sabbia molto fine con  $D_{50}=100\ \mu\text{m}$ .

Nelle simulazioni non si sono considerati i sedimenti di maggiore pezzatura (sabbie grossolane, ghiaie e ciottoli) perché, essendo contraddistinti da velocità di sedimentazione significative, tendono a depositarsi a poche decine di metri dall'apparato di foce, dove la spinta idrodinamica del corso d'acqua è ormai trascurabile rispetto a quella delle correnti litoranee.

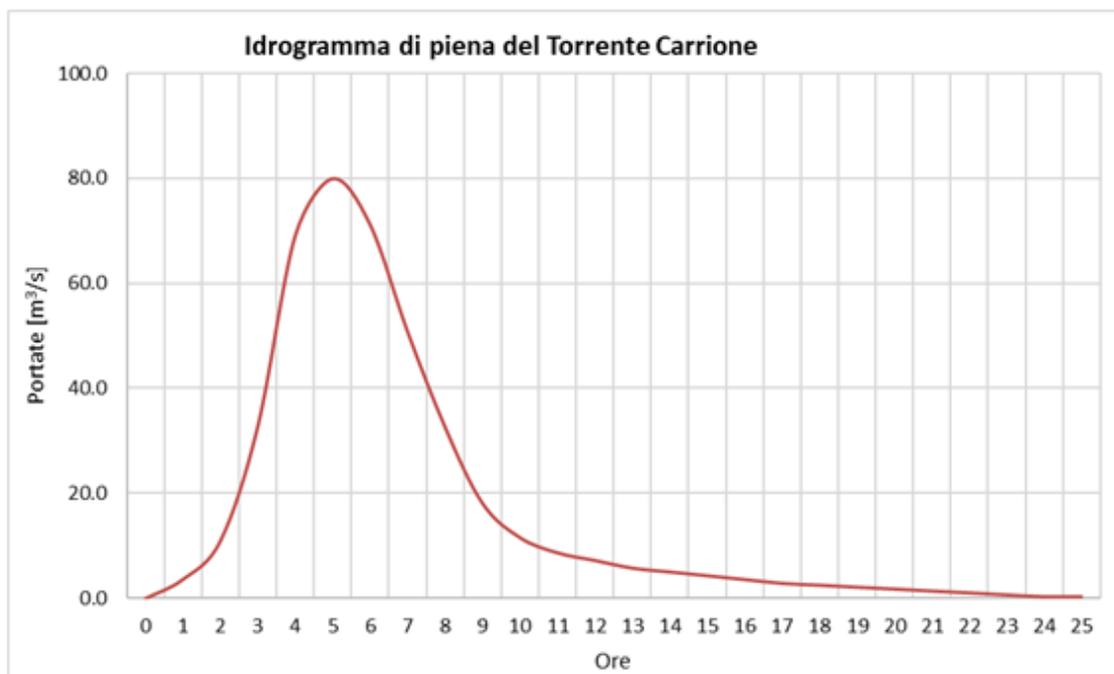


Figura 7-1 Idrogramma di piena del Torrente Carrione.

Oltre al Torrente Carrione, sono stati considerati anche i deflussi dei principali corsi d'acqua sfocianti nel dominio di studio ma soltanto per quanto riguarda la portata liquida come riportato nella Tabella 7-2.

Torrente \ fiume	Portata liquida al colmo	Concentrazione Sed1 ( $D_{50}=30\ \mu\text{m}$ )	Concentrazione Sed2 ( $D_{50}=100\ \mu\text{m}$ )
Torrente Carrione	da idrogramma	0.15 kg/m <sup>3</sup>	0.85 kg/m <sup>3</sup>
Fiume Magra	100 m <sup>3</sup> /s	0 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>
Fiume Serchio	100 m <sup>3</sup> /s	0 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>
Fiume Arno	1000 m <sup>3</sup> /s	0 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>

Tabella 7-2 Portate e concentrazioni dei sedimenti considerate nelle simulazioni.

## 7.2 Analisi dei risultati delle simulazioni

Nei paragrafi seguenti sono riportati i risultati delle simulazioni condotte per i diversi scenari presi in considerazione al fine di valutare l'effetto combinato degli eventi di piena del torrente Carrione concomitanti con gli stati di mare più significativi per il sito in esame sul campo idrodinamico litoraneo e sulla conseguente dispersione dei sedimenti in sospensione associati alla corrente di piena del corso d'acqua.

### 7.2.1 Scenario con piena del torrente Carrione e mareggiata da Libeccio

L'analisi di questo scenario è di particolare rilevanza perché rappresentativo dell'elevata probabilità che le piene del torrente Carrione siano concomitanti con gli stati di mare provenienti dal terzo quadrante (libeccio) ed associati alle perturbazioni meteorologiche che solitamente contraddistinguono il tirreno settentrionale.

L'analisi della propagazione del moto ondoso riportata in Figura 7-2, conferma quanto già evidenziato nel capitolo precedente in merito alle condizioni di esposizione ondosa per una mareggiata proveniente da Libeccio, anche se in quel caso contraddistinte da parametri rappresentativi del moto ondoso (Hs e Tp) più intensi.

Come già evidenziato la realizzazione delle opere foranee prevista nella configurazione proposta di PRP del porto di Marina di Carrara (prolungamento della diga di sopraflutto e nuovo molo sottoflutto in destra idraulica del Carrione) tendono a porre la foce del torrente in una zona d'ombra rispetto al moto ondoso proveniente da levante e libeccio, rendendo di conseguenza il suo deflusso idraulico alla foce meno dipendente da condizioni di esposizione diretta al moto ondoso (nella situazione attuale la foce è mediamente "esposta" ad un'onda di altezza di circa 1.5 m).

Dall'analisi dei campi di velocità delle correnti litoranee riportati in Figura 7-3 (istante di massimo deflusso di piena) è possibile osservare la formazione di una corrente litoranea che si sviluppa lungo la linea di costa a Sud-Est del porto, in corrispondenza dei frangiflutti a difesa del litorale (dighe parallele alla linea di riva), che, una volta compiutamente sviluppatasi, raggiunge velocità anche superiori a 0.6 m/s. Questa corrente, presente sia nella situazione attuale che nella configurazione prevista dal PRP, di fatto è rappresentativa di uno stato di mare ordinario (con frequenza annuale) a prescindere dalla presenza del porto.

Complessivamente si riscontrano:

- a partire dall'attuale molo sopraflutto del porto di Marina di Carrara, procedendo verso nord-ovest, si ha la presenza di un sistema molto eterogeneo delle correnti di moto ondoso (con velocità mediamente comprese tra 0,2 e 0,4 m/s e valori massimi comunque inferiori a 0,7 m/s in corrispondenza del gomito di radicamento dell'esistente molo di sopraflutto), con molteplici circolazioni e divagazioni locali, che comunque presentano un pattern sostanzialmente identico per le due configurazioni portuali simulate (situazione attuale e configurazione di PRP);
- analogamente, procedendo a levante del porto e più precisamente a sud-est della foce del fosso Lavello le correnti litoranee sono molto eterogenee, essendo condizionate dalla presenza delle opere di difesa litoranea (in prevalenza barriere frangiflutti distaccate debolmente emerse) con intensità delle velocità anche sino a 1,0 m/s, ma sono praticamente le stesse per entrambi gli scenari simulati (situazione attuale e configurazione di PRP);
- diversamente, per il tratto di litorale compreso tra la foce del torrente Carrione e il fosso Lavello la configurazione proposta di PRP rispetto a quella attuale, introducendo con il

prolungamento del molo sopraflutto una “zona d’ombra” nei confronti degli stati di mare da libeccio, è associata alla presenza di una corrente localizzata, diretta verso nord-ovest e sostanzialmente in aderenza alla scogliera radente posta tra il Carrione e il Lavello.

Questa combinazione di fattori innesca la presenza di un vortice locale antiorario compreso tra la nuova imboccatura del porto e il fosso Lavello il cui effetto è reso ancora più evidente prendendo in considerazione i fenomeni di dispersione dei sedimenti in sospensione.

Nella Figura 7-4 sono riportate le concentrazioni dei sedimenti in sospensione (nell’istante di massimo deflusso di piena) per la frazione più fine dei sedimenti ( $D_{50} = 30 \mu\text{m}$ ) che il Carrione, in regime di piena, può trasportare anche in grande quantità determinando la formazione del cosiddetto “plume di torbida” che si disperde in mare sotto l’azione delle correnti litoranee. Il plume di questi sedimenti simulato per la configurazione attuale del porto, è sostanzialmente trattenuto dall’azione del moto ondoso e delle correnti lungo la linea di costa, tanto da rendere secondaria la presenza del molo di armatura a sud della foce del Carrione, seguendo un flusso di trasporto e dispersione parallelo alla costa verso sud-est.

