



Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale  
Scali Rosciano, 6 - 57123 Livorno, Italia

R.U.P. ing. Enrico Pribaz  
D.E.C. ing. Ilaria Lotti

R.T.P.



30035 Mirano (VE)  
Viale Belvedere, 8/10  
www.fm-ingegneria.com

Tel. +39 041 5785 711  
Fax +39 041 4355 933  
portolivorno@fm-ingegneria.com



P.O. Box 1132  
3800 BC Amersfoort  
The Netherlands  
www.royalhaskoningdhv.com

Tel. +44 (0)207 222 2115  
Fax +44 (0)207 222 2659  
info@rhdhv.com



35027 Noventa Padovana (PD)  
Via Panà 56/a

Tel. +39 049 8945 087  
Fax +39 049 8707 868  
mail@hsmarinesrl.com



31027 Spresiano (TV)  
Via Tiepolo, 8  
www.gtgeo.it

Tel. +39 0422 8870 31  
Fax +39 0422 8895 89  
info@gtgeo.it

PROGETTO

**PROGETTAZIONE PRELIMINARE E DEFINITIVA DELLE  
OPERE MARITTIME DI DIFESA E DEI DRAGAGGI PREVISTI  
NELLA NUOVA PRIMA FASE DI ATTUAZIONE DELLA  
PIATTAFORMA EUROPA, COMPRESO LO STUDIO DI  
IMPATTO AMBIENTALE E LA VALUTAZIONE DI INCIDENZA  
AMBIENTALE**

EMISSIONE

**PROGETTO DEFINITIVO**

TITOLO

**D - IDRAULICA MARITTIMA**

Studio della dinamica litoranea

T. Tassi

REV.	DATA	FILE	OGGETTO	DIS.	APPR.
1	31/05/2021	1233_PD-D-004_1.doc	Riscontro Rapporto di Ispezione no. IT20056AR-0PP del 19/3/2021	N. Sguotti	T. Tassi
2	30/07/2021	1233_PD-D-004_2.doc	Riscontro Rapporto di Ispezione no. IT20056AR-PDS del 22/6/2021	N. Sguotti	T. Tassi
3	31/10/2022	1233_PD-D-004_3.doc	Aggiornamento a seguito della caratterizzazione ambientale	N. Sguotti	T. Tassi
4					
5					

ELABORATO N.

**D004**

DATA: 04/09/2020	SCALA: -	FILE: 1233_PD-D-004_0.doc	J.N. 1233/'19
PROGETTO N. Sguotti	DISEGNO N. Sguotti	VERIFICA M. Tondello	APPROVAZIONE T. Tassi

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

## Indice generale

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO AMBIENTALE</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA E TRASPORTO SOLIDO INDOTTI DAL MOTO ONDOSI</b>	<b>11</b>
3.1	CONFIGURAZIONI ANALIZZATE	12
3.2	DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO	13
3.3	DATI SEDIMENTOLOGICI	19
3.4	VALORI DEI PARAMETRI UTILIZZATI NEL MODELLO	22
3.5	CONDIZIONI AL CONTORNO	26
3.6	SCENARI ANALIZZATI	28
3.7	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	29
3.7.1	PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSI	29
3.7.2	CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA	46
3.7.3	TRASPORTO SOLIDO E CONCENTRAZIONE DEI SEDIMENTI IN SOSPENSIONE	59
3.7.4	EVOLUZIONE DEI FONDALI	69
<b>4</b>	<b>EFFETTI DELLE PORTATE DI PIENA DELLO SCOLMATORE D'ARNO</b>	<b>76</b>
4.1	CONDIZIONI AL CONTORNO	79
4.1.1	VALUTAZIONI SULLA PORTATA DELLO SCOLMATORE ALLA FOCE	79
4.1.2	VALUTAZIONI SUL TRASPORTO SOLIDO	82
4.1.3	VALUTAZIONI SULLE CORRENTI LITORANEE	83
4.2	VALORI DEI PARAMETRI UTILIZZATI NEL MODELLO	85
4.3	SCENARI ANALIZZATI	86
4.4	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	87
<b>5</b>	<b>VALUTAZIONE DEI FENOMENI DI INTERRIMENTO</b>	<b>98</b>
5.1	INTERRIMENTO GENERATO DAL TRASPORTO SOLIDO INDOTTO DALLE MAREGGIATE	98
5.1.1	DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO	98
5.1.2	DATI SEDIMENTOLOGICI	99
5.1.3	CONDIZIONI AL CONTORNO	100
5.1.4	RISULTATI DELLA SIMULAZIONE	102
5.2	INTERRIMENTO GENERATO DALLE PIENE DELLO SCOLMATORE	104
5.2.1	DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO	104
5.2.2	CONDIZIONI AL CONTORNO	104
5.2.3	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	105
<b>6</b>	<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b>	<b>108</b>

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

## Indice delle figure

Figura 2.1 – Siti Rete Natura 2000 in prossimità dell’area di intervento .....	8
Figura 2.2 – Rilievo geomorfologico della zona di mare antistante il Porto di Livorno eseguito a fine 2016 [4] .....	9
Figura 2.3 – Ubicazione dell’area di intervento rispetto ai limiti della ZSC Secche della Meloria, della pSIC Tutela del Tursiops Truncatus e della mappatura della Posidonia Oceanica.....	10
Figura 3.1 – Configurazione di progetto.....	12
Figura 3.2 – Progetto GIS contenente i punti dei rilievi batimetrici utilizzati per costruire le batimetrie del modello .....	13
Figura 3.3 – Griglie di calcolo dei modelli Delft3D-WAVE (in alto) e Delft3D-FLOW (in basso) .....	15
Figura 3.4 – Batimetria dello stato di fatto rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW (batimetria della griglia con risoluzione 200 m del modulo WAVE) .....	16
Figura 3.5 – Batimetria dello stato di fatto rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW (particolare delle griglie a maggiore risoluzione in corrispondenza delle Secche della Meloria e del porto di Livorno) .....	17
Figura 3.6 – Batimetria della configurazione di progetto rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW (particolare delle griglie a maggiore risoluzione in corrispondenza delle Secche della Meloria e del porto di Livorno) .....	18
Figura 3.7 – Mappatura del diametro mediano $D_{50}$ dei sedimenti, utilizzata per lo studio della circolazione e trasporto lungo il litorale (elaborazione GIS dei dati delle campagne disponibili: 2005 Prov. di Pisa e 2020) .....	21
Figura 3.8 – Rose delle frequenze (blu), delle energie (rosso) e delle altezze significative massime (verde) (punto UNIGE 585, periodo 1979-2018) .....	26
Figura 3.9 – Curve di durata dell’altezza significativa (punto UNIGE 585, periodo 1979-2018) per settore di provenienza .....	26
Figura 3.10 – Campo d’onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s).....	31
Figura 3.11 – Campo d’onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s).....	32
Figura 3.12 – Campo d’onda per la configurazione di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s) .....	33
Figura 3.13 – Campo d’onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s).....	34
Figura 3.14 – Campo d’onda calcolato per la configurazione di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s).....	35
Figura 3.15 – Campo d’onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s).....	36

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

Figura 3.16 – Campo d’onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)..... 37

Figura 3.17 – Campo d’onda calcolato per la configurazione di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)..... 38

Figura 3.18 – Campo d’onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)..... 39

Figura 3.19 – Campo d’onda calcolato per la configurazione di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)..... 40

Figura 3.20 – Campo d’onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s) ..... 41

Figura 3.21 – Campo d’onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s)..... 42

Figura 3.22 – Campo d’onda calcolato per la configurazione di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s) ..... 43

Figura 3.23 – Campo d’onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s)..... 44

Figura 3.24 – Campo d’onda calcolato per la configurazione di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s) ..... 45

Figura 3.25 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s) ..... 47

Figura 3.26 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la configurazione di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s) ..... 48

Figura 3.27 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s) ..... 49

Figura 3.28 – Velocità della corrente calcolata per la configurazione di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s)..... 50

Figura 3.29 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s) ..... 51

Figura 3.30 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la configurazione di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s) ..... 52

Figura 3.31 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s) ..... 53

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

Figura 3.32 – Velocità della corrente calcolata per la configurazione di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s).....	54
Figura 3.33 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s) .....	55
Figura 3.34 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la configurazione di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s) .....	56
Figura 3.35 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s).....	57
Figura 3.36 – Velocità della corrente calcolata per la configurazione di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s) .....	58
Figura 3.37 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Ponente Stato di fatto.....	61
Figura 3.38 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Ponente Configurazione di progetto .....	62
Figura 3.39 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Mezzogiorno Stato di fatto .....	63
Figura 3.40 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Mezzogiorno Configurazione di progetto .....	64
Figura 3.41 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Maestrale Stato di fatto.....	65
Figura 3.42 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Maestrale Configurazione di progetto .....	66
Figura 3.43 – Sezioni utilizzate per i bilanci della portata solida lungo il litorale dallo Scolmatore alle spiagge di Tirrenia .....	67
Figura 3.44 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 3.43 nello stato di fatto e nella configurazione di progetto, per la mareggiata di Ponente .....	67
Figura 3.45 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 3.43 nello stato di fatto e nella configurazione di progetto, per la mareggiata di Mezzogiorno .....	68
Figura 3.46 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 3.43 nello stato di fatto e nella configurazione di progetto, per la mareggiata di Maestrale .....	68
Figura 3.47 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Ponente Stato di fatto .....	70
Figura 3.48 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Ponente Configurazione di progetto .....	71
Figura 3.49 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Mezzogiorno Stato di fatto.....	72
Figura 3.50 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Mezzogiorno Configurazione di progetto.....	73
Figura 3.51 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Maestrale Stato di fatto.....	74
Figura 3.52 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Maestrale Configurazione di progetto.....	75
Figura 4.1 – A sinistra, portata misurata sull’Arno a Pontedera nel corso del 2019 ( <a href="http://www.sir.toscana.it/">http://www.sir.toscana.it/</a> ), a destra livello idrometrico dell’Arno a Pisa Sostegno tra il 2 e il 4 febbraio 2019 ([5]) .....	77
Figura 4.2 – Evento meteomarinico 1-3 febbraio 2019. Altezza d’onda significativa (a sinistra) e direzione dell’onda (a destra) misurate alla boa Gorgona ( <a href="http://www.sir.toscana.it/">http://www.sir.toscana.it/</a> ) .....	77

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

Figura 4.3 – Immagini satellitari ESA Sentinel-2 raccolte il 3 febbraio (a sinistra) e il 6 febbraio 2019 (a destra). La risoluzione al suolo è di 10 m e sono stati evidenziati i siti Rete Natura 2000 e l’areale della Posidonia..... 78

Figura 4.4 – Portate fluenti nello Scolmatore per l’evento con  $T_r=50$  anni [7] e, in grigio e azzurro, portate massima ( $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e media ( $Q=414 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ipotizzate nel presente studio..... 81

Figura 4.5 – Esempio di mappa delle correnti superficiali nell’alto Tirreno prodotta dal modello del consorzio LaMMa (<http://www.lamma.rete.toscana.it/mare/modelli/correnti>) ..... 83

Figura 4.6 – Esempio di mappa delle correnti superficiali nell’alto Tirreno fornita dal servizio CMEMS Copernicus ..... 84

Figura 4.7 – Andamento della componente Nord della velocità superficiale fornita dal servizio CMEMS Copernicus ..... 84

Figura 4.8 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Stato di fatto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ )..... 89

Figura 4.9 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazione di progetto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ )..... 90

Figura 4.10 – Precipitazione dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazioni a confronto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ )..... 91

Figura 4.11 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Stato di fatto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ )..... 92

Figura 4.12 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazione di progetto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ )... 93

Figura 4.13 – Precipitazione dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazioni a confronto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ )... 94

Figura 4.14 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazioni a confronto, mareggiata di Ponente,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ )..... 95

Figura 4.15 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazioni a confronto, mareggiata di Mezzogiorno,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) ..... 96

Figura 4.16 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazioni a confronto, mareggiata di Maestrone,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) ..... 97

Figura 5.1 – Batimetria della configurazione di progetto rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW..... 99

Figura 5.2 – Energia del moto ondoso per classi di direzione e per anno..... 100

Figura 5.3 – Energia del moto ondoso per classi di direzione e per anno – Confronto 1992, 2012, 2018 e anno medio ..... 101

Figura 5.4 – Energia del moto ondoso per classi di altezza d’onda e per anno – Confronto 1992, 2012, 2018 e anno medio ..... 101

Figura 5.5 – Serie temporale di altezza d’onda significativa e direzione d’onda per l’anno tipo ..... 101

Figura 5.6 – Evoluzione dei fondali per l’anno tipico ..... 103

Figura 5.7 – Portate fluenti nello Scolmatore per lo scenario “raro” ( $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e lo scenario “medio” ( $Q=414 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ..... 104

Figura 5.8 – Concentrazione (in alto) e deposizione (in basso) dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d’Arno (mareggiata di Ponente,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ )..... 106

Figura 5.9 – Concentrazione (in alto) e deposizione (in basso) dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d’Arno (mareggiata di Ponente,  $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ )..... 107

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

## Indice delle tabelle

Tabella 3.1 – Impostazioni e parametri modellistici adottati per il modulo Delft3D-Flow .....	23
Tabella 3.2 – Impostazioni e parametri modellistici adottati per il modulo Delft3D-Wave.....	25
Tabella 3.3 – Caratteristiche delle mareggiate associate alle diverse durate medie; in giallo gli eventi simulati.....	27
Tabella 3.4 – Scenari analizzati nello studio della circolazione idrodinamica e del trasporto solido dei sedimenti in sospensione.....	28
Tabella 4.1 – Stima delle portate massime nell’Arno a monte e a valle dell’incile dello Scolmatore e della portata massima derivata dallo Scolmatore stesso per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni. (PGRA, 2016,[6]) .....	79
Tabella 4.2 – Portata massima derivata dallo Scolmatore per gli eventi del periodo 1981-2005. (Progetto di Adeguamento Idraulico del Canale Scolmatore d’Arno, 2011, [7]) .....	80
Tabella 4.3 – Scenari analizzati nello studio dell’interferenza del progetto con le portate di piena dello Scolmatore d’Arno.....	86

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

## 1 PREMESSA

Il presente studio è stato sviluppato a supporto della progettazione definitiva delle opere previste dalla prima fase di attuazione della Piattaforma Europa.

Lo studio della circolazione idrodinamica e del trasporto solido era stato condotto con un elevato livello di approfondimento già a livello di progettazione di fattibilità tecnico economica, al fine di individuare e risolvere le criticità tecniche, funzionali ed ambientali. Proprio tali criticità erano state alla base della valutazione e del confronto delle diverse alternative progettuali.

Le principali problematiche della costa potenzialmente influenzata dall'intervento sono ben note ed inquadrabili in tre macrocategorie:

- a) evoluzione morfologica del litorale dalla foce dell'Arno al porto di Livorno: si tratta di un litorale in fortissima crisi in seguito alla progressiva demolizione della cuspide fociva del fiume, come conseguenza della riduzione dell'apporto solido fluviale; è prevedibile che le aree in erosione si estenderanno progressivamente verso Sud; eventuali modifiche della dinamica litoranea legate alla nuova infrastruttura portuale potrebbero introdurre ulteriori squilibri sull'evoluzione della linea di riva;
- b) qualità delle acque: la presenza dello scolmatore dell'Arno, necessario per la sicurezza idraulica del basso corso del fiume, determina sostanziali anomalie deposizionali nei fondali marini antistanti, dove la prateria di fanerogame è in evidente regressione, presumibilmente proprio per gli anomali tassi di torbidità e sedimentazione;
- c) trasporto solido in ambito portuale: si tratta di una problematica in gran parte legata ancora alla presenza dello scolmatore; la commistione tra le acque portuali e quelle dello scolmatore determina una forte sedimentazione nei bacini portuali.

In fase di progettazione di fattibilità tecnico-economica (PFTE) lo studio era stato condotto con lo scopo di indagare nel maggiore dettaglio possibile le fenomenologie responsabili delle problematiche sopra citate (analisi della configurazione attuale) e analizzare quindi gli impatti prodotti dalle nuove configurazioni progettuali, individuando le più opportune ottimizzazioni e misure di mitigazione necessarie.

In fase di progettazione definitiva si è proceduto ad aggiornare ed approfondire ulteriormente tale studio, con riferimento alle seguenti tematiche:

- valutazione degli effetti della configurazione di progetto definitivo sulla circolazione idrodinamica e sul trasporto solido indotti dal moto ondoso;
- valutazione degli effetti della configurazione di progetto definitivo sulla circolazione idrodinamica e sul trasporto solido, con riferimento agli eventi di piena dello scolmatore d'Arno;
- valutazione dell'interrimento dei canali dragati e delle strategie di manutenzione dell'opera;

Non si ritiene opportuno, invece, procedere alla modellazione fisica di tali fenomeni; appare infatti del tutto improponibile realizzare una modellazione fisica in similitudine di Froude, o anche solo di Dean, di un dominio così vasto. Le esperienze condotte con resine leggere (peso specifico dell'ordine di 1.1 g/cm<sup>3</sup>) in grado di simulare una velocità di caduta più bassa, e quindi poter simulare il comportamento di sedimenti fini ad una scala geometrica ragionevole, dimostrano (anche nell'esperienza degli scriventi) che tale soluzione rappresenta un'opzione di gran lunga meno affidabile dei modelli numerici.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

## 2 INQUADRAMENTO AMBIENTALE

Nel presente paragrafo si riportano i principali target sensibili presenti nell'area oggetto di studio e considerati nell'analisi dei potenziali impatti e delle variazioni indotte dalle opere previste dal presente progetto.

In prossimità del Porto di Livorno sono presenti i seguenti siti Rete Natura 2000, riportati nelle loro estensioni nella successiva Figura 2.1:

- Secche della Meloria IT 5160018, designato zone speciali di conservazione (ZSC) con Decreto 22 dicembre 2016 (GU n. 119 del 24/01/2017).
- Tutela del *Tursiops Truncatus* IT5160021, recentemente designato Sito di Interesse Comunitario (pSIC) con Deliberazione 14 gennaio 2020, n. 2.

Si rileva inoltre la presenza di *Posidonia Oceanica* al largo del porto di Livorno, in prossimità della foce dello Scolmatore. Queste specie vegetali, appartenenti alle fanerogame marine, hanno un'importante valenza ecologica e sono indicate come habitat prioritario nella Direttiva Habitat (92/43/CEE). Esse costituiscono delle "comunità climax" del Mar Mediterraneo e sono in grado di autopertuarsi nel tempo se le condizioni ambientali rimangono stabili, rappresentando di fatto un bioindicatore della qualità delle acque marine.

Un censimento delle fanerogame e di altre specie vegetali presenti al largo del Porto di Livorno è stato effettuato nel 2016 a cura dell'Autorità Portuale [4]. Il rilievo geomorfologico è stato effettuato mediante scansione acustica del fondo tramite Side Scan Sonar e verifiche su transetti da parte di operatori scientifici subacquei. È stato restituito infine un fotomosaico del fondale e prodotta una carta geomorfologica, riportata in Figura 2.2. La mappatura è stata recentemente verificata puntualmente con ROV eseguite nel corso dell'ultima campagna di indagine conclusa nel maggio 2022.

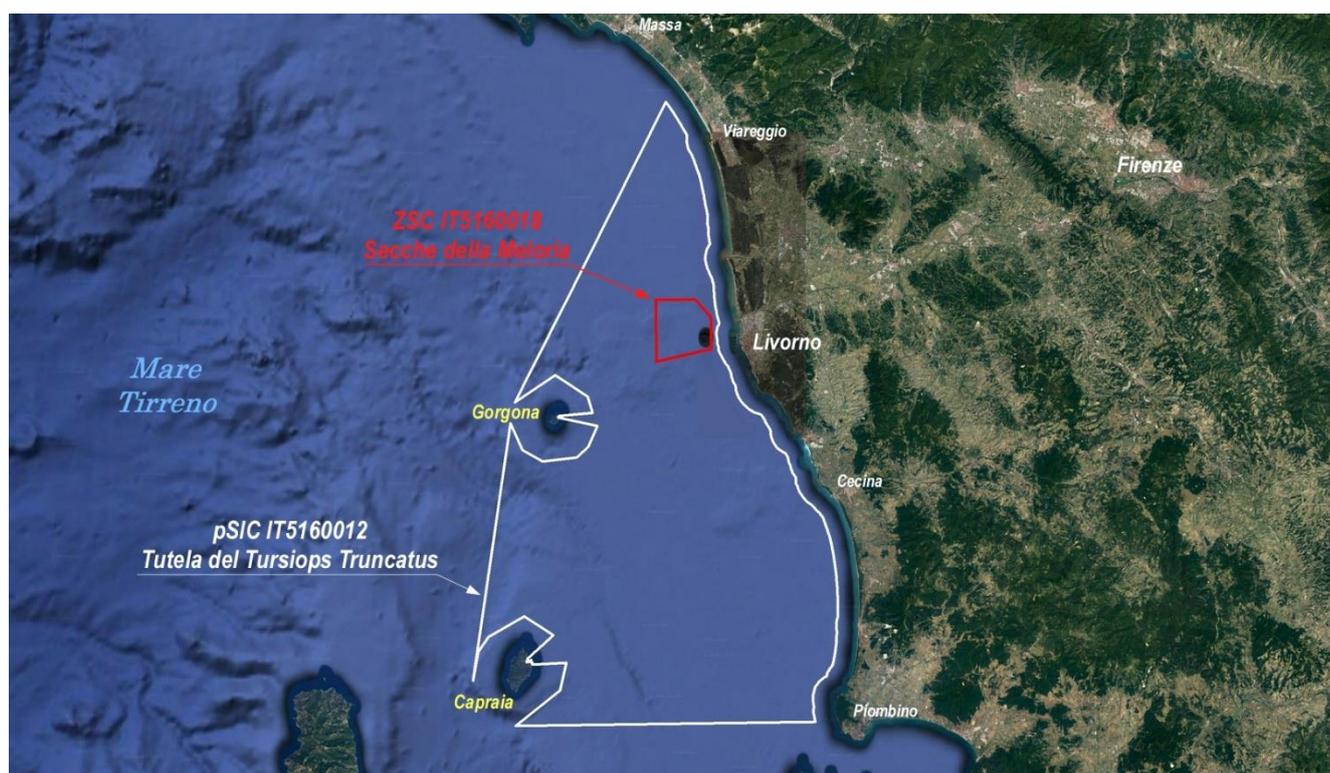


Figura 2.1 – Siti Rete Natura 2000 in prossimità dell'area di intervento

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

Se confrontata con l'estensione dell'Area Marina Protetta Secche della Meloria, l'area indagata dal rilievo geomorfologico (coincidente con l'Area d'intervento di Figura 2.3) è parziale. Riprendendo la relazione esplicativa che accompagna la carta, è possibile comunque mettere in evidenza che, nella maggior parte dell'area indagata, è presente la Posidonia Oceanica. Nella parte più profonda, verso i 10 m di profondità, sono presenti vere e proprie praterie su matte, mentre nella parte costiera più settentrionale, la prateria è pressoché scomparsa. Nella parte settentrionale, a pochi metri di profondità, sono presenti *Cymodocea nodosa* e *Caulerpa prolifera*, notoriamente più tolleranti ad elevati tassi di sedimentazione rispetto alla Posidonia.

Come riportato in Figura 2.3, per completare la definizione delle aree interessate dalla presenza di Posidonia Oceanica è stata reperita presso il Servizio Cartografico della Regione Toscana la mappatura delle biocenosi bentoniche presenti nel braccio di mare antistante al Porto di Livorno. La nuova perimetrazione, che nella parte più prossima al porto ricalca quella del rilievo geomorfologico, individua un'area poco più grande della ZSC Secche della Meloria, con un prolungamento verso sud-est all'altezza dei rioni di Ardenza e Antignano.

L'area di progetto (opere foranee e dragaggi dell'area di intervento e sito di ripascimento in prossimità della foce dell'Arno) comunque non interferisce direttamente con i suddetti siti marini, localizzandosi a distanze minime di 2.5-3 km.

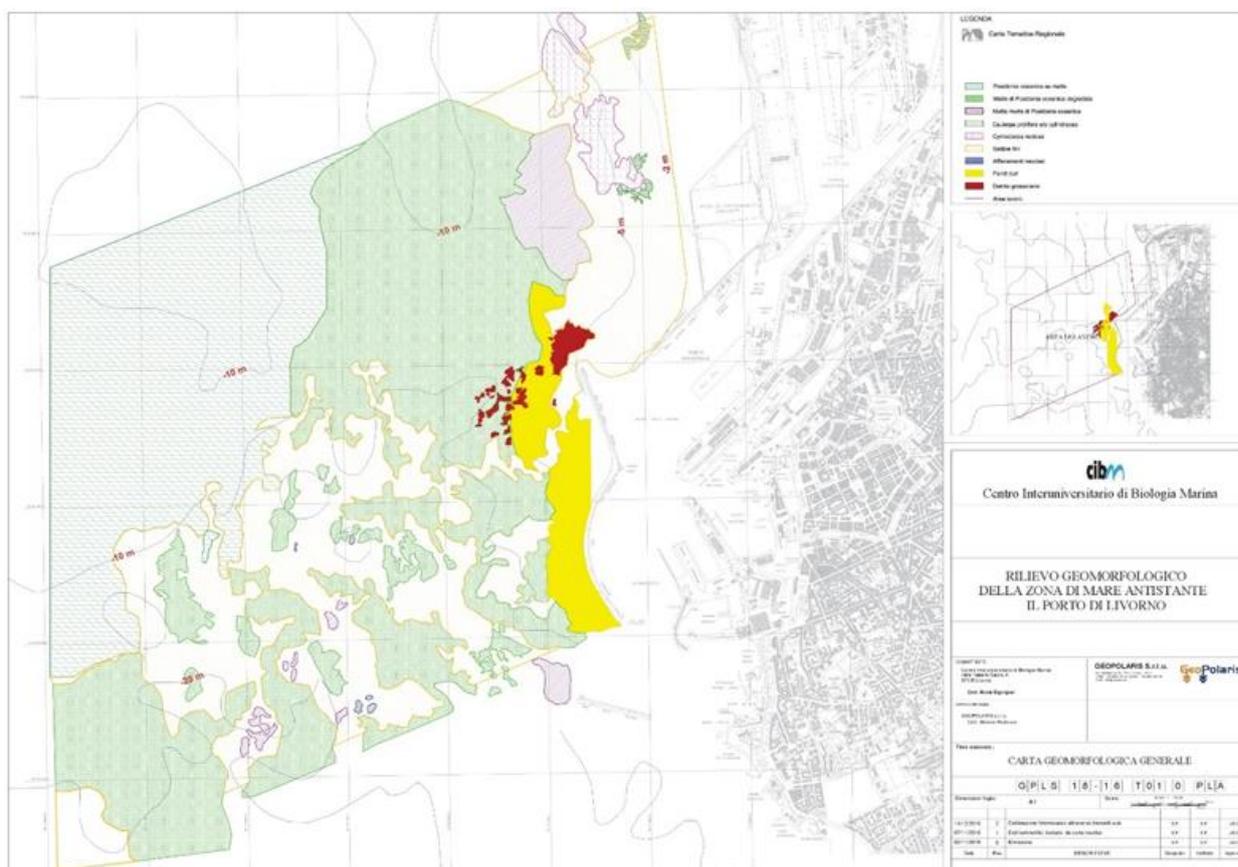


Figura 2.2 – Rilievo geomorfologico della zona di mare antistante il Porto di Livorno eseguito a fine 2016 [4]

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

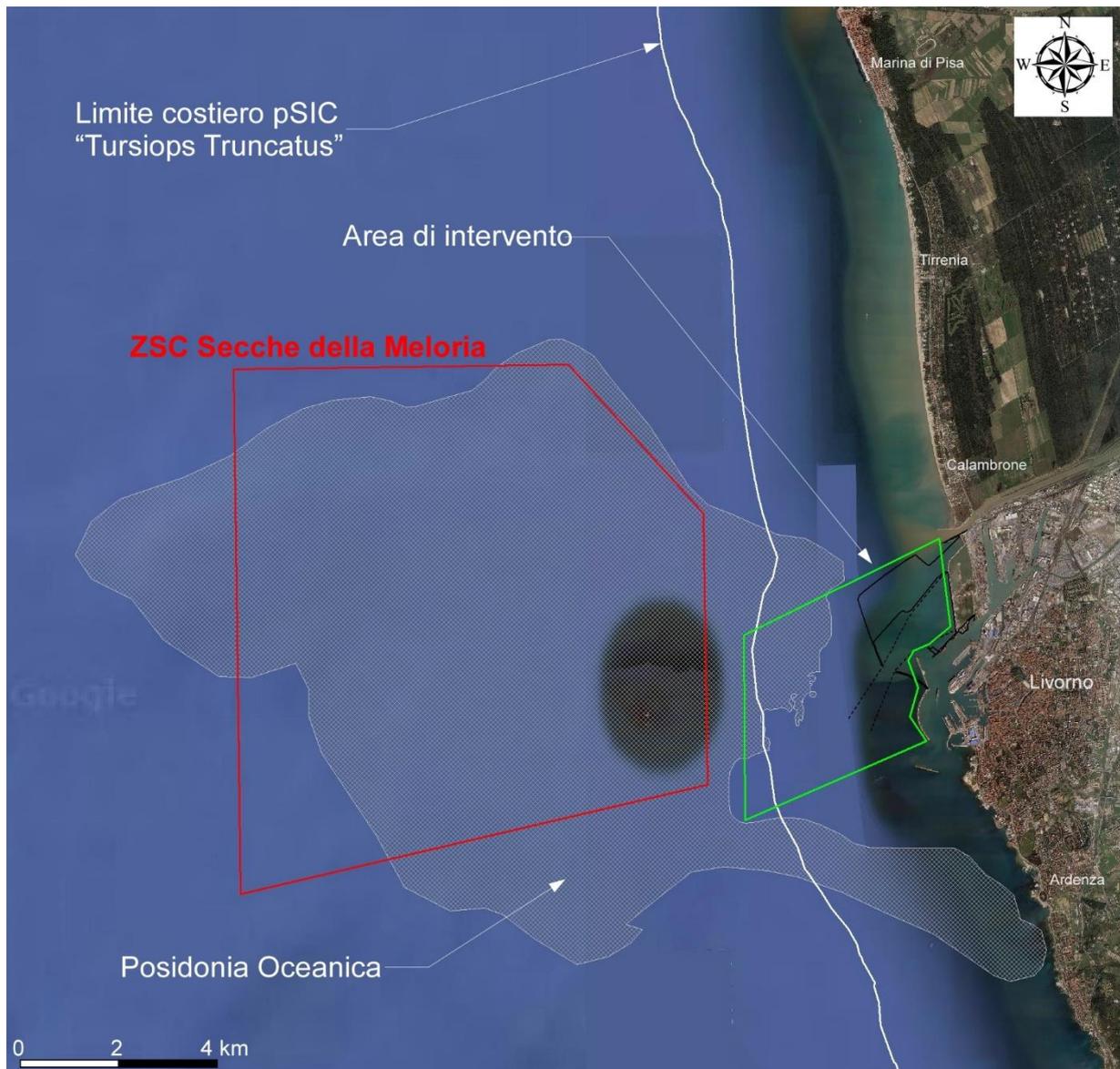


Figura 2.3 – Ubicazione dell'area di intervento rispetto ai limiti della ZSC Secche della Meloria, della pSIC Tutela del Tursiops Truncatus e della mappatura della Posidonia Oceanica

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

### 3 CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA E TRASPORTO SOLIDO INDOTTI DAL MOTO ONDOSI

Nel presente paragrafo sono riportate le analisi eseguite al fine di valutare gli effetti dell'opera nella configurazione di progetto definitivo sulla circolazione idrodinamica e sul trasporto solido indotti dal moto ondoso. La finalità dell'analisi è quella di valutare i possibili impatti sui litorali circostanti, con particolare riferimento a quelli situati a Nord del porto (Calambrone e Tirrenia).

Le analisi svolte nello "Studio morfologico di base" (Elaborato 1233\_PD-D-002) hanno permesso di comprendere le dinamiche che hanno governato in passato l'evoluzione del litorale a Nord del porto di Livorno. La dinamica del trasporto solido locale, alimentata in passato dall'apporto solido fluviale proveniente da Nord, è oggi legata sostanzialmente all'apporto solido dei litorali sopraflutto. Il trasporto solido potenziale in prossimità di foce Arno è diretto da Nord verso Sud e tende a diminuire verso Sud; le spiagge a Nord sono infatti in erosione, mentre quelle più a Sud sono progressivamente più stabili.

I volumi di sedimenti provenienti dall'Arno, in particolare quelli di natura sabbiosa, sono evidentemente trascurabili allo stato attuale, come chiaramente evidenziato dal progressivo approfondimento dei fondali antistanti. I sedimenti provenienti dal Serchio, anche se in minima parte potessero migrare verso Sud, dovrebbero accumularsi a Nord della foce dell'Arno, dove invece si rileva un arretramento di oltre 1 km nell'ultimo secolo. Si può quindi escludere, per il futuro, una sua influenza sul litorale pisano a Sud dell'Arno.

L'erosione del litorale prossimo a foce Arno conferma come l'apporto solido fluviale sia ad oggi assolutamente trascurabile. Quindi, anche se potenzialmente il destino degli apporti solidi fluviali è verso Sud, negli studi su modello non è stato considerato un apporto solido che, se anche fosse presente in misura minima, insisterebbe su fondali di profondità prossima o superiore a quella di chiusura già sulla linea di costa (e lì resterebbe). Vero è invece che lo smantellamento della cuspidi fociva sommersa contribuisce certamente, con la sua progressiva e costante erosione, ad alimentare il trasporto solido litoraneo diretto verso Sud.

Lo studio è stato eseguito inizialmente per la configurazione attuale e successivamente per quella di progetto, analizzando le circolazioni idrodinamiche e il trasporto solido indotti da una serie di mareggiate rappresentative degli eventi di Ponente, Mezzogiorno e Maestrale.

Lo studio della circolazione idrodinamica e del trasporto solido è stato eseguito utilizzando il software Delft3D, una suite modellistica completa 2D/3D realizzata per indagare fenomeni idrodinamici, trasporto di sedimenti, evoluzione morfologica e qualità delle acque in ambienti fluviali, lagunari e costieri.

Il software Delft3D è stato sviluppato dall'istituto Deltares di Delft (NL), un'istituzione indipendente per la ricerca applicata nel settore dell'idraulica, ed è disponibile in formato open-source; è diffusamente utilizzato con successo in tutto il mondo (Olanda, USA, Hong Kong, Singapore, Australia, Italia, etc.) ed è continuamente aggiornato e perfezionato dai ricercatori di Deltares mediante l'impiego delle più avanzate tecniche modellistiche.

Nel caso in esame, il software Delft3D è stato utilizzato nella sua configurazione completa, che include sia la componente idrodinamica che morfodinamica. In particolare, sono stati utilizzati i moduli FLOW/MOR/SED che simulano la circolazione delle correnti e il trasporto solido, e il modulo WAVE, che simula la propagazione del moto ondoso e l'azione generativa del moto ondoso sulle correnti.

Una sintetica descrizione del software Delft3D è riportata in Appendice.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### 3.1 Configurazioni analizzate

Lo studio ha preso in considerazione lo stato di fatto delle opere del porto di Livorno e la configurazione di progetto individuata dal progetto definitivo, che, rispetto alle previsioni del P.R.P. e del PFTE, introduce modifiche alle opere interne e alle aree dragate (vedi sottostante Figura 3.1).

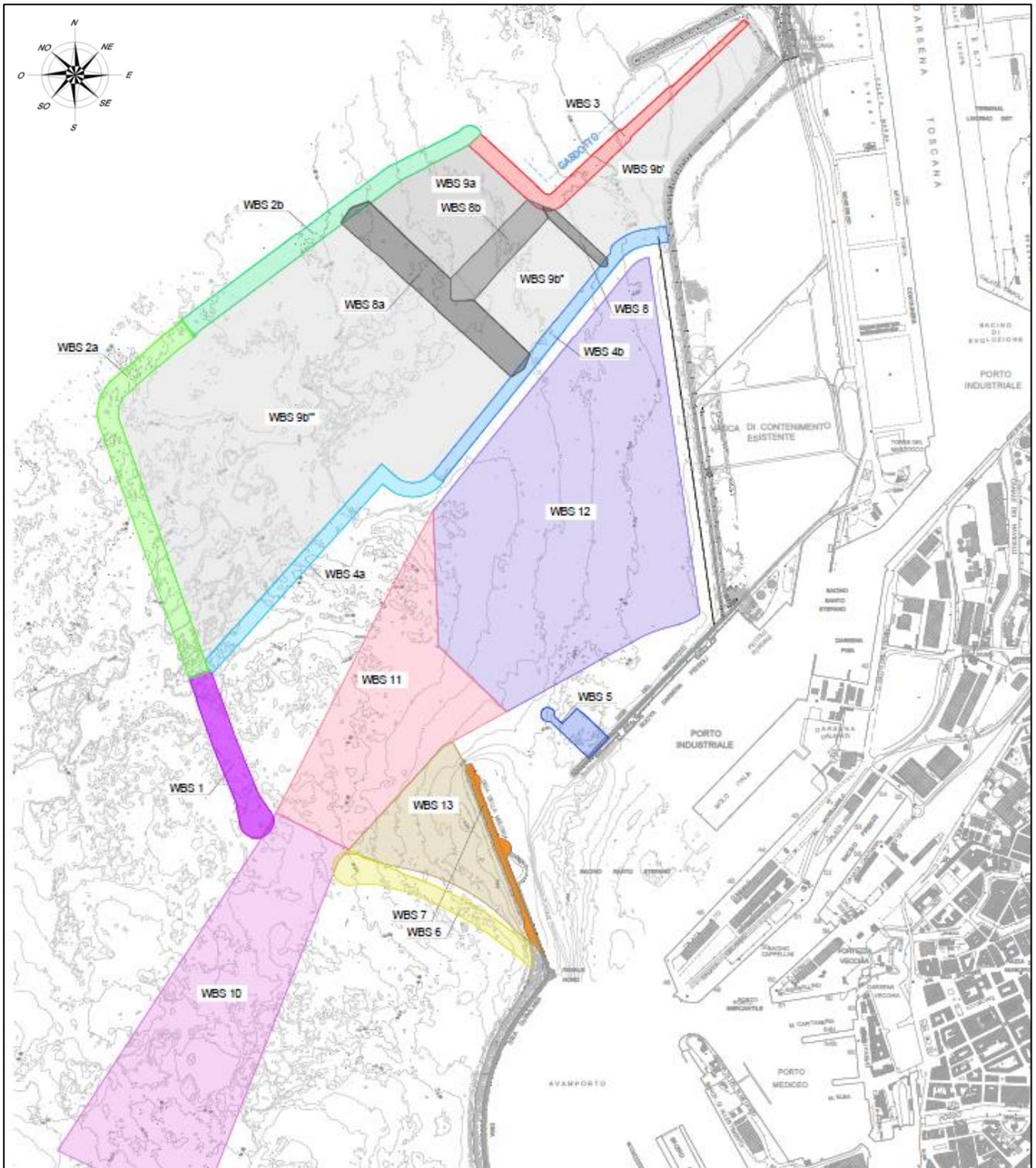


Figura 3.1 – Configurazione di progetto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### 3.2 Definizione del dominio di calcolo

Le simulazioni modellistiche sono principalmente basate sulla schematizzazione dei fondali del litorale antistante l'area portuale di Livorno e la foce del Canale Scolmatore d'Arno.

I dati disponibili, che sono stati impiegati per la costruzione del modello, sono stati essenzialmente i seguenti:

- Rilievo batimetrico dell'area delle Secche della Meloria utilizzato dalla Provincia di Pisa per predisporre lo "Studio idrodinamico e morfodinamico marino" a supporto del "Progetto Definitivo per l'adeguamento idraulico del Canale Scolmatore d'Arno", del 2013 [1].
- Rilievi batimetrici del braccio di mare antistante il litorale che va dalla foce dello Scolmatore d'Arno alla foce del Serchio, estesi da riva fino alla batimetrica -10 effettuati a cura della Provincia di Pisa negli anni 2010-2019.
- Rilievo multi beam effettuato nel 2019 nell'area portuale di Livorno a cura dell'Autorità Portuale, finalizzato alla redazione del Progetto delle opere della Piattaforma Europa.
- Rilievo di dettaglio dell'area di foce dello Scolmatore (9/4/2018) effettuato a cura della provincia di Pisa a supporto dei lavori di armamento della foce stessa.
- Rilievo batimetrico della fascia costiera a nord della foce del Calambrone, eseguito a marzo 2022, per un tratto di circa 20 km. Il rilievo è costituito da strisciate ortogonali alla costa ad interasse di circa 500 m ed estese verso il largo fino alla batimetrica -15.0 m circa.
- Batimetria della carta nautica "Litorale di Livorno" alla scala 1:30000.
- Piano Regolatore Portuale e s.m.i.
- Ipotesi di progetto sviluppate dallo scrivente R.T.P.

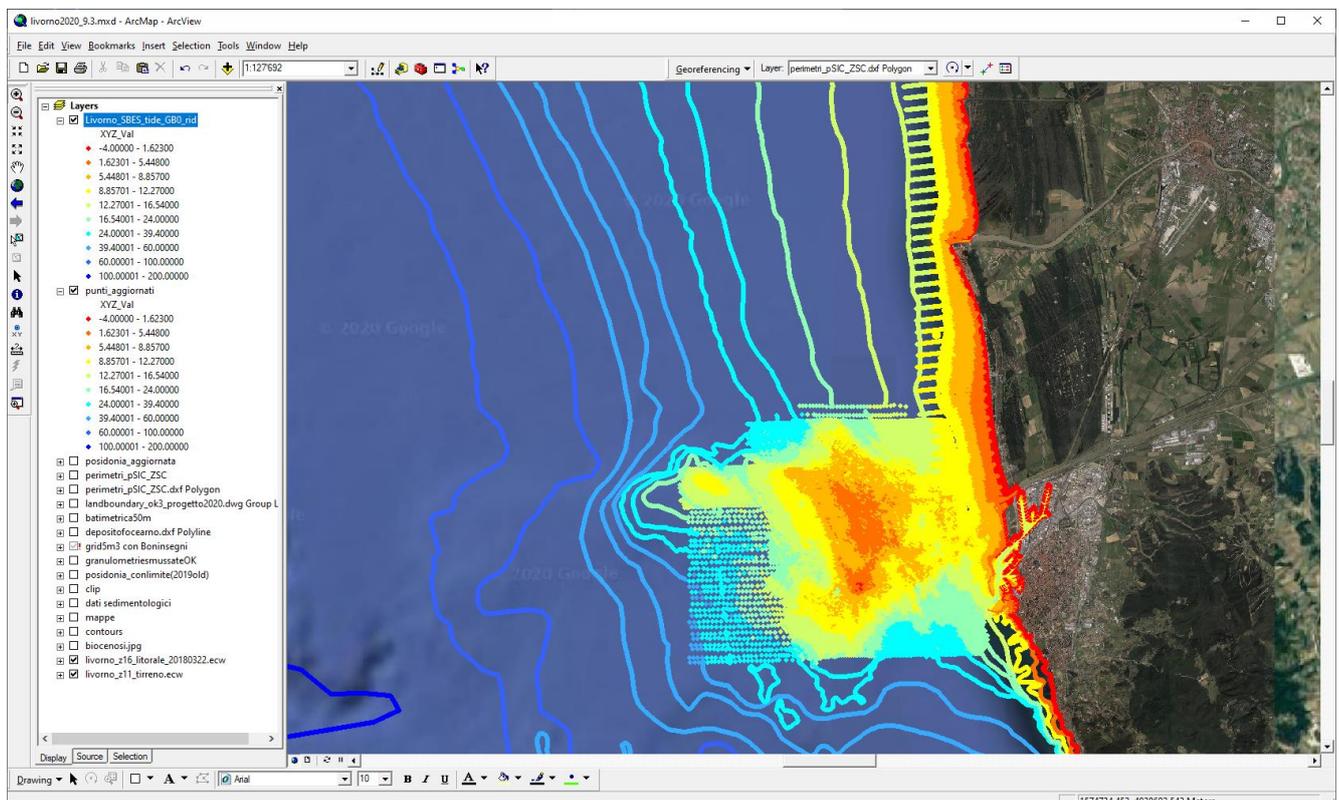


Figura 3.2 – Progetto GIS contenente i punti dei rilievi batimetrici utilizzati per costruire le batimetrie del modello

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto Definitivo	IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx

L'attività preliminare di elaborazione dei dati è consistita nell'analisi, verifica e assemblaggio dei diversi dataset batimetrici. In questa fase sono state utilizzate anche le più recenti foto aeree disponibili al fine della ricostruzione della linea di riva e della schematizzazione delle infrastrutture e manufatti presenti lungo la costa. Successivamente, mediante operazioni di geoprocessing, sono state predisposte le griglie batimetriche da impiegare nella modellazione (DEM). Le operazioni sono state effettuate in ambiente GIS utilizzando il software ArcGis (Figura 3.2).

I moduli del software Delft 3D utilizzano, in generale, griglie strutturata a maglie curvilinee, che possono essere anche diverse tra di loro.

Nel caso in esame, sono state predisposte griglie diverse per il modulo che simula la propagazione del moto ondoso (WAVE) e quello che simula la circolazione e il trasporto (FLOW). In particolare, per il moto ondoso, è stato utilizzato un sistema di 4 griglie annidate a maglie rettangolari, aventi via via dimensioni più ridotte e risoluzione più elevata, in avvicinamento dal largo verso costa. Come rappresentato in Figura 3.3 (immagine in alto), la griglia più esterna ha dimensioni di 70x28.5 km e risoluzione pari a 200 m; la griglia intermedia ha dimensioni di 36.5x20 km e risoluzione pari a 50 m; la terza griglia, la cui estensione è limitata alla fascia costiera compresa tra l'area portuale e la foce dell'Arno, ha dimensioni di 16.5x4 km e risoluzione di 15 m, mentre la griglia più piccola, che descrive nel dettaglio l'area portuale di Livorno, ha dimensioni di 7.3x4.5 km e risoluzione di 10 m.

La griglia del modulo idro-morfologico (FLOW/MOR), rappresentata nella stessa Figura 3.3 (immagine in basso), è invece unica.

La griglia del modulo idro-morfologico si estende all'incirca sullo stesso dominio della maggiore delle griglie del modello del moto ondoso, ed ha una risoluzione variabile tra 250 m, in corrispondenza dei vertici più al largo, e 15 m, nel tratto di maggiore interesse per le indagini; quest'ultimo tratto interessa la costa che va dal porto di Livorno (incluso) alla foce dell'Arno (circa 17 km).

In Figura 3.4 si riporta la batimetria sull'intera griglia di calcolo WAVE, mentre Figura 3.5 e Figura 3.6 è riportato un dettaglio dell'area di studio.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

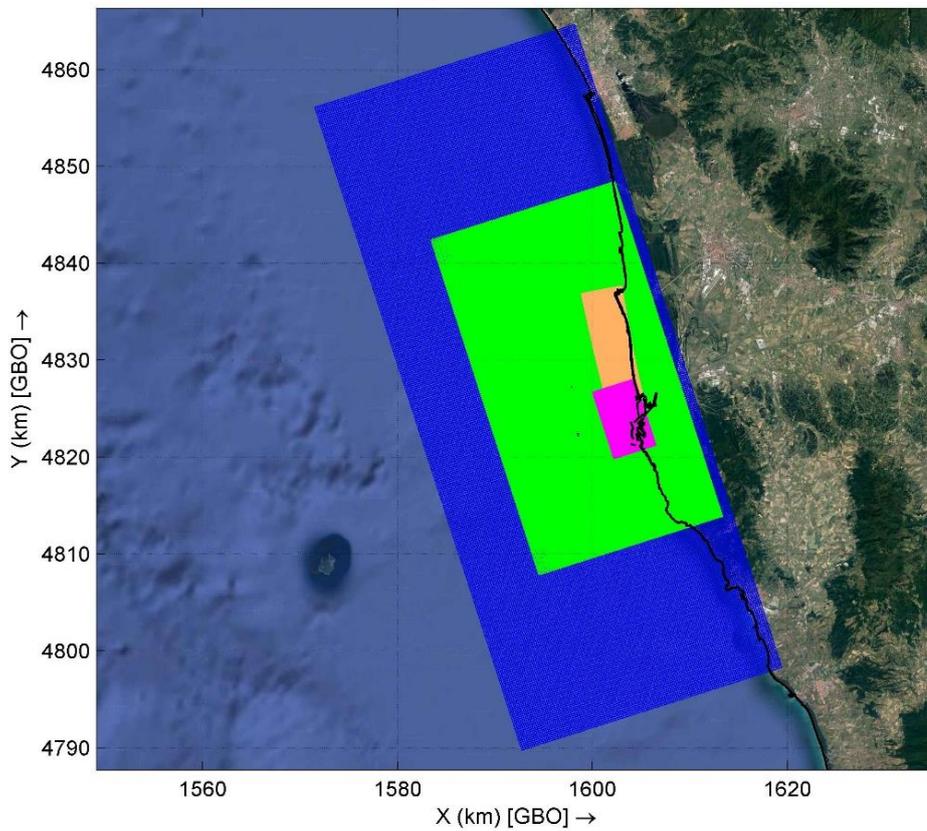
Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

Griglie Delft3D-WAVE



Griglia Delft3D-FLOW e Delft3D-WAVE

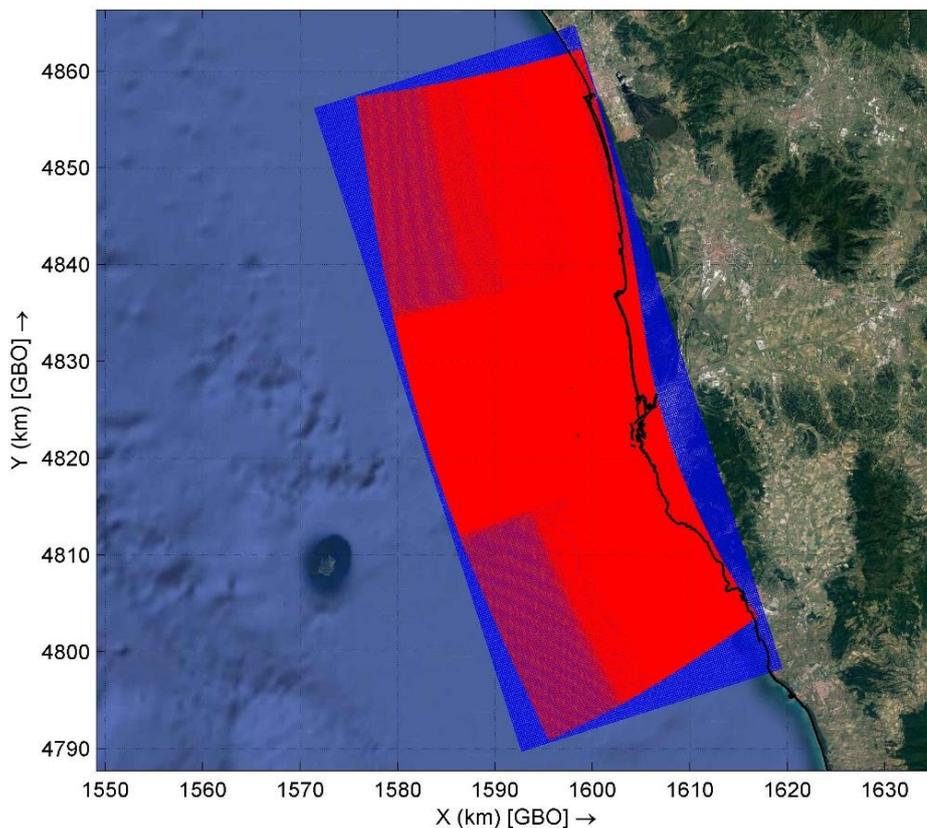


Figura 3.3 – Griglie di calcolo dei modelli Delft3D-WAVE (in alto) e Delft3D-FLOW (in basso)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Batimetria - Stato di fatto

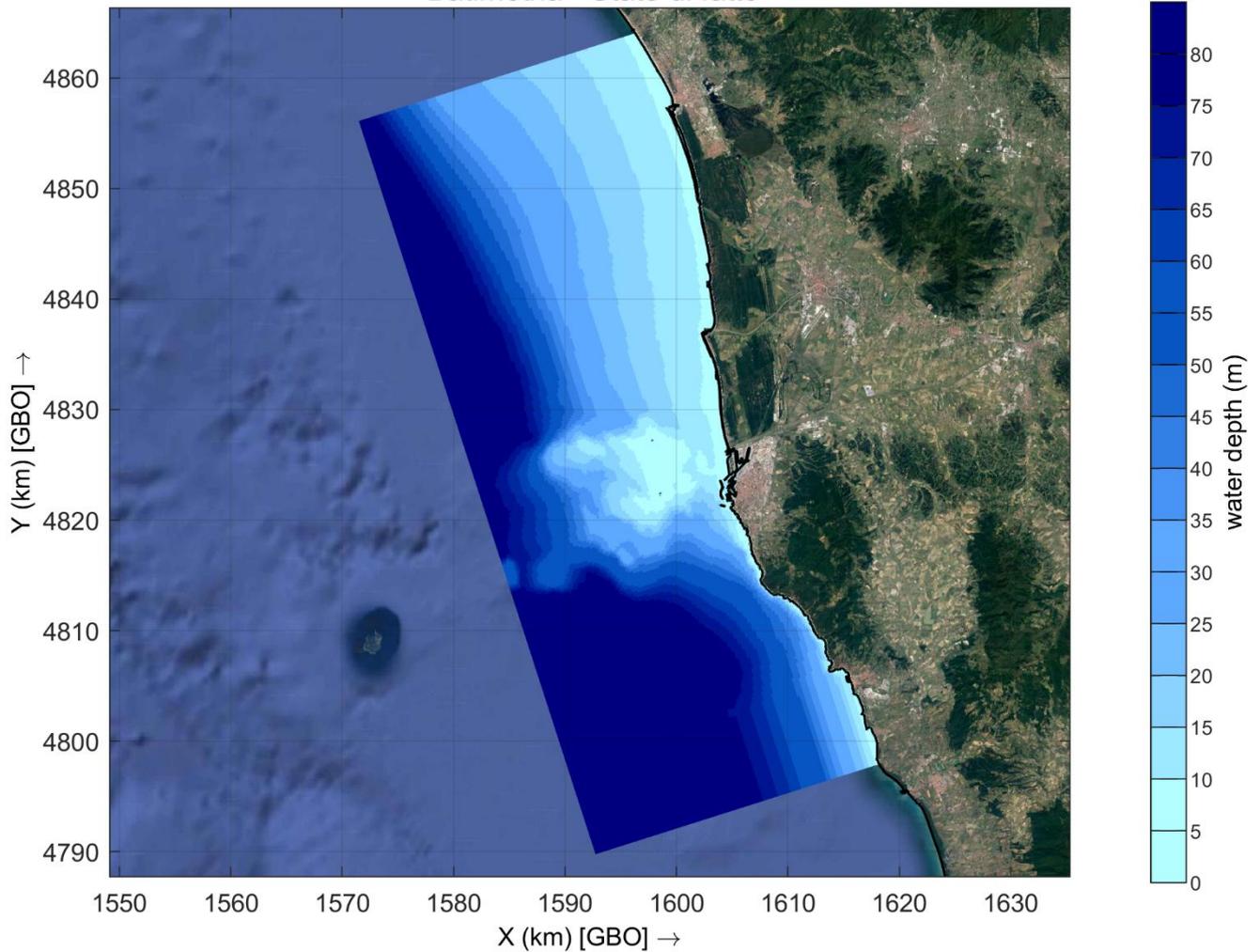


Figura 3.4 – Batimetria dello stato di fatto rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW (batimetria della griglia con risoluzione 200 m del modulo WAVE)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Batimetria - Stato di fatto - Particolare

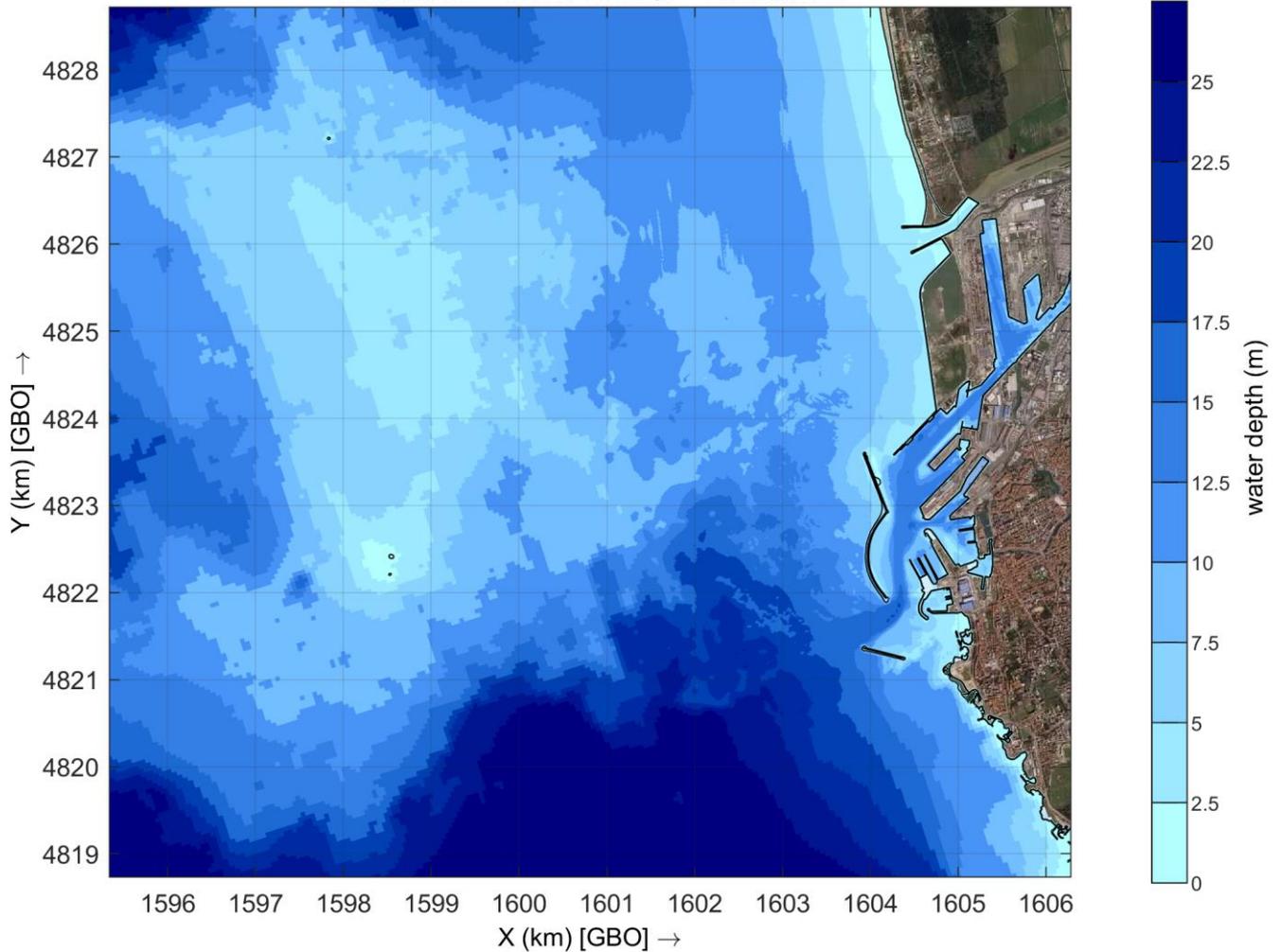


Figura 3.5 – Batimetria dello stato di fatto rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW (particolare delle griglie a maggiore risoluzione in corrispondenza delle Secche della Meloria e del porto di Livorno)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Batimetria - Progetto Definitivo - Particolare

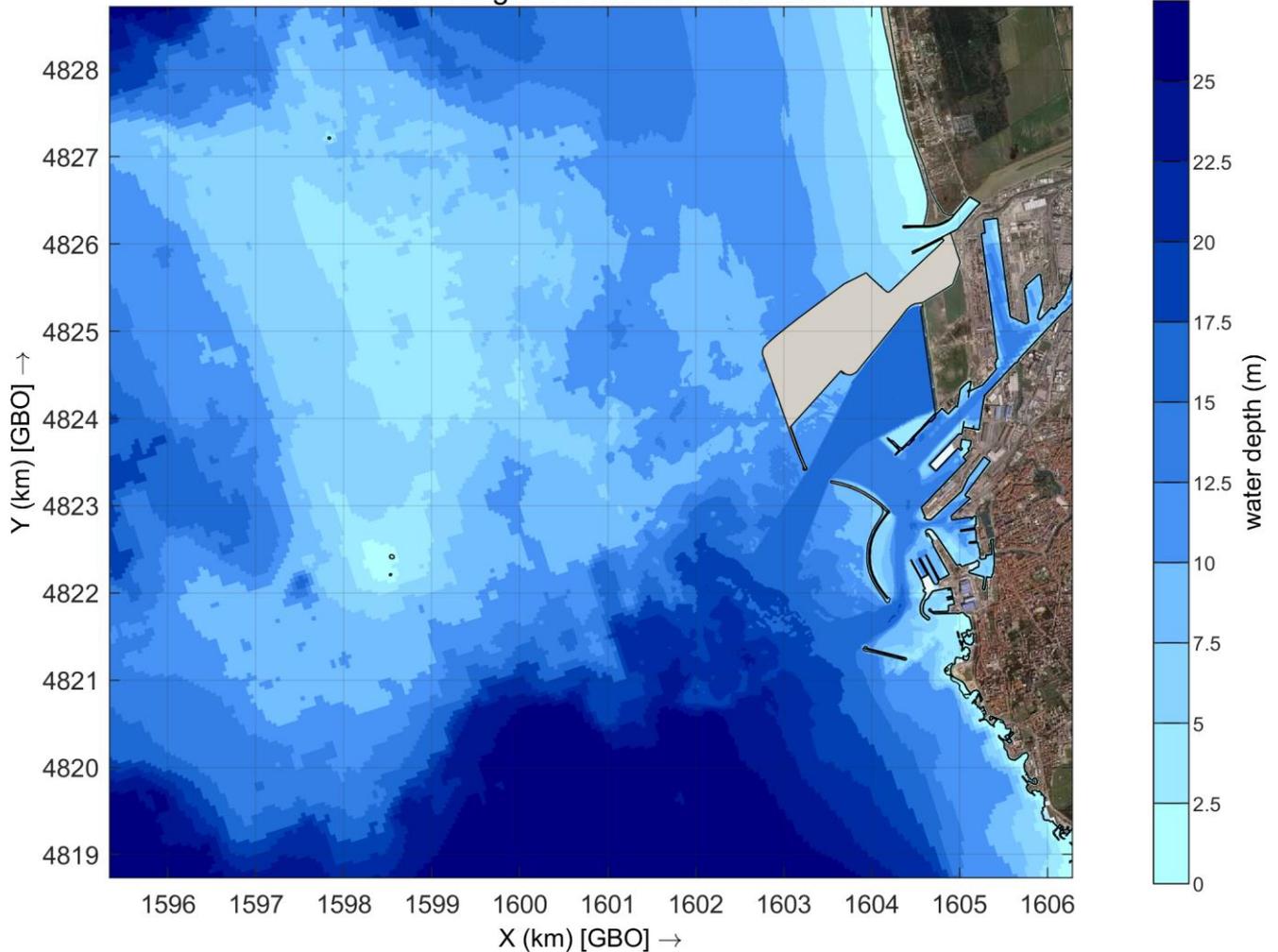


Figura 3.6 – Batimetria della configurazione di progetto rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW (particolare delle griglie a maggiore risoluzione in corrispondenza delle Secche della Meloria e del porto di Livorno)

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

### 3.3 Dati sedimentologici

La dinamica sedimentaria del litorale oggetto di indagine è governata principalmente dagli apporti solidi fluviali e dal trasporto solido litoraneo dovuto alle mareggiate e alle correnti litoranee da queste innescate.

Le portate solide dei due principali corsi d'acqua che insistono sul litorale (l'Arno e, più a Nord, il Serchio) non sono state considerate nello studio del trasporto solido in quanto, nel caso dell'Arno, i volumi di sedimenti provenienti dal fiume, in particolare quelli di natura sabbiosa, sono evidentemente trascurabili allo stato attuale. I sedimenti provenienti dal Serchio, anche se in minima parte potessero migrare verso Sud, dovrebbero accumularsi a Nord della foce dell'Arno, dove invece si rileva un arretramento di oltre 1 km nell'ultimo secolo. Si può quindi escludere, per il futuro, una sua influenza sul litorale pisano a Sud dell'Arno. L'erosione del litorale e del fondale antistante foce Arno testimoniano chiaramente come l'apporto solido fluviale sia assolutamente trascurabile. Quindi, anche se la potenziale destinazione degli apporti solidi fluviali è il tratto di litorale oggetto di studio (cfr. "Studio morfologico di base" Elaborato 1233\_PD-D-002), non si ravvisa alcun costrutto nel modellare un apporto solido che, se anche fosse presente in misura minima, insiste su fondali di profondità prossima o superiore a quella di chiusura già sulla linea di costa. Vero è invece che lo smantellamento della cuspidale fociva sommersa contribuisce certamente, con la sua progressiva e costante erosione, ad alimentare il trasporto solido litoraneo diretto verso Sud.

A sua volta, lo Scolmatore d'Arno, che viene attivato solo di rado, convoglia una portata solida che, in generale, è di molto inferiore rispetto a quelle dei fiumi suddetti e quindi il suo contributo, in termini di alimentazione di sabbie al tratto di costa compreso tra Livorno e Calambrone, si può ritenere poco rilevante. Per questa ragione, ai fini della presente indagine, non è stata affrontata l'analisi del trasporto sabbioso fluviale prodotto dallo Scolmatore, e delle sue interferenze con la dinamica sedimentaria nelle spiagge adiacenti.

È stato invece considerato di particolare interesse il tema della diffusione del "plume" di sedimenti fini (nel campo granulometrico dei limi e delle argille) che gli episodi di piena dello Scolmatore possono introdurre negli specchi acquei antistanti alla foce. Queste valutazioni sono state oggetto delle simulazioni descritte nel successivo capitolo 4.

In questo capitolo sono analizzati gli aspetti della dinamica sedimentaria litoranea legata al moto ondoso, responsabile dell'evoluzione della linea di riva e dei fondali al di fuori dell'ambito di foce.

Sono stati presi in esame, a tale scopo, i dati sedimentologici raccolti nel 2005 da parte della Provincia di Pisa nell'ambito del "Programma provinciale di interventi prioritari di recupero e di riequilibrio del litorale". I dati raccolti in tale ambito consistono in una serie di circa 1300 campioni di sedimento superficiale, prelevati dai fondali antistanti il litorale nel tratto tra Livorno e la foce del Serchio.

I dati del 2005 sono stati integrati per la parte più prossima al porto di Livorno con i campioni raccolti durante la campagna di indagine 2019, realizzata nell'ambito delle indagini ambientali propedeutiche alla deperimetrazione del SIN.

La mappa di Figura 3.7 riporta un'elaborazione, con geoprocessing GIS e restituzione su grid a scala di colori (risoluzione 2.5 m), del valore mediano  $D_{50}$  della granulometria dei sedimenti sul fondale.

L'immagine di Figura 3.7 (a destra) rappresenta il particolare della mappa nel tratto di interesse per lo studio, che va dal Porto di Livorno alla foce dell'Arno. Verso la foce del Calambrone, la granulometria dei sedimenti è, in generale, più fine rispetto a quella che si ritrova a Nord in prossimità della foce dell'Arno, pur trattandosi in ogni caso di sedimenti sabbiosi con diametri  $D_{50}$  compresi tra 125 e 250  $\mu\text{m}$ .

<b>Progetto:</b> Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	<b>Livello progettazione:</b> Progetto Definitivo	<b>Elaborato:</b> IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
---	--	--

Si tratta in ogni caso di campioni di sedimenti superficiali, nei quali può pesare significativamente (o esclusivamente) la sedimentazione recente prodotta dallo scolmatore, anche se globalmente non rilevante. In corrispondenza del porto di Livorno, si registra invece una variabilità più marcata, essendo presenti anche sedimenti limosi ( $D_{50}$  inferiore a  $62.5 \mu\text{m}$ ) in prossimità della diga della Meloria e sabbie più grossolane al largo ( $D_{50}$  compresi tra  $250$  e  $500 \mu\text{m}$ ).

Nelle simulazioni è stato utilizzato un valore medio del diametro caratteristico  $D_{50}$ , rappresentativo delle sabbie fini presenti in tutta l'area di studio; tale valore è stato fissato pari a  $200 \mu\text{m}$ .

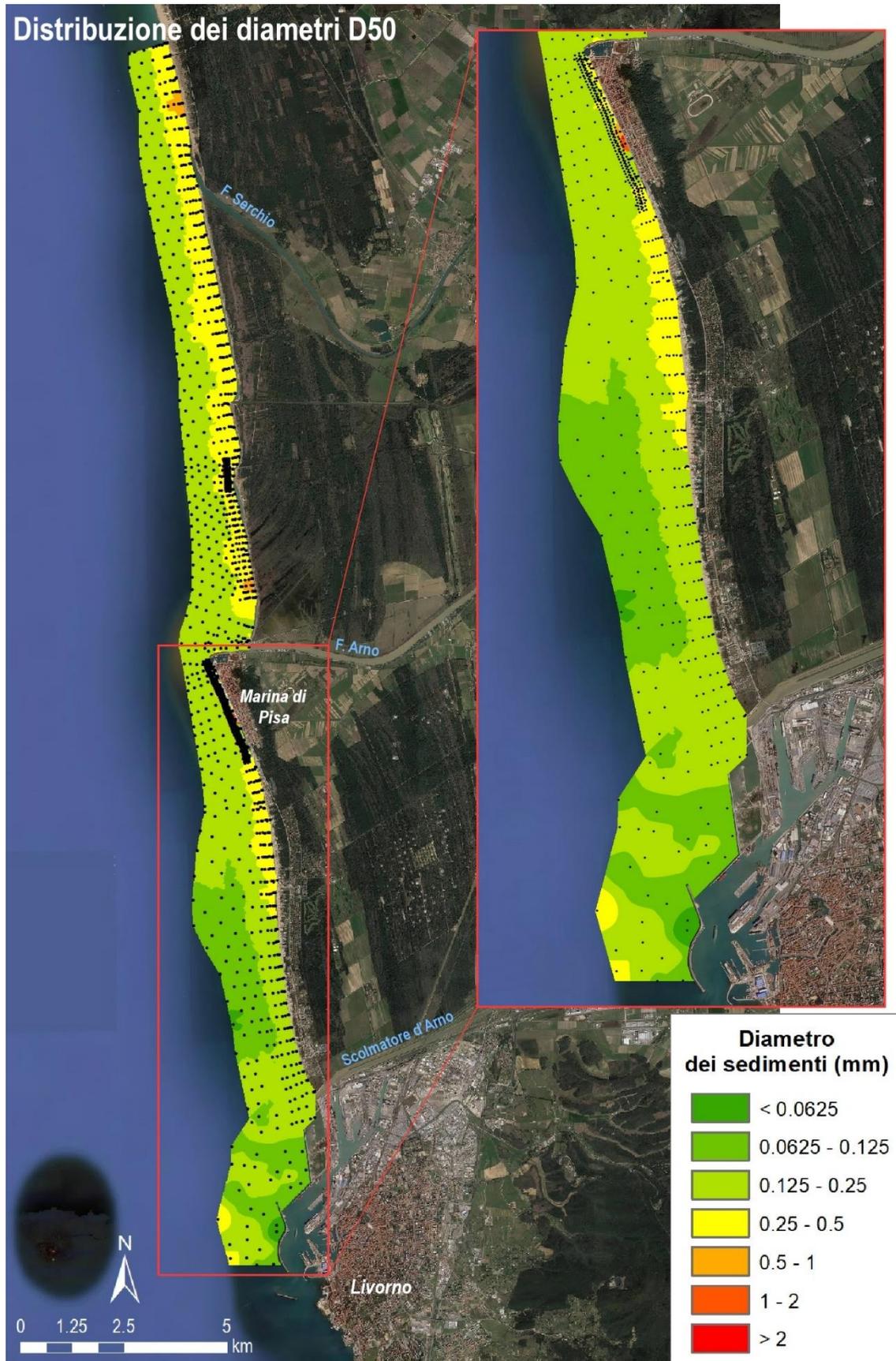


Figura 3.7 – Mappatura del diametro medio  $D_{50}$  dei sedimenti, utilizzata per lo studio della circolazione e trasporto lungo il litorale (elaborazione GIS dei dati delle campagne disponibili: 2005 Prov. di Pisa e 2020)

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

### 3.4 Valori dei parametri utilizzati nel modello

Per le simulazioni con Delft3D sono stati utilizzati i moduli FLOW, MOR, SED e WAVE, accoppiati tra loro per ottenere simulazioni idro-morfodinamiche forzate dal moto ondoso e dal vento (maggiori dettagli sui moduli sono riportati nell'Appendice al presente documento). I parametri utilizzati per la modellazione con i moduli FLOW, MOR, SED sono descritti di seguito e riepilogati in Tabella 3.1:

- è stata utilizzata una griglia strutturata curvilinea a maglie quadrangolari, predisponendo griglie diverse per ogni scenario analizzato (Stato di Fatto –SDF- e Di Progetto definitivo);
- per includere gli effetti legati alla forza di Coriolis, la latitudine è stata posta pari a 43.5 °N (latitudine di Livorno);
- le simulazioni sono state effettuate utilizzando 1 singolo layer (simulazione 2D);
- la durata delle simulazioni è di 12 ore, con time-step di calcolo pari a 0.1 minuti (6 s);
- i processi attivati sono: trasporto di sedimenti, vento e moto ondoso accoppiato all'idrodinamica (online Delft3D-Wave);
- le condizioni iniziali sui livelli e sulla concentrazione di sedimenti sono uniformi sul dominio e pari a 0 (cold start);
- le condizioni al contorno sono applicate ai 3 bordi aperti del dominio: ad Ovest, lato mare, è stata posta una condizione di livello nullo, mentre a Nord e Sud sono state poste condizioni di Neumann (gradiente di livello) nulle per l'intera durata della simulazione; le condizioni di Neumann associate alla condizione addizionale di Coastal Boundary (Cstbnd) consentono l'instaurarsi di correnti litoranee all'interno del dominio di calcolo senza effetti di bordo ([11] e [13]);
- le costanti idrodinamiche (gravità, densità dell'acqua e dell'aria) e i coefficienti di drag del vento assumono i valori di default, adatti al sito;
- per la scabrezza del fondo è stata usata la formulazione di Manning: nei fondali sabbiosi è stato usato un valore di 0.025 (40 m<sup>1/3</sup>/s secondo Strickler), mentre sugli affioramenti rocciosi delle Secche della Meloria ed in corrispondenza delle strutture portuali, è stato usato un valore di 0.04 (25 m<sup>1/3</sup>/s secondo Strickler);
- per i parametri fisici riguardanti la viscosità, di norma oggetto di calibrazione, sono stati usati i parametri di default a seguito di alcune simulazioni di verifica preliminari: il parametro "eddy viscosity" orizzontale è pari a 1 m<sup>2</sup>/s (come in altri studi simili come tipologia [13] [14] [15] e prossimità geografica [16]), mentre la "eddy diffusivity" orizzontale è pari a 10 m<sup>2</sup>/s;
- i sedimenti sono rappresentati da un fuso avente diametro mediano D<sub>50</sub> = 200 µm (§ 3.3);
- la densità dei sedimenti è di 2650 kg/m<sup>3</sup>, mentre lo spessore della coltre è positivo per profondità inferiori ai -50 m s.l.m. (in pratica al di sotto di questa quota il fondo è considerato inerodibile);
- l'evoluzione morfologica del fondo è implementata mediante la formula di Van Rijn (1993) per sedimento non coesivo e ha inizio dopo 60 minuti dall'istante iniziale della simulazione. Per la formula sono usati i parametri di default;
- ai fattori moltiplicativi del trasporto al fondo ed in sospensione dovuti alla corrente e al moto ondoso, che dovrebbero essere oggetto di una calibrazione specifica, sono stati assegnati i seguenti valori, a seguito di simulazioni di sensitività preliminari ;al trasporto dovuto alle correnti è stato assegnato il fattore moltiplicativo 1 (default) mentre è stato ridotto al 10% il contributo al trasporto associato al moto ondoso, come suggerito dal manuale di Delft3D-FLOW [11];

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

- il vento è uniforme nello spazio e, dopo la prima ora di simulazione dove cresce linearmente, si mantiene costante nel tempo;
- l'aggiornamento delle quote di fondo delle maglie è condotto dal modulo MOR;
- i risultati (mappa) sono estratti ogni ora, mentre l'accoppiamento col modulo WAVE avviene ogni 3 ore di simulazione.