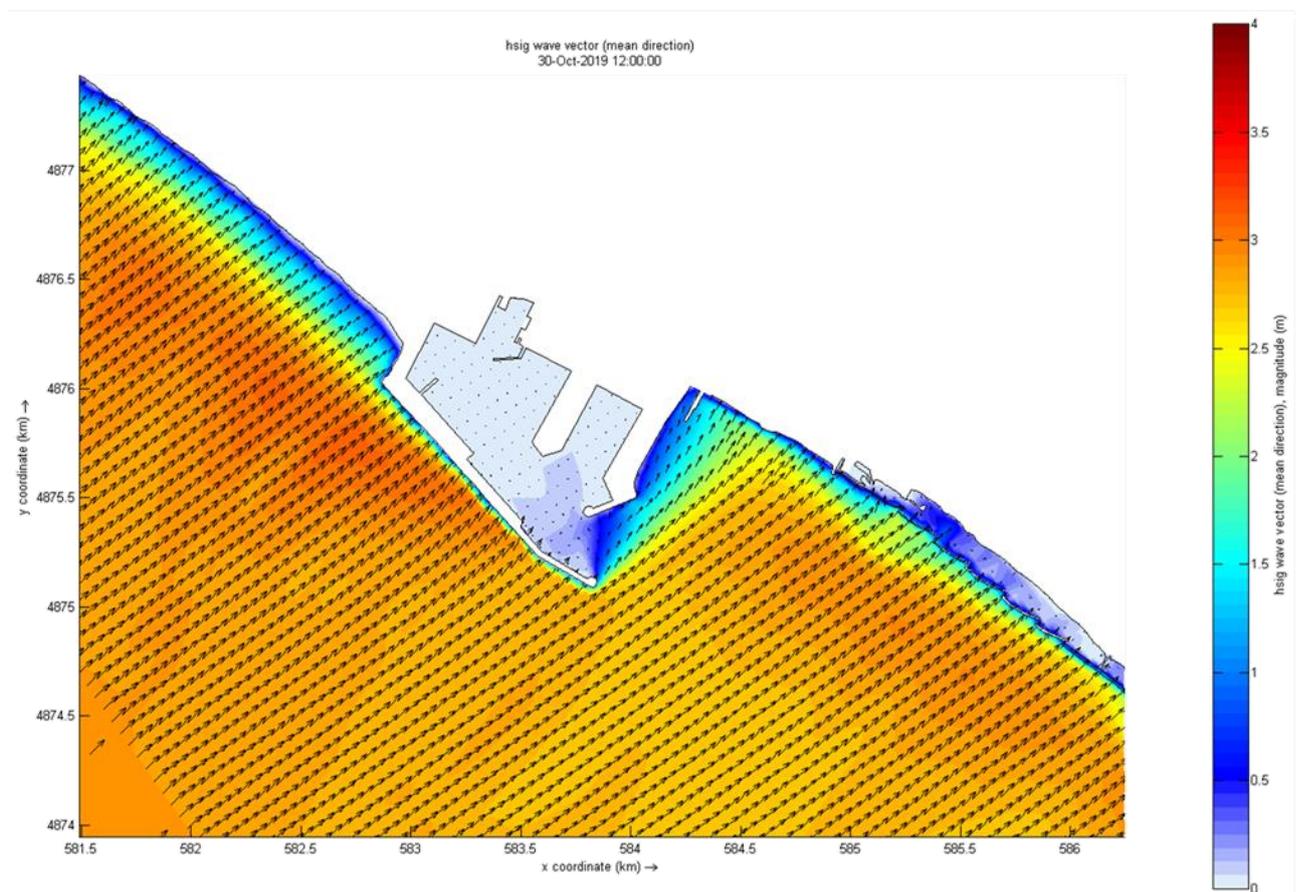
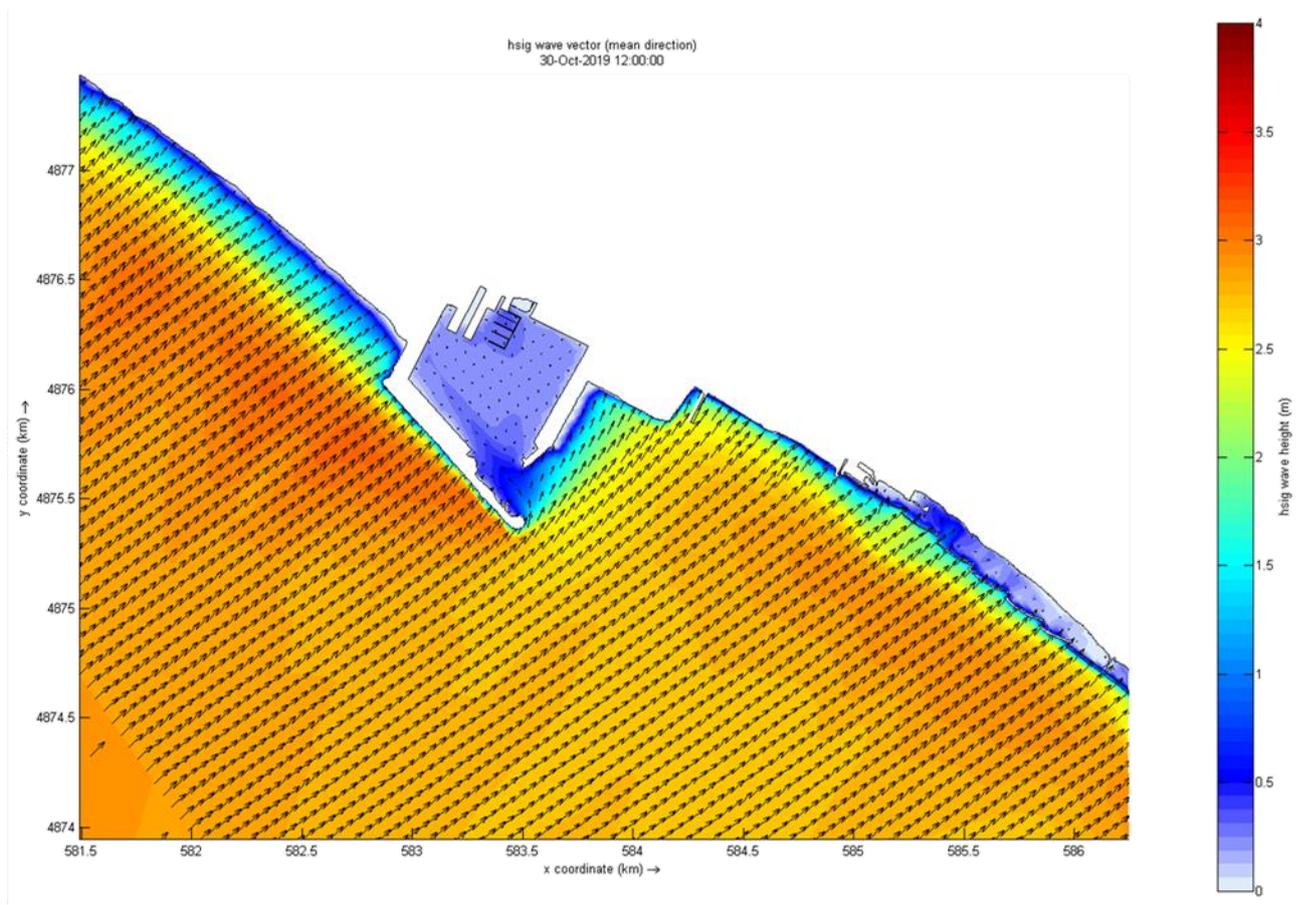
Nella simulazione condotta per la configurazione di PRP, invece, la presenza del prolungamento della diga di sopraflutto e della nuovo molo di sottoflutto combinati al pennello di armatura in sinistra idraulica del Carrione, favoriscono il confinamento e la veicolazione del plume dalla sezione di foce verso il largo, in aderenza con il nuovo molo di sottoflutto, per essere poi deviato e disperso, dal vortice descritto in precedenza, nuovamente verso la linea di costa rimanendo comunque sostanzialmente confinato tra la foce del Carrione e quella del Lavello.

Ben diversa è la situazione che si viene a creare per sedimenti con un  $D_{50}$  pari a  $100 \mu\text{m}$  e la cui distribuzione delle concentrazioni viene riportata in Figura 7-5. In questo secondo caso risulta evidente come i sedimenti tendano a depositarsi nella zona di foce o immediatamente a ridosso di questa e di conseguenza non si forma un plume di torbidità ampio come il precedente. Ciononostante, per la situazione attuale, è visibile un comportamento analogo a quello dei sedimenti più fini, anche se con concentrazioni estremamente più limitate, con un plume che, immediatamente fuori dal pennello di foce, viene trasportato lungo la linea di riva per la configurazione attuale mentre per la configurazione proposta di PRP, sempre in ragione della presenza del vortice di cui sopra, il plume è diretto verso il largo, confinato tra il nuovo molo sottoflutto ed il pennello in sinistra idraulica, esaurendosi in un breve tratto.

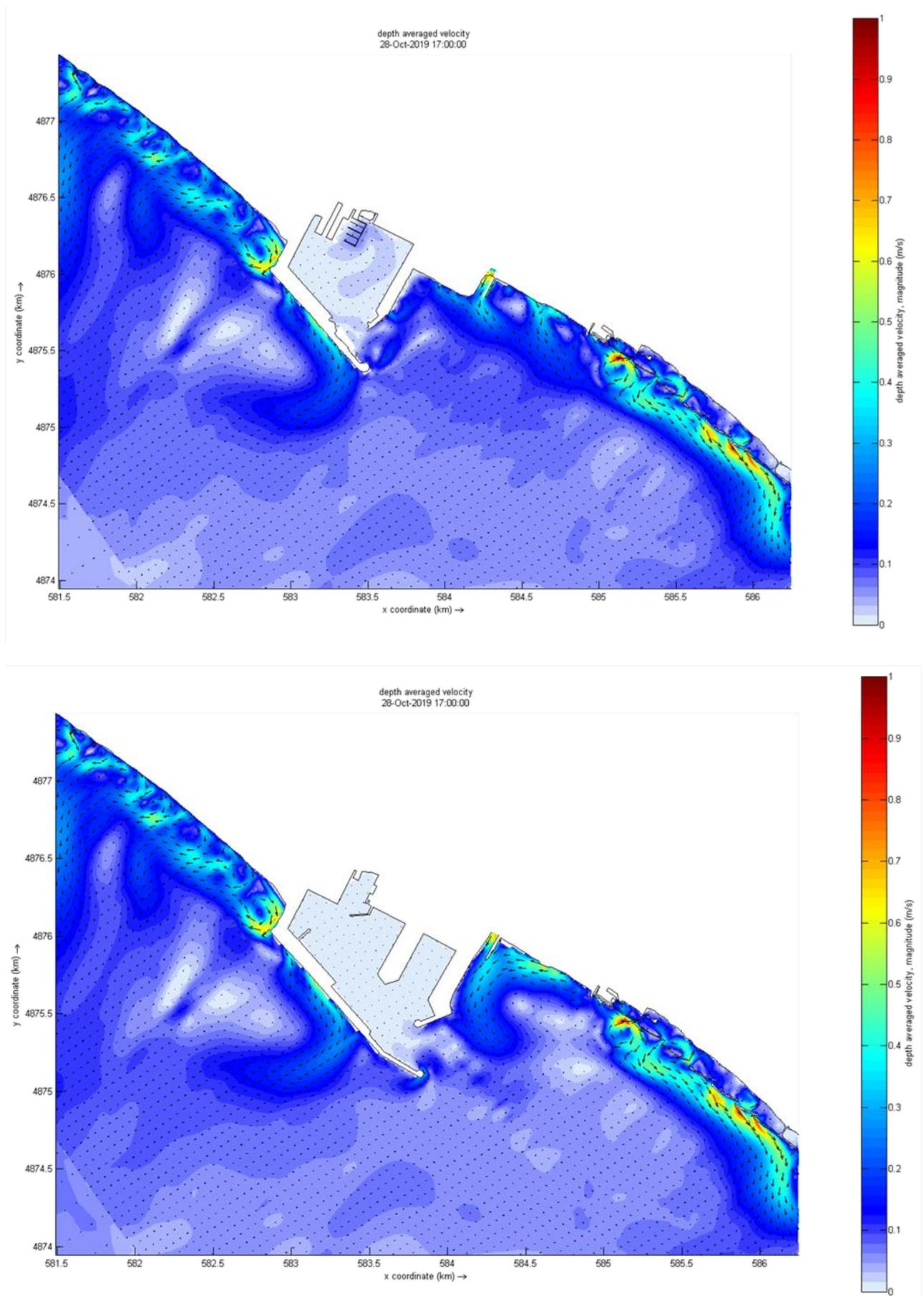
In Figura 7-6 sono presentate le mappe di sedimentazione cumulata calcolate alla fine delle simulazioni considerando la somma delle due frazioni di sedimenti per le due configurazioni analizzate. Si osserva che nella situazione attuale i sedimenti tendono a depositarsi in aderenza alla fascia litoranea prospiciente la difesa radente presente tra il Carrione ed il Lavello; una frazione significativa è trasportata verso sud-est alimentando in parte le spiagge più a sud confluendo all’intero delle “celle litoranee” costituite dalle difese costiere. Invece, nella configurazione di PRP, i sedimenti trasportati dal vortice circolatorio tendono a depositarsi in buona parte lungo il molo di sottoflutto. Parte di questi si ridistribuiscono principalmente lungo i fondali prospicienti la difesa radente tra il fosso Lavello e il torrente Carrione interessando in misura minore anche l’imboccatura portuale. In modo del tutto simile alla configurazione attuale i sedimenti trasportati verso sud-est presentano lo stesso pattern di sedimentazione all’intero delle celle litoranee.