Delft3D-FLOW	
Griglia di calcolo	
Tipo griglia	Delft3D strutturata curvilinea
Batimetria	Specifica per ogni configurazione
Sistema di coordinate	Cartesiano
Dimensioni M x N	1348 x 451
Latitudine	43.5°
Orientazione	0°
Layer verticali	1
Impostazioni temporali	
Durata simulazione	12 ore
Time step	0.1 min (6 s)
Processi	
Sedimenti	Attivo
Moto ondoso	Online Delft3D-WAVE
Vento	Attivo
Condizioni iniziali	
Tutti i parametri	Default
Condizioni al contorno	
Bordi	1 X water level time-series
	2 X Neumann time-series
	Altri parametri = default
Parametri fisici	
Costanti	Default
Scabrezza	Manning formula
	Distribuzione spaziale: da file .rgh
Viscosità	Default
Sedimenti	D50 = 200 µm
	Initial sediment layer thickness: da file .sdb
Morfologia	Spin-up interval = 60 min
	Wave-related suspended transport factor = 0.1
	Wave-related bed-load transport factor = 0.1
	Altri parametri = default
Vento	Uniforme, da file .wnd
Parametri numerici	
Tutti i parametri	Default
Monitoring	
Cross-sections	Lettura da file .crs
Parametri addizionali	
Keyword	Cstbnd = #Y#
Output	
Storage	Store map results = 60 min
	History interval = 60 min
	Store communication file = 180 min
	Altri parametri = default

Tabella 3.1 – Impostazioni e parametri modellistici adottati per il modulo Delft3D-Flow

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

Il modulo WAVE di Delft3D si basa sul modello SWAN (Simulation WAVes Nearshore) nella versione 40.72 ABCDE. I parametri per il modulo WAVE sono riportati di seguito e riepilogati in Tabella 3.2:

- la griglia utilizzata è strutturata curvilinea a maglie quadrangolari. Sono state predisposte 4 griglie diverse per ogni scenario analizzato (SDF e configurazione di progetto) per un totale di 8 griglie (Figura 3.3);
- la discretizzazione dello spettro del moto ondoso nel dominio delle direzioni è di 36 settori, nel dominio delle frequenze è di 24 bins (valori di default). La frequenza minima è stata assunta pari a 0.06 mentre quella massima è pari a 0.2 per l'onda più alta (direzione 250°N) e 0.4 per le onde più basse (direzioni 170°N e 290°N);
- l'accoppiamento con l'idrodinamica avviene sui livelli idrometrici;
- le simulazioni sono stazionarie e l'accoppiamento col modulo Flow avviene ogni 3 ore di simulazione;
- le condizioni al contorno sono applicate sui bordi esterni della griglia più grande, mediante il riconoscimento dell'orientamento del lato; le condizioni d'onda ( $H_s$ ,  $T_p$ , Dir) sono uniformi;
- lo spettro utilizzato per le onde è di tipo Jonswap con coefficiente di appuntimento di 3.3 (default); è applicato un directional spreading di 4;
- le dighe e i moli foranei esistenti sono stati modellati come "obstacles" lineari, scegliendo la tipologia "dam" (ostacolo non trascinabile), usando la formulazione di Goda (1967) per il coefficiente di trasmissione.
- le costanti fisiche (gravità, densità dell'acqua) assumono i valori di default, adatti al sito;
- il vento è costante e uniforme sulle griglie di calcolo;
- i processi fisici attivati includono: processo generativo di 3° generazione, frangimento per interazione col fondo (Battjes&Janssen, 1976), attrito sul fondo (Hasselmann, 1973), whitecapping (Komen, 1984), quadruplette, generazione da vento, rifrazione e shift in frequenza (con valori di default); sono state aggiunte le interazioni triadi non lineari (Eldeberky&Battjes, 1996) e la diffrazione dovuta agli ostacoli, aumentando a 50 gli smoothing steps (Holthuijsen, 1993);
- gli output sono estratti per tutte le griglie WAVE e assemblati automaticamente durante la corsa modellistica per fornire le forzanti (radiation stress) per la griglia FLOW.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

<b>Delft3D-WAVE</b>	
Griglie di calcolo	
Tipo di griglie	Delft3D strutturata curvilinea
Batimetria	Specifica per ogni configurazione
Numero griglie	4
Risoluzione spettrale	Fmin = 0.06
	Fmax = 0.2-0.4
	Altri parametri = default
Nesting	Attivo
Idrodinamica	Flow + wave: water level
Impostazioni temporali	
Water level correction	Default
Condizioni al contorno	
Bordi	3
Condizioni sul bordo	Uniformi, variabili in base alle onde utilizzate
Spettro	Default (Jonswap)
Ostacoli	
Tipologia	Dam
Altezza	Variabile: da file .obt
	Altri parametri = default
Parametri fisici	
Costanti	Default
Vento	Uniforme, variabile in base alle onde utilizzate
Processi	Depth-induced breaking = default
	Non-linear triad interactions = attivo
	Bottom friction = default
	Diffraction = attivo
Altro	Wind growth = attivo
	Altri parametri = default
Parametri numerici	
Tutti i parametri	Default
Output	
Computational mode	Default (stationary)
Coupling interval	180 min
Output	180 min
	Altri parametri = default

Tabella 3.2 – Impostazioni e parametri modellistici adottati per il modulo Delft3D-Wave

### 3.5 Condizioni al contorno

Per la simulazione delle condizioni caratteristiche del sito sono state utilizzate mareggiate con durata media complessiva 1 giorno/anno, ottenute dall'elaborazione del clima ondoso a sua volta ottenuto dall'elaborazione della serie ondometrica oraria del periodo 1979-2018 (punto UNIGE 585).

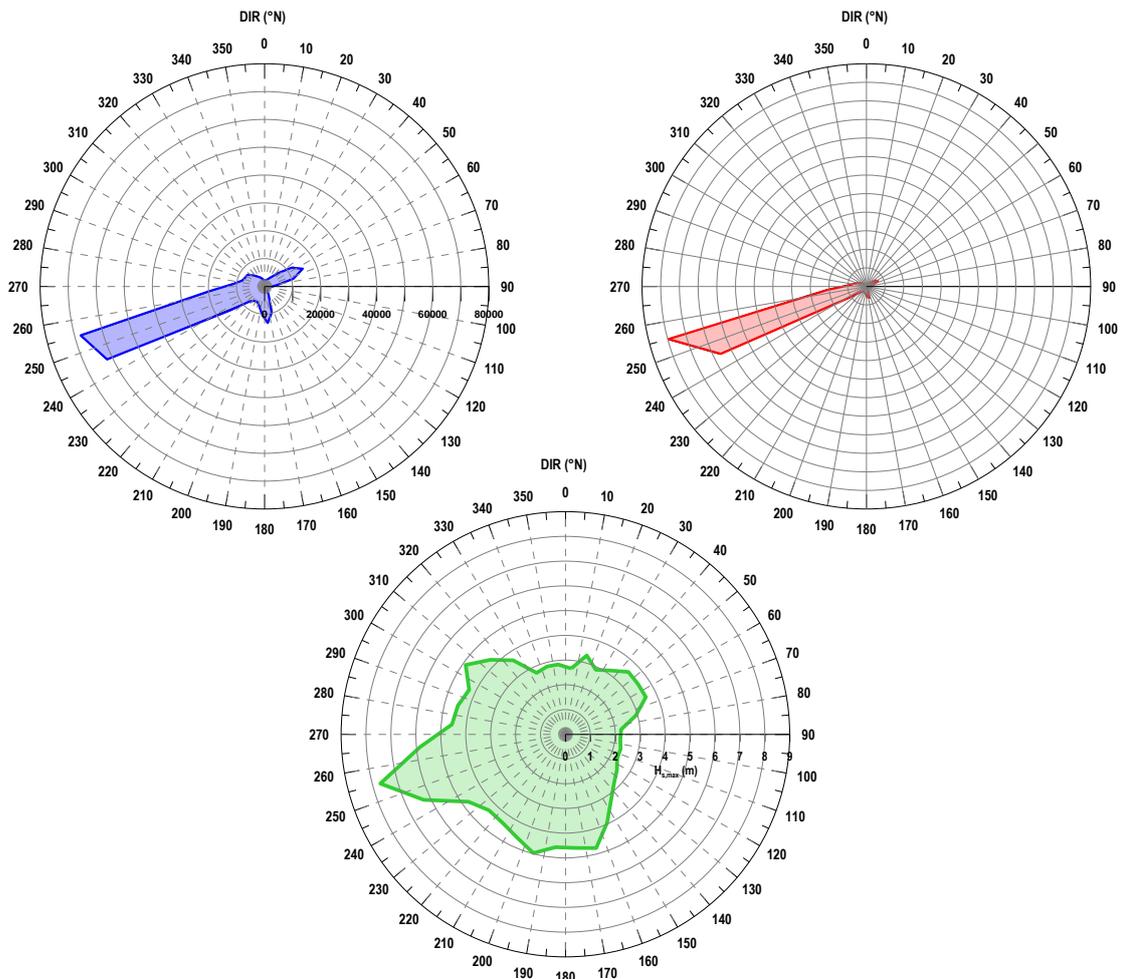


Figura 3.8 – Rose delle frequenze (blu), delle energie (rosso) e delle altezze significative massime (verde) (punto UNIGE 585, periodo 1979-2018)

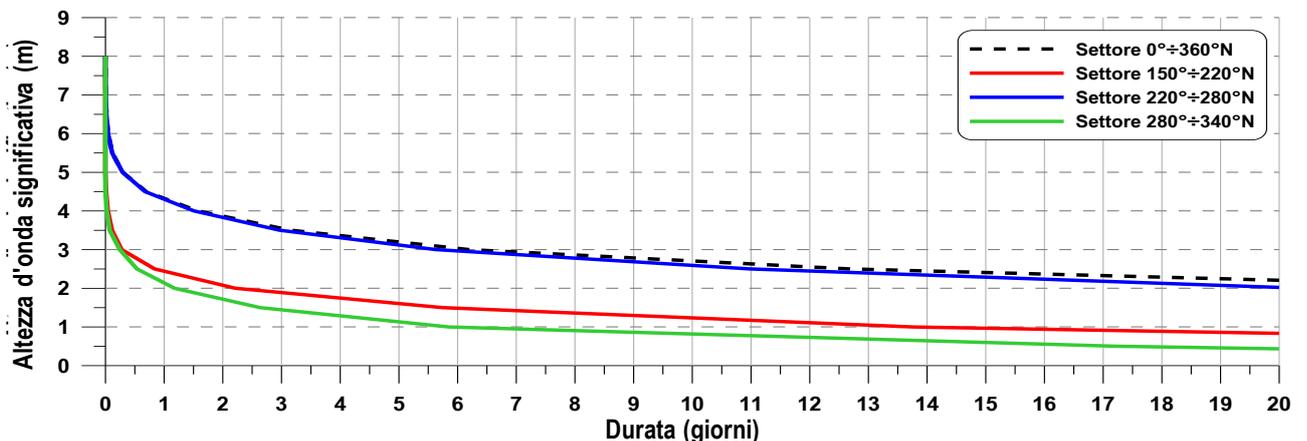


Figura 3.9 – Curve di durata dell'altezza significativa (punto UNIGE 585, periodo 1979-2018) per settore di provenienza

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

Settore	Durata (gg/anno)	Hs (m)	Tp (s)	DIR (°N)	Vel vento (m/s)	Dir Vento (°N)
150-220	1	2.44	6.73	170	10.0	170
	5	1.60	6.14		7.7	
	7	1.42	5.82		7.3	
220-280	1	4.31	9.40	250	12.2	250
	5	3.12	8.71		9.9	
	7	2.87	8.44		9.5	
280-340	1	2.14	7.30	290	8.4	290
	5	1.13	6.82		5.3	
	7	0.95	5.60		5.4	

Tabella 3.3 – Caratteristiche delle mareggiate associate alle diverse durate medie; in giallo gli eventi simulati

È stato considerato l'effetto del vento, generato a partire dalle caratteristiche delle onde secondo la formulazione proposta dallo Shore Protection Manual [17] per il caso di mare pienamente sviluppato. Le formule utilizzate per il calcolo del vento relativo a ciascuna mareggiata sono le seguenti (Shore Protection Manual, Volume I, Tabella 3-2 [17]):

$$u_A = 0.71 \cdot u^{1.23}$$

$$u = \left( \frac{33.432 \cdot H_s}{0.71 \cdot T_p} \right)^{1/1.23}$$

È stata cioè utilizzata la formulazione valida in acque profonde per il mare completamente sviluppato, indipendente quindi dal fetch.

I campi di corrente generale sotto costa (forzati dalla marea) che si verificano nel Mar Tirreno Settentrionale, sono ragionevolmente trascurabili rispetto a quelli generati dalle onde e dal vento. Conseguentemente si è assunto sul bordo occidentale del dominio di calcolo in mare aperto un livello del mare pari a 0 m s.l.m. costante nel tempo, mentre sui bordi settentrionale e meridionale sono state applicate condizioni di gradiente di livello nullo (condizioni di Neumann), per permettere l'instaurarsi di correnti litoranee all'interno del dominio di calcolo senza effetti di bordo.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

### 3.6 Scenari analizzati

Le simulazioni sono state effettuate per le tre mareggiate indicate nel paragrafo 3.5 (Tabella 3.3), con direzione di provenienza pari a 250°N, 170°N e 290°N e durata di 1 giorno/anno.

Le simulazioni sono state effettuate nell'ipotesi di fondo mobile (modulo MOR), assumendo per i sedimenti al fondo un diametro medio uniforme pari a 200 µm (valore medio in base ai dati sedimentologici disponibili, si veda il par. 3.3).

Le simulazioni sono state effettuate considerando attiva l'azione del vento, la cui direzione è stata assunta concorde con quella del moto ondoso al largo e che è stata applicata uniformemente sia per la propagazione del moto ondoso che per la circolazione idrodinamica.

Nella Tabella 3.4 sono elencate le 6 simulazioni effettuate, i cui risultati sono illustrati nei paragrafi che seguono.

<b>Caso</b>	<b>Configurazione</b>	<b>Mareggiata</b>	<b>Durata</b>
Circ 1	Stato di fatto	250°N	1 g/anno
Circ 2	Progetto definitivo	250°N	1 g/anno
Circ 3	Stato di fatto	170°N	1 g/anno
Circ 4	Progetto definitivo	170°N	1 g/anno
Circ 5	Stato di fatto	290°N	1 g/anno
Circ 6	Progetto definitivo	290°N	1 g/anno

*Tabella 3.4 – Scenari analizzati nello studio della circolazione idrodinamica e del trasporto solido dei sedimenti in sospensione*

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

### 3.7 Risultati delle simulazioni

#### 3.7.1 Propagazione del moto ondoso

La Figura 3.10 riporta il campo d'onda calcolato con il modello nel caso della mareggiata più intensa tra quelle considerate, proveniente dal settore di 250°N (Ponente), con altezza significativa dell'onda al largo di 4.31 m, periodo di picco di 9.4 s e velocità del vento di 12.2 m/s. L'immagine rappresenta con una scala di colori la distribuzione dell'altezza d'onda e con vettori la direzione dell'onda stessa.

La direzione di provenienza della mareggiata coincide con il settore al quale è associata la quasi totalità del moto ondoso proveniente dal largo; si può quindi assumere che il risultato della simulazione individui le "condizioni caratteristiche del sito", responsabili della dinamica litoranea.

L'elemento più evidente che emerge dall'immagine è il forte effetto rifrattivo, diffrattivo e dissipativo prodotto dalle Secche della Meloria, che creano sostanzialmente uno schermo alla propagazione del moto ondoso nel braccio di mare antistante la foce del Calambrone.

L'immagine di Figura 3.11 rappresenta nel dettaglio il campo d'onda tra la foce dell'Arno e il Porto di Livorno. Si osserva come l'onda, che al largo si propaga in direzione praticamente ortogonale al litorale, sia smorzata dalle Secche, sulle quali l'altezza d'onda si riduce a circa 1.5 m. Il tratto di litorale che va dal porto di Livorno fino a Marina di Pisa è pertanto soggetto ad un'azione del moto ondoso apprezzabilmente inferiore a quella che insiste sui litorali limitrofi, e che deriva in buona parte dalla combinazione dell'energia delle onde che per effetti di rifrazione e di diffrazione si presentano sotto costa dopo aver aggirato le Secche su entrambi i lati.

La successiva immagine di Figura 3.12 mostra il medesimo campo d'onda calcolato con il modello nella configurazione di progetto.

Il confronto tra la mappa relativa allo stato di fatto e quella relativa alla configurazione di progetto evidenzia che l'intervento previsto non modifica apprezzabilmente la distribuzione dell'azione d'onda lungo il litorale, restando l'effetto delle Secche nettamente prevalente sulle modifiche all'infrastruttura portuale. Le uniche differenze apprezzabili si riscontrano nelle immediate adiacenze del limite settentrionale delle opere, in prossimità della foce dello Scolmatore d'Arno.

Le successive immagini (Figura 3.13 e Figura 3.14) rappresentano, con maggiore dettaglio e con una diversa scala dei colori, il campo d'onda nelle immediate adiacenze dell'area portuale, per le due configurazioni esaminate. Le mappe evidenziano che le differenze tra le configurazioni, lungo il litorale a Nord della foce dello Scolmatore, sono praticamente impercettibili.

Apprezzabili differenze si riscontrano, invece, nello specchio d'acqua immediatamente antistante la foce dello Scolmatore stesso, dove il moto ondoso è smorzato per la protezione offerta dalle opere in progetto. L'altezza d'onda in corrispondenza delle testate dei moli che armano la foce del canale, che nello stato attuale è di circa 1.8÷2.0 m, nella configurazione di progetto si riduce apprezzabilmente, soprattutto sul lato Sud della foce.

Le successive immagini (da Figura 3.15 a Figura 3.19) riportano i campi d'onda ottenuti per la mareggiata proveniente dalla direzione 170°N (Mezzogiorno) con altezza significativa dell'onda al largo di 2.44 m, periodo di picco di 6.73 s e velocità del vento di 10.0 m/s. Data la minor intensità di questa mareggiata rispetto alla precedente, in questo caso la scala dei colori è stata modificata per adeguarla al più ristretto intervallo di variazione dell'altezza d'onda.

L'immagine complessiva di Figura 3.15 evidenzia in primo luogo come, per effetto sia della conformazione del litorale, sia della presenza delle Secche della Meloria, le onde provenienti dal settore

<b>Progetto:</b> Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	<b>Livello progettazione:</b> Progetto Definitivo	<b>Elaborato:</b> IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
---	--	--

meridionale incidano molto debolmente sul litorale a Nord di Livorno, verso il quale si propagano con altezza molto smorzata dalla rifrazione.

Le mappe a minor scala, ed in particolare quelle di maggior dettaglio (da Figura 3.18 a Figura 3.19) evidenziano che le opere in progetto producono un'ulteriore attenuazione del moto ondoso nella parte meridionale del litorale oggetto di studio, a causa della maggiore estensione verso il largo delle opere foranee, che schermano le onde provenienti dal quadrante meridionale. Questo effetto, poco significativo data la già debole intensità del moto ondoso incidente sul litorale, si estende approssimativamente per 3.5 km dalla foce del Calambrone fino alle spiagge di Tirrenia.

Le immagini successive (da Figura 3.20 a Figura 3.24), infine, riportano i risultati delle simulazioni effettuate con il modello del moto ondoso per la mareggiata proveniente dalla direzione 290°N (Maestrale), altezza significativa di 2.14 m, periodo di picco di 7.3 s e velocità del vento di 8.4 m/s. Anche in questo caso la scala dei colori è stata adattata rispetto all'altezza d'onda, che è di molto inferiore rispetto al primo dei due casi illustrati precedentemente.

Le mappe a maggior scala di Figura 3.20 e Figura 3.21 evidenziano che, a differenza del caso precedente, in questo caso il litorale a Nord di Livorno risulta sostanzialmente esposto all'attacco ondoso proveniente dal settore NW. Tuttavia anche in questo caso l'effetto di schermo prodotto dalle Secche della Meloria è particolarmente evidente in tutto il tratto che va dalla foce del Calambrone al litorale di Tirrenia, dove le onde risultano apprezzabilmente smorzate rispetto al tratto adiacente posto più a Nord.

In questo caso, trovandosi le opere in progetto sottoflutto rispetto all'attacco ondoso, le differenze sul litorale dovute alla presenza delle opere stesse sono praticamente trascurabili.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 250°N - Stato di fatto

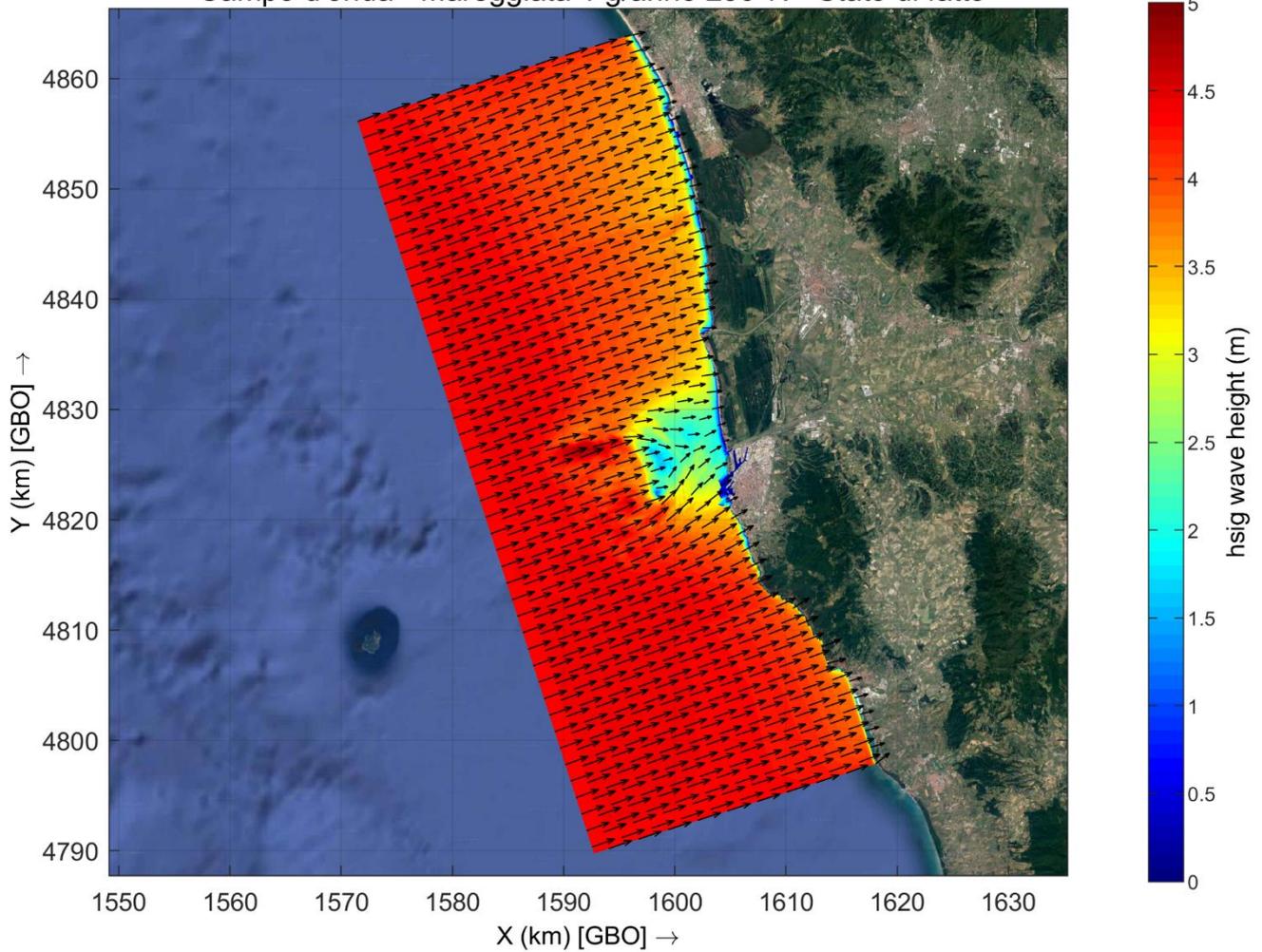


Figura 3.10 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

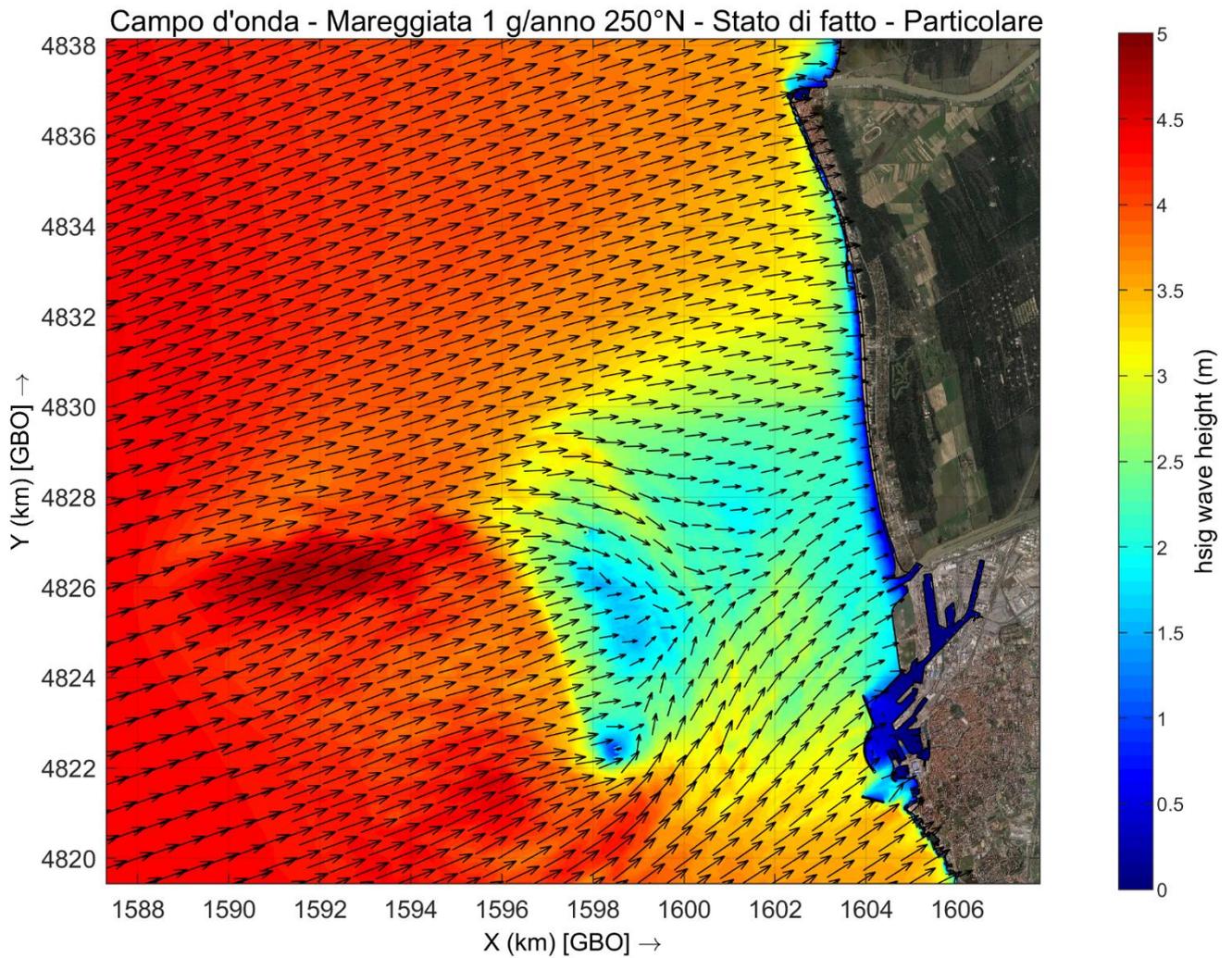


Figura 3.11 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 250°N - Progetto Definitivo - Particolare

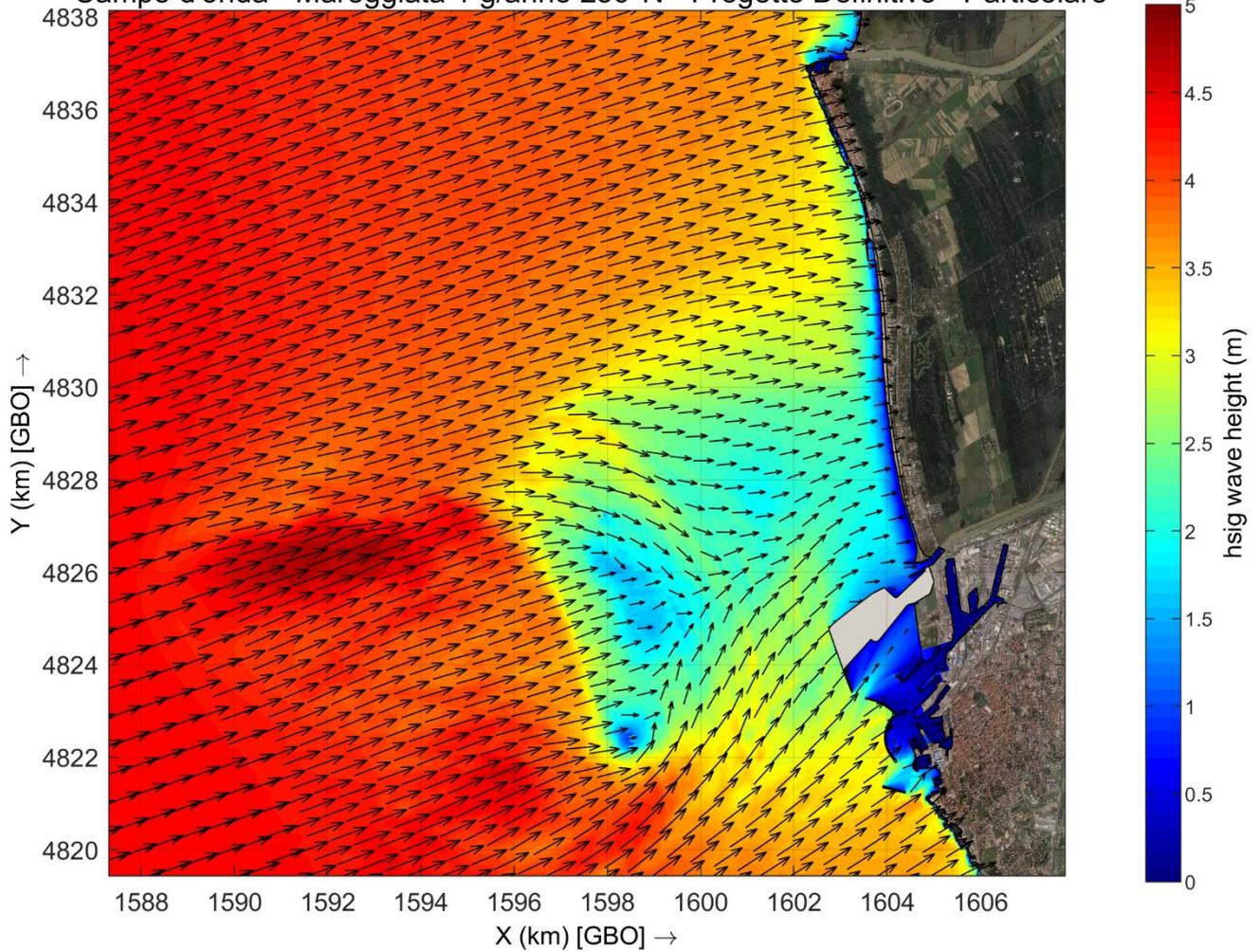


Figura 3.12 – Campo d'onda per la configurazione di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 250°N - Stato di fatto - Particolare

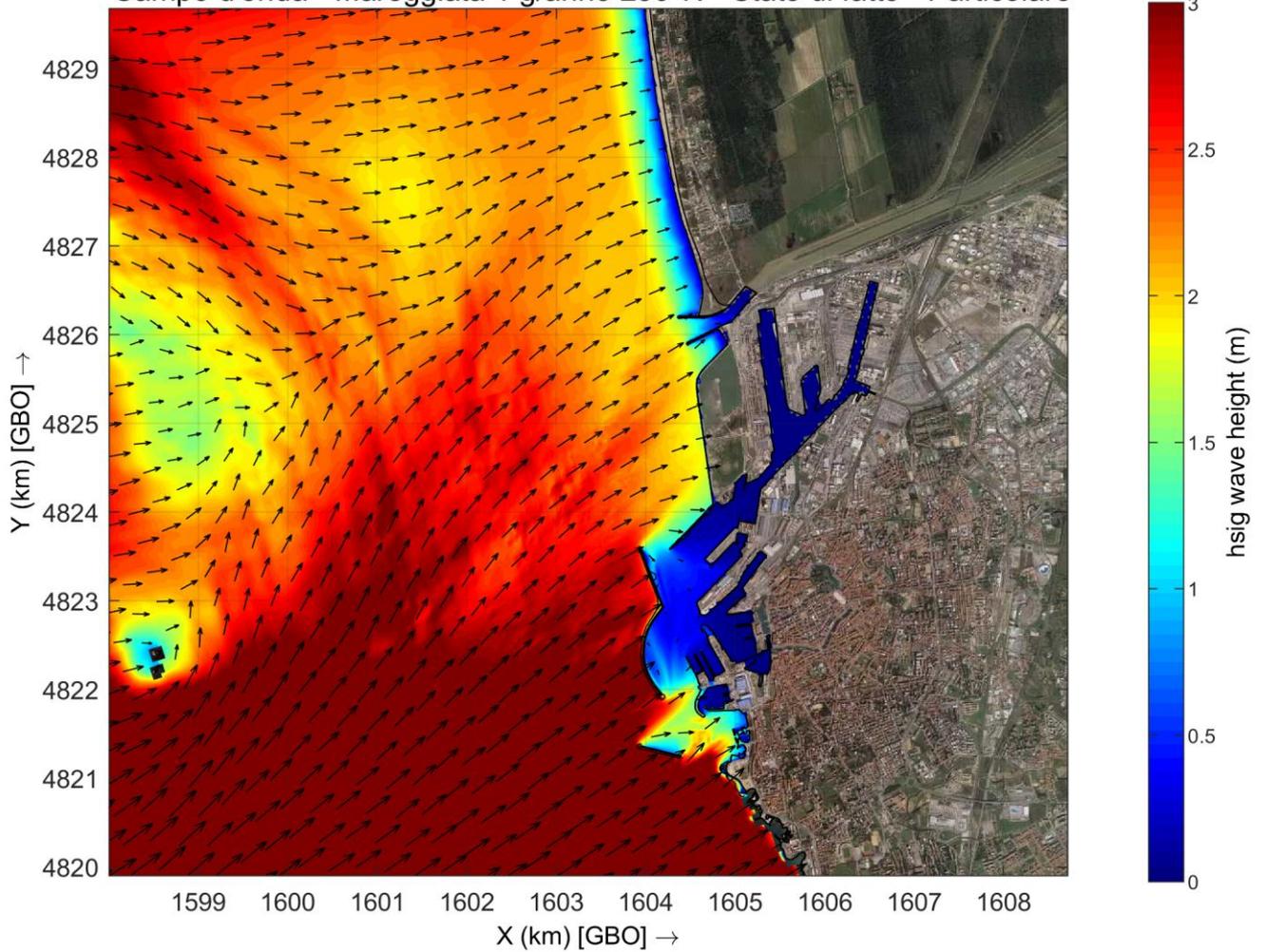


Figura 3.13 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 250°N - Progetto Definitivo - Particolare

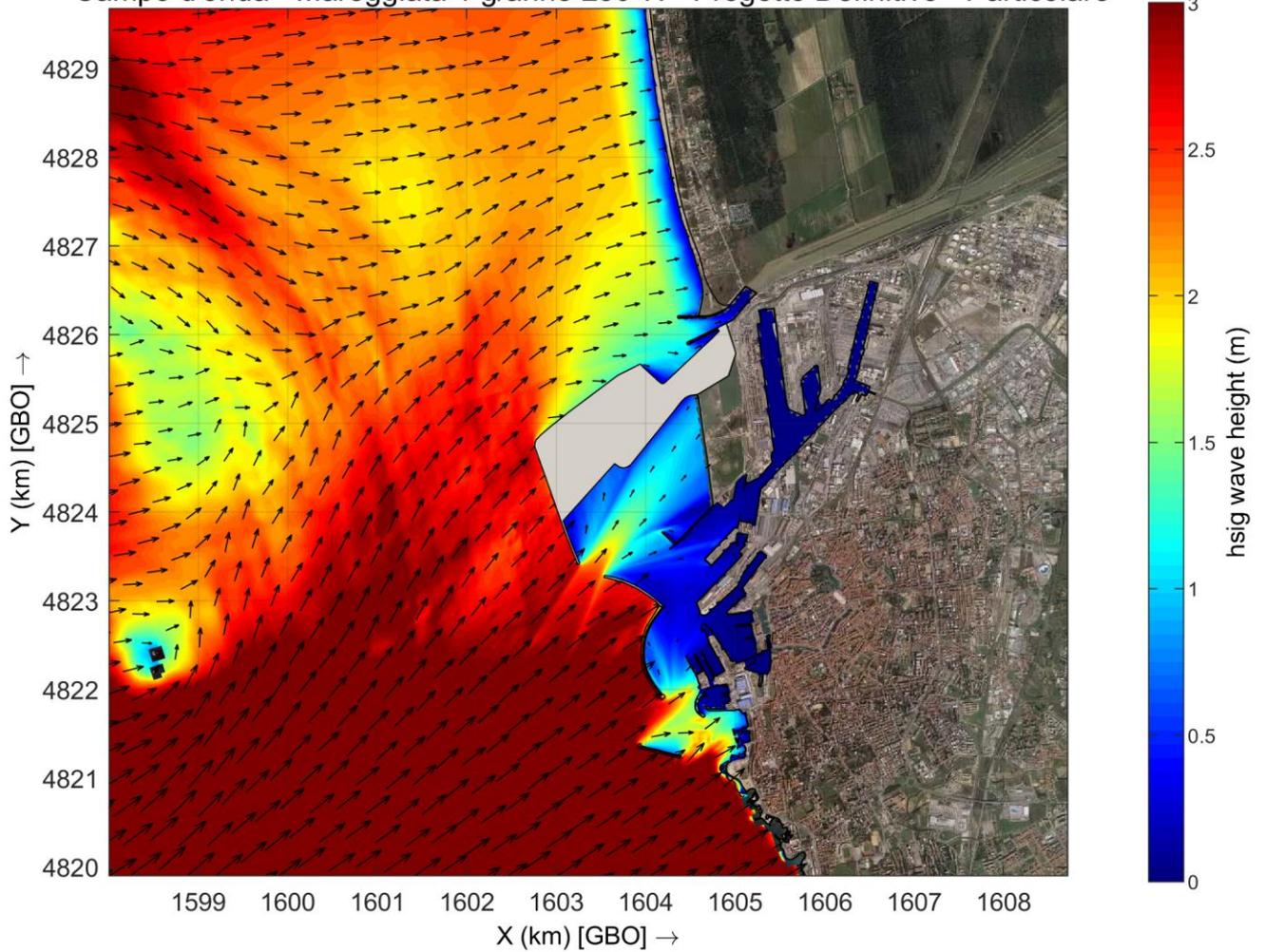


Figura 3.14 – Campo d'onda calcolato per la configurazione di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 170°N - Stato di fatto

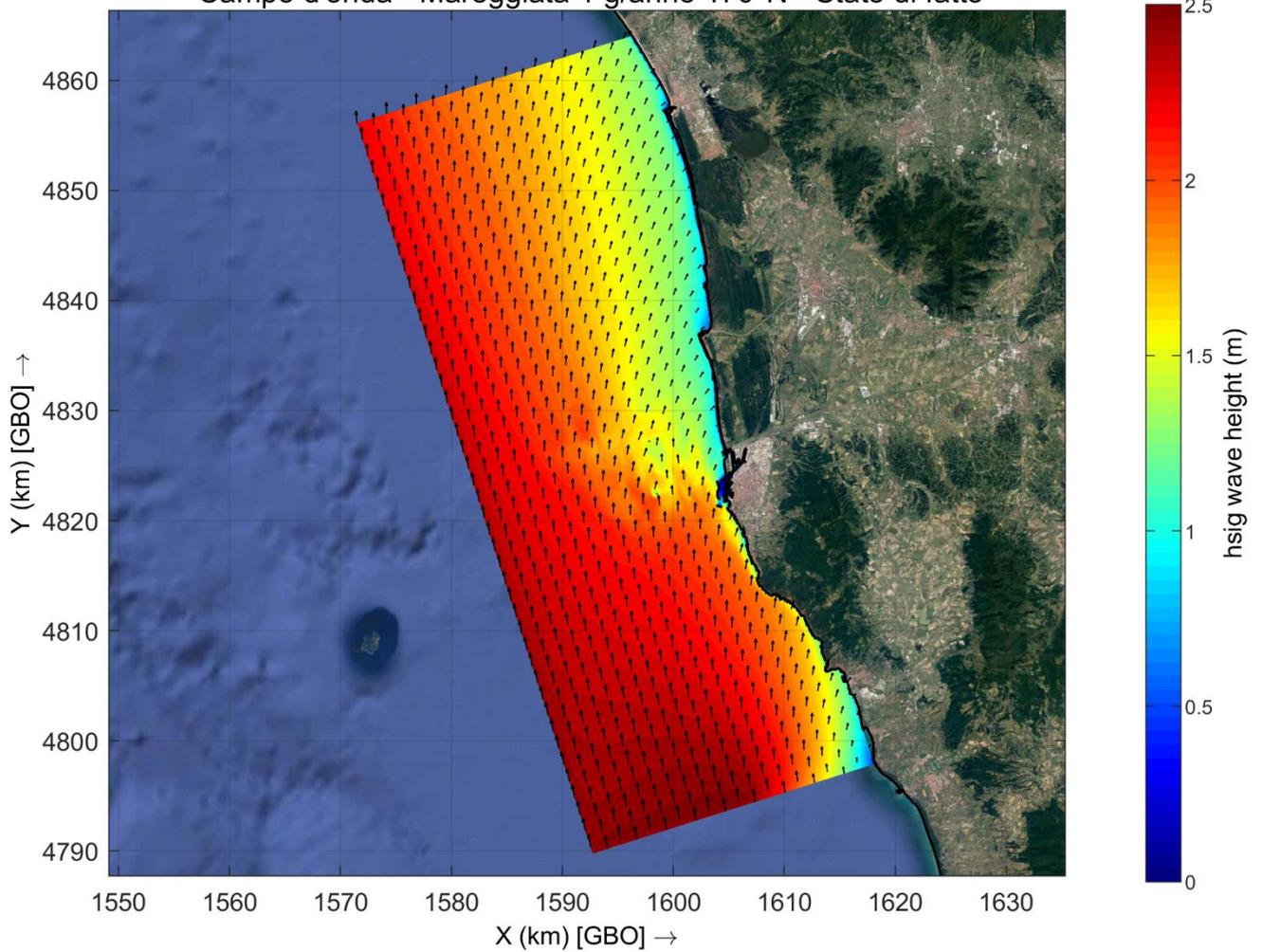


Figura 3.15 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

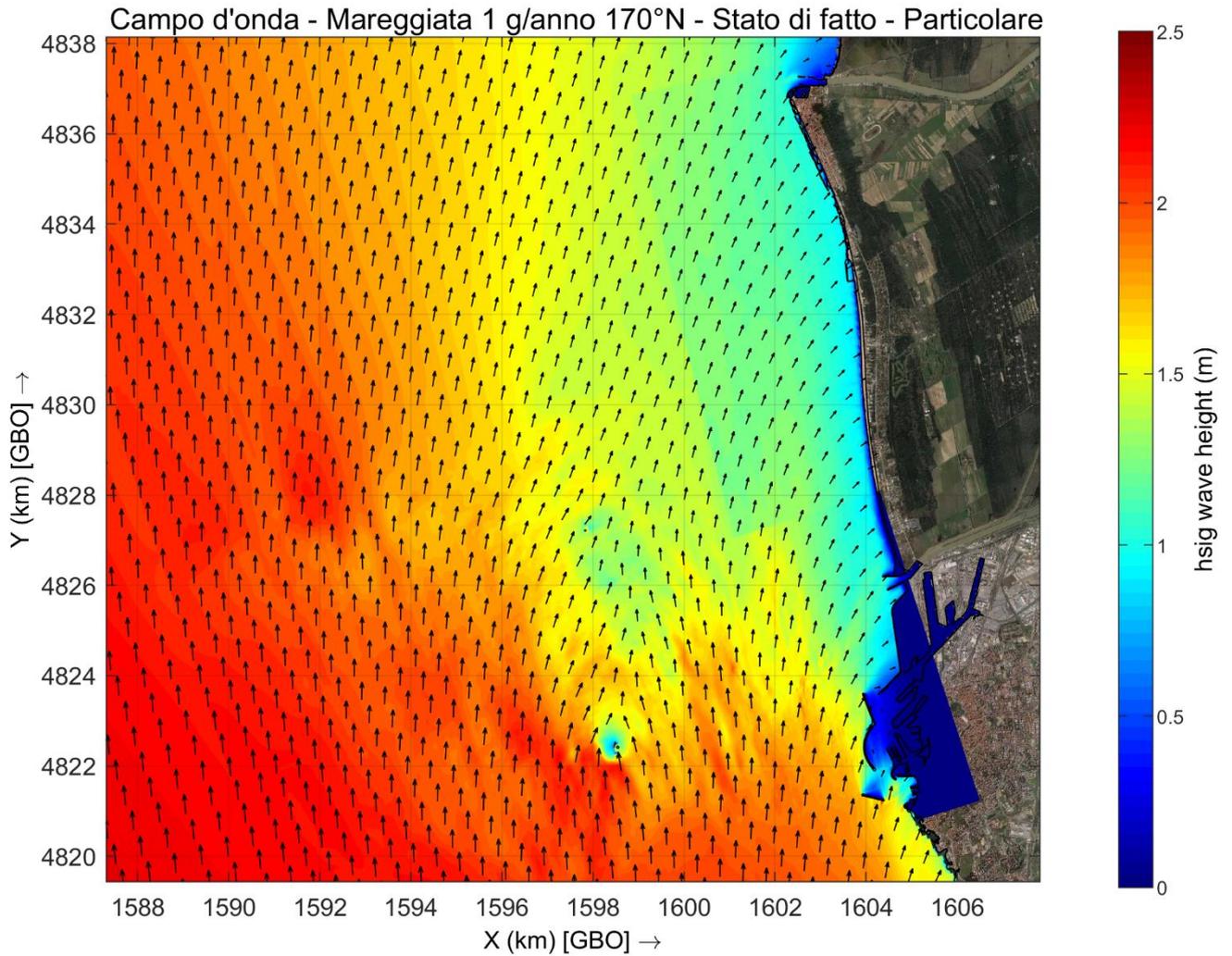


Figura 3.16 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 170°N - Progetto Definitivo - Particolare

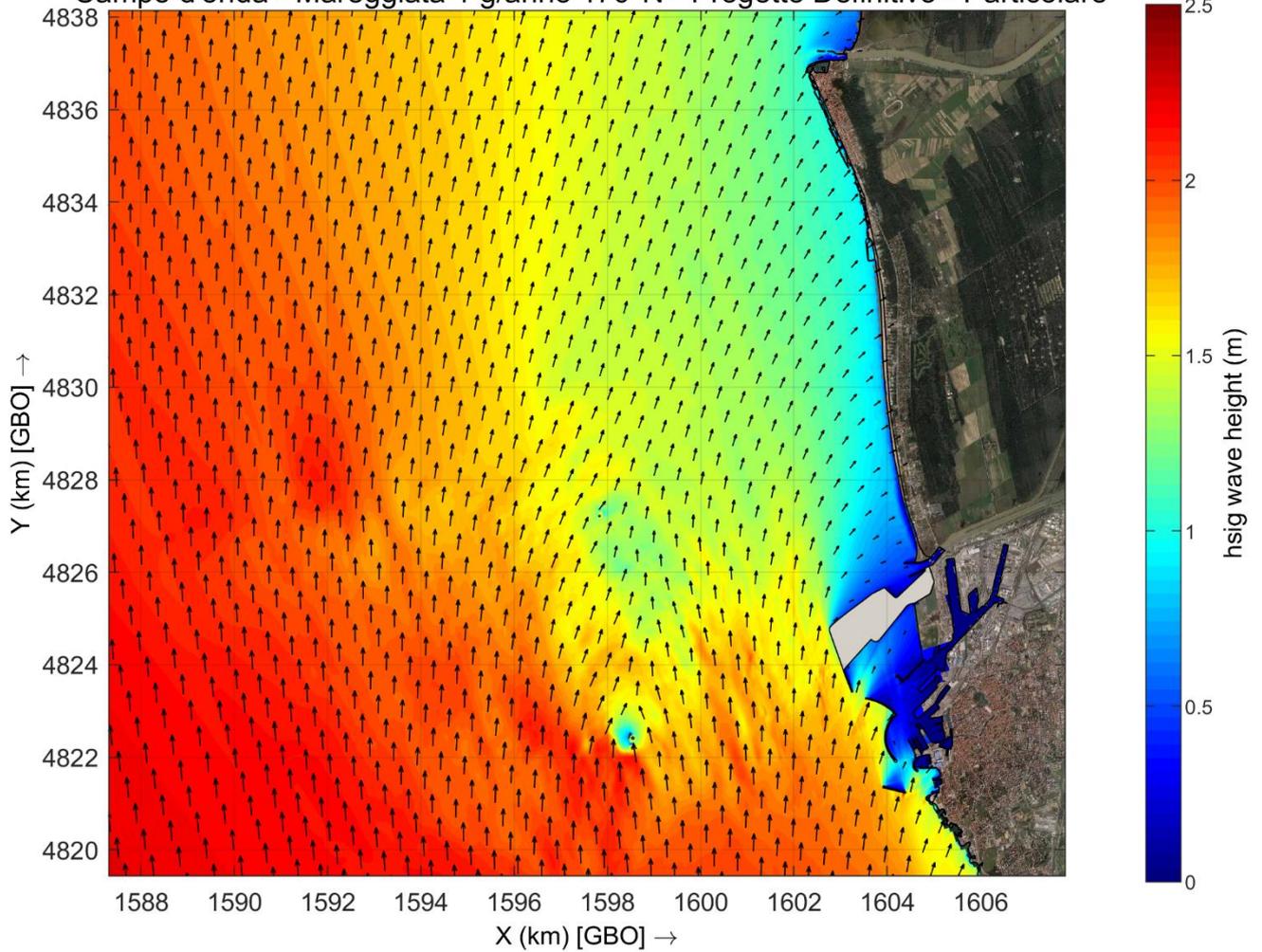


Figura 3.17 – Campo d'onda calcolato per la configurazione di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 170°N - Stato di fatto - Particolare

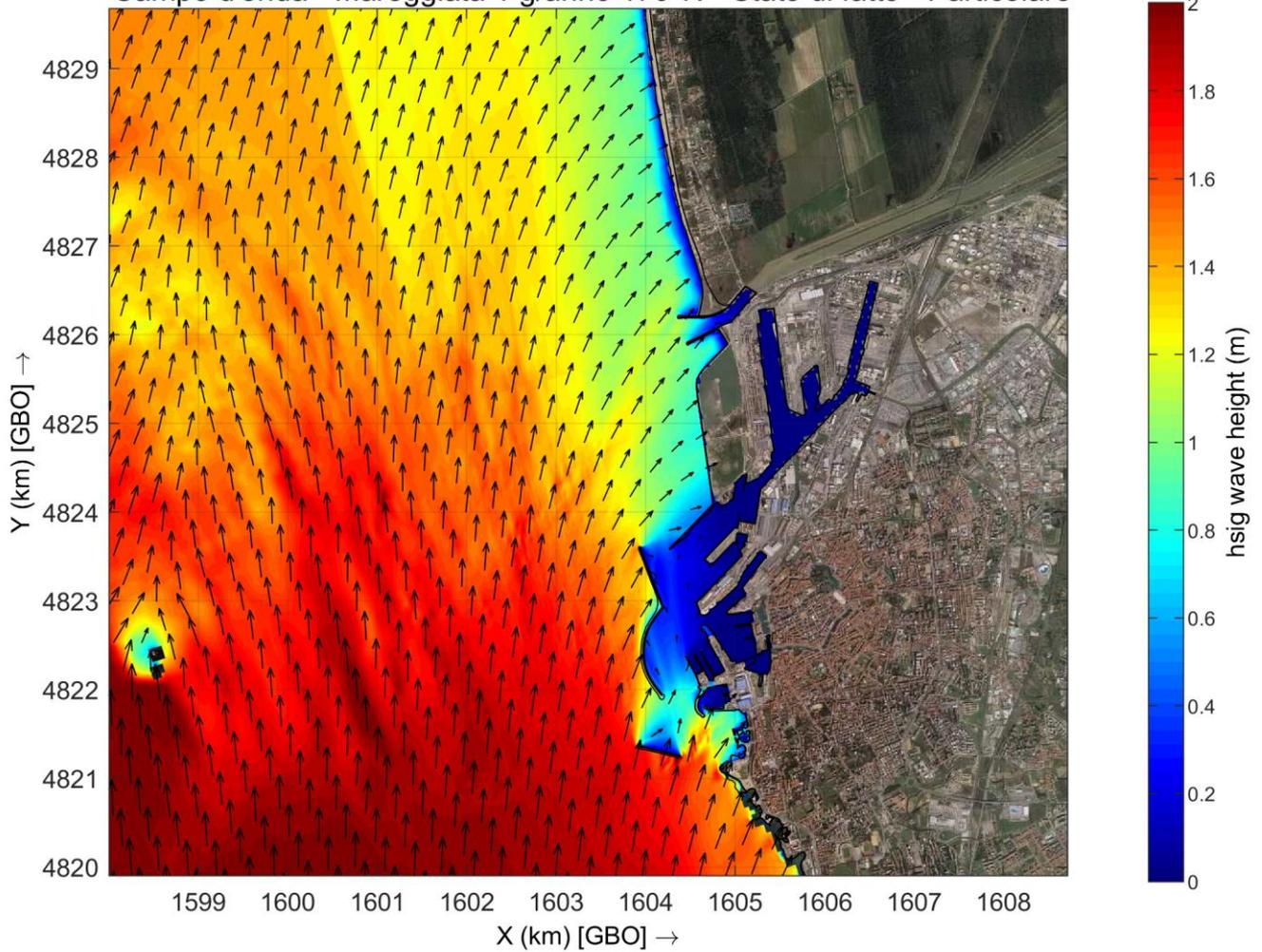


Figura 3.18 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 170°N - Progetto Definitivo - Particolare

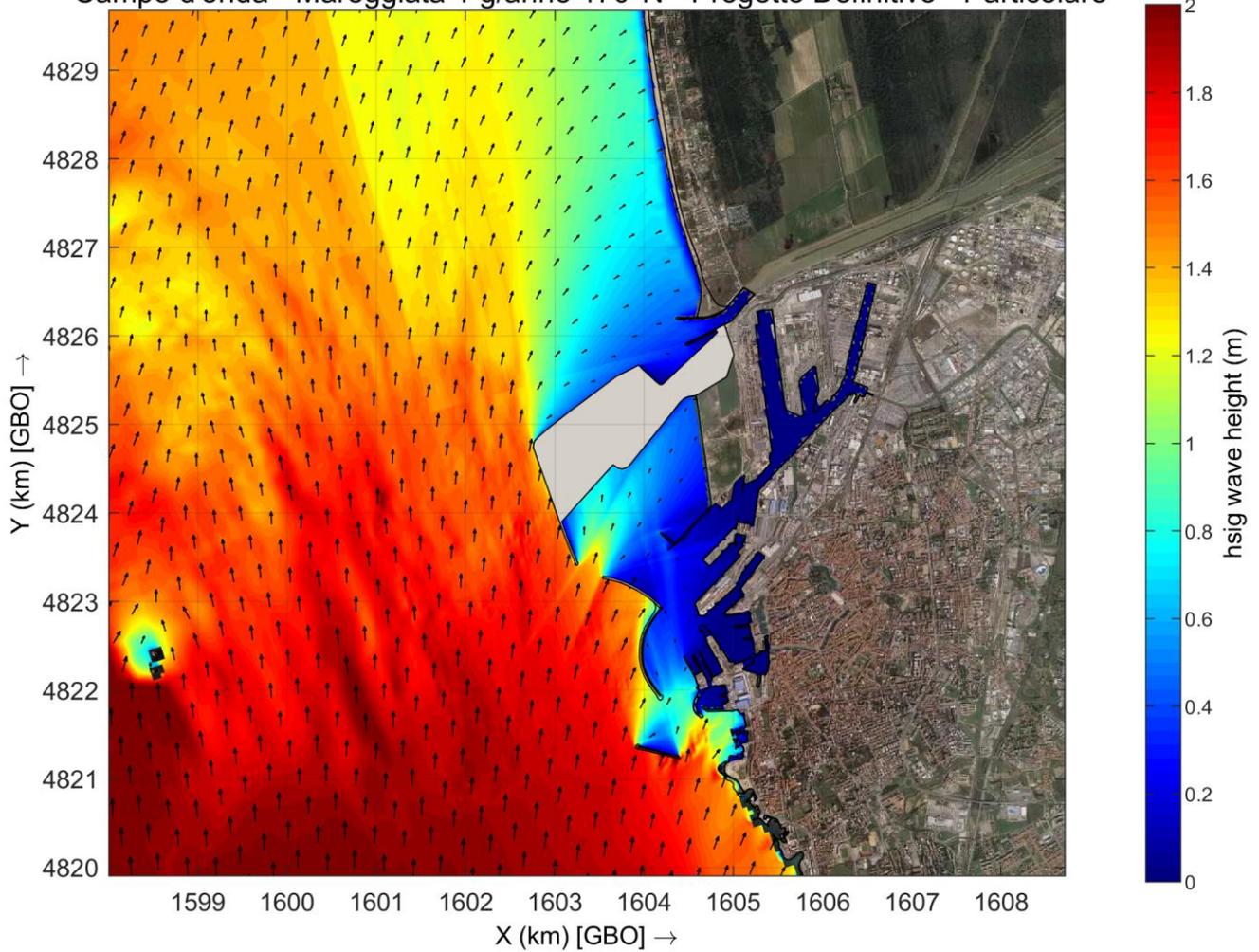


Figura 3.19 – Campo d'onda calcolato per la configurazione di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 290°N - Stato di fatto

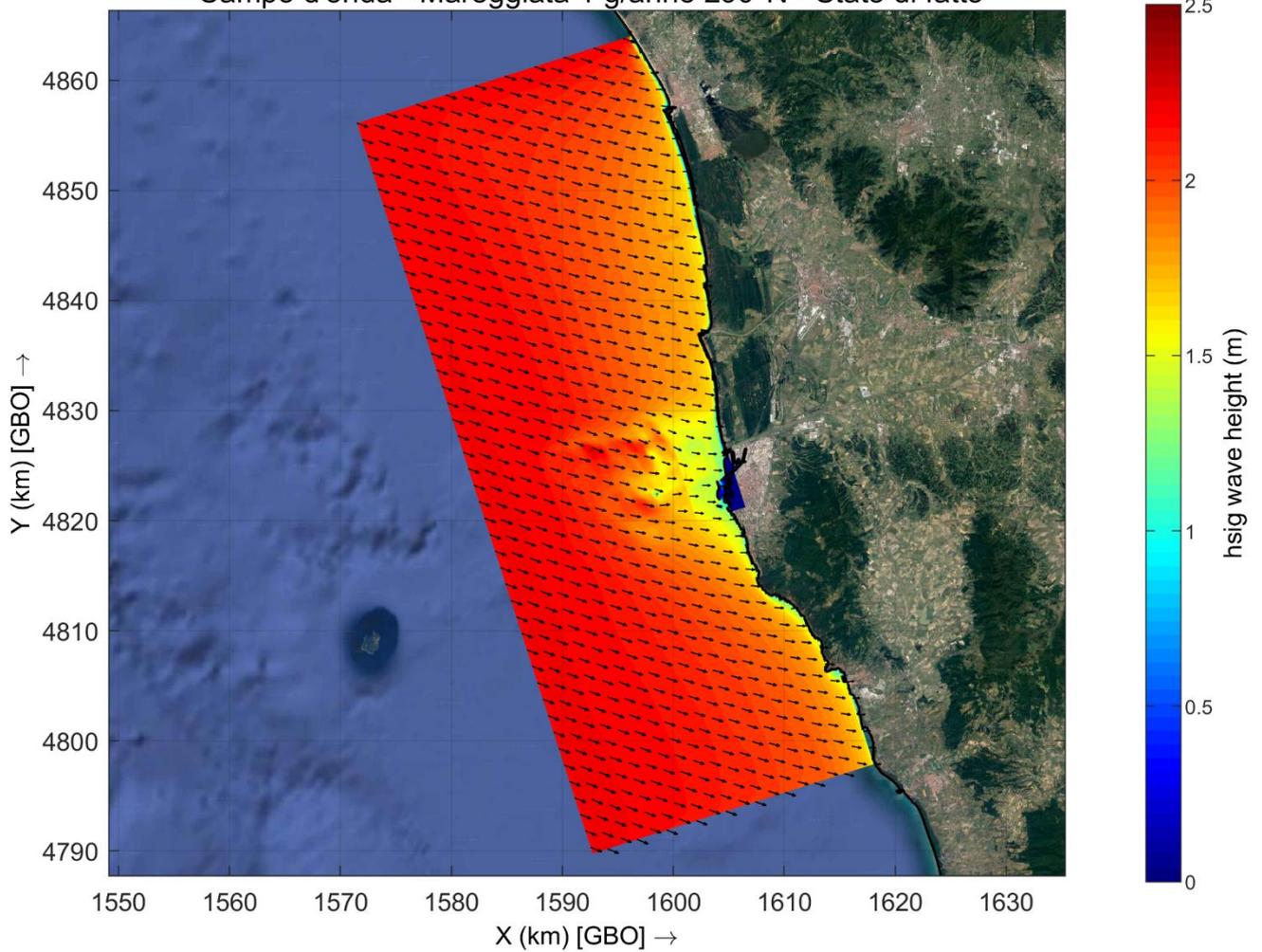


Figura 3.20 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

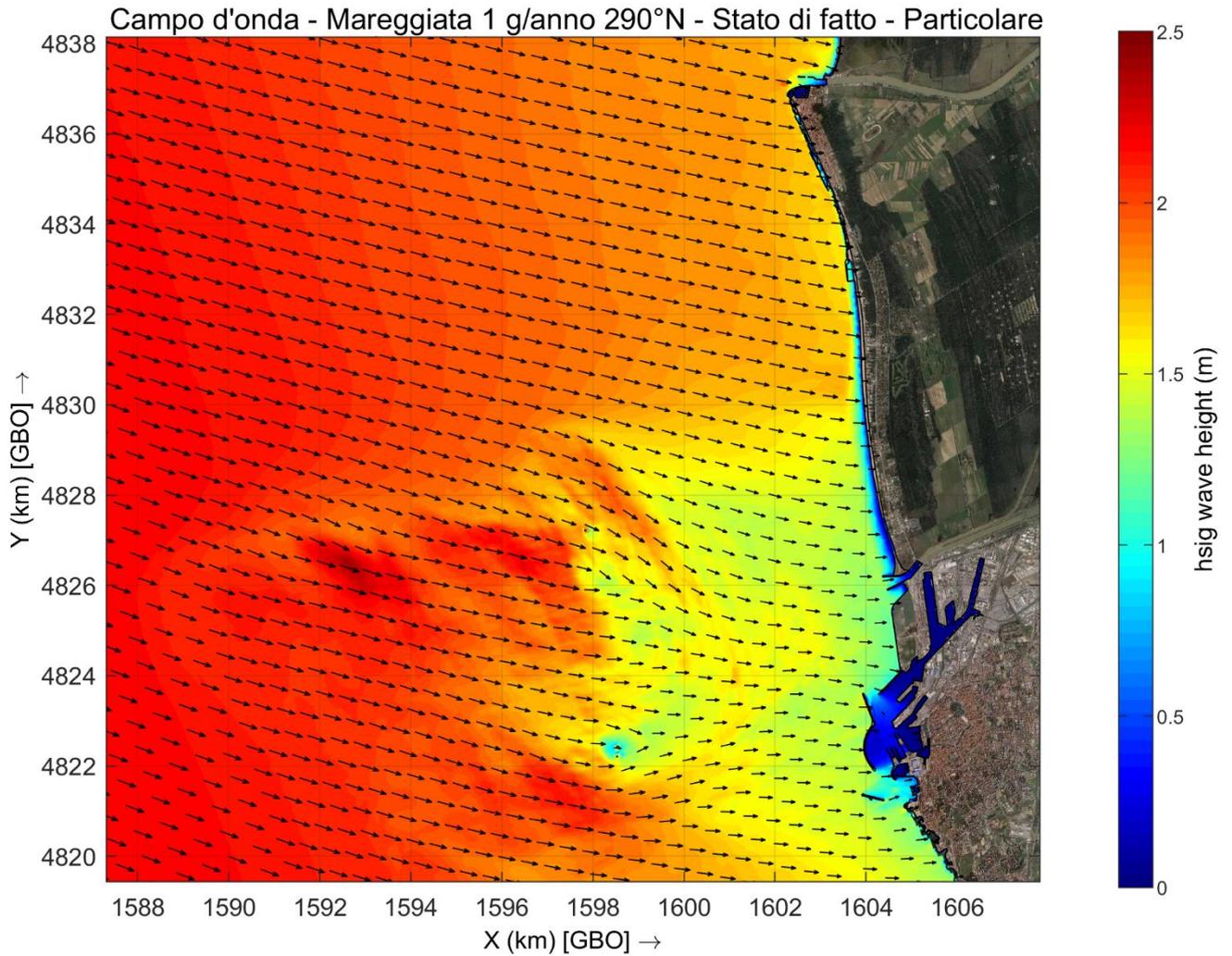


Figura 3.21 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

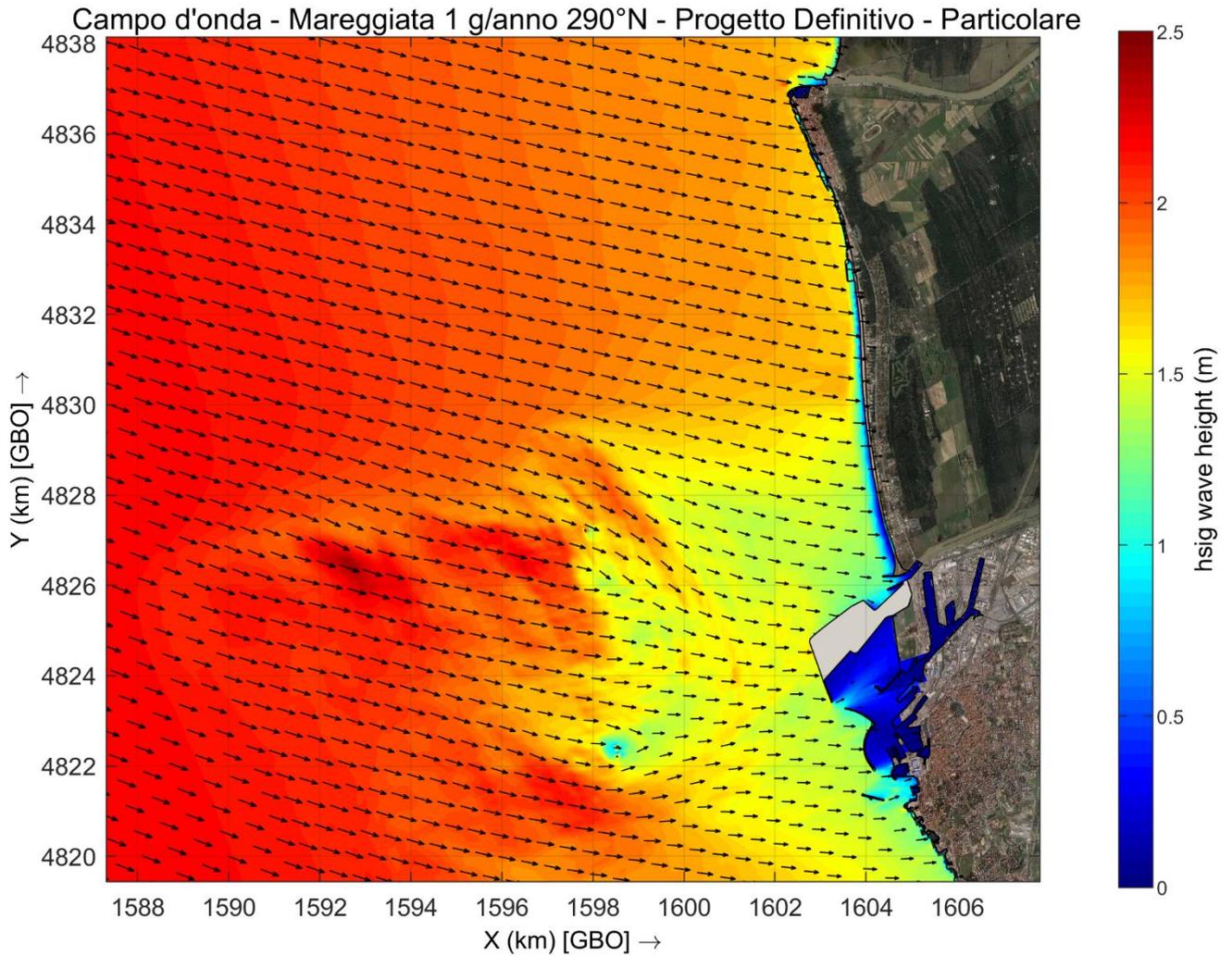


Figura 3.22 – Campo d'onda calcolato per la configurazione di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 290°N - Stato di fatto - Particolare

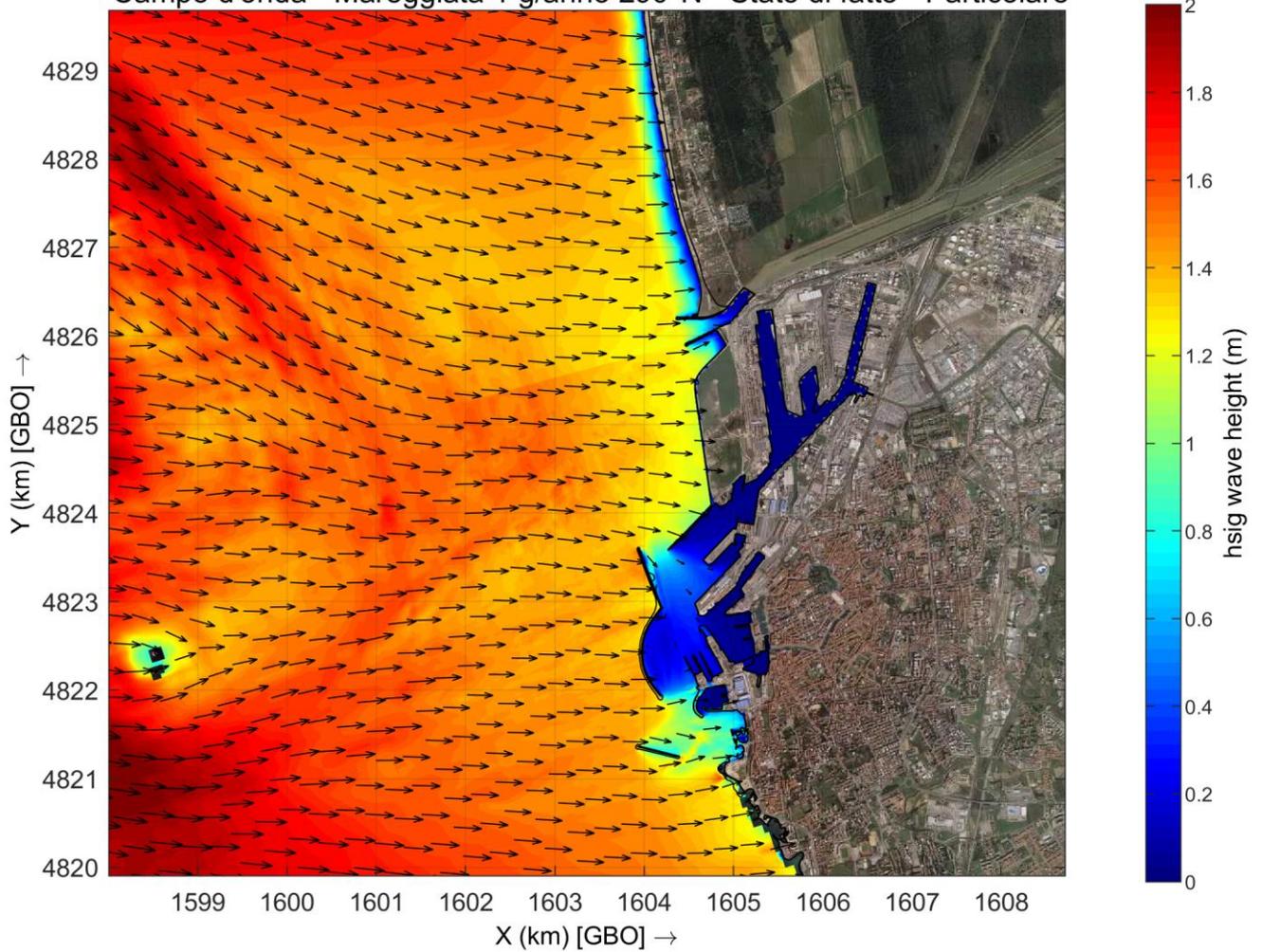


Figura 3.23 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 290°N - Progetto Definitivo - Particolare

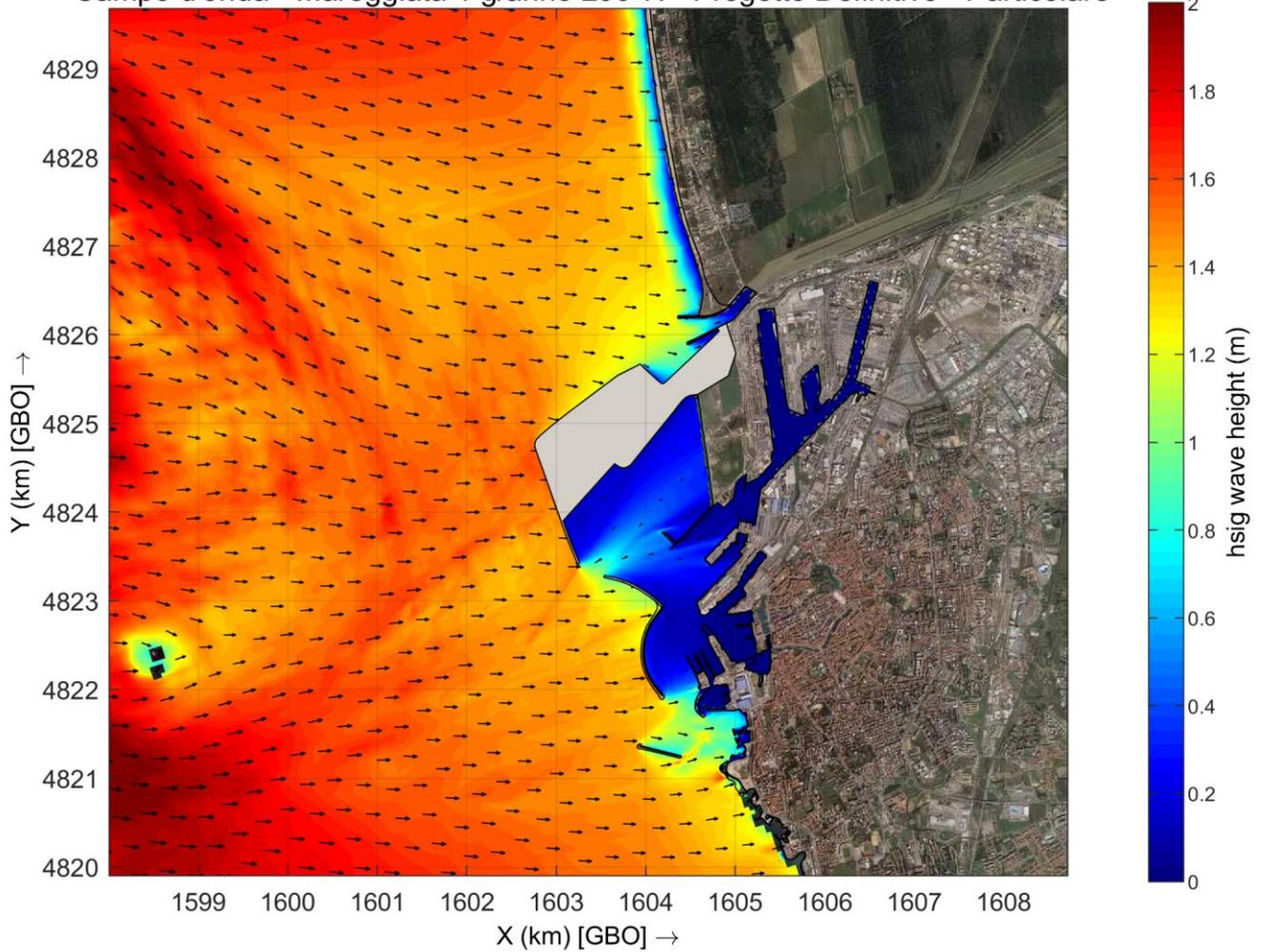


Figura 3.24 – Campo d'onda calcolato per la configurazione di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s)

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

### 3.7.2 Circolazione idrodinamica

Le mappe da Figura 3.25 a Figura 3.36 riportano, per le 3 mareggiate considerate (onde di durata 1 g/anno con provenienza da 250°N, 170°N e 290°N) e le 2 configurazioni analizzate (Stato di Fatto e di Progetto) i risultati delle simulazioni in forma di campi di corrente (vettori e scala cromatica).