In relazione al singolo evento di piena si osserva che il tasso di sedimentazione cumulato nell’area adiacente il nuovo molo di sottoflutto ed esterna all’alveo del torrente, è nell’ordine di 0 – 5

kg/m<sup>2</sup> per la configurazione di PRP mentre è trascurabile per la situazione attuale. Al riguardo è importante considerare che il materiale depositato è costituito in larga parte dalla frazione più fine mentre la frazione più grossolana ha una limitata capacità di dispersione e rimane confinata in prossimità della foce. In riferimento a questo scenario, per entrambe le configurazioni i tassi di sedimentazione in prossimità dell'imboccatura portuale sono trascurabili con valori leggermente superiori per la configurazione di PRP comunque dell'ordine di 0-1 kg/m<sup>2</sup>. In prossimità della foce del torrente Carrione i valori sono cautelativamente pari a 5 kg/m<sup>2</sup> cui corrisponde un contenuto volumetrico comunque trascurabile in termine di riduzione della sezione idraulica della foce.



**Figura 7-2 Moto ondoso [m] –**  
condizioni di Libeccio ( $H_s = 3.5$  m,  $dir = 225^\circ N$ ,  $T_p = 10.4$  s), piena del Carrione TR = 1 anno.  
Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.



**Figura 7-3 Campo di moto [m/s] – condizioni di Libeccio ( $H_s = 3.5$  m,  $dir = 225^\circ N$ ,  $T_p = 10.4$  s), piena del Carrione  $TR = 1$  anno. Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.**

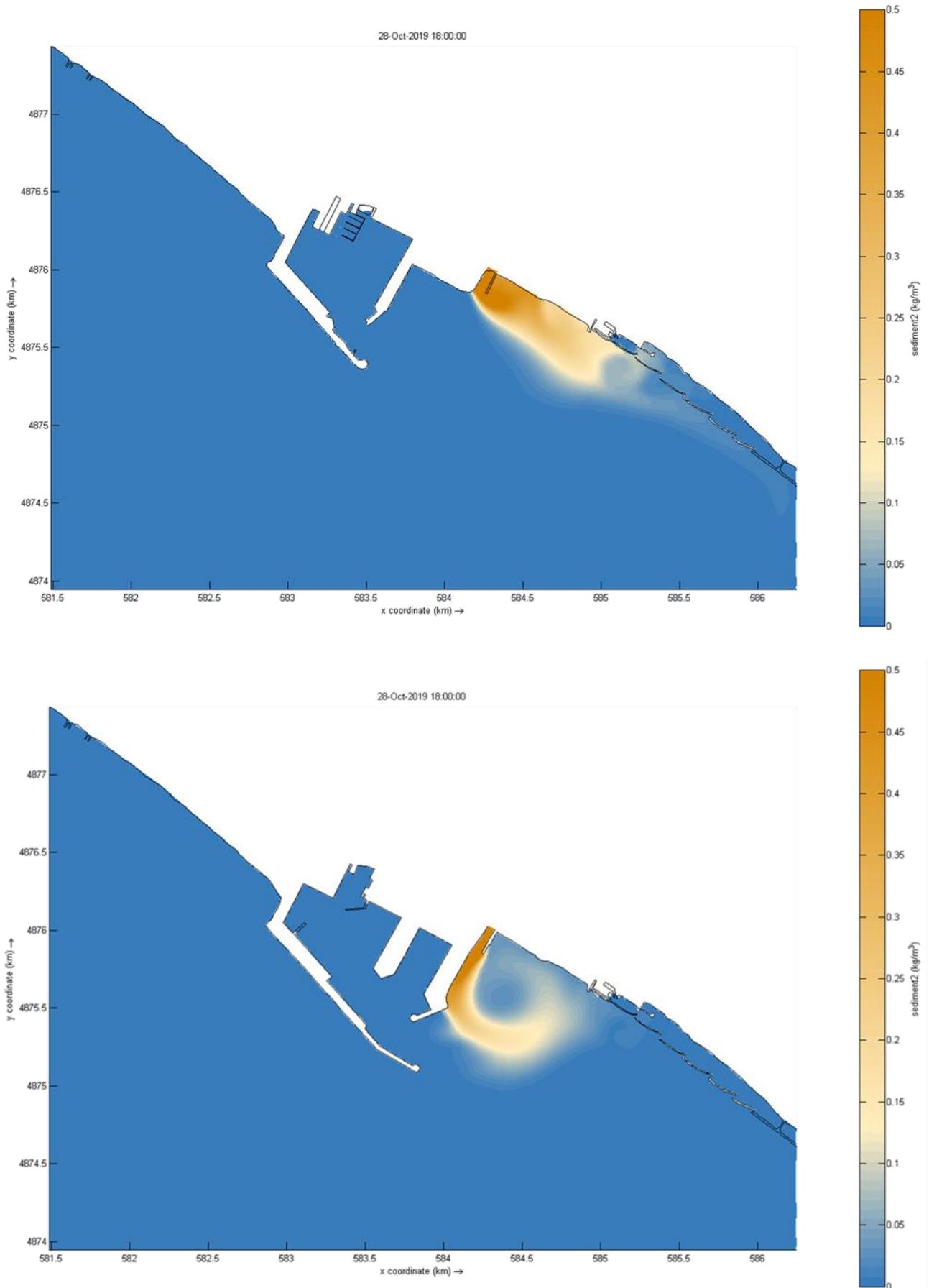
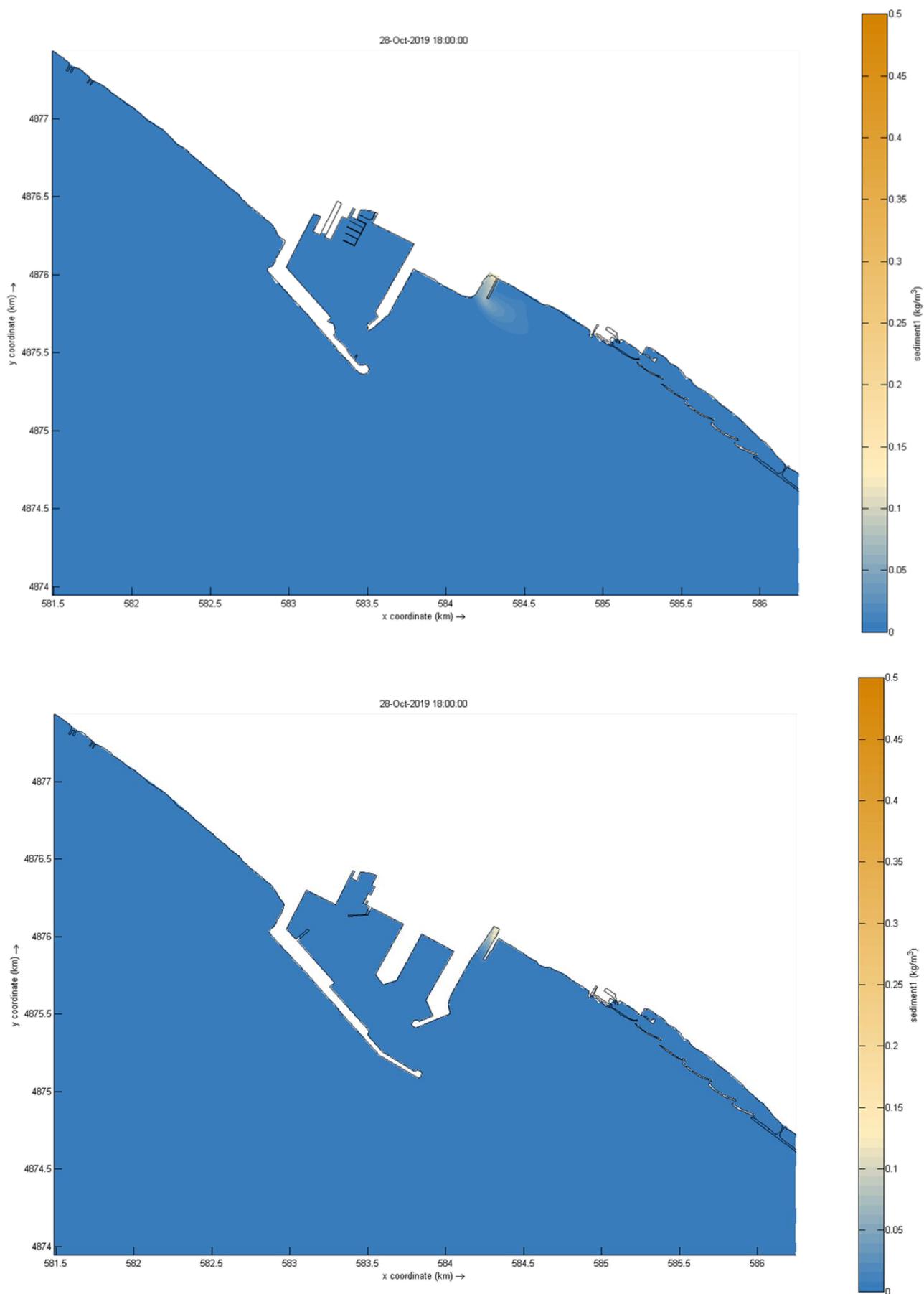
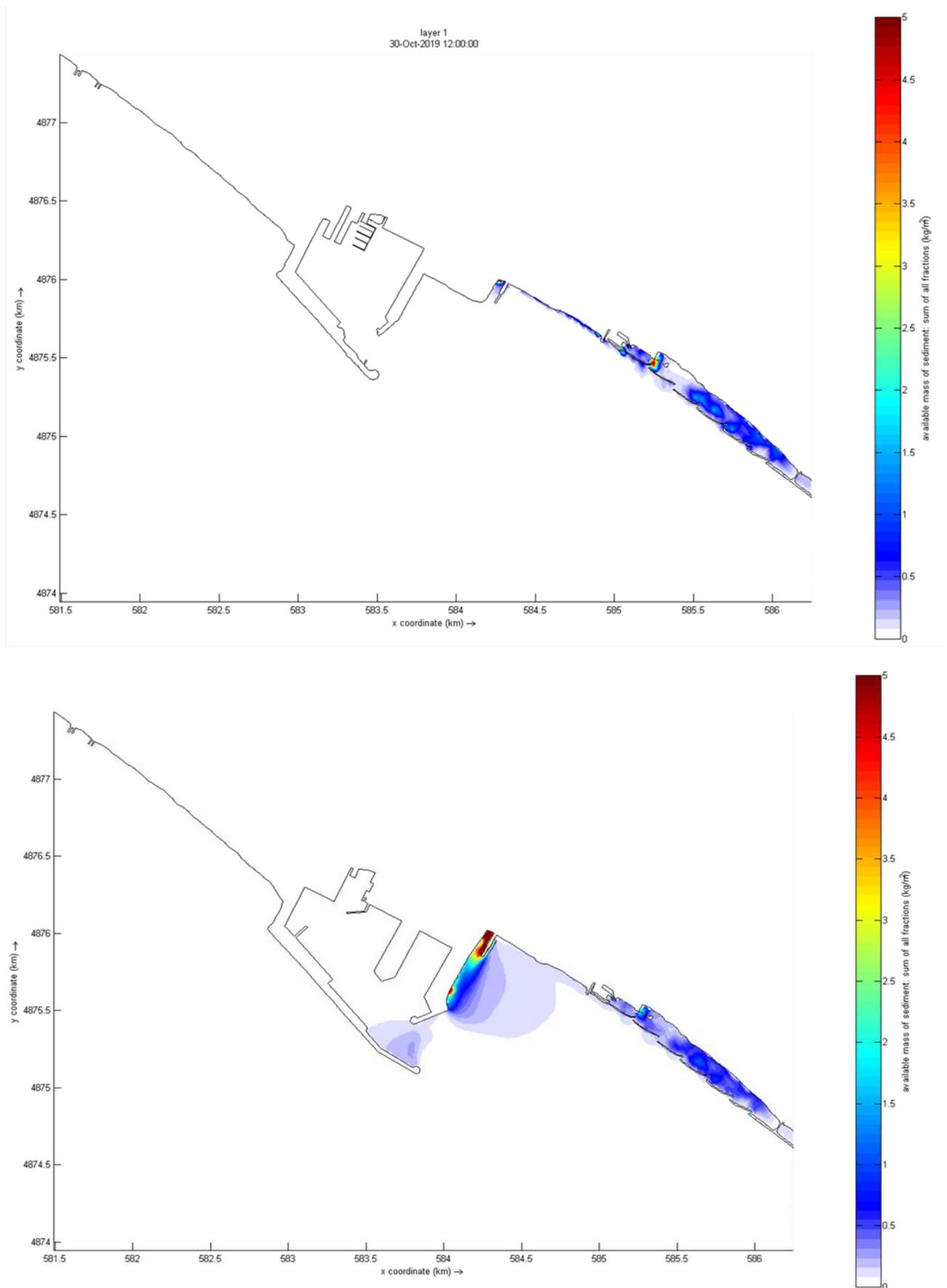