Per la mareggiata di Ponente (Dir=250°N, Hs=4.31 m, Tp=9.4 s, Uw=12.2 m/s), le mappe a più piccola scala (Figura 3.25 e Figura 3.26) evidenziano come il moto ondoso inneschi un campo di corrente che presenta la massima intensità (in termini di velocità) in corrispondenza dei bassi fondali delle Secche della Meloria. Le azioni dissipative sul moto ondoso (shoaling e frangimento) che si sviluppano sui bassi fondali delle Secche innescano infatti, attraverso il meccanismo del cosiddetto “radiation stress”, correnti relativamente intense, aventi direzione ortogonale alla costa e intensità massime dell’ordine di 1 m/s (valore ovviamente mediato nella fase). Sottoflutto rispetto alle Secche, il moto ondoso innesca due macro-vorticità (dirette in senso anti-orario, a Nord e in senso orario, a Sud), al centro delle quali, ossia nello specchio d’acqua antistante la foce del Calambrone, si instaura una zona di relativa calma. Si tratta di una dinamica sostanzialmente simile a quella che porta alla formazione dei tomboli, e si vedrà in seguito come ad essa sia associata una zona di sedimentazione.

Le stesse mappe evidenziano anche come la presenza delle opere in progetto non modifichi in modo apprezzabile l’assetto generale della circolazione delle correnti, governato dalla presenza delle Secche della Meloria. Si nota tuttavia che la vicinanza delle opere alla foce del Calambrone modifica il campo di corrente in prossimità della foce stessa.

Le successive mappe (Figura 3.27 e Figura 3.28), mostrano con maggiore dettaglio, per la medesima mareggiata di Ponente (proveniente da 250°N), il campo di velocità in corrispondenza del bacino portuale e lungo il tratto di costa che, dal Porto di Livorno, arriva fino alle spiagge di Tirrenia.

Si osserva che lungo tale tratto, per un’estensione di circa 3.5 km a partire dall’armatura di foce dello Scolmatore, si sviluppa una corrente litoranea diretta verso Nord con intensità massima dell’ordine di 0.3÷0.4 m/s. Nella configurazione di progetto (Figura 3.28) la corrente litoranea suddetta è ancora presente, anche se caratterizzata da velocità inferiori.

A Sud della foce, nello stato di fatto si sviluppa una vorticità anti-oraria che induce una corrente diretta verso Nord a ridosso della spiaggia. Nella configurazione di progetto, per la presenza delle nuove opere, il campo di moto locale si modifica sostanzialmente e nello specchio d’acqua davanti alla foce dello Scolmatore le correnti indotte dalla mareggiata sono indirizzate secondo la direzione prevalente delle correnti costiere, ossia verso nord.

Le mappe rappresentate nelle successive figure (da Figura 3.29 a Figura 3.32) riportano i medesimi campi di velocità per il caso della mareggiata di Mezzogiorno, proveniente dalla direzione 170°N, caratterizzata da altezza significativa di 2.44 m, periodo di picco di 6.73 s e velocità del vento di 10.0 m/s.

Data la minore intensità di questa mareggiata e la sua direzione di incidenza quasi parallela al litorale, le correnti da essa indotte sono molto meno intense rispetto a quelle del caso precedente. È peraltro di interesse il fatto che, lungo la costa a Nord della foce dello Scolmatore, si sviluppa comunque una corrente litoranea diretta verso Nord di intensità relativamente modesta (circa 0.3 m/s).

Questa corrente risulta parzialmente attenuata nelle due configurazioni di progetto, a causa dell’effetto di schermo che le nuove opere portuali inducono nei confronti del moto ondoso proveniente dal settore meridionale.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

Di modesta intensità è anche il campo di corrente indotta dalla mareggiata di Maestrale, che proviene dalla direzione  $290^{\circ}\text{N}$  ed è caratterizzata da altezza significativa di 2.14 m, periodo di picco di 7.3 s e velocità del vento di 8.4 m/s (da Figura 3.33 a Figura 3.36).

In quest'ultimo caso, l'elemento maggiormente significativo che emerge dai campi di velocità è rappresentato dalla corrente litoranea che si stabilisce lungo tutto il tratto che va dalla foce dell'Arno alla foce dello Scolmatore. Si tratta di una corrente diretta in direzione Sud, più intensa nel primo tratto (spiagge di Marina di Pisa), ma comunque non trascurabile anche nei tratti successivi (Spiagge di Tirrenia e del Calambrone). Rispetto a questa corrente, le opere previste non producono effetti significativi, dal momento che esse si trovano sottoflutto rispetto all'azione della mareggiata.

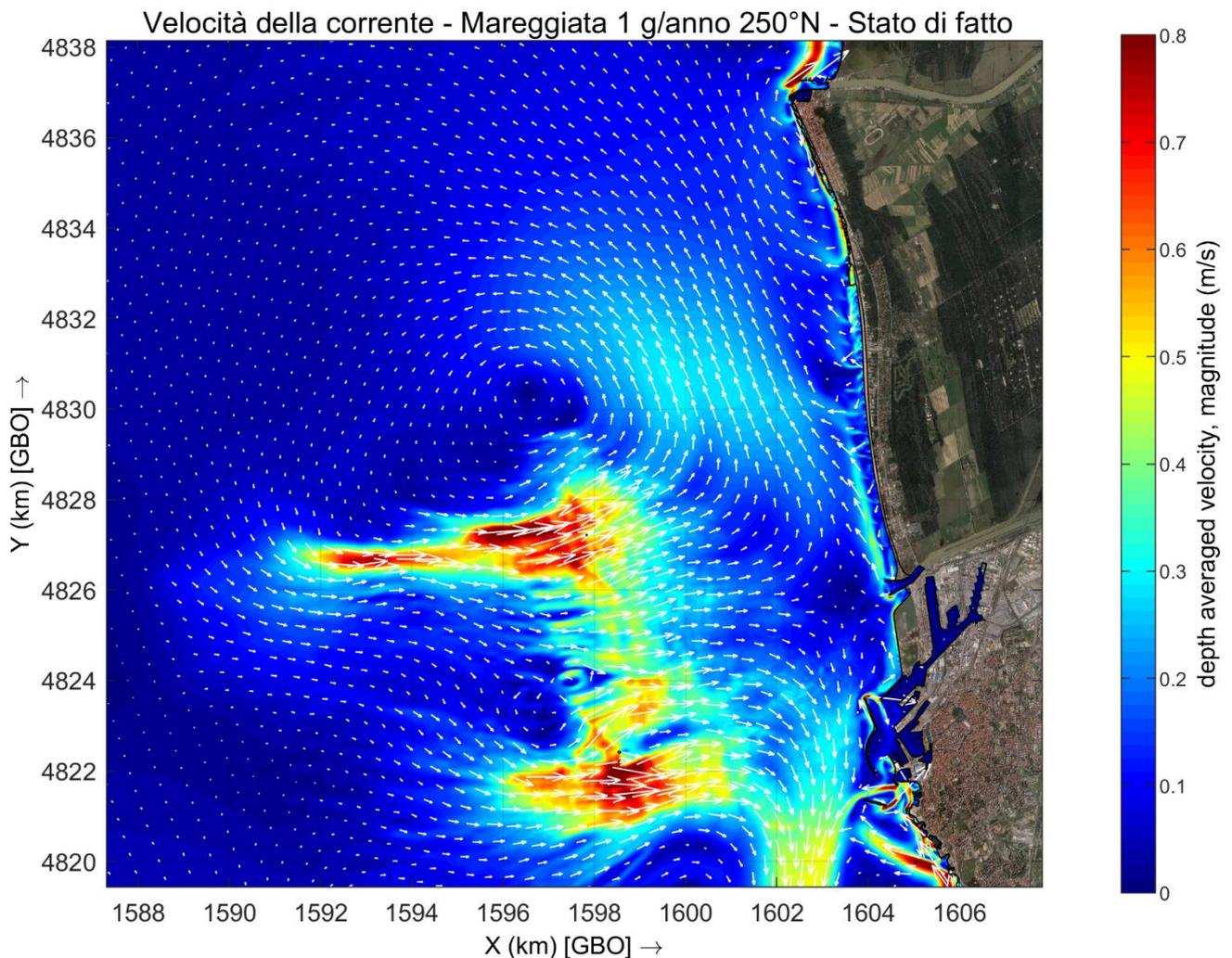


Figura 3.25 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione  $250^{\circ}\text{N}$ :  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

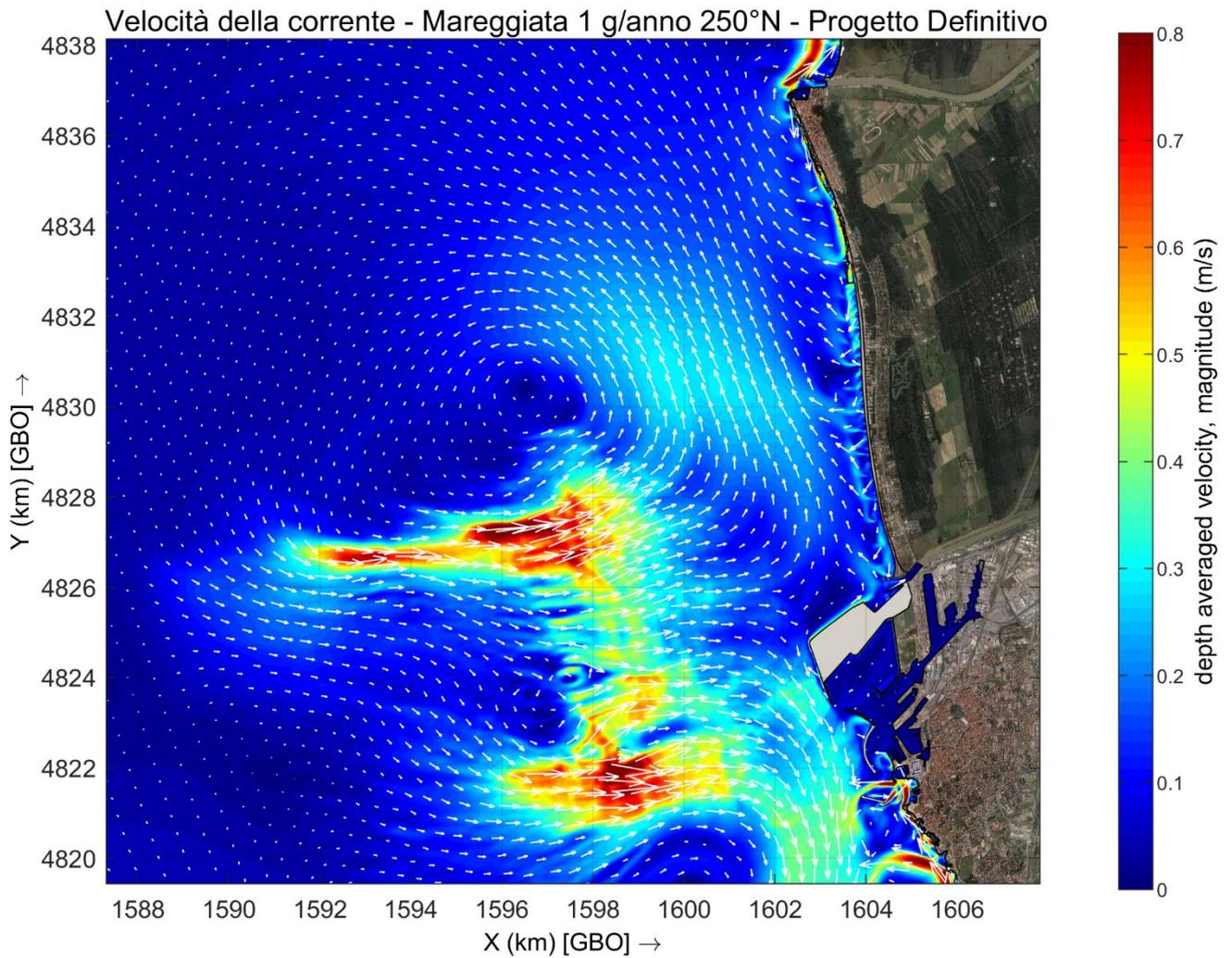


Figura 3.26 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la configurazione di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Velocità della corrente - Mareggiata 1 g/anno 250°N - Stato di fatto

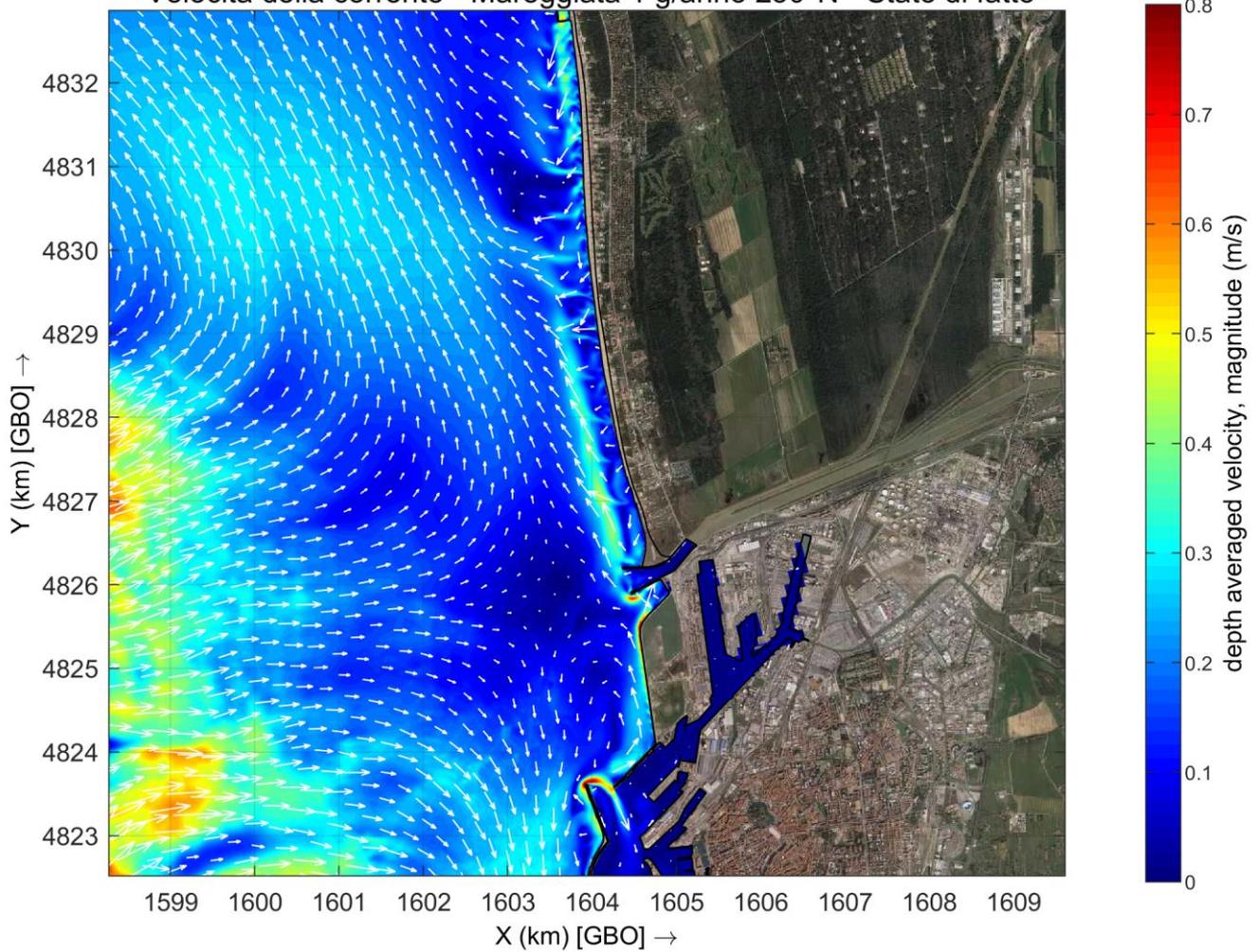


Figura 3.27 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Velocità della corrente - Mareggiata 1 g/anno 250°N - Progetto Definitivo

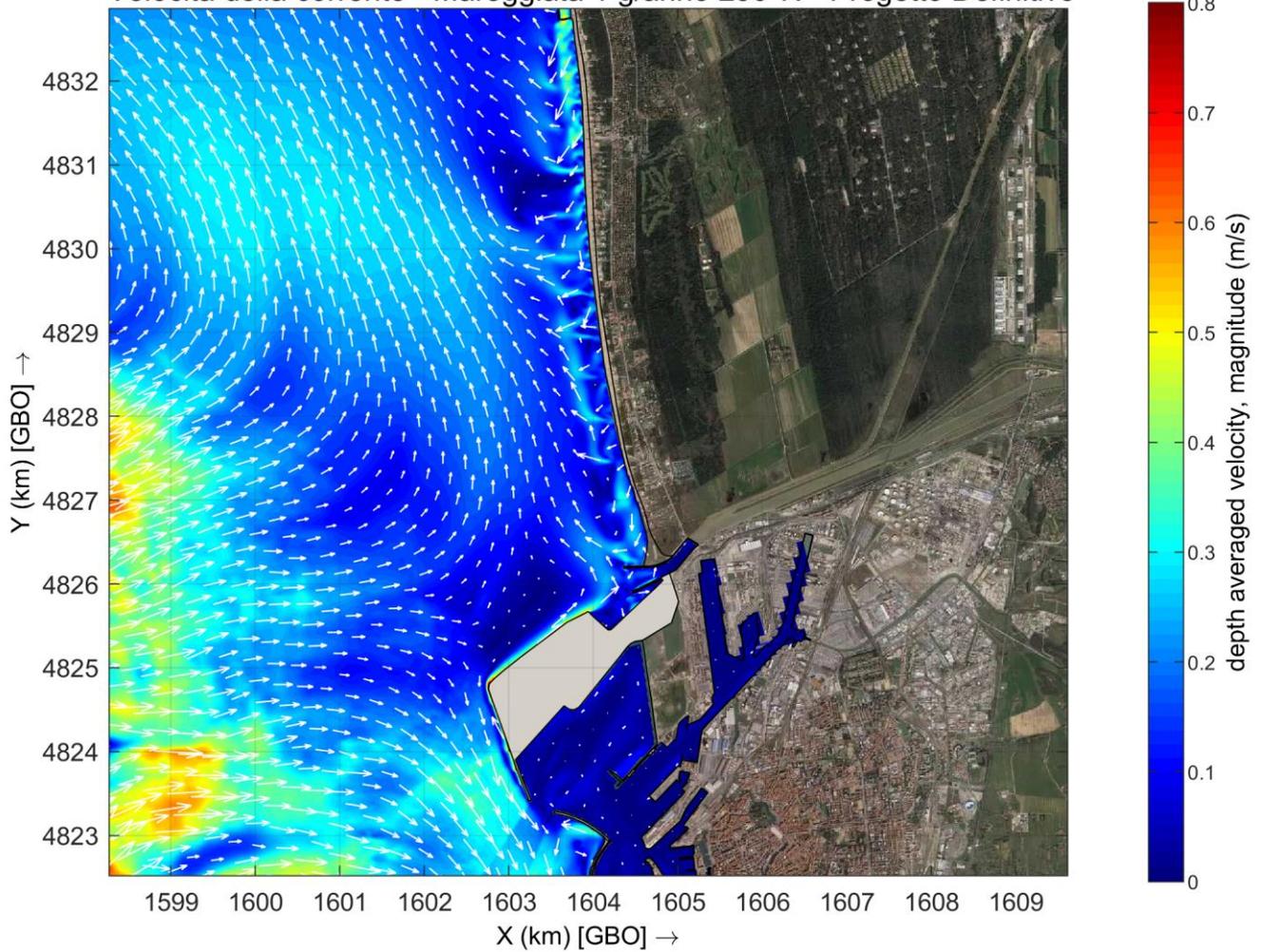


Figura 3.28 – Velocità della corrente calcolata per la configurazione di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N:  $H_s = 4.31$  m,  $T_p = 9.40$  s,  $U_w = 12.2$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

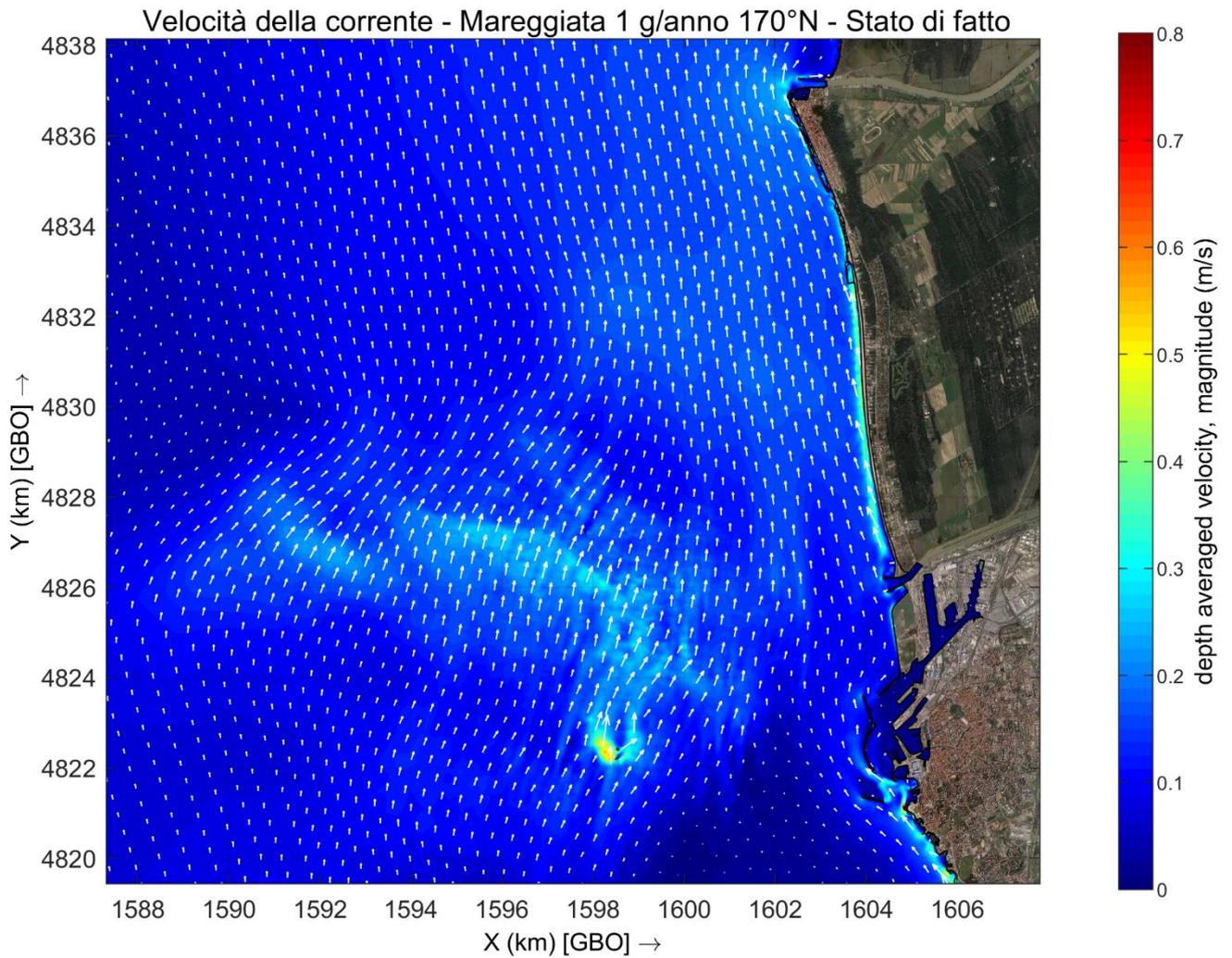


Figura 3.29 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

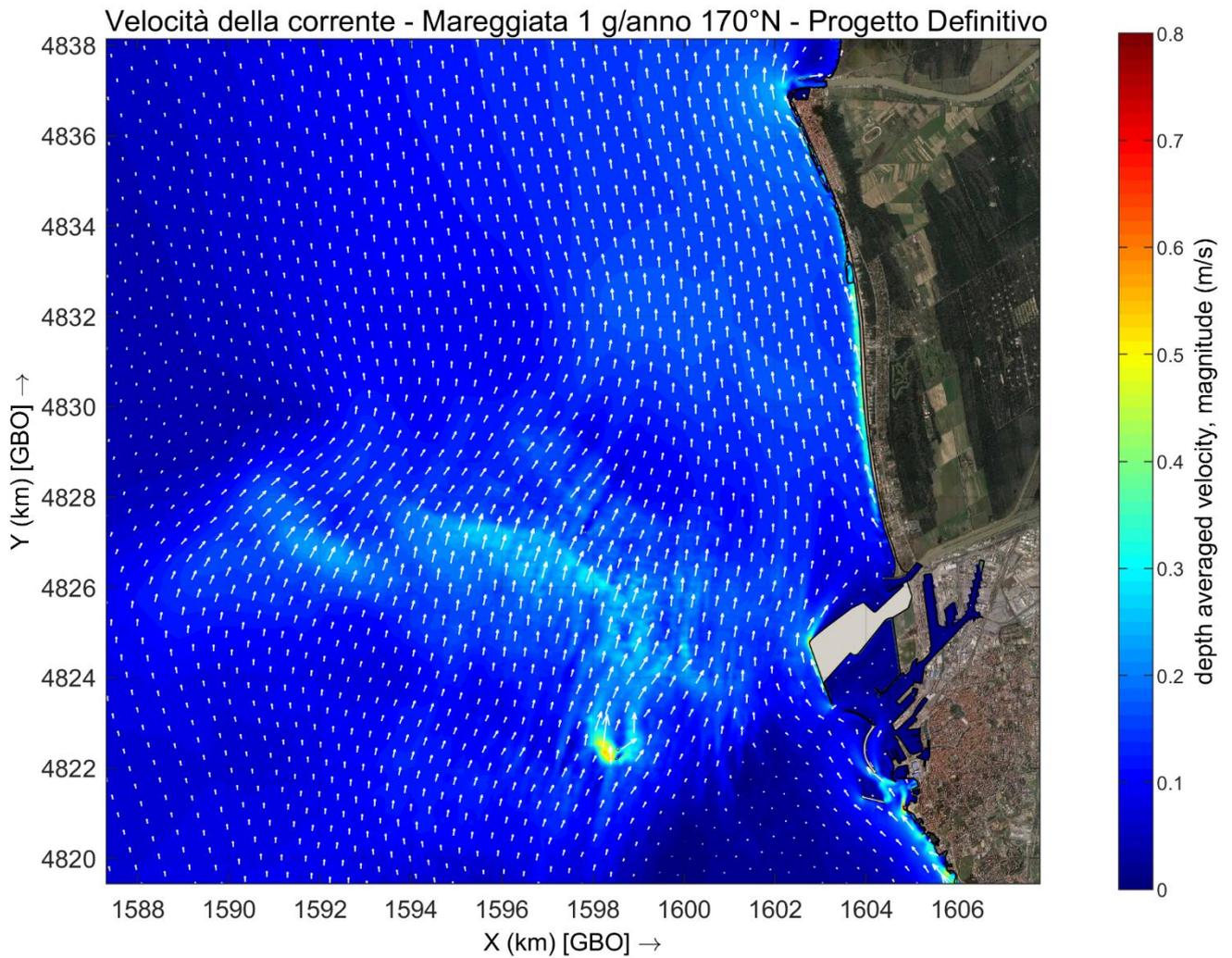


Figura 3.30 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la configurazione di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Velocità della corrente - Mareggiata 1 g/anno 170°N - Stato di fatto

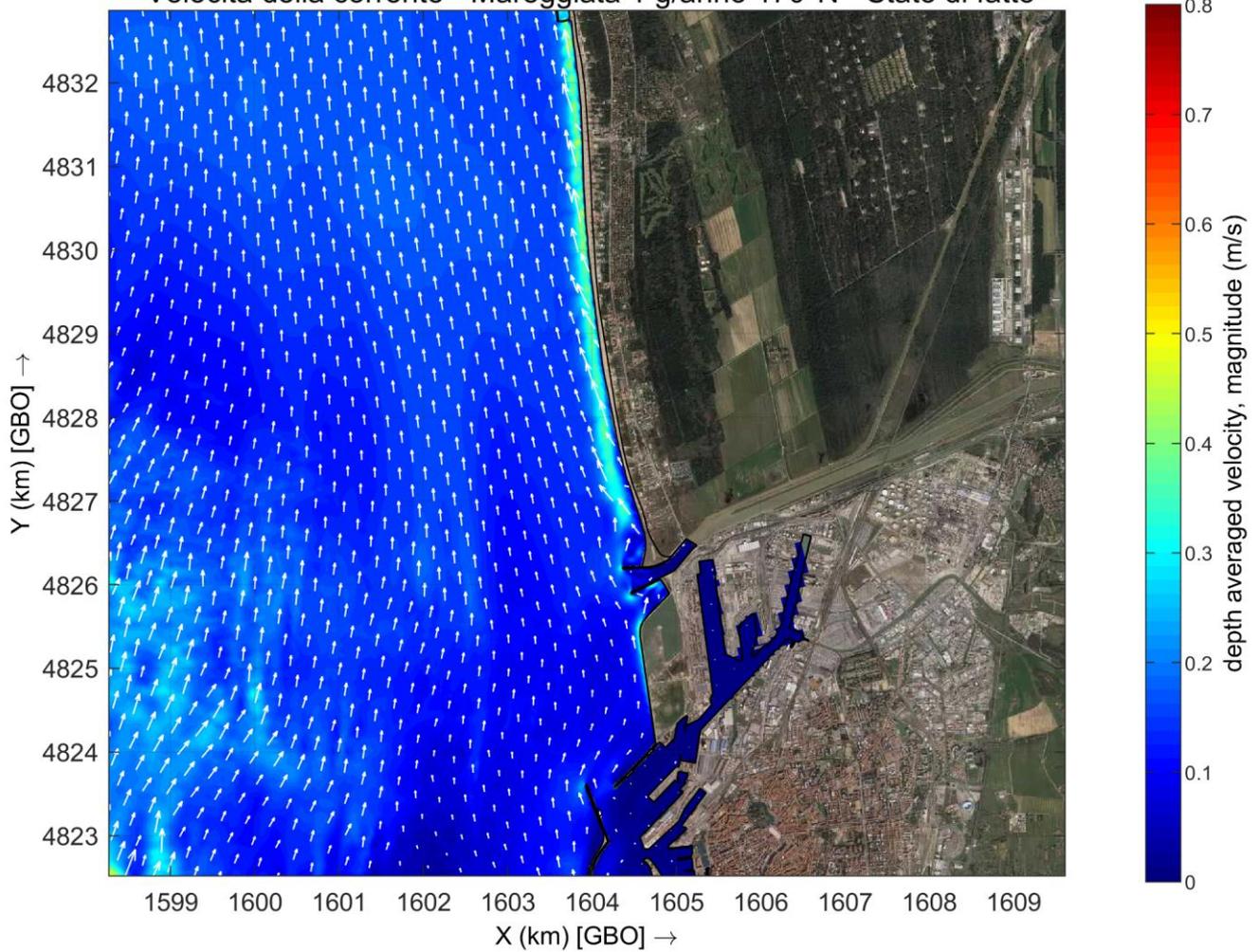


Figura 3.31 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Velocità della corrente - Mareggiata 1 g/anno 170°N - Progetto Definitivo

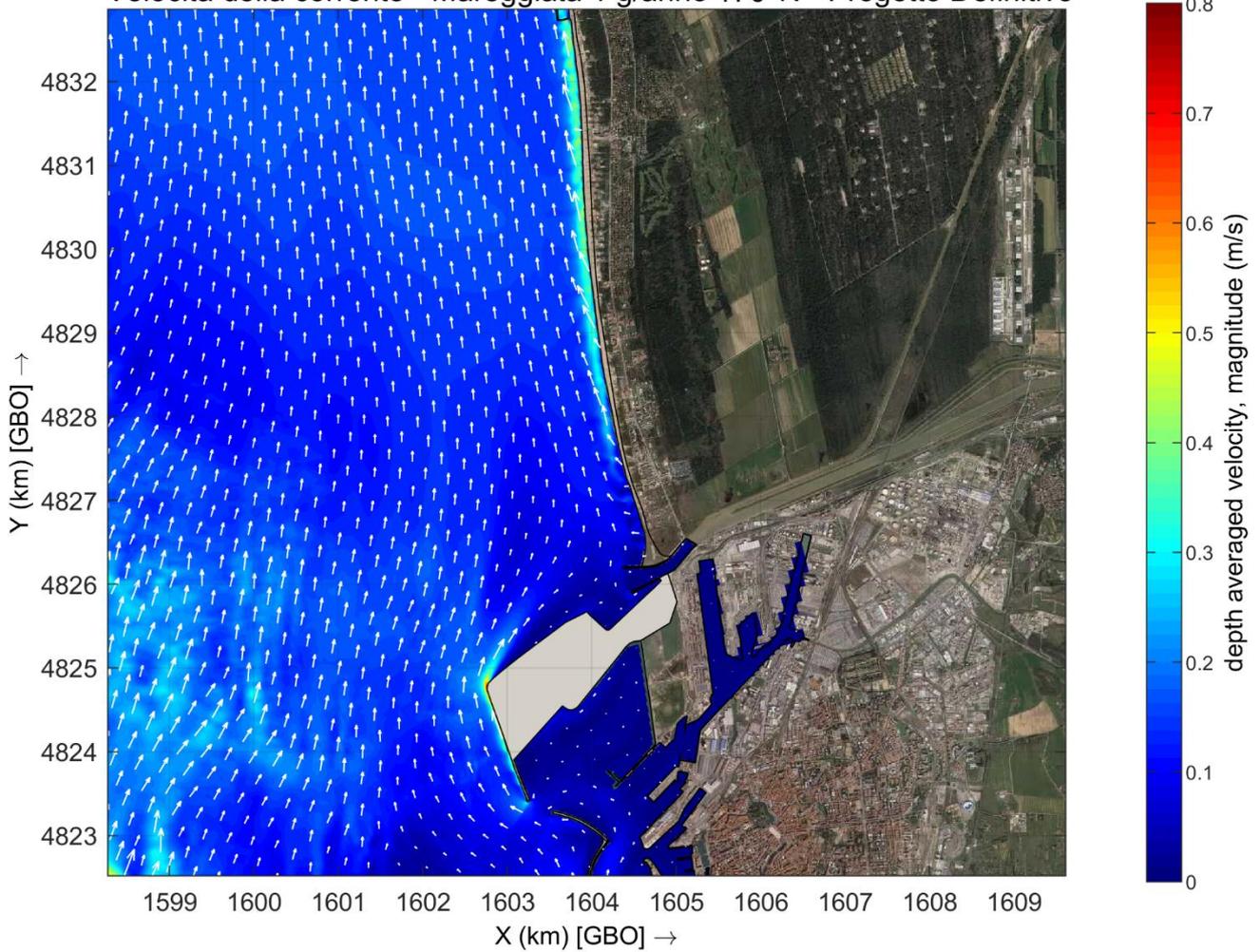


Figura 3.32 – Velocità della corrente calcolata per la configurazione di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N:  $H_s = 2.44$  m,  $T_p = 6.73$  s,  $U_w = 10.0$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