Figura 7-4 Sedimenti in sospensione – frazione 30  $\mu\text{m}$  [kg/m<sup>3</sup>] – condizioni di Libeccio e piena del Carrione TR = 1 anno. Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.



**Figura 7-5 Sedimenti in sospensione – frazione 100 µm [kg/m³] – condizioni di Libeccio e piena del Carrione TR = 1 anno. Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.**



**Figura 7-6 Sedimentato totale [kg/m<sup>2</sup>] – condizioni di Libeccio e piena del Carrione TR = 1 anno.  
Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.**

## 7.2.2 Scenario con piena del Carrione e mareggiata da Scirocco

La mareggiata di Scirocco ha effetti molto diversi rispetto a quella di Libeccio perché oltre ad essere associata ad una forzante di moto ondoso di minore intensità ha una direzione di provenienza tale che le opere foranee esterne realizzano una zona d'ombra molto più limitata in corrispondenza della foce del Carrione. Quindi gli effetti indotti sia sul moto ondoso (Figura 7-7) che sulle correnti litoranee sono simili tra la configurazione attuale e quella prevista dal PRP (Figura 7-8).

Le simulazioni condotte evidenziano che le mareggiate da Scirocco hanno un effetto limitato sulle correnti litoranee che si generano a sud-est, mentre per il tratto di costa immediatamente a nord-ovest dello stesso si genera una corrente litoranea diretta verso ponente che anche in presenza delle opere previste dal PRP non varia rispetto alla situazione attuale.

Leggere differenze si osservano solo per il campo di correnti nella zona adiacente il nuovo molo di sottoflutto previsto dalla configurazione proposta di PRP, anche se in entrambi i casi le velocità di mantengono sostanzialmente basse ed inferiori a 0.3 m/s.

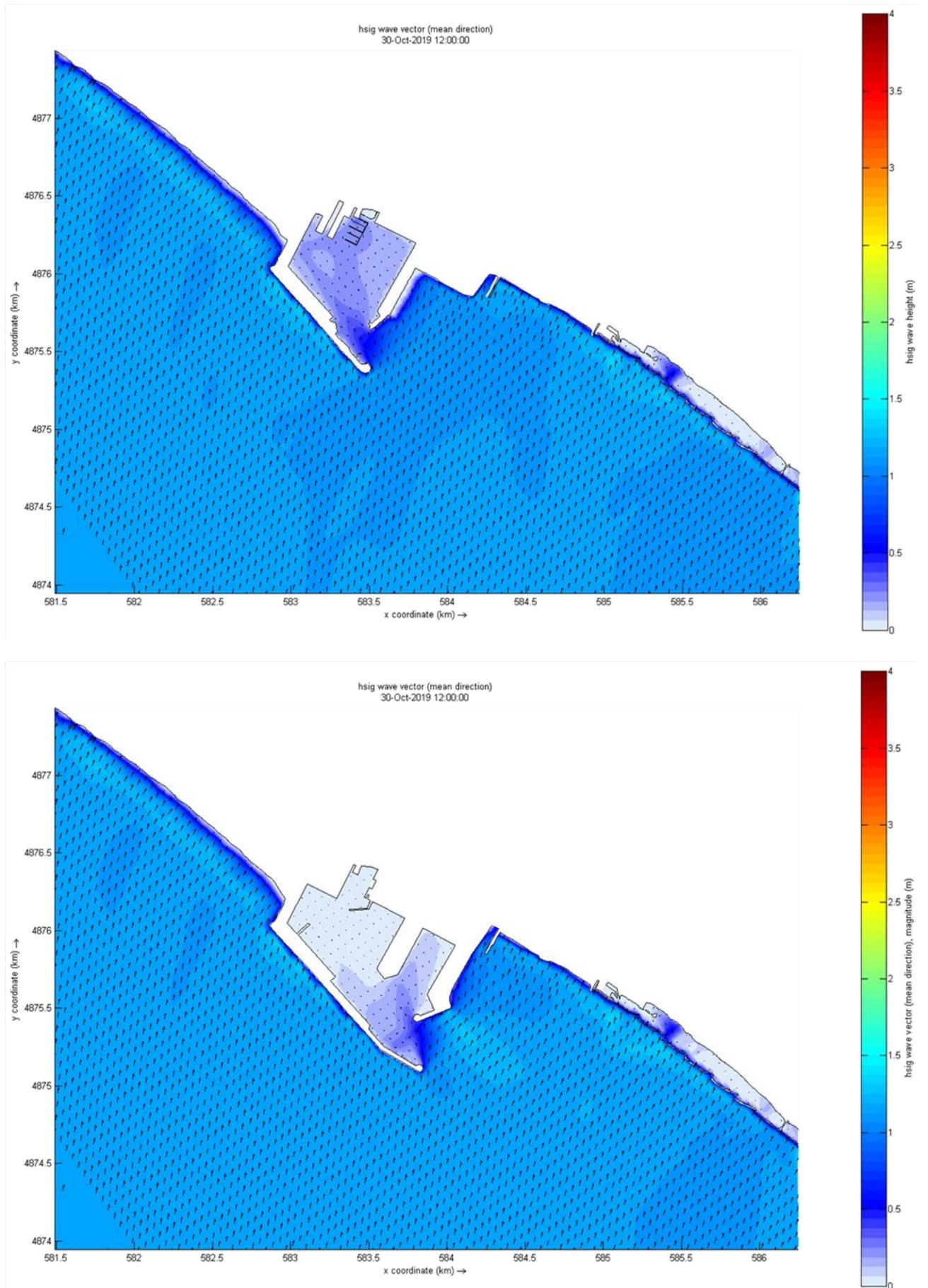
In relazione alle mappe della concentrazione di sedimenti in sospensione, riportata in Figura 7-9 per quanto riguarda la frazione 30  $\mu\text{m}$  e nella Figura 7-10 per la frazione 100  $\mu\text{m}$ , si osserva come il plume dei sedimenti più fini si mantenga parallelo al nuovo molo di sottoflutto della configurazione proposta di PRP e si propaghi verso il largo oltrepassando l'imboccatura del porto. Nella situazione attuale il plume tende ad essere deviato verso nord-est interessando l'imboccatura del porto in misura maggiore rispetto alla configurazione di PRP.

Per quanto riguarda il plume dei sedimenti con diametro maggiore, valgono le considerazioni fatte in precedenza per la mareggiata di Libeccio: i sedimenti tendono a depositarsi sui fondali prospicienti la foce del torrente Carrione, comunque con tassi di deposizione trascurabili e non in grado di condizionarne la sezione idraulica.