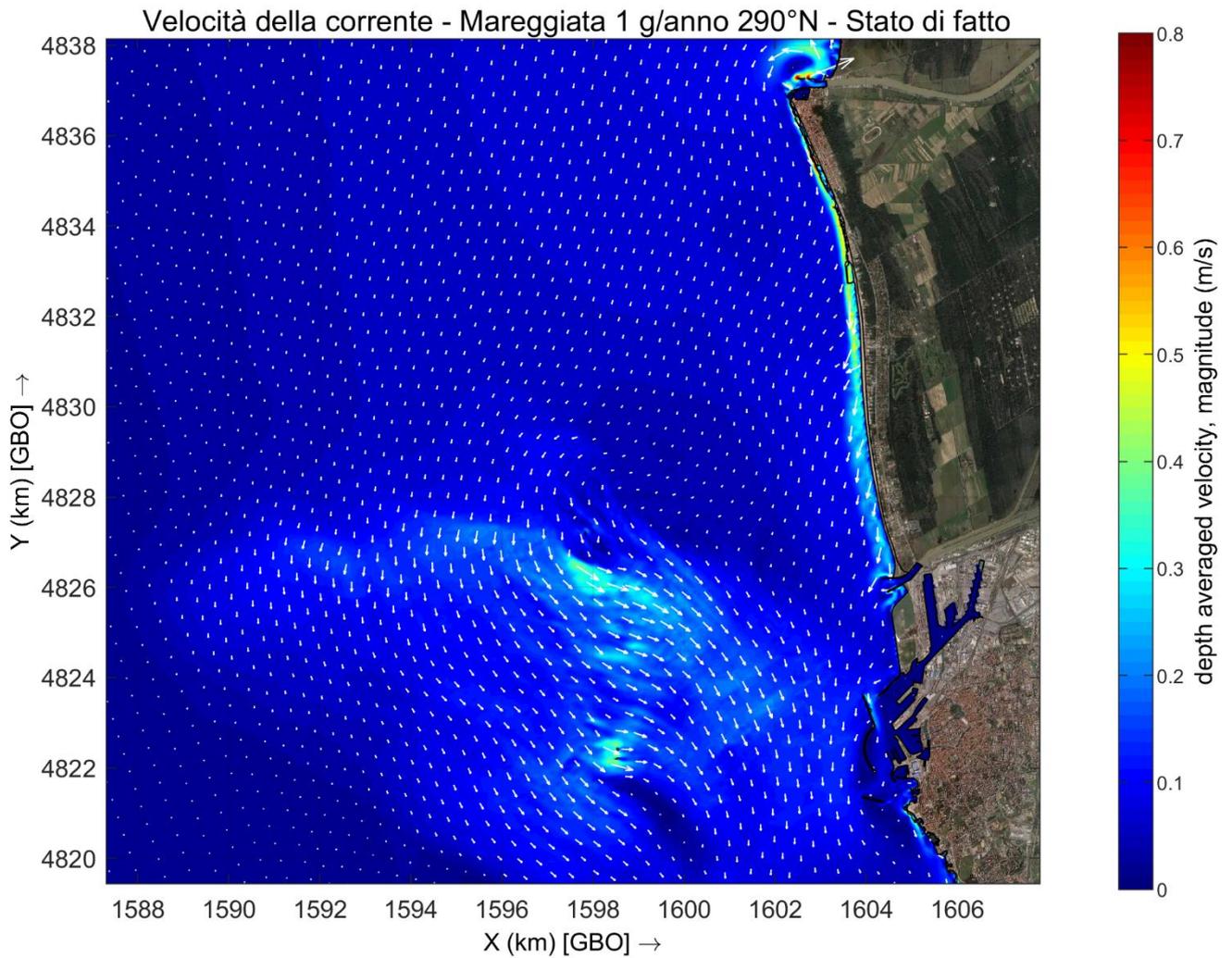


Figura 3.33 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

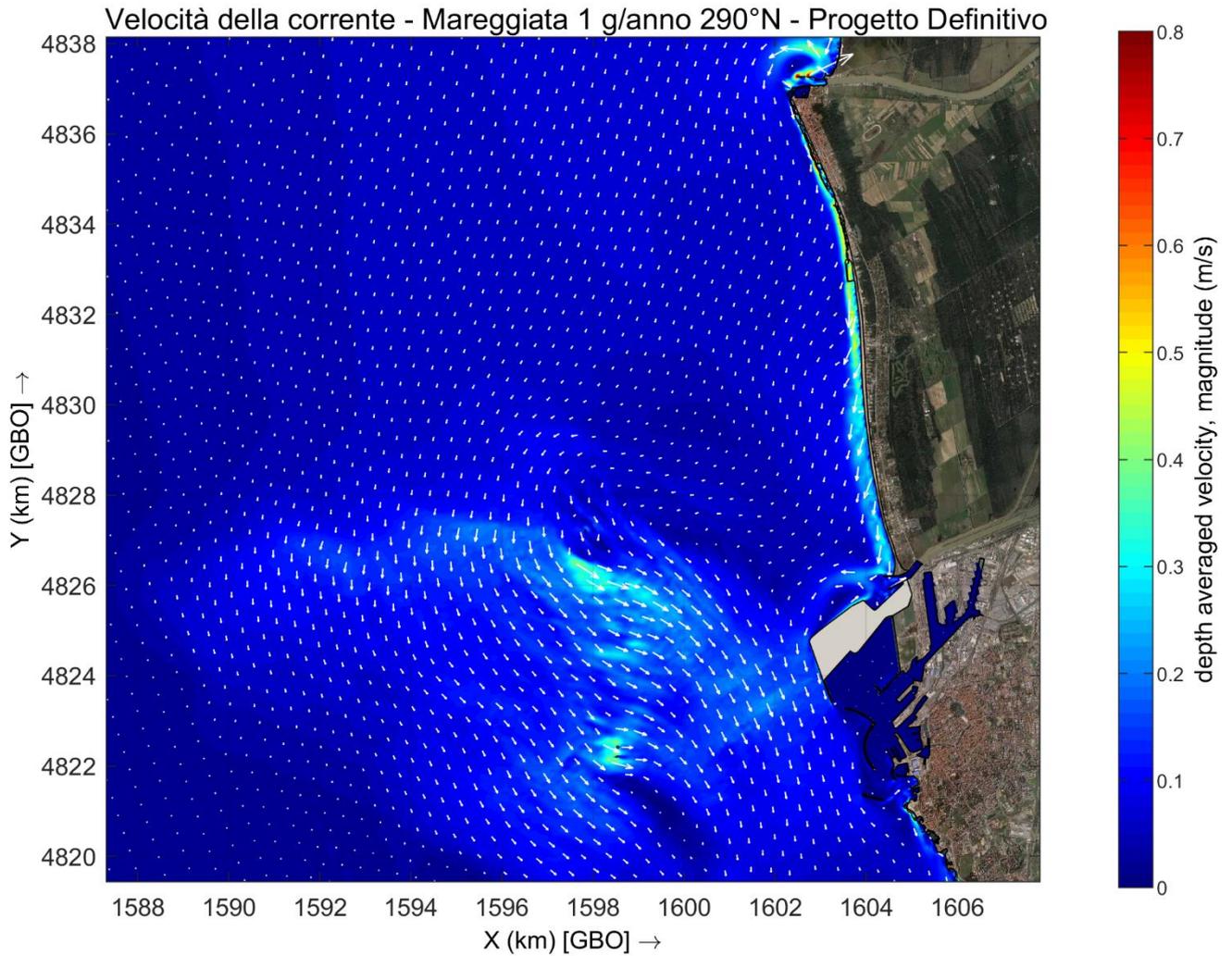


Figura 3.34 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la configurazione di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Velocità della corrente - Mareggiata 1 g/anno 290°N - Stato di fatto

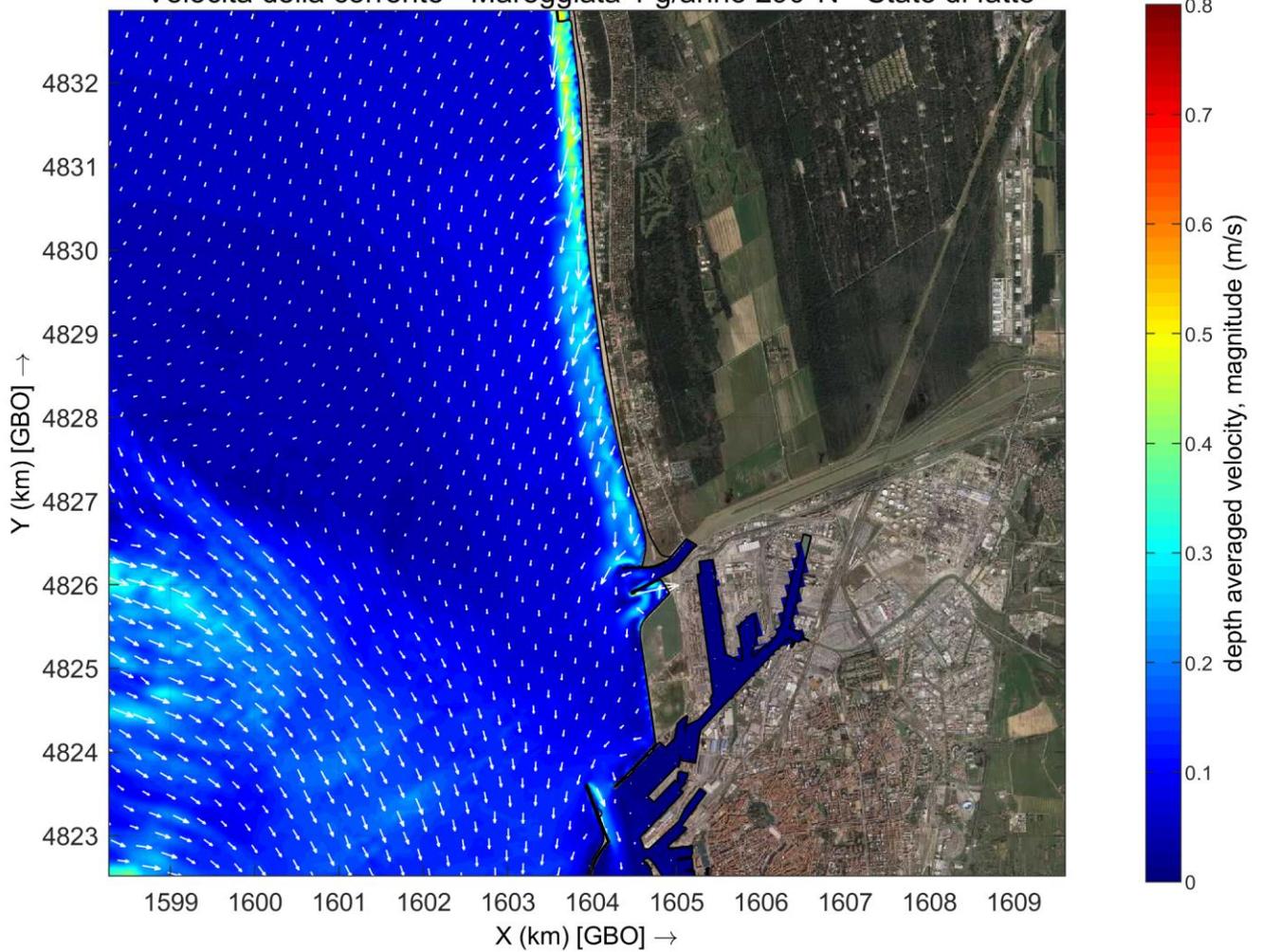


Figura 3.35 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Velocità della corrente - Mareggiata 1 g/anno 290°N - Progetto Definitivo

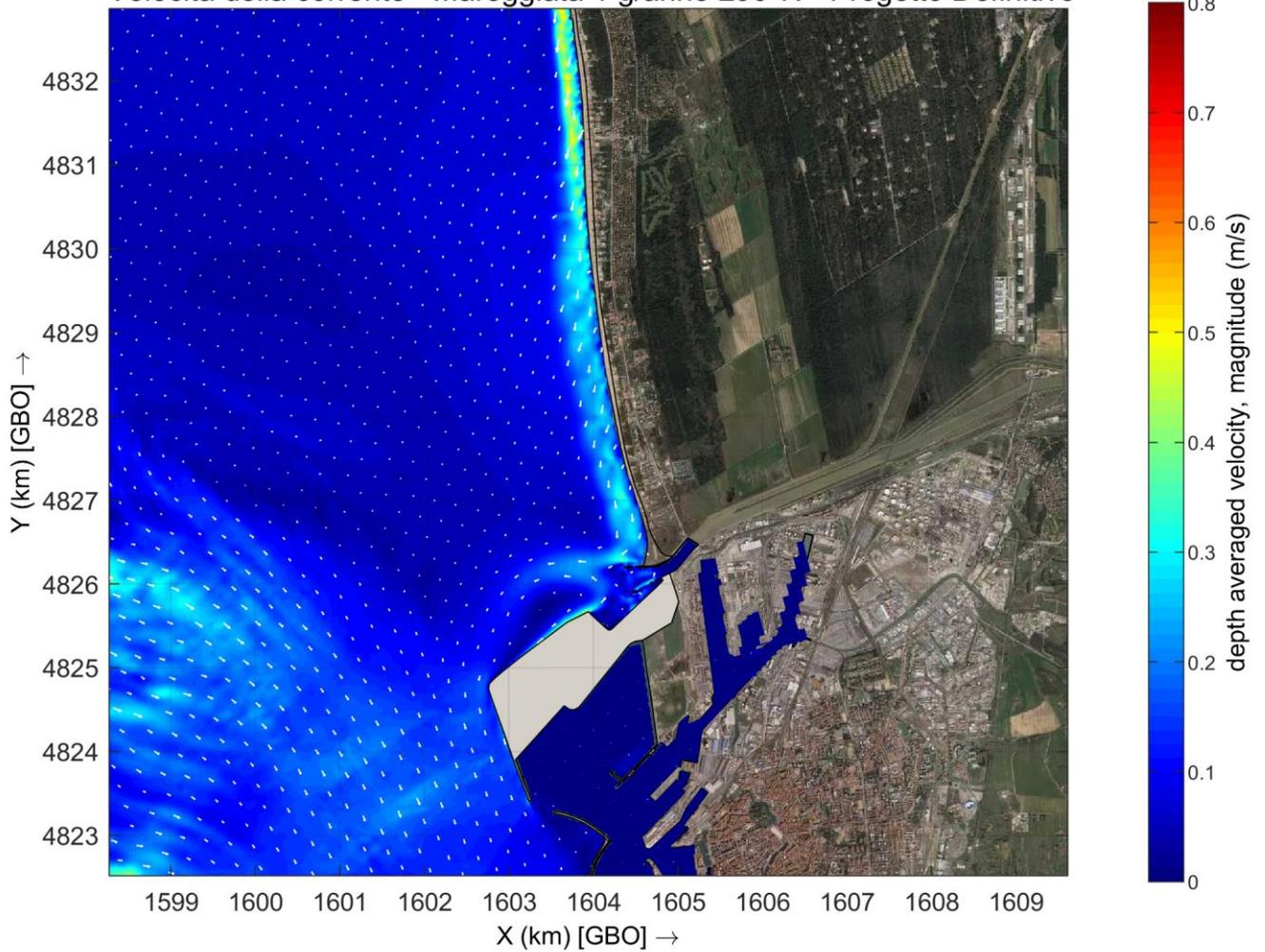


Figura 3.36 – Velocità della corrente calcolata per la configurazione di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N:  $H_s = 2.14$  m,  $T_p = 7.30$  s,  $U_w = 8.4$  m/s)

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

### 3.7.3 Trasporto solido e concentrazione dei sedimenti in sospensione

Delle tre mareggiate considerate, quella che produce gli effetti maggiormente significativi in termini di trasporto dei sedimenti in sospensione è certamente la mareggiata di Ponente. La mareggiata simulata è proveniente da 250°N ed è caratterizzata da altezza significativa di 4.31 m, periodo di picco di 9.4 s e velocità del vento di 12.2 m/s. A questo settore è peraltro associata la quasi totalità dell'energia del moto ondoso incidente, e la mareggiata è quindi da considerarsi rappresentativa, per la maggior parte degli ambiti indagati, del regime del trasporto solido e delle tendenze evolutive complessive dei fondali. Le mappe riportate nelle figure (Figura 3.37 e Figura 3.38) rappresentano con una scala di colori la concentrazione dei sedimenti in sospensione ( $\text{kg/m}^3$ ) raggiunta durante la mareggiata, mentre i vettori rappresentano la direzione del trasporto solido totale (al fondo e in sospensione), la cui intensità è proporzionale alla dimensione dei vettori stessi.

Considerando la mareggiata di Ponente, l'elemento più evidente che emerge dalle mappe è che, nel tratto di costa della lunghezza di circa 4 km a Nord della foce dello Scolmatore (le spiagge del Calambrone), la quantità di sedimenti messi in sospensione dall'azione della mareggiata è di molto inferiore a quella mobilitata nel tratto più a Nord, fino alla foce dell'Arno (spiagge di Tirrenia e Marina di Pisa). Questa circostanza è chiaramente legata al fatto che l'azione della mareggiata nell'intorno della foce dello Scolmatore è fortemente attenuata dalla presenza delle Secche della Meloria e dà ragione del fatto che il tratto di litorale posto più a Nord sia storicamente più vulnerabile alle mareggiate rispetto a quello posto più a Sud.

Inoltre, la presenza di praterie di *Posidonia Oceanica*, schematizzate nel modello come inerodibile, è chiaramente visibile al largo del porto in quanto riduce la concentrazione di sedimenti in sospensione.

Il confronto tra lo stato di fatto (Figura 3.37) e la configurazione di progetto (Figura 3.38) mette a sua volta in evidenza come l'entità del trasporto solido non si modifichi apprezzabilmente nella parte centrale e settentrionale del tratto di litorale in esame, mentre si riduce nel tratto più a Sud, per un'estensione di circa 3.5 km a partire dalla foce dello Scolmatore. La minore quantità di sedimenti in sospensione, che è dovuta all'attenuazione del moto ondoso e delle correnti già evidenziata nei paragrafi precedenti, determina un minore impatto della mareggiata sull'evoluzione morfologica locale di questo tratto. Ciò non comporta il rischio di un sostanziale deficit di apporto sedimentario sul litorale settentrionale, dal momento che la corrente diretta verso Nord si esaurisce rapidamente verso Nord, dove prevalgono altre dinamiche. Va tuttavia segnalato che localmente potrebbe prodursi uno squilibrio della dinamica litoranea, con un incremento dei processi deposizionali a ridosso della foce dello Scolmatore ed un corrispondente incremento di quelli erosivi nella parte più settentrionale del tratto in questione.

Il confronto tra le mappe evidenzia anche come, per la configurazione di progetto, sia apprezzabilmente ridotto il trasporto dei sedimenti nello specchio d'acqua prospiciente la foce dello Scolmatore e, ovviamente, in quello immediatamente a Sud della foce, che è occupato dalle nuove opere e da esse fisicamente separato dalla spiaggia. Questa circostanza è verosimilmente indicativa del fatto che, ad opere portuali realizzate, dovrebbe diminuire ulteriormente l'interrimento dei bacini portuali, mentre dovranno proseguire le manutenzioni della foce dello Scolmatore, con auspicabile reflimento dei sedimenti entro 3.5 km verso Nord per compensare l'eventuale squilibrio cui si accennava sopra.

Per quanto riguarda la mareggiata di Mezzogiorno, proveniente da 170°N e caratterizzata da altezza significativa di 2.44 m, periodo di picco di 6.73 s e velocità del vento di 10.0 m/s, le mappe riportate nelle figure (Figura 3.39 e Figura 3.40) mostrano come l'intensità del trasporto solido sia sensibilmente inferiore rispetto al caso precedente, ed interessa solo la spiaggia sommersa più prossima alla linea di riva.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

Anche in questo caso si osserva come, per la configurazione di progetto, il trasporto nel primo tratto di litorale a ridosso della foce dello Scolmatore (spiagge del Calambrone) sia attenuato, a causa dell'effetto di schermo che la realizzazione delle opere portuali produce rispetto all'azione del moto ondoso proveniente da Sud. Valgono quindi le medesime considerazioni sui potenziali squilibri localizzati della dinamica litoranea evidenziate in precedenza.

Infine, la mareggiata di Maestrale, proveniente da 290°N e caratterizzata da altezza significativa di 2.14 m, periodo di picco di 7.3 s e velocità del vento di 8.4 m/s, incide il litorale a Nord del porto di Livorno senza subire alcuna influenza dalle opere portuali, esistenti e in progetto.

Le successive figure (da Figura 3.43 a Figura 3.46) illustrano alcuni risultati quantitativi ottenuti sulla base dei risultati delle simulazioni del trasporto solido; le figure riportano il bilancio, in termini di m<sup>3</sup>/s di portata solida, effettuato lungo 8 sezioni ortogonali al litorale, distanziate circa 800 m l'una dall'altra ed estese dalla riva fino alla batimetrica -5.0. Le sezioni sono ubicate nel tratto di circa 6 km che va dalla foce dello Scolmatore al limite settentrionale della spiaggia di Tirrenia (soffolta Milano).

Il primo grafico (Figura 3.44), che si riferisce al risultato ottenuto con la mareggiata proveniente da 250°N, evidenzia come il trasporto solido sia diretto verso Nord in tutto il tratto che compete alle prime 5 sezioni (circa 3.5 km, dalla foce dello scolmatore verso Nord), per poi andare verso Sud in corrispondenza delle sezioni successive. Il diverso andamento è legato all'orientazione della linea di costa rispetto al moto ondoso incidente, che in questo tratto di litorale è comunque quasi ortogonale. Si rileva tuttavia che il trasporto nella configurazione di progetto è inferiore (addirittura di verso contrario nella sezione 2, a poca distanza dalla foce) a quello relativo allo stato di fatto nel tratto di circa 3.5 km che compete alle prime 4÷5 sezioni Tali sezioni individuano quindi la zona in cui la presenza delle opere in progetto ha influenza sul trasporto solido litoraneo. Questo significa che, ad opere realizzate, lungo questo tratto di litorale sarà verosimilmente inferiore l'intensità dei fenomeni morfodinamici innescati dalle mareggiate prevalenti di Ponente.

I grafici successivi di Figura 3.45 e Figura 3.46 riportano analoghe valutazioni per le altre due mareggiate considerate, che provengono, rispettivamente, dalle direzioni di 170°N e 290°N. In entrambi i casi si rileva che l'entità del trasporto solido è sensibilmente inferiore a quello dovuto alla mareggiata proveniente da 250°N.

Nel caso della mareggiata di Mezzogiorno (Figura 3.45), la portata solida ha segno positivo in tutte le sezioni, ad indicare che lungo tutto il tratto considerato il trasporto di sedimenti lungo la costa è diretto verso Nord. Si riscontra inoltre che fino alle sezioni 5÷6 il trasporto calcolato nella configurazione di progetto è sensibilmente inferiore a quello calcolato nello stato di fatto, a conferma del fatto che le opere in progetto forniscono una protezione non trascurabile rispetto al moto ondoso proveniente dal settore meridionale. Si tratta peraltro di differenze che, pesate rispetto all'energia associata al settore di Mezzogiorno, hanno complessivamente un significato trascurabile nella dinamica complessiva.

Minime o nulle sono infine le differenze che si osservano tra lo stato di fatto e la configurazione di progetto nel caso della mareggiata di Maestrale (Figura 3.46), a conferma del fatto che le opere in progetto non modificano l'assetto del trasporto solido litoraneo indotto dalle mareggiate provenienti da Nord-Ovest, rispetto alle quali le opere stesse si collocano sottoflutto.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Stato di fatto

Concentrazione di sedimenti  
Mareggiata 1 g/anno 250°N

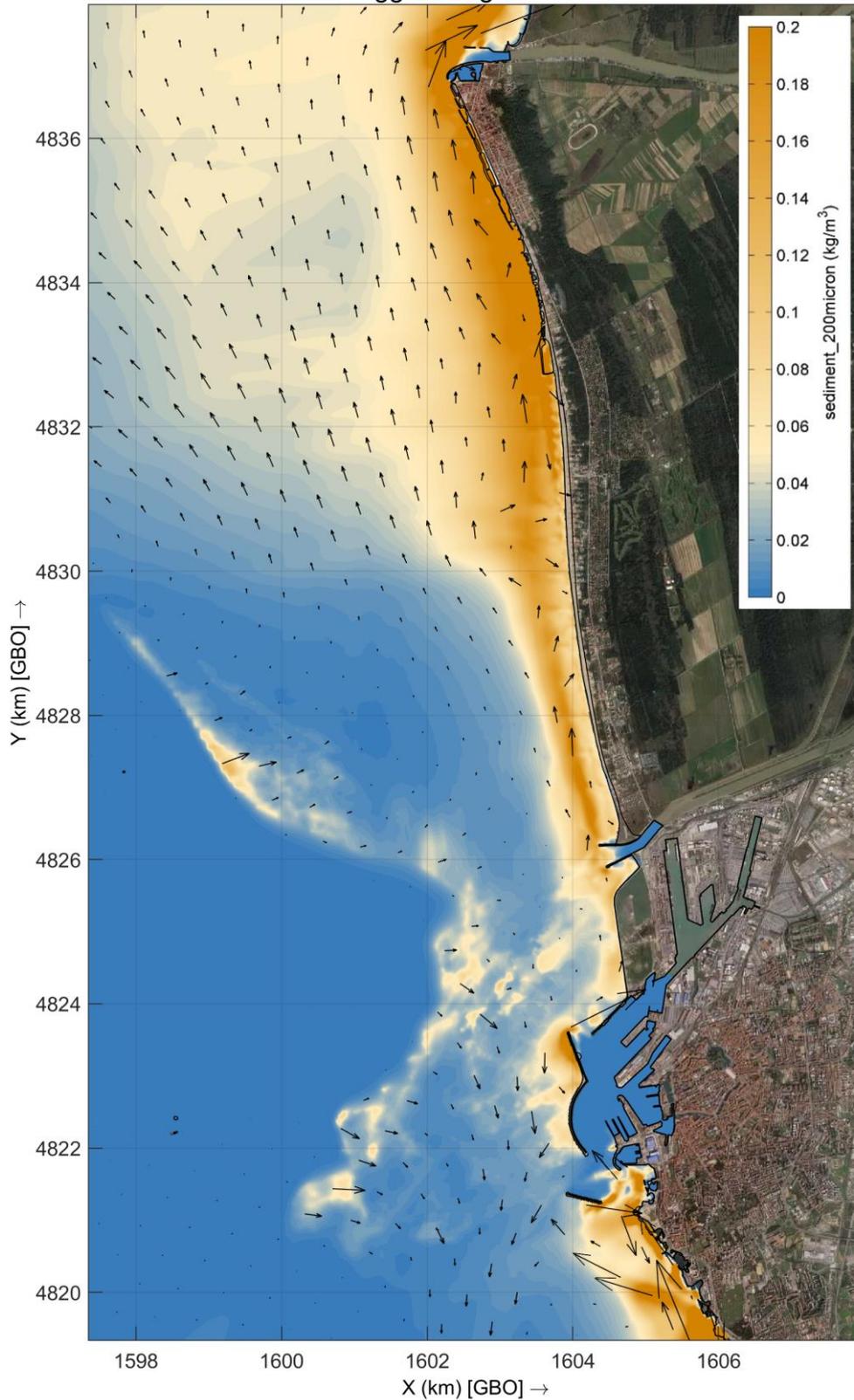


Figura 3.37 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Ponente  
Stato di fatto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

**Progetto Definitivo**  
**Concentrazione di sedimenti**  
**Mareggiata 1 g/anno 250°N**

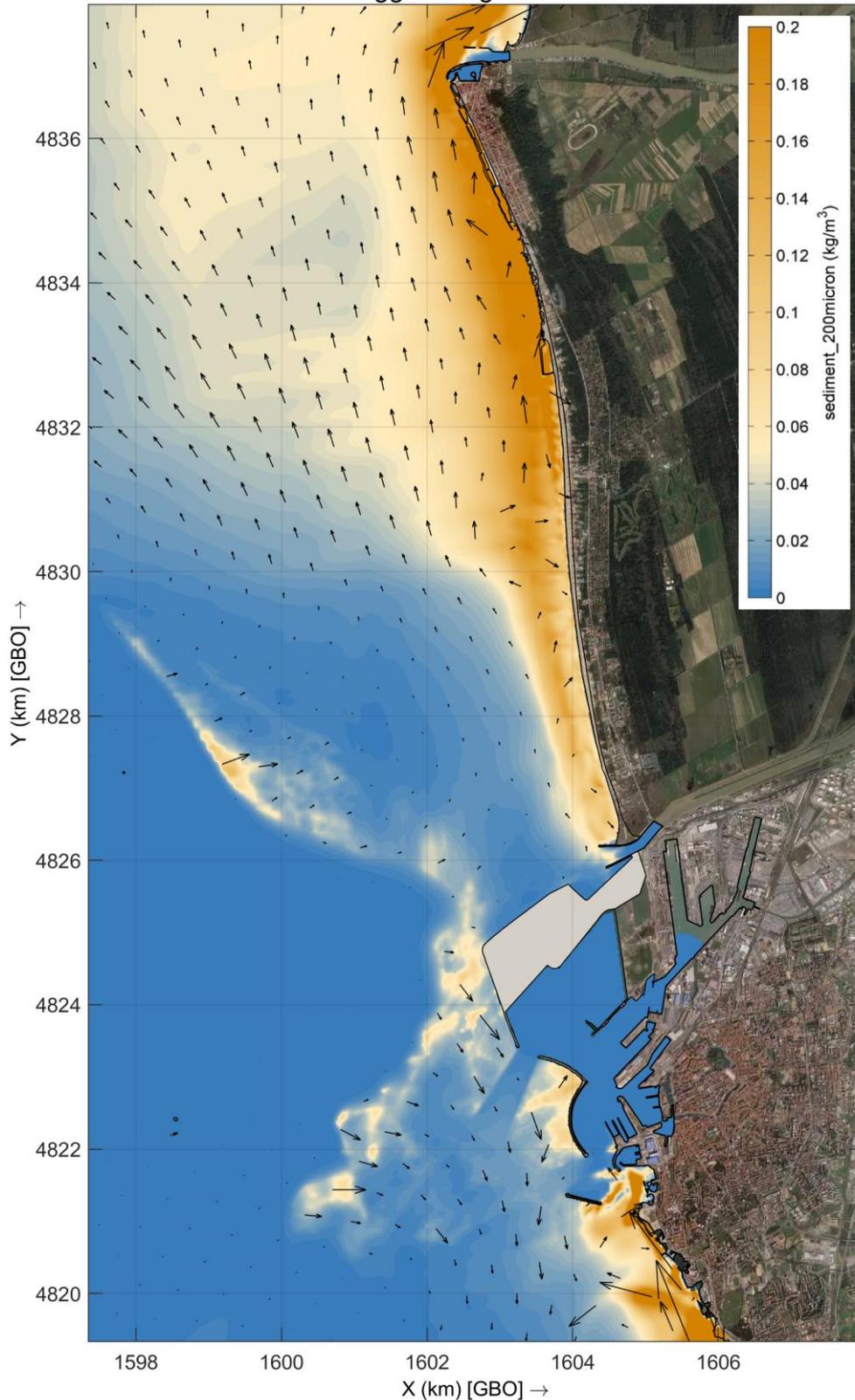


Figura 3.38 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Ponente  
Configurazione di progetto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Stato di fatto

Concentrazione di sedimenti  
Mareggiata 1 g/anno 170°N

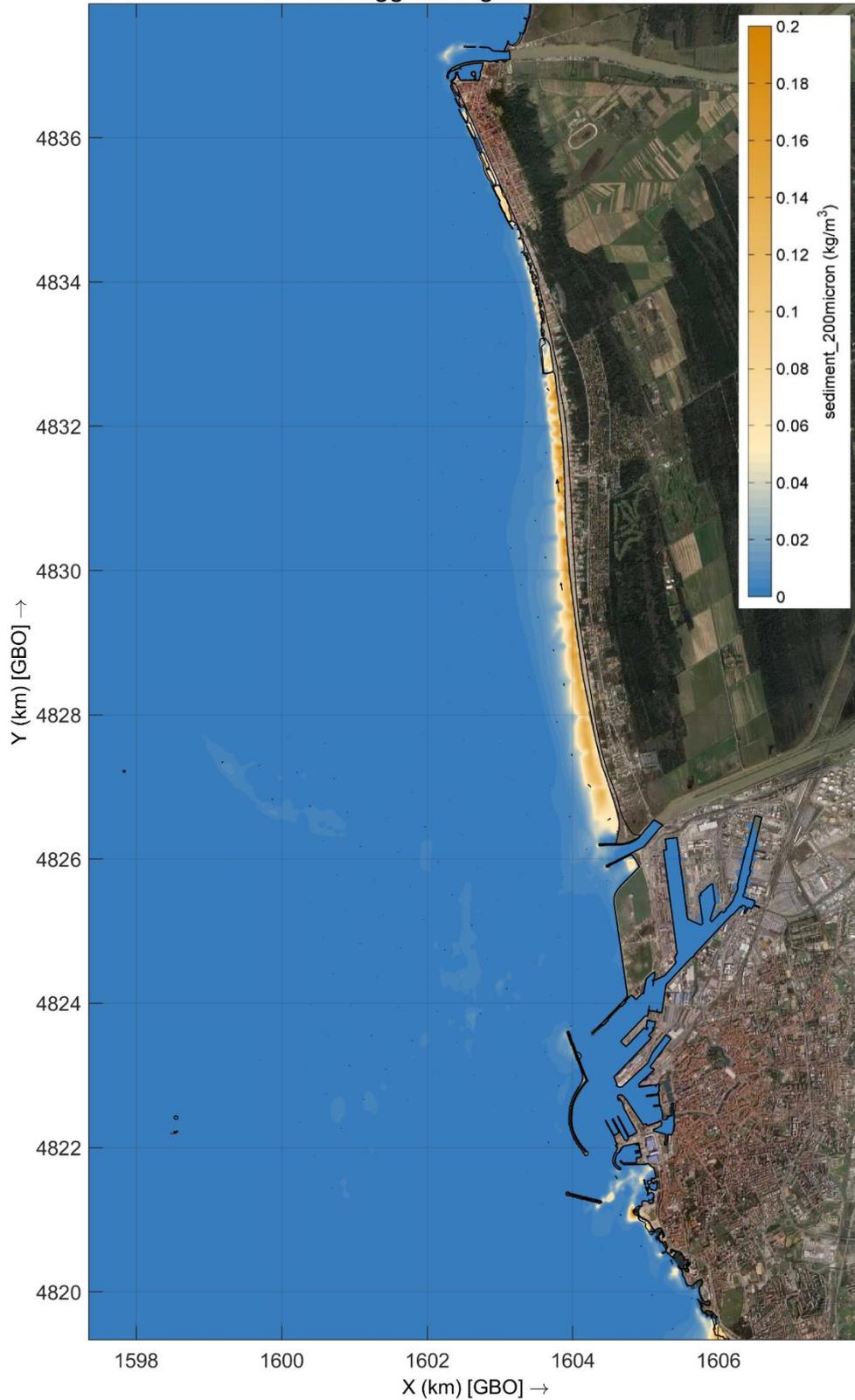


Figura 3.39 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Mezzogiorno  
Stato di fatto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Progetto Definitivo Concentrazione di sedimenti Mareggiata 1 g/anno 170°N

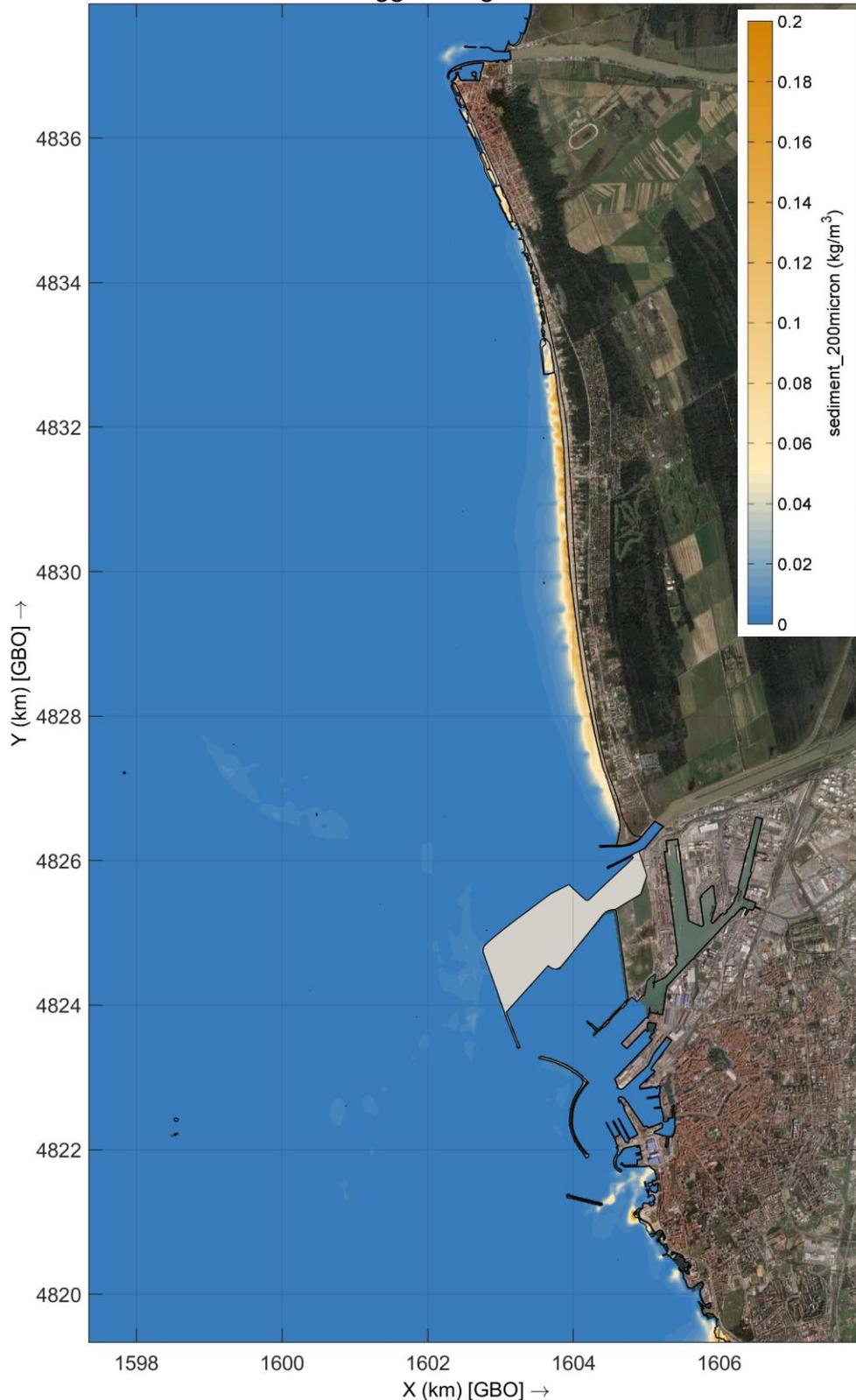


Figura 3.40 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Mezzogiorno  
Configurazione di progetto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Stato di fatto

Concentrazione di sedimenti  
Mareggiata 1 g/anno 290°N

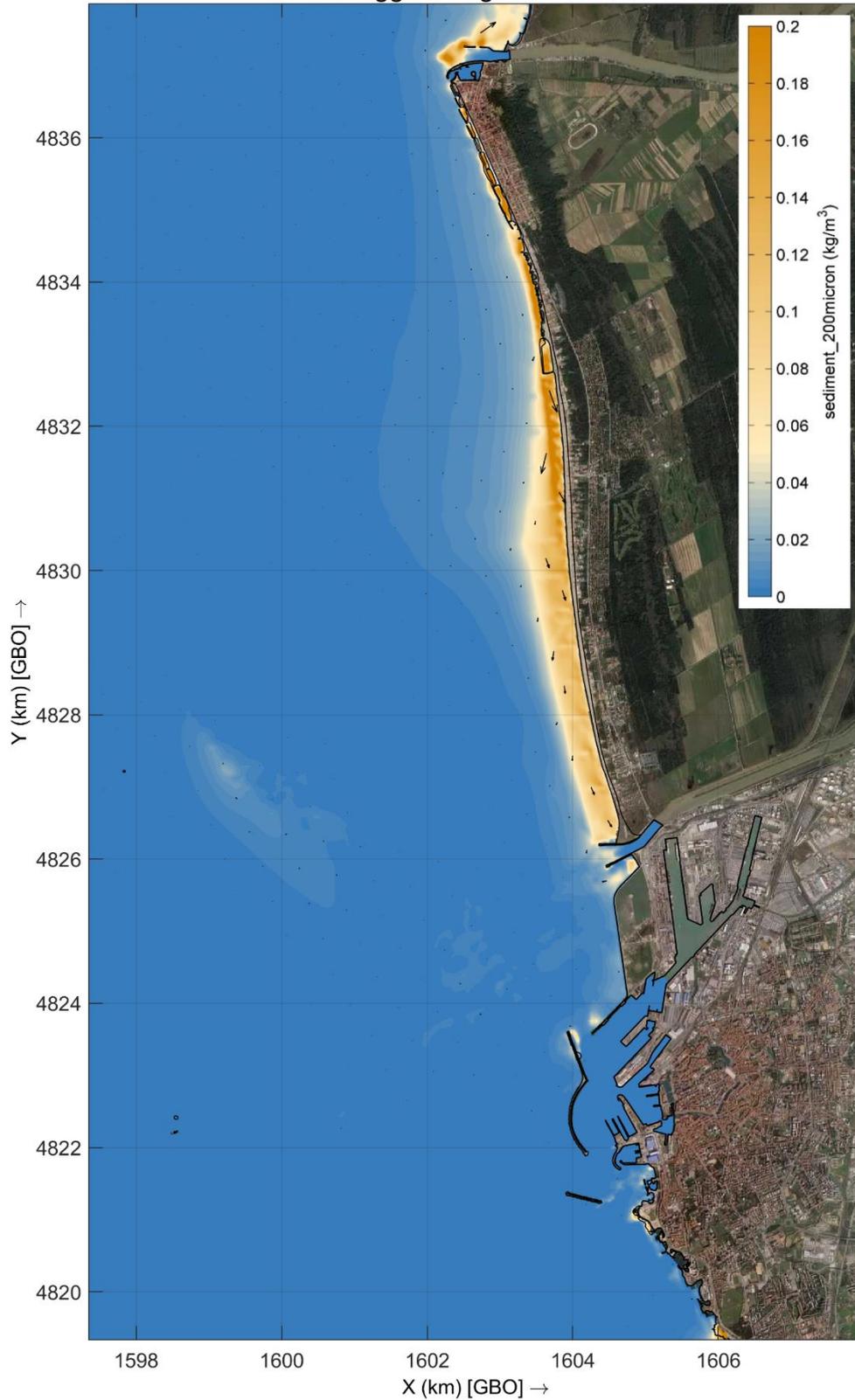


Figura 3.41 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Maestrale  
Stato di fatto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