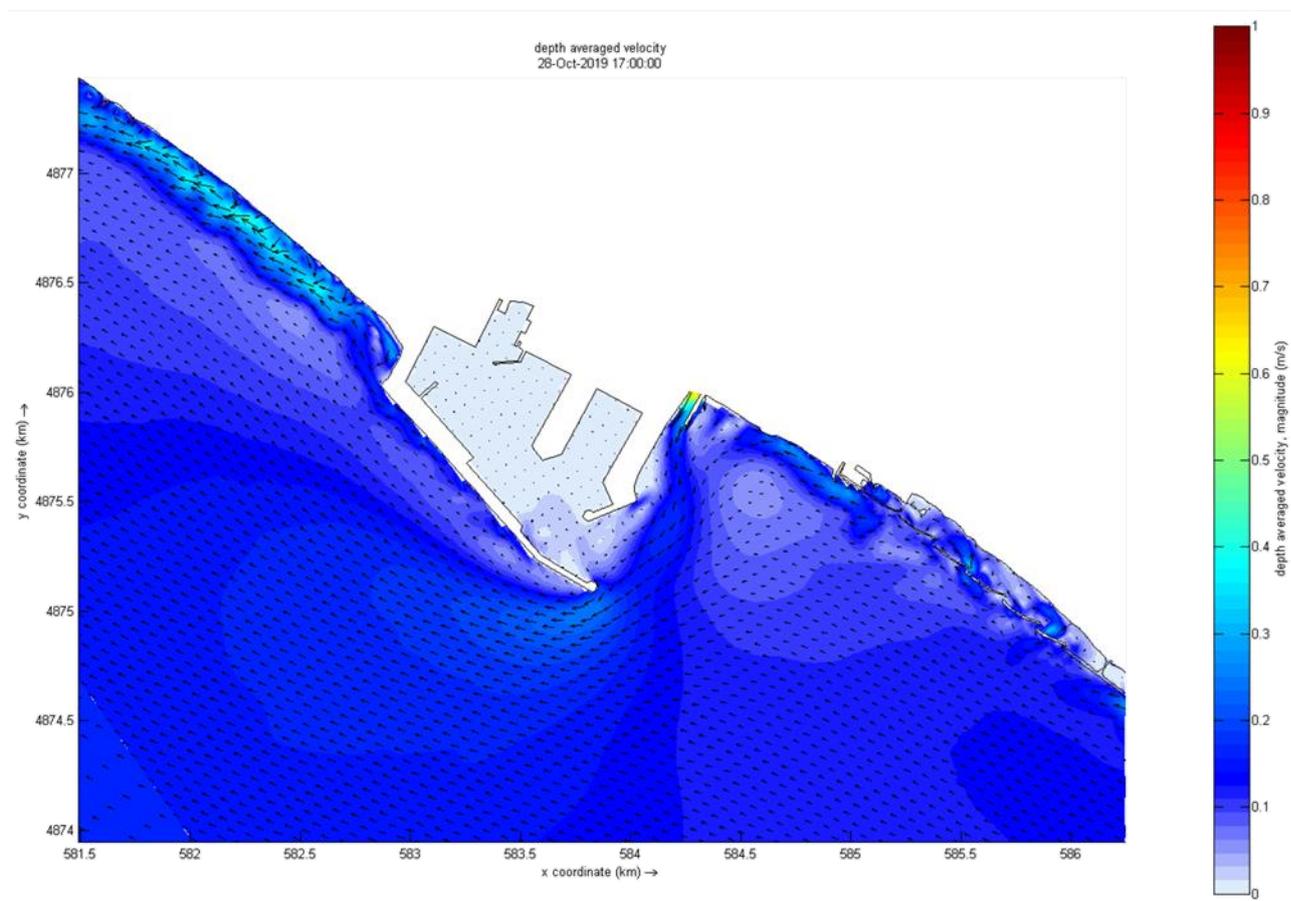
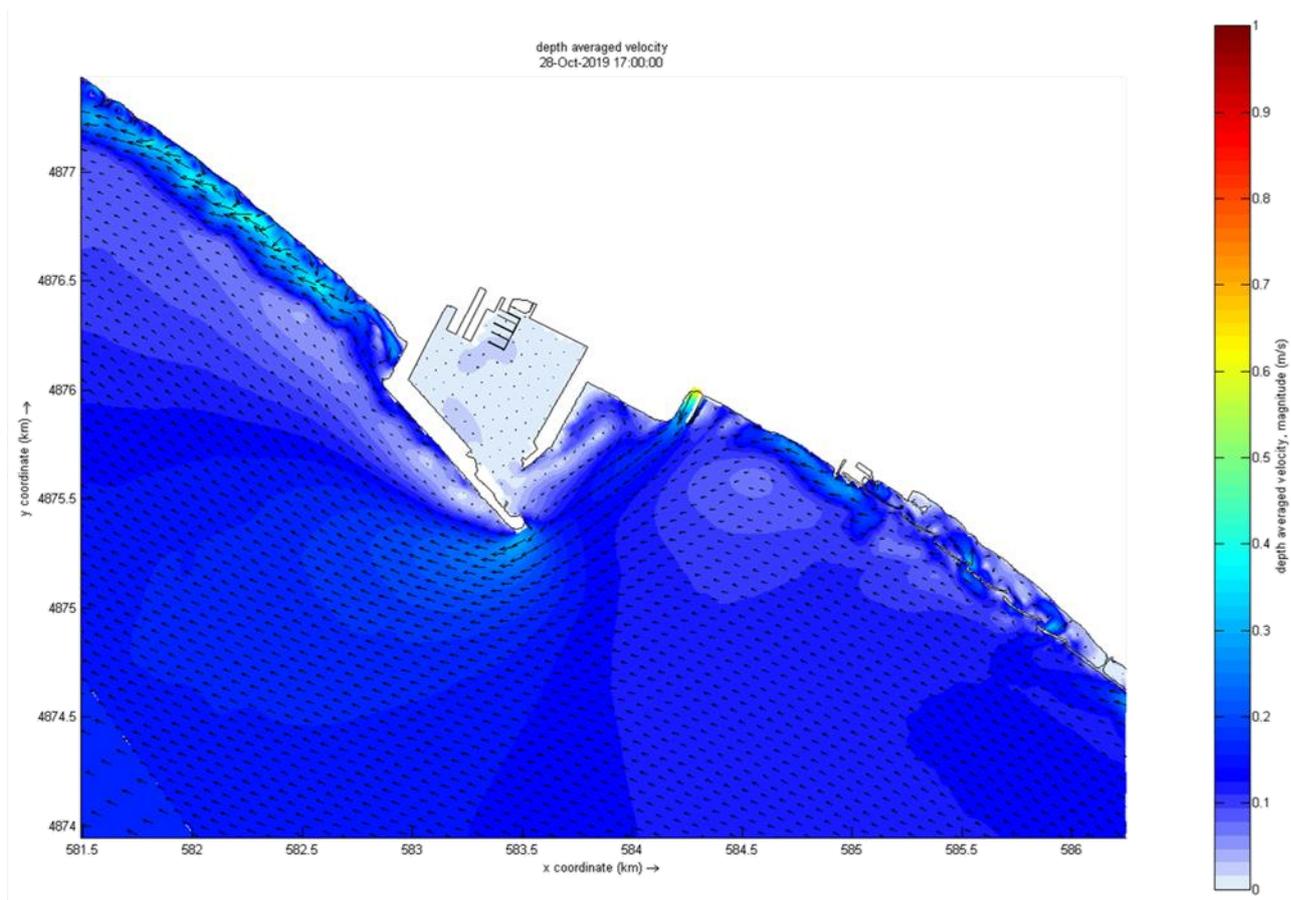
In Figura 7-11 sono riportate le mappe con il tasso di sedimentazione cumulato al termine della simulazione nelle due configurazioni. Nella situazione attuale si osserva che una parte consistente dei sedimenti trasportati dal torrente Carrione si deposita all'interno del tratto terminale del Carrione mentre i tassi di sedimentazione in prossimità dell'imboccatura del porto e del molo di sottoflutto sono nell'ordine di 0-2  $\text{kg}/\text{m}^2$ .

Nella configurazione proposta di PRP si osserva un pattern di sedimentazione simile in prossimità della foce del torrente Carrione e una leggera estensione dell'area di sedimentazione in corrispondenza dell'imboccatura portuale con valori sempre nell'ordine di 0-2  $\text{kg}/\text{m}^2$ . Considerando una densità del materiale sedimentato di 1600  $\text{kg}/\text{m}^3$  questo pattern di sedimentazione equivale a pochi millimetri di spessore del materiale che si deposita lungo i fondali con conseguenze del tutto ininfluenti.

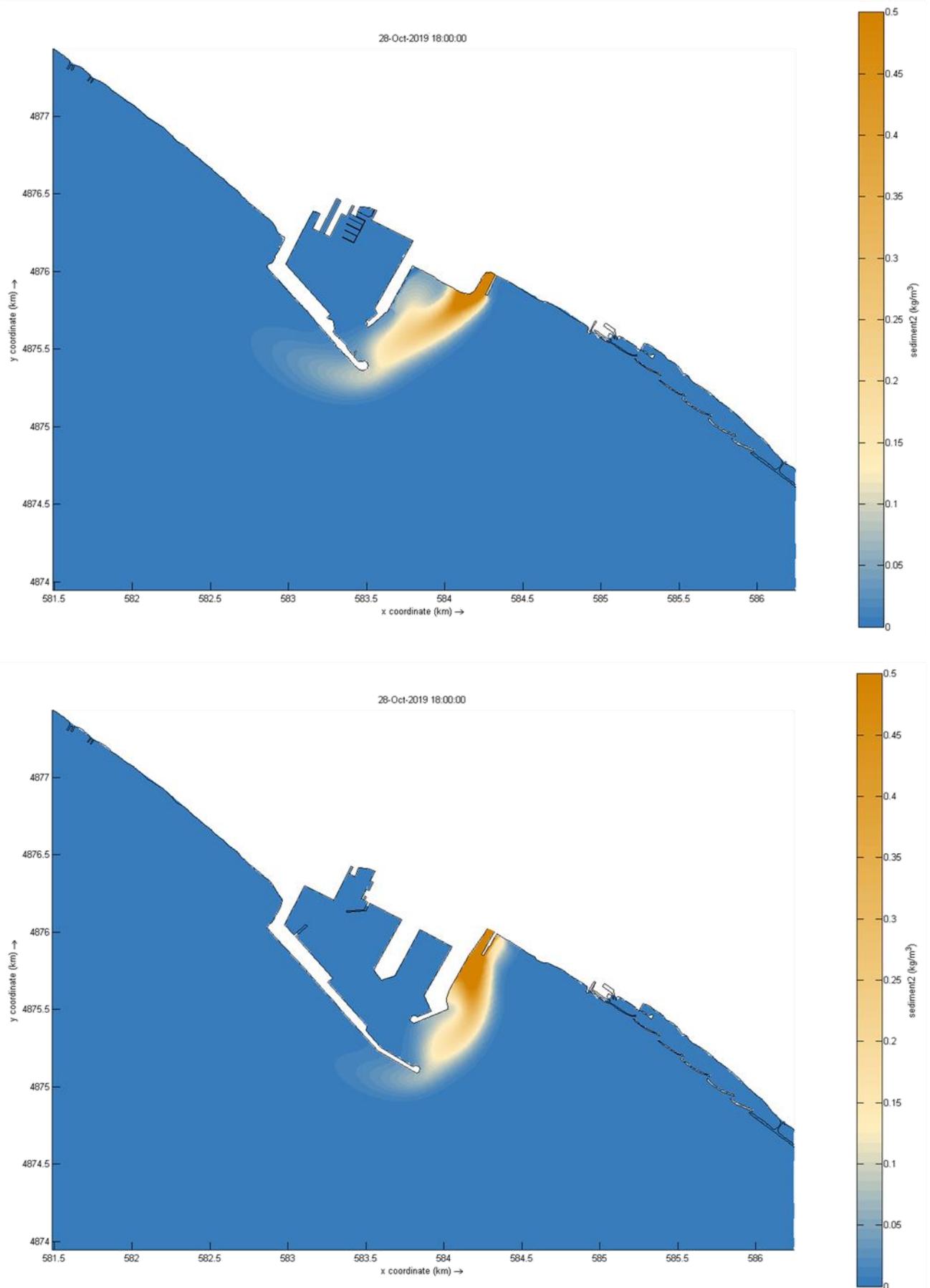
Complessivamente, il materiale sedimentato nella zona di imboccatura del porto al termine di un evento di piena è nell'ordine del 5 - 10% rispetto al carico totale di sedimenti trasportato dal Carrione con valori, rispetto alla configurazione attuale, leggermente superiori per la configurazione della proposta di PRP e comunque con effetti sulla deposizione del tutto trascurabili in termini volumetrici.