**Progetto Definitivo**  
**Concentrazione di sedimenti**  
**Mareggiata 1 g/anno 290°N**

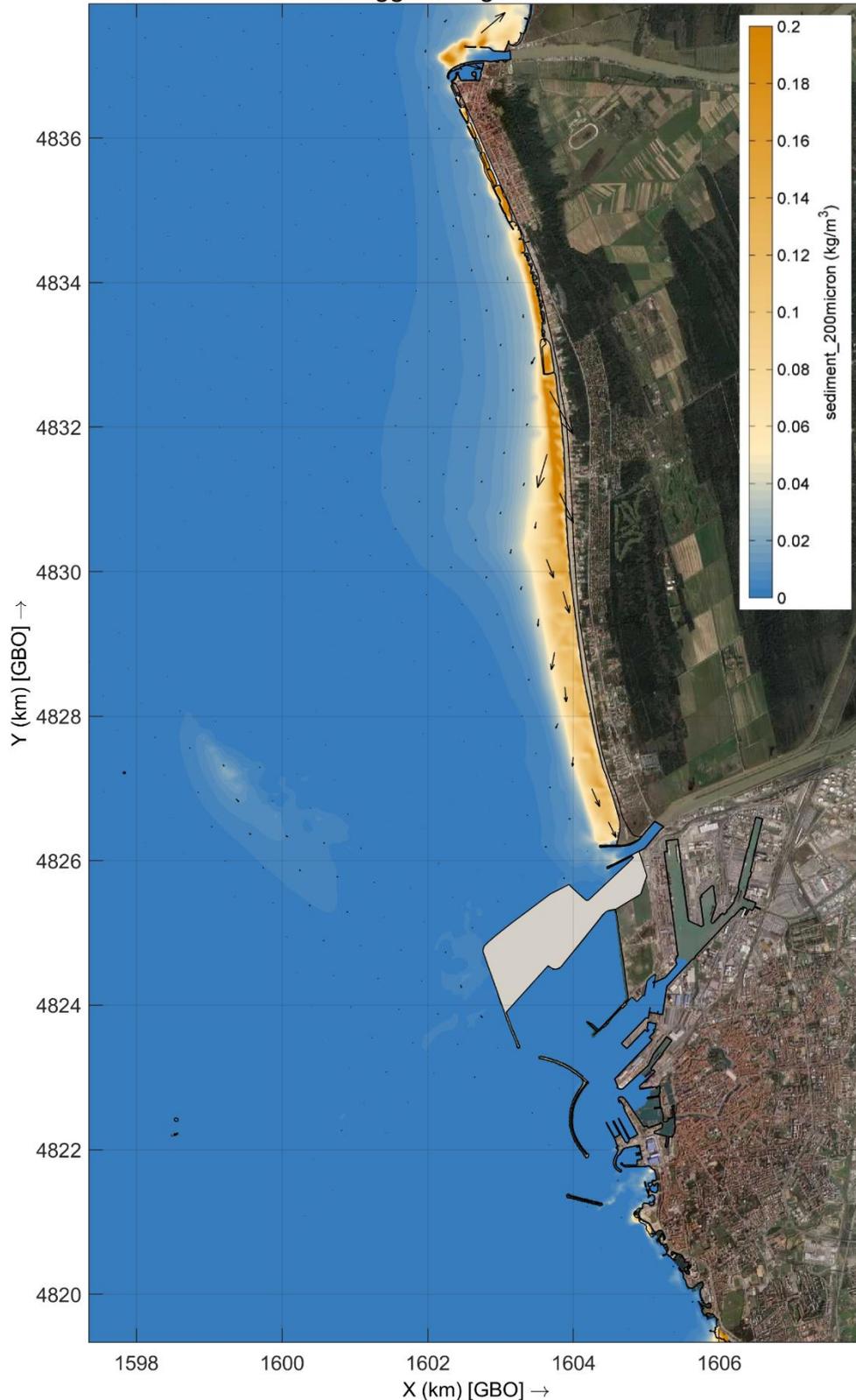


Figura 3.42 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Maestrale  
Configurazione di progetto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Sezioni per il calcolo della portata solida

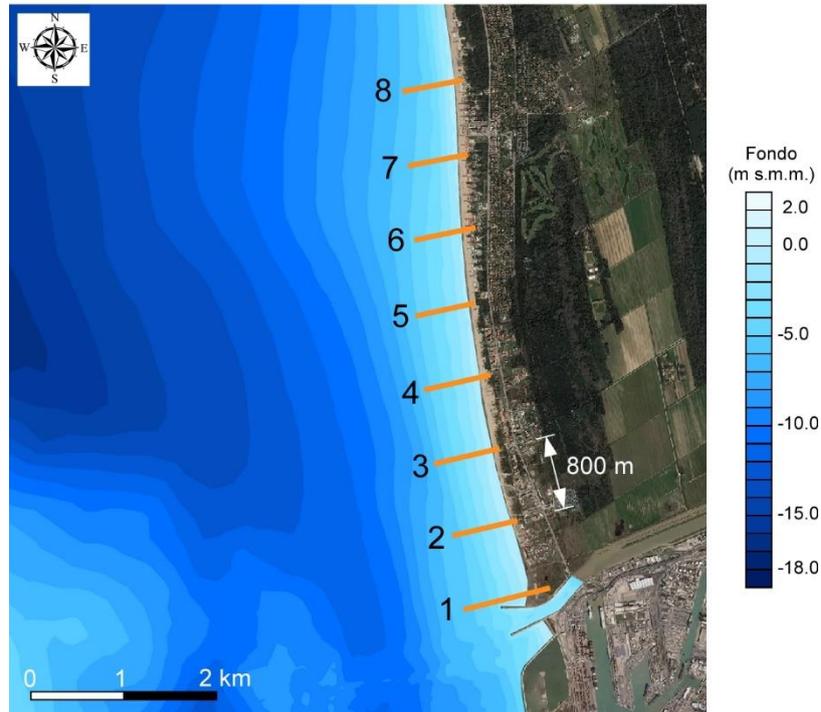


Figura 3.43 – Sezioni utilizzate per i bilanci della portata solida lungo il litorale dallo Scolmatore alle spiagge di Tirrenia

### Portata solida sulle sezioni - Mareggiata 1/anno 250°N

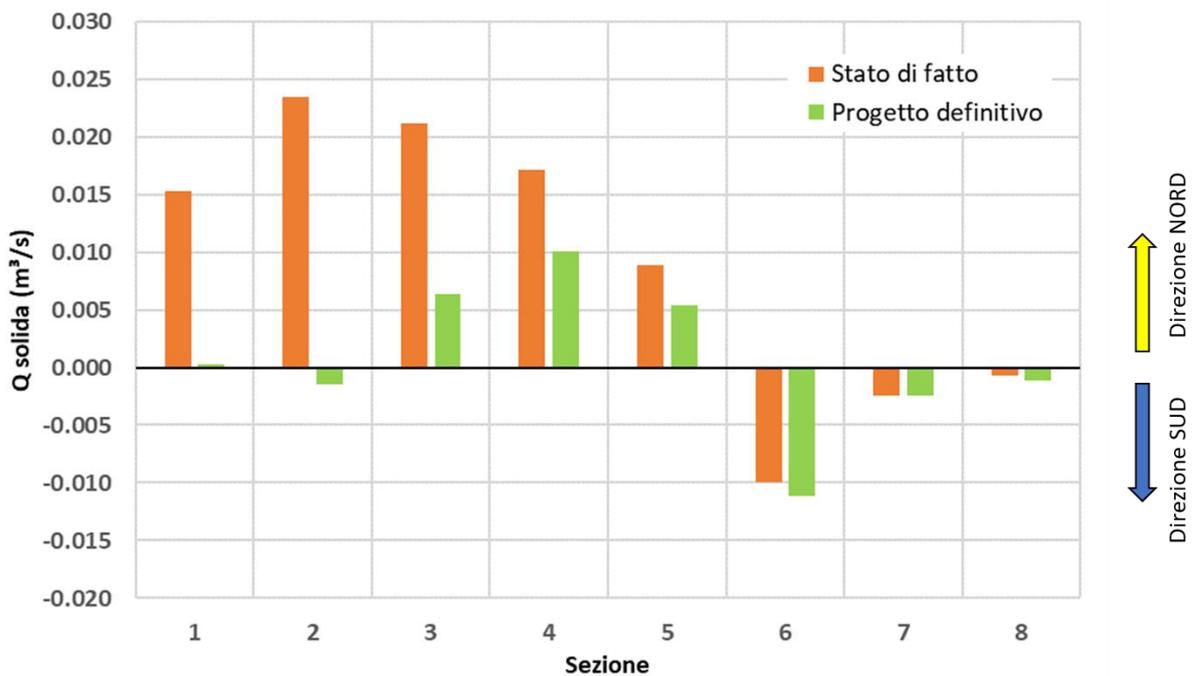


Figura 3.44 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 3.43 nello stato di fatto e nella configurazione di progetto, per la mareggiata di Ponente

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Portata solida sulle sezioni - Mareggiata 1/anno 170°N

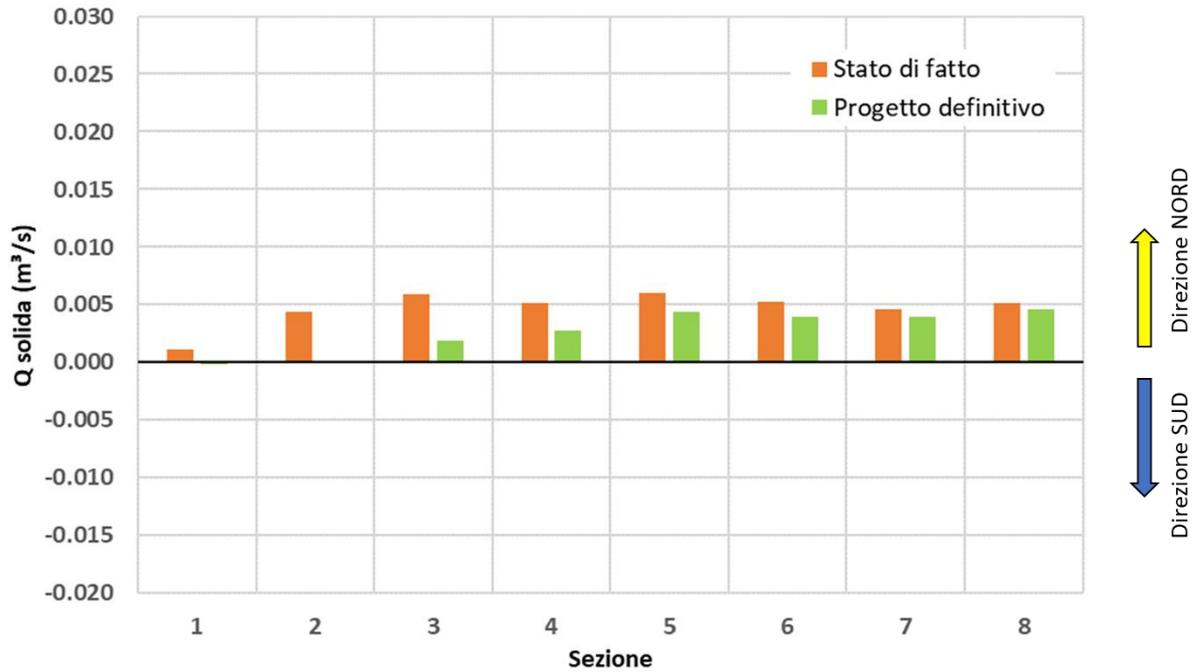


Figura 3.45 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 3.43 nello stato di fatto e nella configurazione di progetto, per la mareggiata di Mezzogiorno

### Portata solida sulle sezioni - Mareggiata 1/anno 290°N

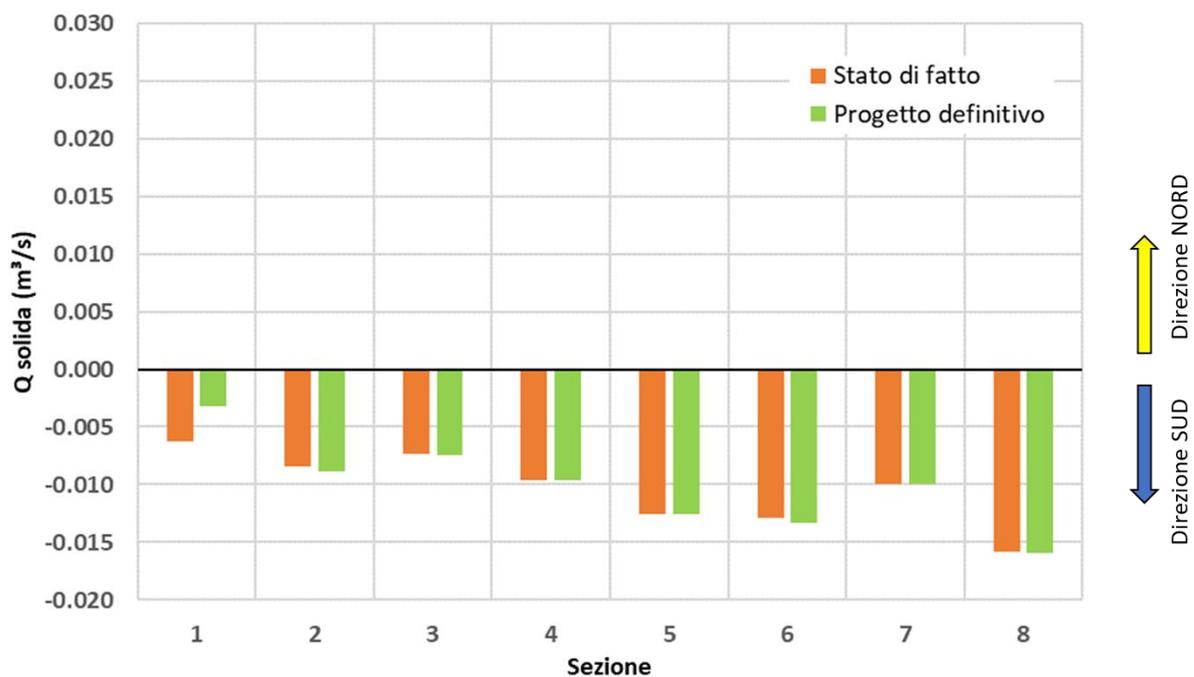


Figura 3.46 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 3.43 nello stato di fatto e nella configurazione di progetto, per la mareggiata di Maestrale

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto Definitivo	IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx

#### 3.7.4 Evoluzione dei fondali

Le mappe che seguono, da Figura 3.47 a Figura 3.52, riportano per ciascuna delle 3 mareggiate considerate (onde di durata 1g/anno di Ponente, Mezzogiorno e Maestrale) e delle 2 configurazioni analizzate (Stato di Fatto e di Progetto) i risultati delle simulazioni in termini di evoluzione dei fondali al termine delle simulazioni. La rappresentazione è prodotta mediante l'utilizzo di una scala cromatica che evidenzia qualitativamente le aree soggette ad erosione e a deposizione.

Confrontando le varie mappe, appare subito evidente come sia la mareggiata di Ponente a produrre le più significative variazioni del fondale, mentre le mareggiate di Mezzogiorno e Maestrale, molto meno intense, producono solo variazioni localizzate in alcuni punti lungo il litorale, tra la foce dello Scolmatore e la foce dell'Arno. La presenza di *Posidonia Oceanica* contribuisce ovviamente a stabilizzare l'assetto dei fondali.

Se si osservano i risultati relativi alla mareggiata di Ponente, riportati in Figura 3.47 e Figura 3.48, si evidenzia una dinamica sedimentaria particolarmente complessa sotto costa, legata anche agli interventi di difesa che sono stati messi in atto nel corso degli anni per proteggere il litorale (scogliere parallele e radenti, scogliere soffolte, difese a celle, ecc.). È possibile rilevare tuttavia che le aree maggiormente soggette a tendenze erosive sono quelle poste immediatamente a Sud della foce dell'Arno (spiagge di Marina di Pisa e Tirrenia), mentre il fenomeno erosivo risulta più attenuato in prossimità della foce del Canale Scolmatore (spiaggia di Calambrone), in linea con quanto già evidenziato nel precedente par. 3.7.3.

Il confronto tra lo stato di fatto e la configurazione di progetto mette in evidenza, per quest'ultima, una diminuzione della dinamica sedimentaria nel tratto di litorale più prossimo alla foce del Canale Scolmatore, per un'estensione di circa 3.5 km a partire dai moli. Ciò è legato all'attenuazione del moto ondoso e delle correnti locali di cui si è già discusso nei paragrafi precedenti. Si evidenzia, inoltre, un potenziale processo di interrimento del canale di accesso al porto, che avviene per erosione delle sponde, e che verrà trattato in maniera più approfondita nel successivo Capitolo 5.

Se si osservano i risultati relativi alla mareggiata di Mezzogiorno, riportati in Figura 3.49 e Figura 3.50, e quelli relativi alla mareggiata di Maestrale, riportati in Figura 3.51 e Figura 3.52, si riscontra in entrambi i casi che la dinamica sedimentaria è attiva principalmente lungo le spiagge di Marina di Pisa e di Tirrenia, ed è comunque di entità di molto inferiore rispetto alla mareggiata di Ponente. L'effetto delle opere in progetto, anche nel tratto di litorale più prossimo alla foce dello Scolmatore, risulta trascurabile per entrambe le mareggiate.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

### Stato di fatto

Evoluzione del fondo  
Mareggiata 1 g/anno 250°N

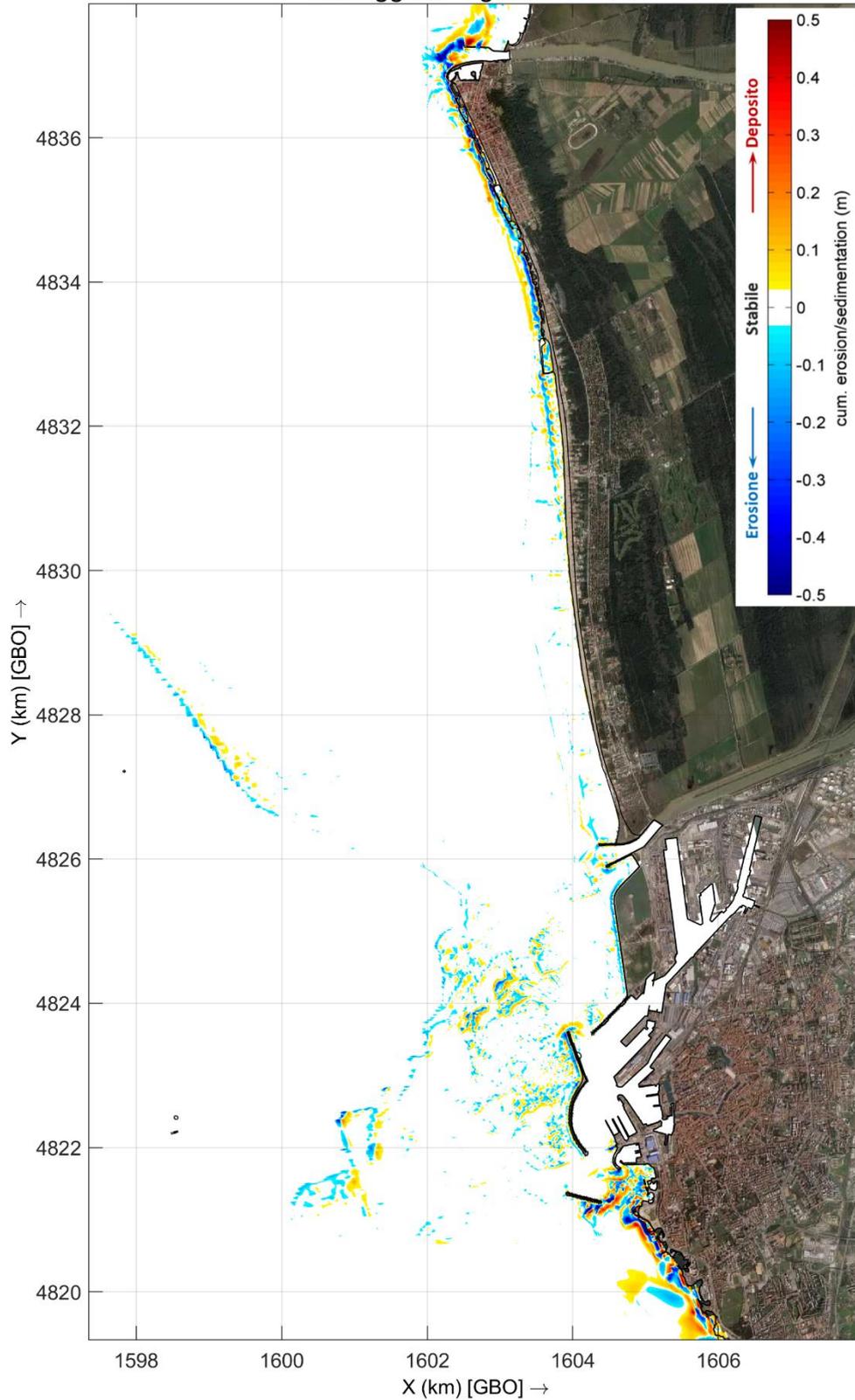


Figura 3.47 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Ponente  
Stato di fatto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

Progetto definitivo  
Evoluzione del fondo  
Mareggiata 1 g/anno 250°N

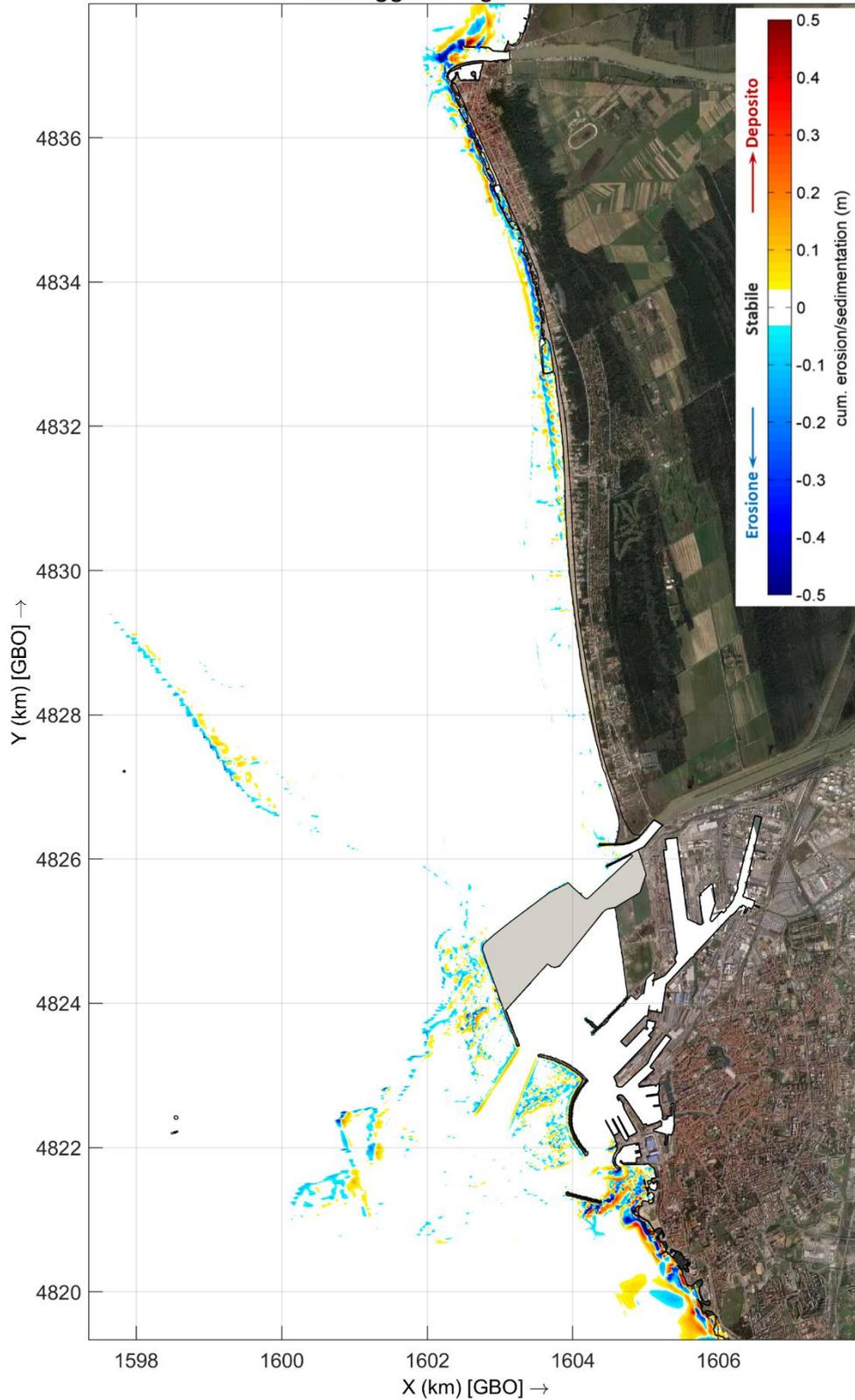


Figura 3.48 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Ponente  
Configurazione di progetto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

## Stato di fatto

Evoluzione del fondo  
Mareggiata 1 g/anno 170°N

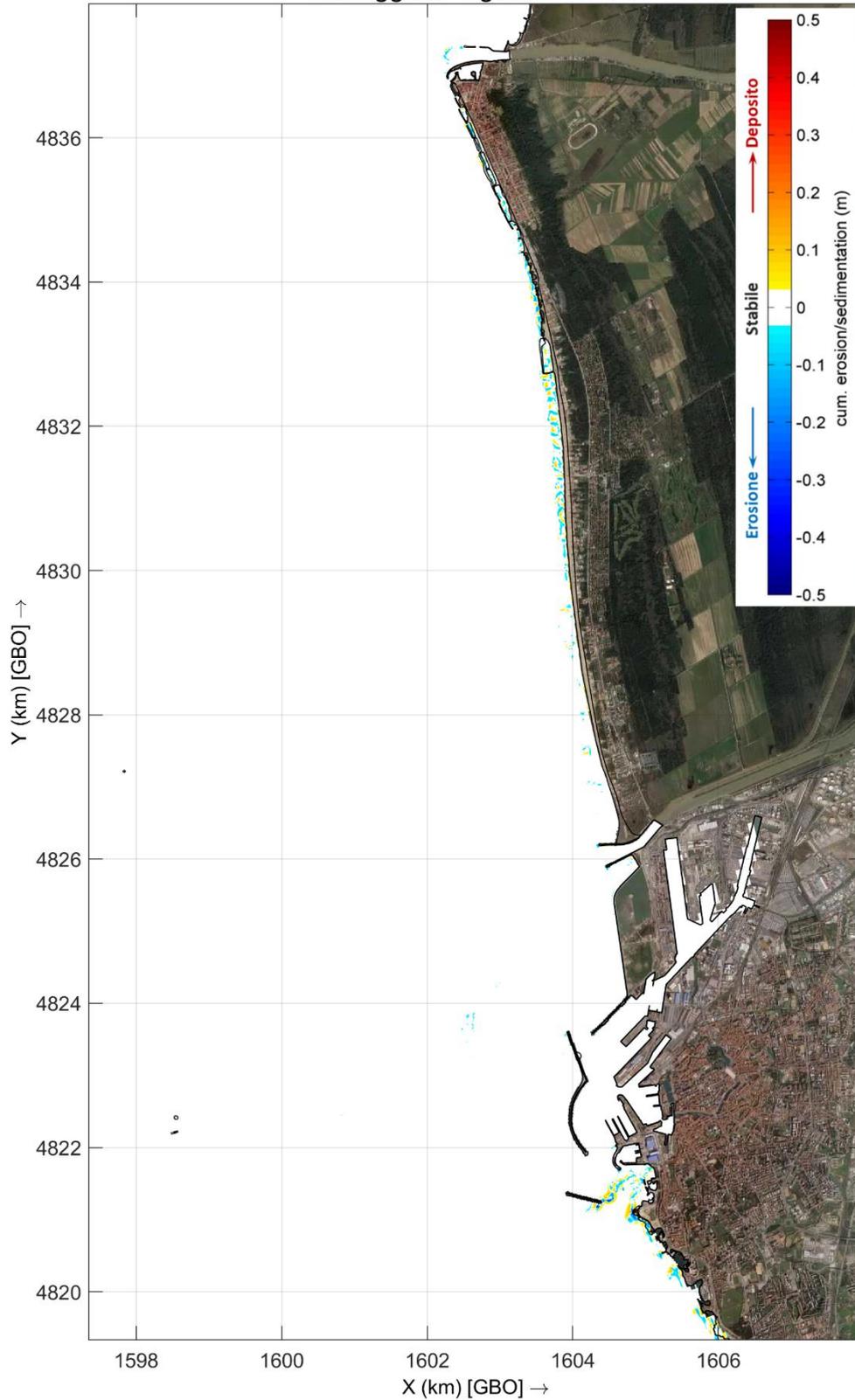


Figura 3.49 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Mezzogiorno  
Stato di fatto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

Progetto definitivo  
Evoluzione del fondo  
Mareggiata 1 g/anno 170°N

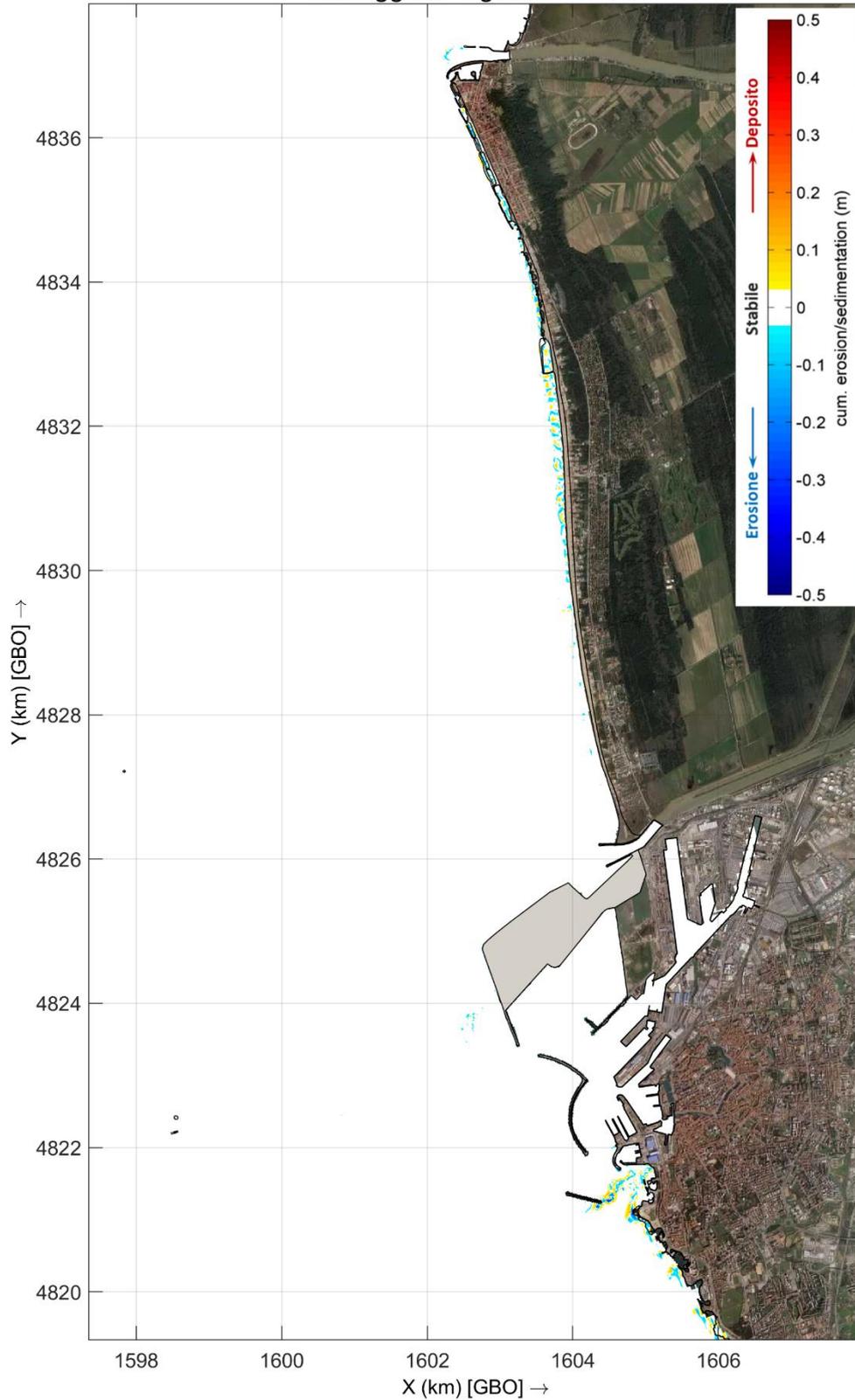


Figura 3.50 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Mezzogiorno  
Configurazione di progetto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

## Stato di fatto

Evoluzione del fondo  
Mareggiata 1 g/anno 290°N

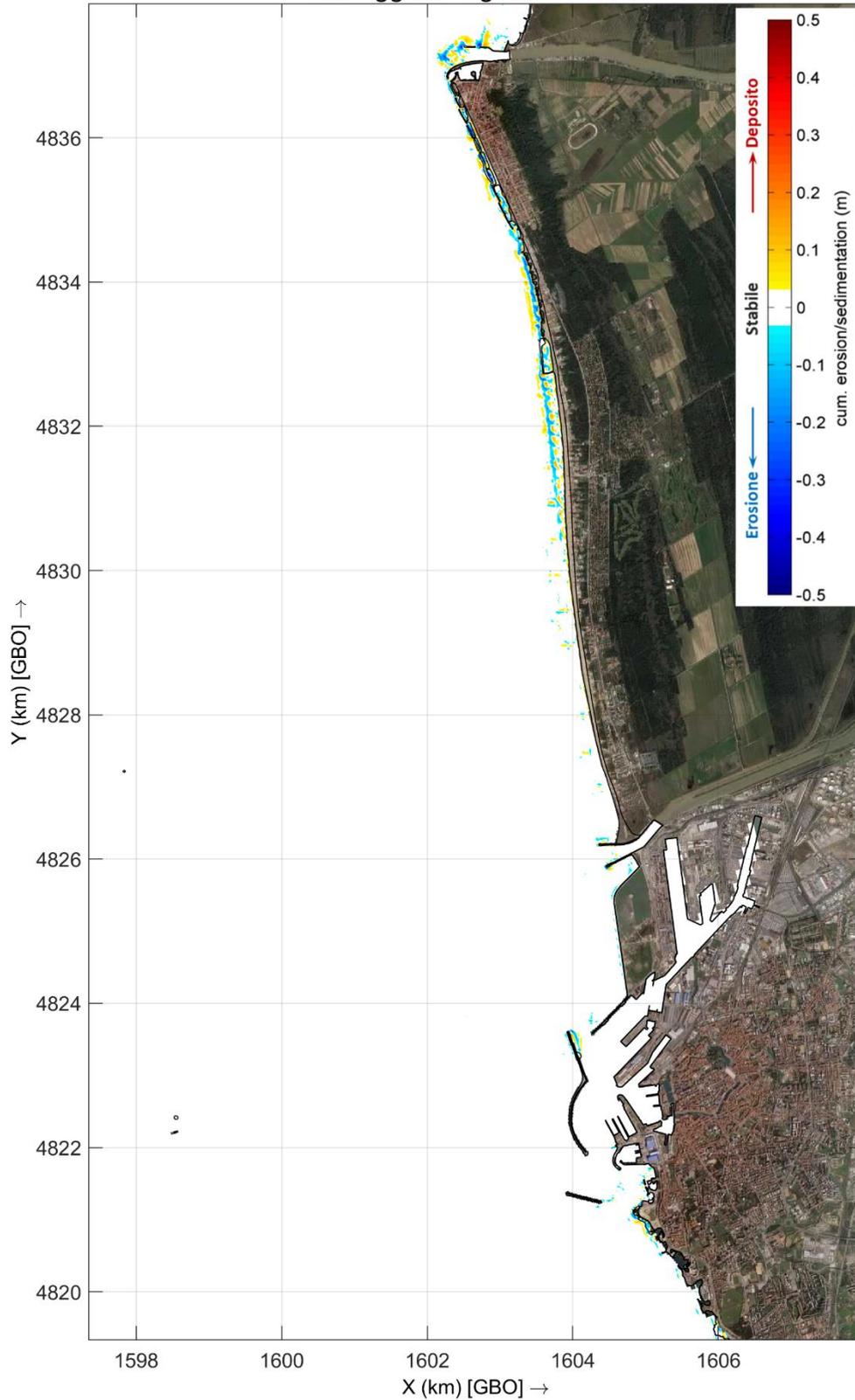


Figura 3.51 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Maestrale  
Stato di fatto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

Progetto definitivo  
Evoluzione del fondo  
Mareggiata 1 g/anno 290°N

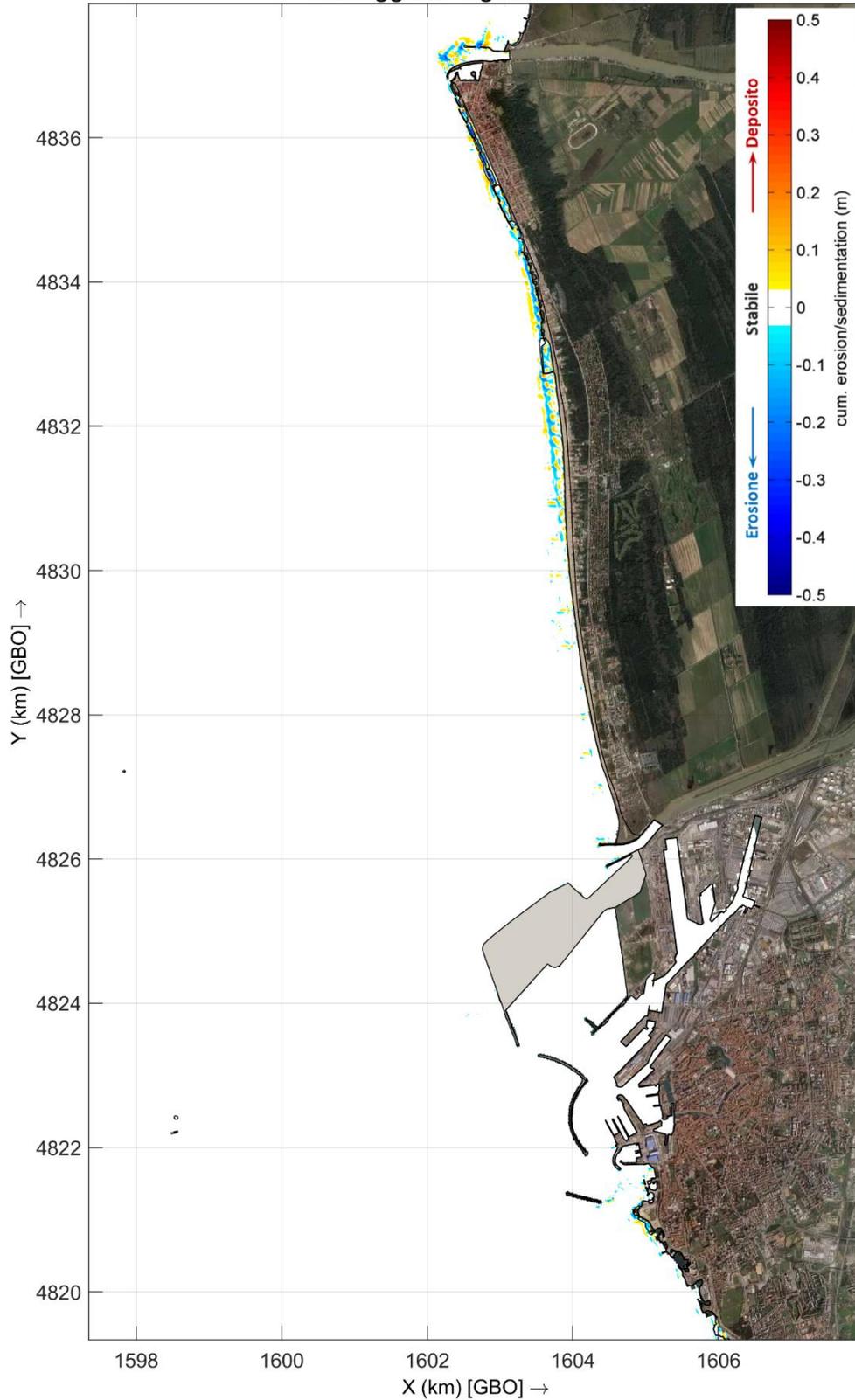


Figura 3.52 – Evoluzione dei fondali per la mareggiata di Maestrale  
Configurazione di progetto

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

## 4 EFFETTI DELLE PORTATE DI PIENA DELLO SCOLMATORE D'ARNO

Il Canale Scolmatore del Fiume Arno ha il suo incile subito a valle di Pontedera e termina dopo un percorso di circa 28.3 km alle foci del Calambrone, al confine tra i comuni di Livorno e di Pisa. La costruzione dello Scolmatore d'Arno fu decisa nel 1954 in seguito all'inondazione della città di Pisa del 1949. La costruzione dell'opera fu completata nel 1985.