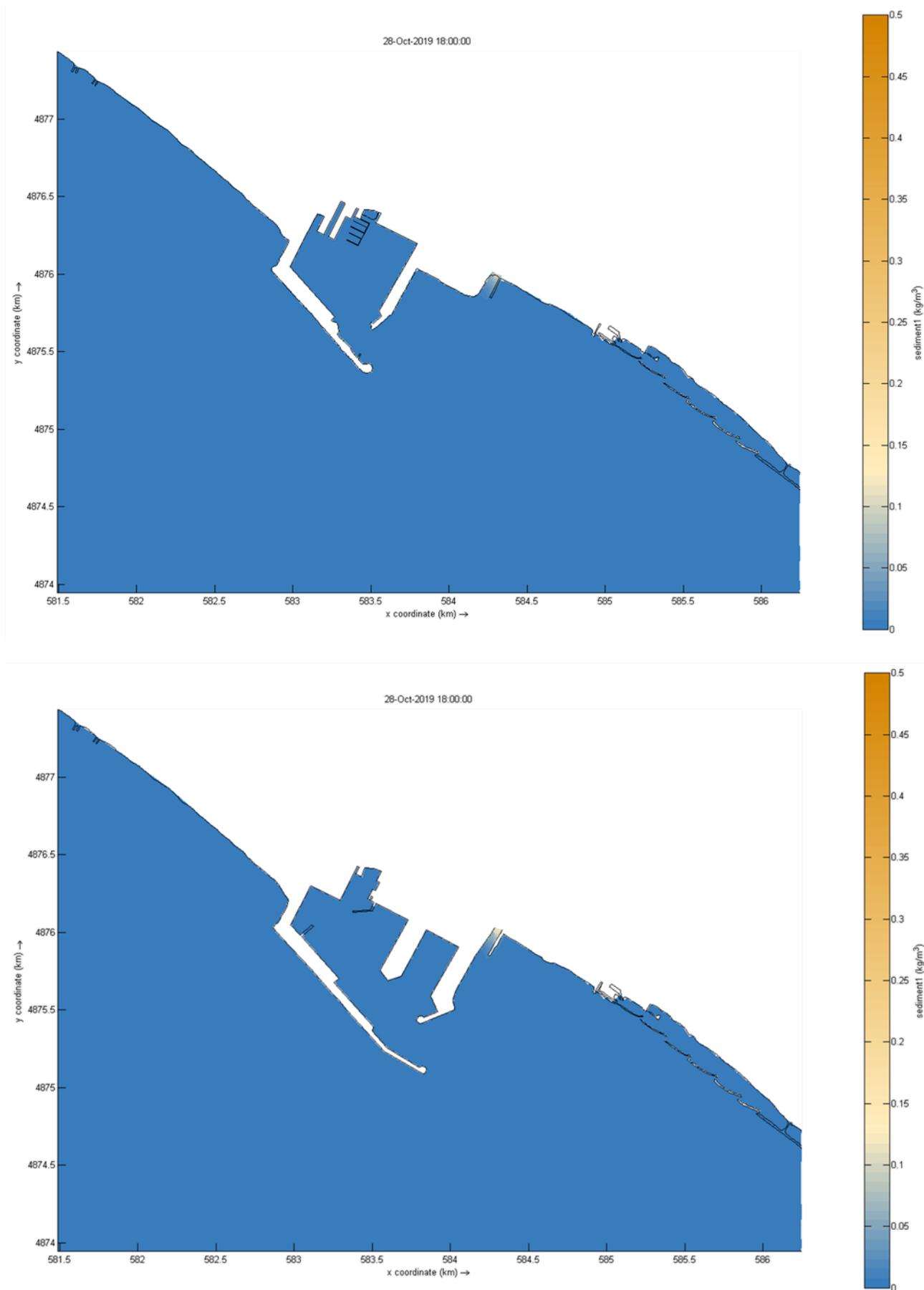
**Figura 7-7 Moto ondoso [m] – condizioni di Scirocco ( $H_s = 2$  m,  $dir = 165^\circ N$ ,  $T_p = 8.0$  s) e piena del Carrione TR = 1 anno.  
Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.**



**Figura 7-8** Campo di moto [m/s] – condizioni di Scirocco ( $H_s = 2$  m,  $dir = 165^\circ N$ ,  $T_p = 8.0$  s) e piena del Carrione TR = 1 anno.  
Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.



**Figura 7-9 Sedimenti in sospensione – frazione 30  $\mu\text{m}$  [kg/m<sup>3</sup>] – condizioni di Scirocco (Hs = 2 m, dir = 165°N, Tp = 8.0 s) e piena del Carrione TR = 1 anno.**  
**Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.**



**Figura 7-10 Sedimenti in sospensione – frazione 100  $\mu\text{m}$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] – condizioni di Scirocco ( $H_s = 2 \text{ m}$ ,  $\text{dir} = 165^\circ\text{N}$ ,  $T_p = 8.0 \text{ s}$ ) e piena del Carrione TR = 1 anno.  
Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.**

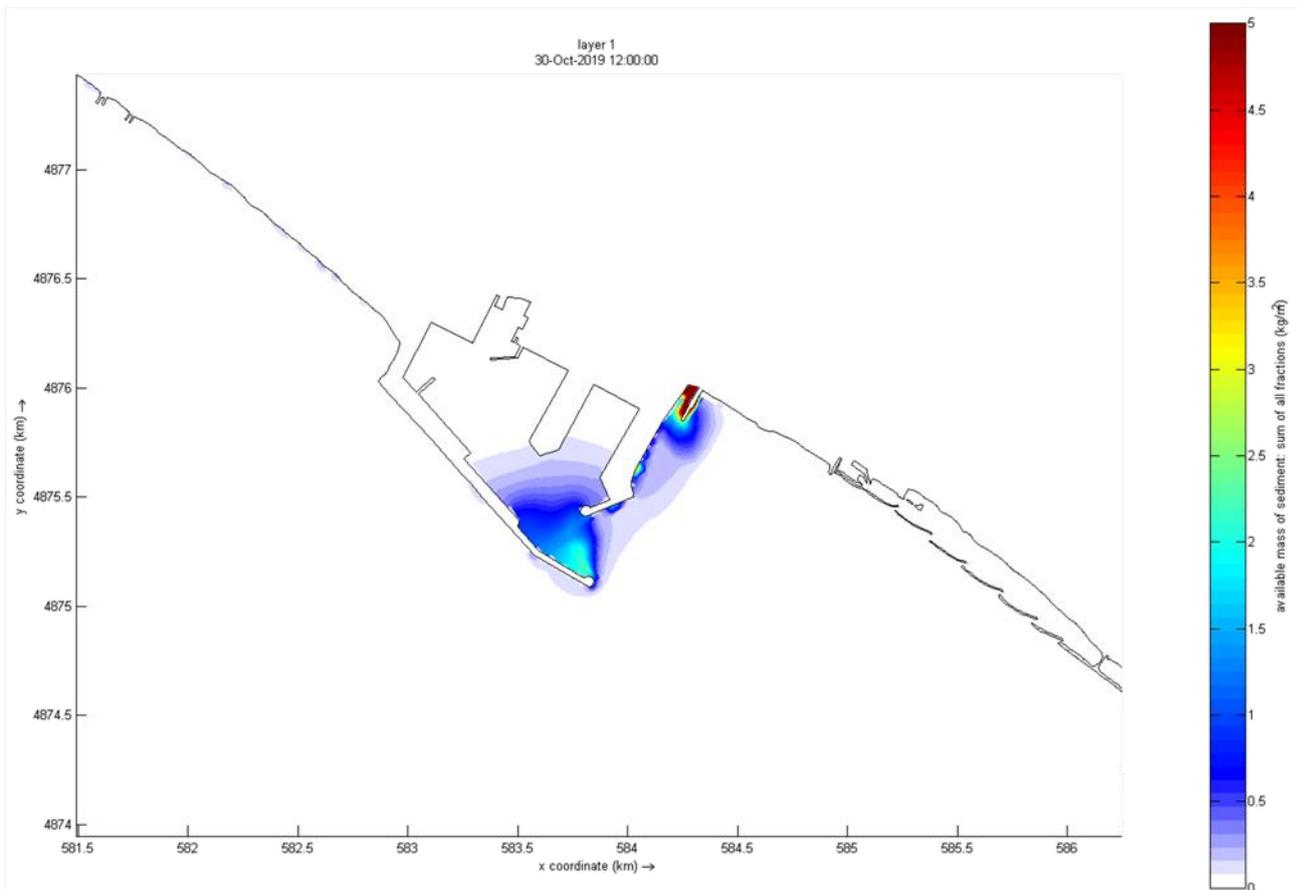
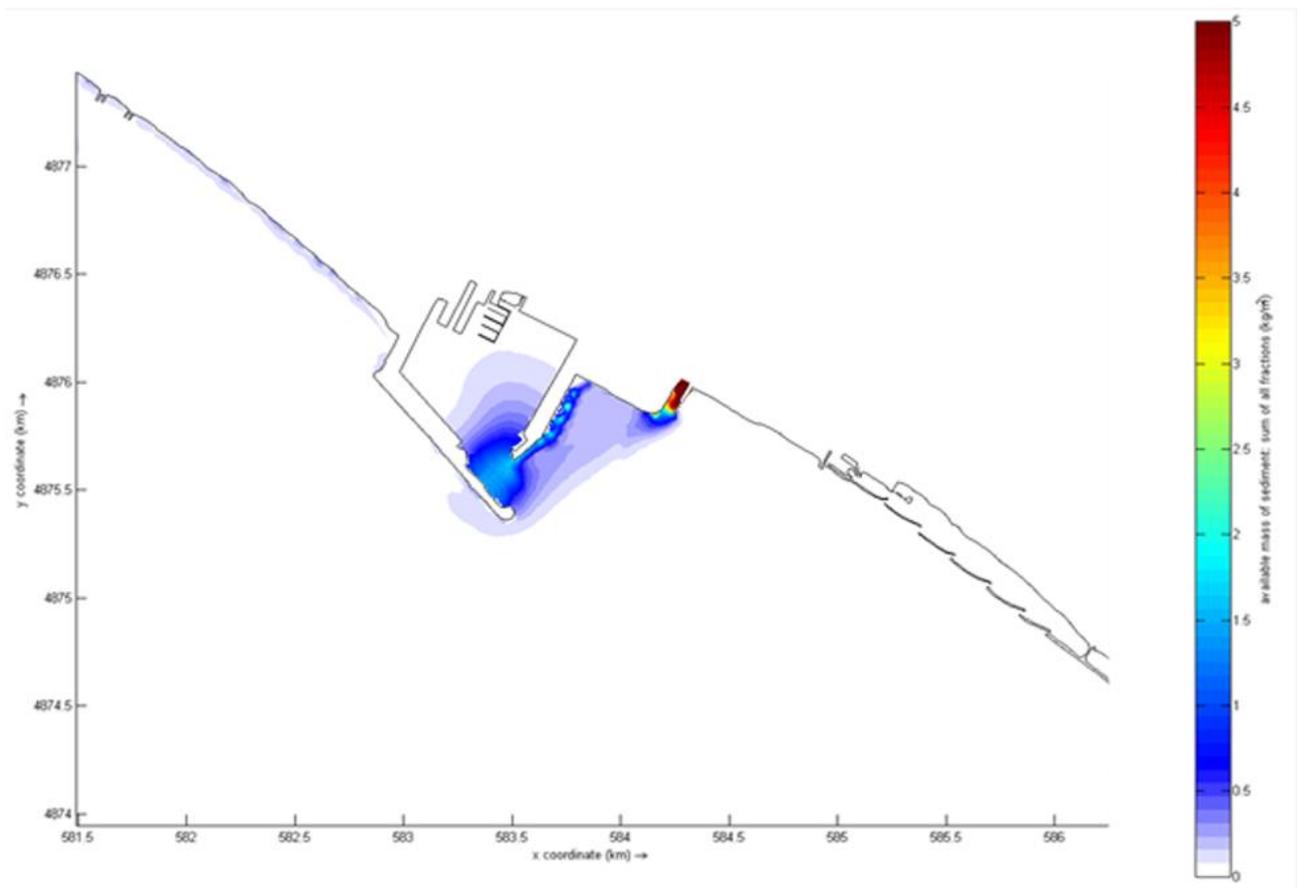


Figura 7-11 Sedimentato totale [kg/m<sup>2</sup>] – condizioni di Scirocco e piena del Carrione TR = 1 anno.  
Sopra: Configurazione attuale; Sotto: Configurazione proposta PRP.

## Capitolo 8 Conclusioni

Il presente Studio di morfodinamica costiera a larga scala è stato condotto al fine di valutare con l'ausilio di idonea modellistica numerica i potenziali effetti indotti in termini di variazioni morfologiche, nel tempo e nello spazio, dalle opere previste dalla proposta di PRP del porto di Marina di Carrara sulla costa adiacente, e di analizzare l'eventuale apporto di materiale solido all'imboccatura portuale.

Questo studio specialistico ha interessato la porzione del litorale compreso tra Bocca di Magra fino al porto di Viareggio al fine di valutare, tramite modellazioni a larga scala e modellazioni a scala di dettaglio, gli effetti indotti, nel tempo e nello spazio, dal nuovo assetto planimetrico delle opere foranee previste dal PRP del porto di Marina di Carrara sul regime del moto ondoso e sul conseguente trasporto solido litoraneo e morfodinamica del sito in esame.

Lo studio si è articolato in diverse fasi con l'obiettivo di analizzare e definire i seguenti aspetti.

- Analisi del quadro conoscitivo sulle attuali tendenze evolutive al fine di:
  - identificare e quantificare il trend di evoluzione morfologica nel tempo, ed in particolare negli ultimi decenni sulla base dell'analisi diacronica delle linee di costa, in particolare nell'ultimo decennio (2010-2020), come base di riferimento per impostare e calibrare i modelli numerici di idrodinamica e morfodinamica litoranea;
  - definire l'estensione, la risoluzione e la schematizzazione spaziale del litorale in esame nel modello numerico, ;
  - determinare le condizioni al contorno (in termini di forzanti meteomarine: vento, onde e marea) più adeguate per l'applicazione dei suddetti modelli numerici in considerazione degli obiettivi dello studio e soprattutto per gli aspetti di dettaglio delle possibili interferenze riconducibili alle opere foranee previste dalla proposta di PRP del porto di Marina di Carrara (prolungamento diga di sopraflutto e nuovo molo di sottoflutto) sulla morfodinamica litoranea e sull'apparato di foce del limitrofo torrente Carrione.
- Analisi a larga scala e di dettaglio, con idonea modellistica numerica, per simulare gli effetti delle opere foranee del porto di Marina di Carrara, nella configurazione attuale e in quella prevista dalla proposta di PRP:
  - sui principali processi di idrodinamica e morfodinamica litoranea nel breve e lungo termine;
  - possibili interferenze sui fenomeni di dispersione, ad opera delle correnti litoranee, dei sedimenti apportati a mare dagli eventi di piena del torrente Carrione.

Le attività di analisi del quadro conoscitivo, condotte quale integrazione degli studi passati sulla base delle linee di riva dell'ultimo decennio (dal 2010 al 2020), hanno permesso di verificare e confermare con dati oggettivi la corretta impostazione e calibrazione dei modelli numerici utilizzati rispetto alle attuali tendenze evolutive. In particolare questo aggiornamento, espletato tenendo conto delle osservazioni e contributi pervenuti dai Soggetti Competenti in materia Ambientale (SCA) nella fase di Scoping (ex art.13, comma 1, del D.Lgs.152/2006) relativa della procedura di VAS sulla proposta di PRP, confermano che i fenomeni erosivi attualmente in essere per il tratto di litorale compreso tra i comuni di Massa e Pietrasanta sono strettamente connessi alla presenza delle opere di difesa litoranea, poste in opera negli ultimi decenni, che ormai senza

soluzione di continuità si sviluppano dalla foce del fosso Lavello quasi sino a quella del fiume Versilia.

Si precisa che al fine di consentire un'oggettiva analisi comparativa dei risultati, tutte le simulazioni sono state eseguite in riferimento alle configurazioni attuale e di PRP.

Le prime attività di modellazione sono state eseguite al fine di individuare e definire l'assetto ottimale delle opere esterne (vedi Allegato I) la cui tipologia e conformazione planimetrica di base erano già state oggetto di analisi e valutazione, nell'ambito del precedente studio specialistico "S5 – Studio Idrodinamico", per gli aspetti precipui di sicurezza alla navigazione e stazionamento all'ormeggio delle imbarcazioni afferenti al porto di Marina di Carrara.

Dall'insieme delle modellazioni e relative analisi condotte si sono investigati nel dettaglio i fenomeni che regolano la dinamica del litorale valutando con dati oggettivi i potenziali effetti delle opere foranee previste nella proposta di PRP. In particolare, le analisi hanno evidenziato e confermato che, come già nella situazione attuale, il flusso sedimentario che si sviluppa parallelo alla costa da nord-ovest verso sud-est si riduce in modo graduale lungo la diga di sopraflutto. Solo in presenza di stati di mare più sostenuti si sviluppa una corrente litoranea che è in grado di oltrepassare l'attuale imboccatura del Porto e trasportare i sedimenti verso sud-est.

Con la realizzazione delle opere foranee previste dalla proposta di PRP, articolate nel prolungamento della diga di sopraflutto nel nuovo molo sottoflutto in destra idraulica della foce del torrente Carrione, comunque non variano in modo significativo i flussi sedimentari rispetto alla condizione attuale. Infatti, per entrambe le configurazioni analizzate (attuale e di PRP), i flussi presentano un andamento molto simile non solo per la zona a nord-ovest del porto, perché sopraflutto rispetto alla risultante delle condizioni medio-climatiche di esposizione al moto ondoso, ma anche per il litorale a sud-est dove, già a partire dalla sezione posta in prossimità dello sbocco a mare del Fosso Lavello, i due flussi sedimentari potenziali simulati presentano lo stesso andamento a riprova che procedendo verso levante la morfodinamica litoranea non è condizionata dal nuovo assetto ipotizzato dal PRP per le opere foranee del porto (prolungamento delle diga sopraflutto e nuovo molo sottoflutto). In particolare le simulazioni condotte per la configurazione di PRP mostrano che le nuove opere foranee non introducono fenomeni erosivi sottoflutto anzi favoriscono il flusso dei sedimenti verso sud-est limitandone la dispersione verso il largo. Le modellazioni indicano che le variazioni indotte sulle correnti litoranee ed i conseguenti flussi sedimentari si esauriscono nella zona compresa tra le foci del Carrione e del Lavello e comunque non arrivano ad interessare e a modificare il campo idrodinamico della zona posta a sud-est fortemente condizionato dalla presenza delle opere di difesa costiera comprese tra il fiume Frigido ed il fosso Lavello.

Alla luce di queste considerazioni è possibile concludere che la zona di influenza delle nuove opere foranee sulla morfodinamica dell'intera sub-unità fisiografica della Toscana settentrionale, che si sviluppa per circa 30 km dal porto di Viareggio sino alla foce del Fiume Magra, è comunque contenuta alla sola area posta immediatamente a sud-est del porto per un'estensione di circa 500 m fino alla foce del fosso Lavello. Al netto di questa area più prossima alle nuove opere foranee previste dal PRP, complessivamente non si osservano alterazioni apprezzabili per le zone limitrofe sia a nord-ovest che a sud-est del porto dove i flussi sedimentari calcolati si mantengono sostanzialmente inalterati.

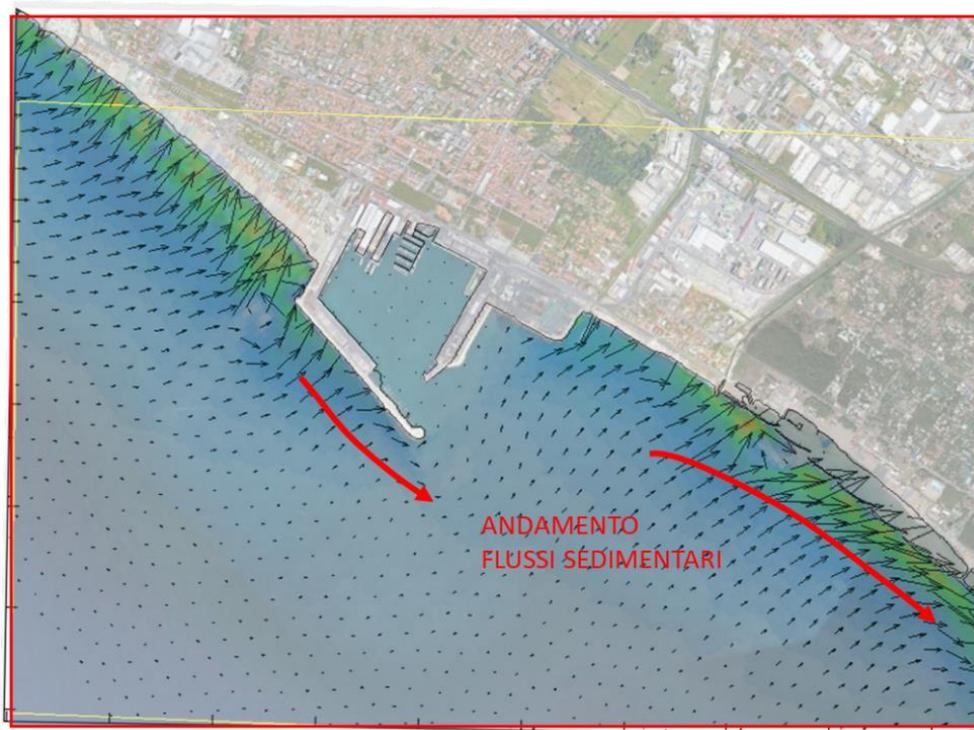
Un ulteriore effetto collegato alla realizzazione delle nuove opere foranee del porto è il ridosso che queste esercitano per il tratto di litorale a sud-est del porto compreso tra la foce del torrente Carrione e del fosso Lavello soprattutto nei confronti degli stati di mare più frequenti ed intensi provenienti da Libeccio. La conseguente riduzione dell'agitazione ondosa indotta dalle nuove opere foranee per questo tratto di litorale limita il trasporto e l'accumulo di materiale solido movimentato dal moto ondoso e dalle correnti litoranee verso la zona di foce del Carrione favorendo così il mantenimento dell'efficienza della stessa.

Inoltre, il prolungamento della diga di sopraflutto e la realizzazione del nuovo molo di sottoflutto combinati alla presenza del pennello di armatura in sinistra idraulica del Carrione, facilita il confinamento e la veicolazione del plume di torbidità proveniente dalla sezione di foce verso il largo, in aderenza con il nuovo molo di sottoflutto; il plume viene poi deviato e disperso per effetto delle correnti e dei vortici locali verso la linea di costa rimanendo comunque sostanzialmente confinato tra la foce del Carrione e quella del Lavello.

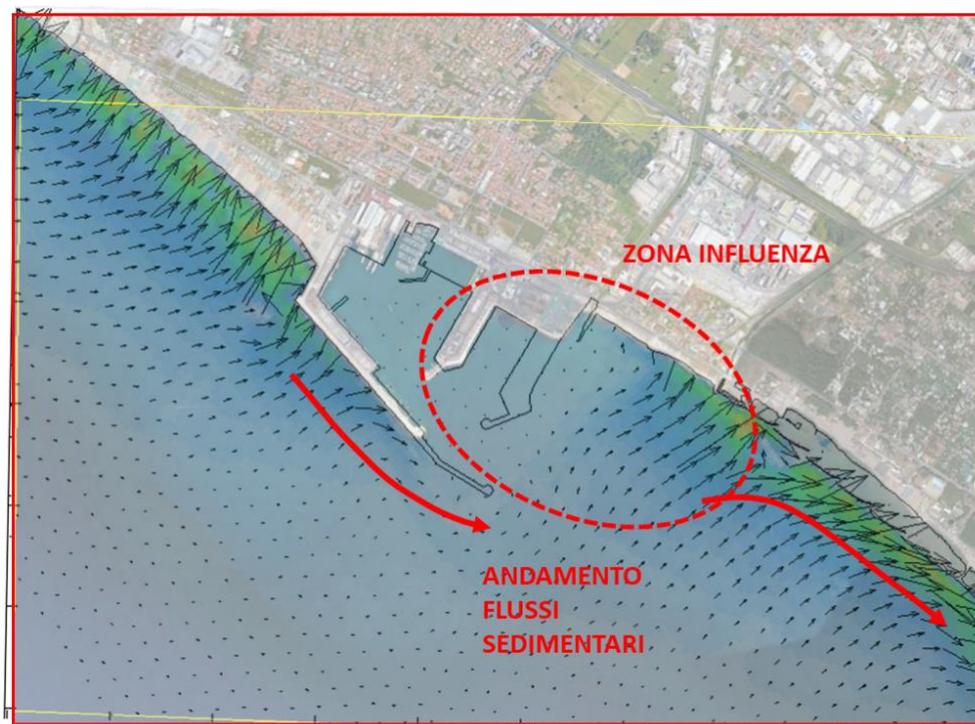
Nella seguente immagine di Figura 8-1 sono illustrati in forma grafica i risultati dei processi delle dinamiche del litorale simulate per le due configurazioni analizzate (attuale e proposta di PRP).

In questa figura sono rappresentati i flussi medi annui del trasporto litoraneo ottenuto combinando i 4 scenari meteomarini simulati. In rosso sono evidenziati gli andamenti dei flussi sedimentari longitudinali complessivi delimitando con una linea rossa tratteggiata, per il grafico relativo alla proposta di PRP, la zona di influenza morfodinamica dovuta alla realizzazione delle nuove opere che comunque non è dissimile da quella relativa allo stato attuale (grafico soprastante).

In definitiva, sulla base delle modellazioni condotte risulta che le opere previste dalla configurazione di PRP non introducono variazioni sul campo idrodinamico litoraneo tali da interferire e condizionare gli interventi di riqualificazione attualmente in fase di impostazione e progettazione da parte del Comune di Massa dalla foce del fosso Lavello sino a quella del torrente Frigido. Piuttosto è auspicabile che le attività di dragaggio manutentivo dei fondali marini interessati dal canale di accesso e dalla zona di avamposto da associare alla realizzazione del prolungamento dell'attuale molo sopraflutto previsto dal PRP vengano inquadrate e pianificate per destinare i sedimenti dragati ad interventi di ripascimento (emerso e/o sommerso) del litorale del Comune di Massa a beneficio del bilancio solido litoraneo di tutta l'unità fisiografica ed in particolare del tratto compreso tra i Comuni di Massa e Pietrasanta.



Attuale



Proposta di PRP

Figura 8-1 Quadro di sintesi della dinamica del litorale nelle configurazioni attuale e di proposta di PRP

## Capitolo 9 Riferimenti bibliografici

- [1] Modimar - Technital, «Studio Meteomarino – Volume 1: condizioni meteomarine al largo.,» 2019.
- [2] Deltares, «Delft Hydraulics - Carrara Coastal Study,» 2006.
- [3] CERA-FRI, «Realizzazione del secondo stralcio del monitoraggio del trasporto solido nei corsi d'acqua della Toscana,» 2011.
- [4] Regione Toscana - DICCA (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale - Università di Genova), «Studio idraulico del Torrente Carrione con analisi dei possibili interventi per la mitigazione del rischio,» 2016.
- [5] Autorità Portuale Marina di Carrara - Dipartimento Scienza della Terra (Università di Firenze) - prof. E. Pranzini, «Studio della dinamica dei sedimenti nell'intorno del Porto di Marina di Carrara,» 2009.
- [6] ENEA, «Elementi di gestione costiera,» 2003.
- [7] I. Lisi, A. Bruschi, M. Del Gizzo, M. Archina, A. Barbano e S. Corsini, «Caratteristiche della costa italiana: le unità fisiografiche e le profondità di chiusura,» *L'ACQUA*, n. 2, 2010.
- [8] Regione Toscana, ««Piano di indirizzo territoriale Regione Toscana - 3. Quadro conoscitivo. Allegato al testo n.2 Evoluzione recente delle spiagge toscane,» 2006.
- [9] L. E. F. S. I. P. P. F. & P. E. Cipriani, «Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale,» in *Studi Costieri*, 2001, pp. 119-156.
- [10] Regione Toscana - Settore protezione e valorizzazione fascia costiera e ambiente marino, «Quadro conoscitivo per la gestione dei sedimenti costieri - Rapporto Finale,» 2015.
- [11] Distretto Appennino Settentrionale - UoM (ITADBR092), «Piano Gestione Rischio Alluvioni,» 2015.
- [12] Università di Firenze - DICEA, «Approfondimenti dello studio geomorfologico dei principali alvei fluviali nel bacino del fiume Magra finalizzato alla definizione di linee guida di gestione dei sedimenti e della fascia di mobilità funzionale,» 2007.
- [13] Regione Toscana - Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile - Settore Genio Civile Toscana Nord, «Recupero e riequilibrio del litorale di Massa fra le foci del Lavello e del Frigido - Studio morfodinamico dello stato attuale rev.01,» 2019.
- [14] G. Inghirami, *Carta della Toscana 1830*, Nàrodni Archiv Praha, Fondo: Rodinny Toskanskych Habsburku.

- [15] R. T. - C. LaMMA, «Monitoraggio a scala regionale dell'evoluzione - Documento Operativo per il recupero e riequilibrio della fascia costiera. (L.R.80/2015),» 2017.
- [16] Castelli et al. ; Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale . Università di Genova.
- [17] Regione Toscana, Piano Paesaggistico. Scheda di Ambito - 02 versilia e costa apuana.
- [18] M. RINALDI e C. (. - U. F. SIMONCINI, «Studio geomorfologico del Fiume Magra e del Fiume Vara finalizzato alla gestione dei sedimenti e della fascia di mobilità. Atti Giornate di Studio “Nuovi approcci per la comprensione dei processi fluviali e la gestio,» in *Nuovi approcci per la comprensione dei processi fluviali e la gestione dei sedimenti. Applicazioni nel bacino del Magra.*, Sarzana, 2006.
- [19] Università di Firenze - DICEA, «Studio del Magra e degli affluenti principali dal punto di vista geomorfologico a seguito dell'evento alluvionale del 25/10/2011e definizione delle azioni e degli interventi di messa in sicurezza,» 2012.