Il canale deriva le acque del Fiume Arno attraverso un sistema di 4 paratoie a ventola che si abbattano in maniera automatica, quando i livelli in Arno risultano superiori a 16 m s.l.m., oppure possono essere azionate manualmente, come di fatto è sempre avvenuto in passato. Esso convoglia in mare anche le portate di alcuni corsi d'acqua minori, come il Tora, il Fosso Reale e, nell'ultimo tratto, il Canale dei Navicelli. Tramite il canale Usciana, convoglia inoltre le acque provenienti dal Padule di Fucecchio, raccolte dal C. Usciana stesso mediante un bypass che sottopassa l'Arno in corrispondenza dell'opera di presa dello Scolmatore.

Nell'ottica della valutazione delle potenziali interferenze dell'opera in progetto sulla dinamica costiera del tratto compreso tra il porto di Livorno e la spiaggia del Calambrone, è utile ricordare che, data la finalità per la quale il canale fu costruito, ossia la messa in sicurezza idraulica della città di Pisa, l'entrata in funzione dello Scolmatore è sporadica e avviene occasionalmente in concomitanza con le piene più gravose dell'Arno (si veda il § 4.1.1). Di conseguenza, il contributo dello Scolmatore all'alimentazione sedimentaria del litorale a Nord della foce, pur se di qualche rilevanza [2] [3], è comunque di minore entità rispetto agli apporti solidi provenienti dalle Spiagge di Tirrenia (e quindi dal Fiume Arno) e dalle Secche della Meloria.

Risulta invece di maggiore interesse valutare se le opere previste dal presente progetto possano produrre una variazione dei pattern di dispersione delle torbide del canale Scolmatore rispetto alle praterie di *Posidonia Oceanica* presenti al largo del porto di Livorno, in prossimità della foce dello Scolmatore stesso.

Come anticipato nel precedente Capitolo 2, l'estensione delle praterie di fanerogame è stata rilevata nel 2016 a cura dell'Autorità Portuale [4] ed è stata completata nelle aree mancanti sulla base della mappatura delle biocenosi bentoniche del Mar Tirreno reperita presso il Servizio Cartografico della Regione Toscana.

Il fatto che questa specie target proliferi nelle aree dove è stata censita è spiegabile anche grazie ad alcune foto satellitari recentemente scattate in concomitanza di un evento meteo-marino intenso, caratterizzato anche dalle piene dei principali corsi d'acqua toscani, dove è possibile apprezzare le traiettorie dei plume di torbida provenienti dai fiumi. L'evento in questione è quello che ha investito la regione nei primi giorni di febbraio 2019 e che ha coinvolto principalmente i bacini del Serchio, dell'Ombrone Pistoiese, del Bisenzio, la porzione toscana del Reno ed il Magra; secondariamente, le piogge hanno interessato anche i bacini del Cecina e dell'Arno. Dal punto di vista idrometrico sono state registrate piene importanti principalmente sul Serchio (1250 m<sup>3</sup>/s a Ripafratta-Vecchiano), sull'Ombrone Pistoiese, sul Bisenzio e sul Cecina, con livelli prossimi o superiori alla seconda soglia di riferimento. L'Arno a Pisa ha superato il primo livello di guardia e a Pontedera ha raggiunto una portata media giornaliera di circa 1100 m<sup>3</sup>/s (Figura 4.1), non sufficiente peraltro a giustificare l'attivazione dello Scolmatore d'Arno, che ha pertanto fatto defluire verso il mare solo le portate dei corsi d'acqua minori in esso affluenti. Da un punto di vista mareografico, i dati della boa Gorgona, situata a Nord dell'omonima isola a circa 28 km dalla costa, riportano un'altezza d'onda massima di circa 3.5 m con direzione di 240°N (Figura 4.2).

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

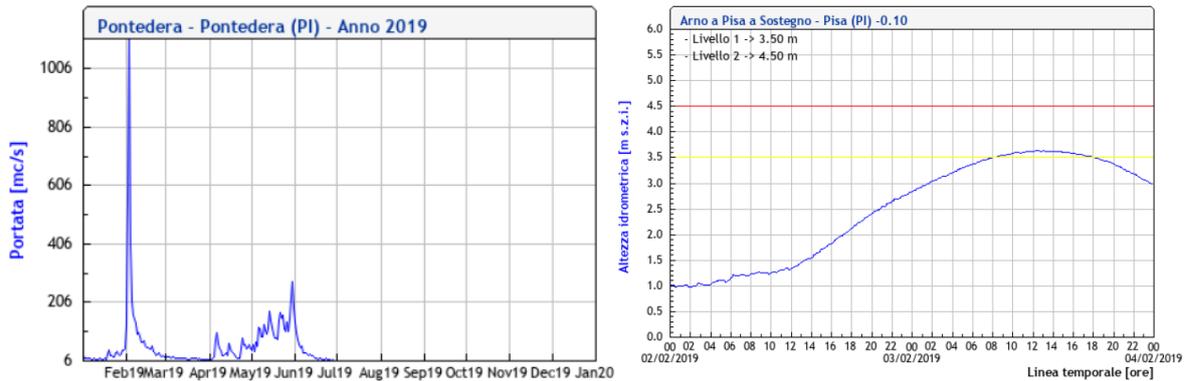


Figura 4.1 – A sinistra, portata misurata sull’Arno a Pontedera nel corso del 2019 (<http://www.sir.toscana.it/>), a destra livello idrometrico dell’Arno a Pisa Sostegno tra il 2 e il 4 febbraio 2019 ([5])

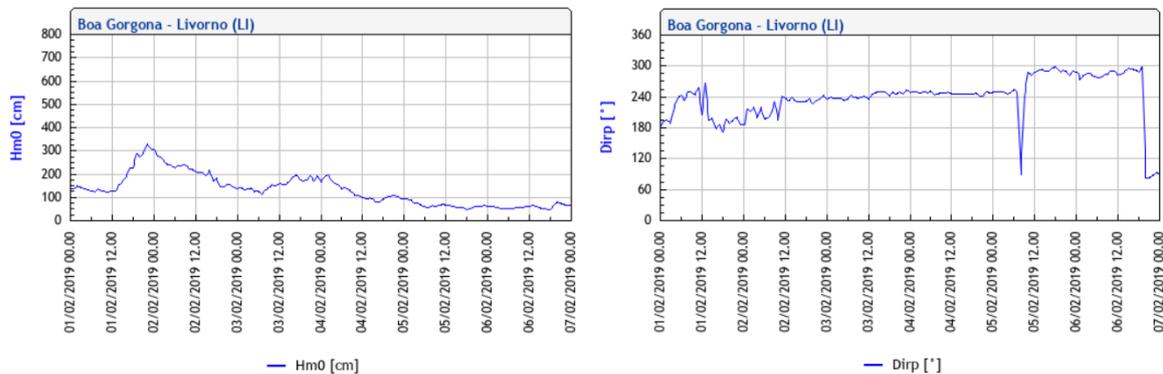


Figura 4.2 – Evento meteomarinò 1-3 febbraio 2019. Altezza d’onda significativa (a sinistra) e direzione dell’onda (a destra) misurate alla boa Gorgona (<http://www.sir.toscana.it/>)

Le immagini satellitari raccolte in questo periodo sono state acquisite dai satelliti Sentinel-2, facenti parte della missione sviluppata dall’ESA nell’ambito del programma Copernicus, con l’obiettivo di monitorare le aree verdi del pianeta e fornire supporto nella gestione dei disastri naturali. I due satelliti che compongono la missione sono stati lanciati a giugno 2015 e a marzo 2017, e da allora forniscono immagini con risoluzione massima al suolo di 10 m, sorvolando circa ogni 5 giorni lo stesso punto della superficie terrestre. I dati rilevati sono liberamente consultabili nel portale <https://scihub.copernicus.eu/>.

Le foto satellitari disponibili sono quelle del 3 e del 6 febbraio 2019 (Figura 4.3), giornate in cui il litorale era interessato da una debole mareggiata di Libeccio ( $H_s = 1.3$  m il giorno 3,  $H_s = 0.6$  m il giorno 6). In esse sono chiaramente riconoscibili le foci del Fiume Arno a Nord e del canale Scolmatore a Sud; entrambe generano un plume di torbida, ma di diversa dimensione in ragione delle rispettive portate (per l’Arno a Pontedera la portata media giornaliera era di circa  $1100$  m<sup>3</sup>/s il 3 febbraio e di circa  $160$  m<sup>3</sup>/s il 6 febbraio). Le immagini riportate mostrano la traiettoria del plume di torbida proveniente dallo Scolmatore, che il giorno 3 si avvicina alle aree dove è presente la *Posidonia Oceanica* per poi deviare verso Nord nel suo diffondersi verso il largo. L’immagine successiva del 6 febbraio, sulla coda dell’evento, mostra come la torbidità più intensa sia ormai circoscritta alle immediate vicinanze della foce, mentre in mare aperto il plume si è diffuso e non mostra più una netta frontiera di separazione tra acque fluviali e marine.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

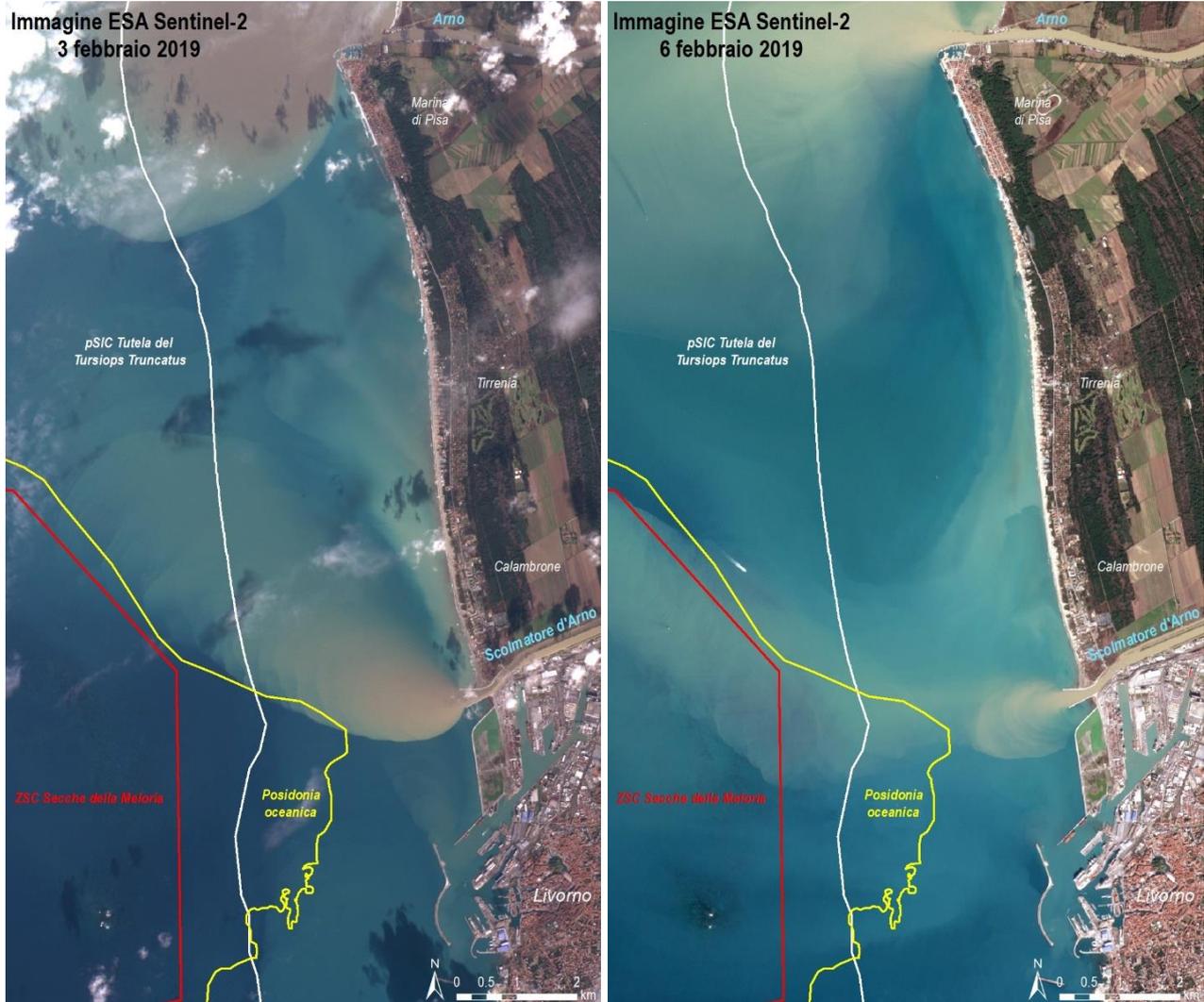


Figura 4.3 – Immagini satellitari ESA Sentinel-2 raccolte il 3 febbraio (a sinistra) e il 6 febbraio 2019 (a destra). La risoluzione al suolo è di 10 m e sono stati evidenziati i siti Rete Natura 2000 e l'areale della Posidonia

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

## 4.1 Condizioni al contorno

### 4.1.1 Valutazioni sulla portata dello Scolmatore alla foce

Come si è detto in precedenza, il canale Scolmatore deriva le acque del Fiume Arno attraverso un sistema di paratoie a ventola, che si abbattano automaticamente al raggiungimento di un livello prefissato (16 m s.m.m). Il sistema di paratoie può essere anche azionato manualmente, come di fatto è sempre avvenuto dalla sua messa in funzione.

In base alle informazioni riportate nella Relazione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGR) a cura dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, l'attivazione dello scolmatore avviene automaticamente quando le portate in Arno superano all'incirca i 1800 m<sup>3</sup>/s [6].

Nella stessa Relazione sono riportate alcune valutazioni effettuate per redigere le mappe di pericolosità idraulica relative alle alluvioni frequenti (elevata probabilità di accadimento - tempo di ritorno fino a 30 anni), alle alluvioni poco frequenti (media probabilità di accadimento - tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni) e alle alluvioni rare (bassa probabilità di accadimento - tempo di ritorno superiore a 200 anni). In particolare, in Tabella 4.1 sono riportati, per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni, i valori delle portate massime calcolate sull'Arno a monte e a valle dell'incile dello Scolmatore e, per differenza, le portate derivate nello Scolmatore stesso.

Tr (anni)	Arno monte (m <sup>3</sup> /s)	Arno Valle (m <sup>3</sup> /s)	Scolmatore (m <sup>3</sup> /s)	% derivata
30	3329	2300	1029	31%
200	3684	2497	1187	32%

Tabella 4.1 – Stima delle portate massime nell'Arno a monte e a valle dell'incile dello Scolmatore e della portata massima derivata dallo Scolmatore stesso per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni. (PGR, 2016,[6])

Per queste ultime, si tratta peraltro di valori superiori all'attuale capacità di portata dello Scolmatore, stimata intorno ai 700 m<sup>3</sup>/s, considerato anche che nel Canale, oltre alla portata scolmata dal fiume Arno, confluisce il contributo di numerosi corsi d'acqua facenti parte del reticolo della bonifica e di alcune aste fluviali minori. Nel corso delle piene più gravose, i fenomeni di allagamento risultano infatti assai diffusi nelle aree contermini al canale, e sono legati anche a fenomeni di rigurgito del reticolo ad esso afferente.

Per questa ragione sullo Scolmatore sono attualmente in corso opere di adeguamento, con un primo obiettivo di aumentare la sua capacità di deflusso a 1000 m<sup>3</sup>/s. Il primo ed il secondo lotto di tali opere risultano finanziati e in corso di attuazione, mentre il terzo lotto di completamento è inserito nel Piano Nazionale contro il dissesto Idrogeologico - Piano stralcio Aree Metropolitane sezione programmatica [6]). In particolare, sono stati recentemente completati (nel 2018) gli interventi per il ripristino della funzionalità idraulica del canale Scolmatore dallo sbocco a mare all'attraversamento della Strada Statale "Aurelia", che hanno comportato la realizzazione dei pennelli di armamento della foce e la ricalibratura del tratto terminale del Canale.

Tali interventi, oltre alle finalità della difesa idraulica, sono coerenti con gli obiettivi di sviluppare tale asta fluviale come asse di collegamento navigabile tra il porto di Livorno e l'entroterra. La sistemazione dello sbocco a mare del Canale è stata inoltre progettata tenendo conto del pianificato sviluppo portuale alla foce ed in particolare del fatto che una foce armata può ridurre il trasporto solido che oggi, tramite il Canale dei Navicelli, va a sedimentare nelle darsene portuali.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

In base a quanto riportato nella Relazione Tecnico Illustrativa allegata al “Progetto di adeguamento idraulico del Canale Scolmatore d’Arno” [7], negli anni passati lo Scolmatore è stato utilizzato durante le piene in maniera sporadica e con portata massima di circa 900 m<sup>3</sup>/sec, ben inferiore a quella di progetto pari a 1.400 m<sup>3</sup>/sec (Tabella 4.2).

<i>Data</i>	<i>Portata max scolmata mc/sec</i>
13 dicembre 1981	100 – con 2 paratoie parzialmente aperte
19 dicembre 1981	180 – con 2 paratoie parzialmente aperte
29-30 dicembre 1981	370 – con 2 paratoie parzialmente aperte
13-15 novembre 1982	210 – con 2 paratoie parzialmente aperte
16 novembre 1991	680 – con 4 paratoie parzialmente aperte
20-22 ottobre 1992	790 – con 4 paratoie parzialmente aperte
30-31 ottobre 1992	880 – con 4 paratoie parzialmente aperte
5-6 dicembre 1992	250 – con 2 paratoie parzialmente aperte
8-9 dicembre 1992	330 – con 3 paratoie parzialmente aperte
8-9 ottobre 1993	520 – con 4 paratoie parzialmente aperte
21-22 novembre 2000	200 – con 2 paratoie parzialmente aperte
27-28 novembre 2005	460 – con 4 paratoie aperte

Tabella 4.2 – Portata massima derivata dallo Scolmatore per gli eventi del periodo 1981-2005.  
(Progetto di Adeguamento Idraulico del Canale Scolmatore d’Arno, 2011, [7])

Con riferimento ai valori riportati in tabella, nel presente studio si è stabilito di effettuare le simulazioni considerando il valore medio delle portate indicate in Tabella 4.2, pari a **414** m<sup>3</sup>/s, che è stato considerato rappresentativo della portata che mediamente può essere scaricata in mare nei casi in cui lo sfioratore entra in funzione.

Alcune simulazioni di verifica sono state effettuate anche considerando la portata massima prevedibile al completamento degli interventi in corso di realizzazione e che, come si è detto, è pari a **1000** m<sup>3</sup>/s.

Il valore di 1000 m<sup>3</sup>/s è peraltro in accordo con le valutazioni effettuate nell’ambito della redazione del Progetto di adeguamento idraulico del Canale Scolmatore d’Arno [7].

Nel Progetto suddetto, in particolare, è stata effettuata una ricostruzione dell’evento di piena del 30 ottobre 1992, al quale è attribuito un tempo di ritorno di 50 anni. Per tale evento, la portata massima dello Scolmatore all’incile è stata valutata in circa 730 m<sup>3</sup>/s, la durata dello sfioro è stata di circa 27 ore, e il volume derivato è stato di circa 50\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Va poi tenuto presente che, a valle dello sfioratore, si immettono vari corsi d’acqua minori (Usciana, Zannone, Orcina, Isola, Tora), e vi sono da considerare anche i contributi relativi ad impianti idrovori, tra i quali ad esempio quello a servizio dell’area dell’Interporto Amerigo Vespucci e della piana di Guasticce. Se si sommassero tutti i vari apporti si otterrebbe un incremento di portata di circa 400 m<sup>3</sup>/sec, che tuttavia è da considerarsi eccessivo per la bassa probabilità che si verifichi la contemporaneità delle piene dello Scolmatore e di tutti i suoi affluenti. Per tale ragione si è ritenuto ragionevole adottare come scenario di massimo impatto quello che si ottiene assumendo una portata alla foce avente valore massimo di 1000 m<sup>3</sup>/s e un andamento nel tempo che fosse simile a quello verificatosi nel corso dell’evento dell’ottobre 1992.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

In Figura 4.4 sono rappresentate le portate considerate nel Progetto [7] per le verifiche idrauliche dello Scolmatore e anche, con i colori grigio e azzurro, gli idrogrammi di portata adottati nel presente studio, sia per l'evento massimo ( $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) che per l'evento "medio" ( $Q=414 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Si fa osservare che per l'evento "medio" è stato adottato un andamento temporale analogo a quello dell'evento "massimo".

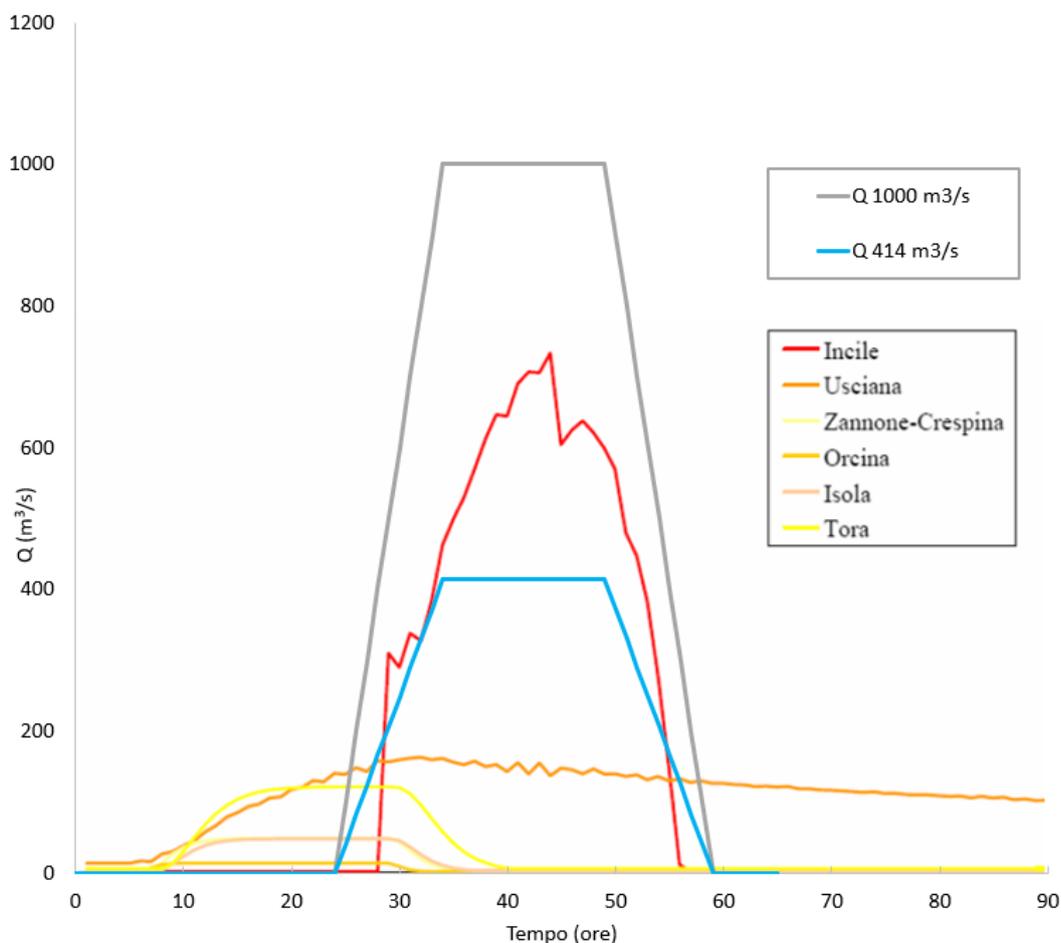


Figura 4.4 – Portate fluenti nello Scolmatore per l'evento con  $Tr=50$  anni [7] e, in grigio e azzurro, portate massima ( $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e media ( $Q=414 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ipotizzate nel presente studio

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto Definitivo	IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx

#### 4.1.2 Valutazioni sul trasporto solido

Per simulare l'interferenza tra le opere portuali e il trasporto solido indotto dalle piene dello Scolmatore sarebbe necessario disporre di dati sulle portate solide e sulla concentrazione e granulometria dei sedimenti trasportati in sospensione dalle piene dello Scolmatore stesso. Purtroppo questi dati attualmente non sono disponibili, per cui le valutazioni effettuate si riferiscono necessariamente a stime di prima approssimazione.

Per i fiumi della Regione Toscana, ed in particolare per il F. Arno, esistono in realtà molti dati significativi sul trasporto solido, quali quelli riportati nello "Studio del monitoraggio del trasporto solido nei corsi d'acqua della Toscana", svolto a cura del prof. Enio Paris dell'Università di Firenze [8]. Tuttavia i dati in questione si riferiscono, per il fiume Arno, ad una sezione (Rosano) posta molto a monte rispetto allo Scolmatore e non sono pertanto utilizzabili per le finalità della presente indagine.

In linea di principio, una stima delle grandezze summenzionate sarebbe possibile con l'impiego di un modello idro-morfodinamico del tratto terminale dello Scolmatore, in grado di valutare, note le caratteristiche del materiale d'alveo, la concentrazione dei sedimenti messi in sospensione dalla corrente nel tratto di foce.

Tuttavia, dato che, come si è detto in precedenza, l'obiettivo della presente indagine è quello di valutare le variazioni indotte sulla diffusione del "plume" dei sedimenti in sospensione (SSC) dalla presenza delle opere in progetto, si è ritenuto che anche tale valutazione sarebbe stata poco significativa. Infatti, sia le misure di trasporto solido che i modelli idro-morfodinamici rappresentano generalmente la dinamica della componente più grossolana del trasporto solido in sospensione, ossia della parte compresa, dal punto di vista granulometrico, nell'ambito delle sabbie o dei limi sabbiosi. Questa componente è caratterizzata da una velocità di caduta piuttosto elevata e non viene trasportata a grandi distanze dalla foce.

Invece il "plume" di sedimenti che si espande durante le piene fluviali, prevalentemente negli strati superficiali, è costituito solo dalla parte più fine del trasporto solido in sospensione, la quale ha una velocità di caduta trascurabile e la cui diffusione è sostanzialmente la medesima del getto delle acque dolci fluviali che si espande nel mare. Ciò è confermato, ad esempio, da dati raccolti alla foce del F. Isonzo durante le piene fluviali [9] (e già utilizzati dagli scriventi per altre indagini modellistiche [10]), che evidenziano la correlazione (inversa) esistente tra la concentrazione dei sedimenti in sospensione nel braccio di mare antistante alla foce (che nel caso del F. Isonzo hanno un diametro medio dell'ordine di 10  $\mu\text{m}$ ) e la salinità dell'acqua.

Per tale ragione, al fine di valutare gli effetti delle opere in progetto in relazione all'estensione degli specchi d'acqua interessati dal "plume" dello Scolmatore, si è ritenuto più significativo condurre delle simulazioni di carattere qualitativo, che mostrassero la dinamica della componente più fine del trasporto solido. In analogia con le suddette valutazioni sul F. Isonzo, le simulazioni sono state perciò effettuate considerando la diffusione di sedimenti in sospensione aventi diametro medio di 10  $\mu\text{m}$  e quindi caratterizzati da velocità di caduta ridottissima (0.1 mm/s, si veda il par. 4.2).

Per quanto riguarda la concentrazione dei solidi sospesi nelle portate fluviali in arrivo alla foce dello Scolmatore, le simulazioni sono state effettuate assumendo un valore costante di 500 mg/l che, essendo riferito alla sola componente fine, è estremamente elevato e può essere considerato rappresentativo della torbidità tipica delle situazioni di piena.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

#### 4.1.3 Valutazioni sulle correnti litoranee

Per valutare l'assetto generale della circolazione delle correnti costiere nel braccio di mare antistante il porto di Livorno è possibile riferirsi ai modelli oceanografici attualmente operativi sul Mar Tirreno. Tra questi, è disponibile il Modello oceanografico ad alta risoluzione (griglia 2 km) predisposto dal consorzio LaMMA, tra Regione Toscana e CNR, che fornisce la previsione in tempo reale delle correnti (Figura 4.5); il modello è basato sul codice di calcolo ROMS (Regional Ocean Modeling System).

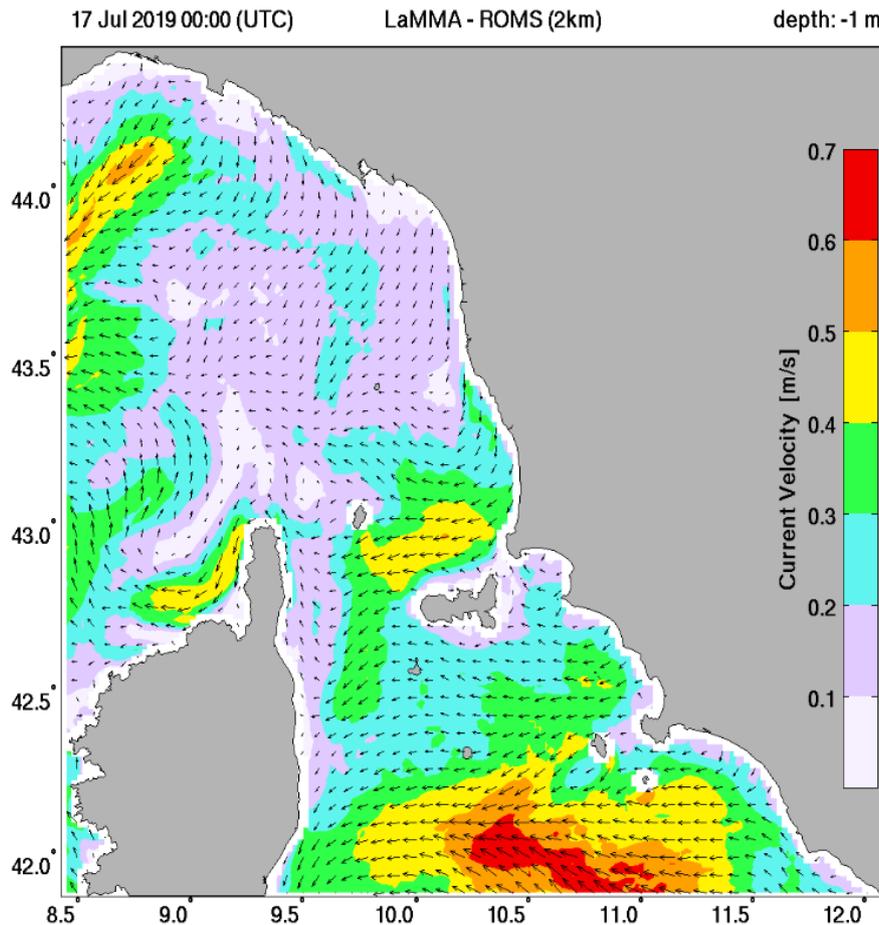


Figura 4.5 – Esempio di mappa delle correnti superficiali nell'alto Tirreno prodotta dal modello del consorzio LaMMA (<http://www.lamma.rete.toscana.it/mare/modelli/correnti>)

Oltre ai dati in tempo reale forniti dal modello ROMS, è oggi possibile disporre gratuitamente dei dati forniti dal servizio europeo E.U. Copernicus Marine Service (CMEMS), accessibili al link: <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>. Tra questi, è disponibile un servizio di previsione delle correnti in tutto il Mediterraneo (Mediterranean Forecasting System, Med-Currents), fornito da un modello accoppiato onde-correnti. La risoluzione orizzontale del modello è di  $1/24^\circ$  (ca. 4 km), mentre la discretizzazione verticale è composta di 141 livelli.

Il modulo idrodinamico del sistema è costituito dal "Nucleous for European Modelling of the Ocean" (NEMO v3.6) mentre il moto ondoso è fornito dal modello Wave Watch-III. I risultati modellistici sono corretti da una procedura di "data assimilation" (3DVAR) basata su profili di temperatura e salinità e osservazioni satellitari. Per questo modello sono disponibili output a scansione oraria a partire dal 1/1/2017, scaricabili in formato NETCDF.

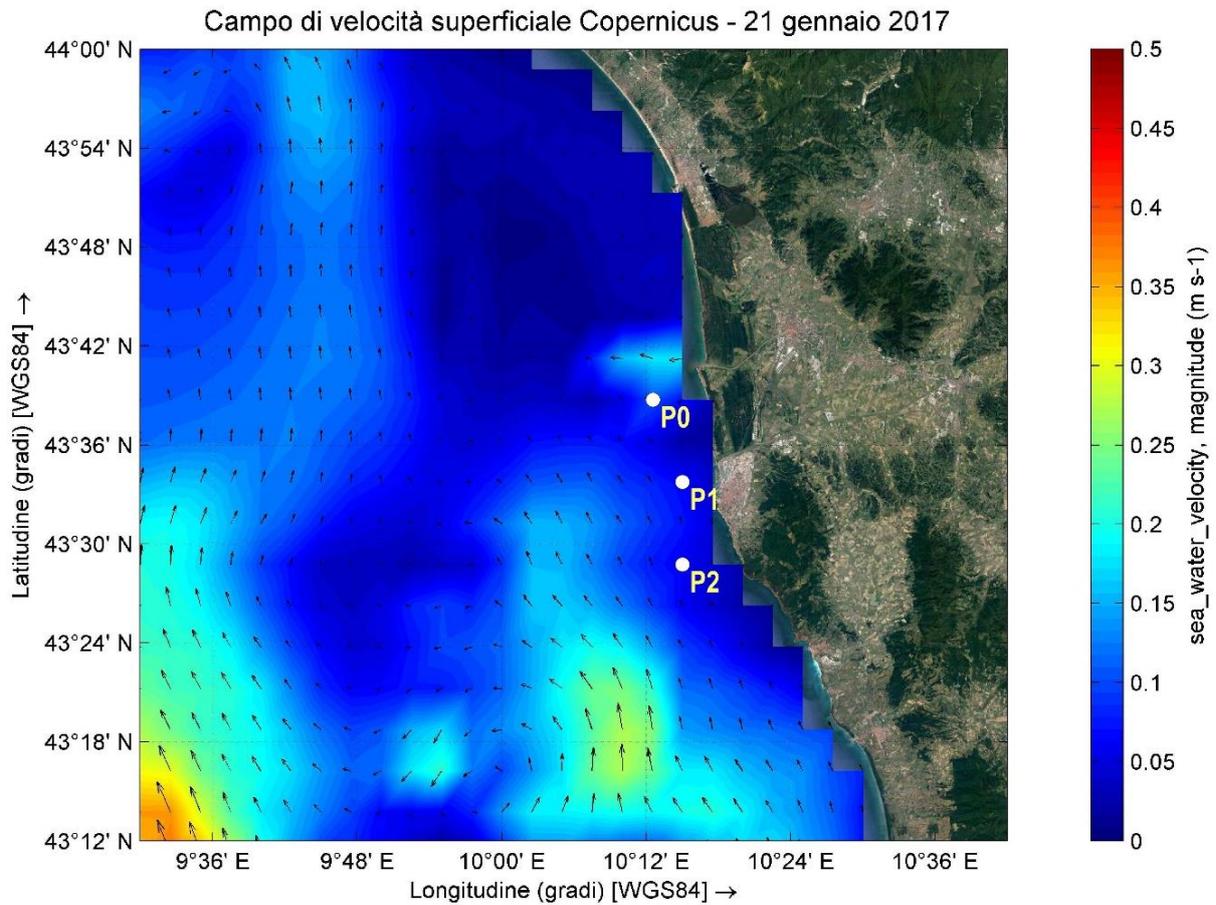


Figura 4.6 – Esempio di mappa delle correnti superficiali nell’alto Tirreno fornita dal servizio CMEMS Copernicus

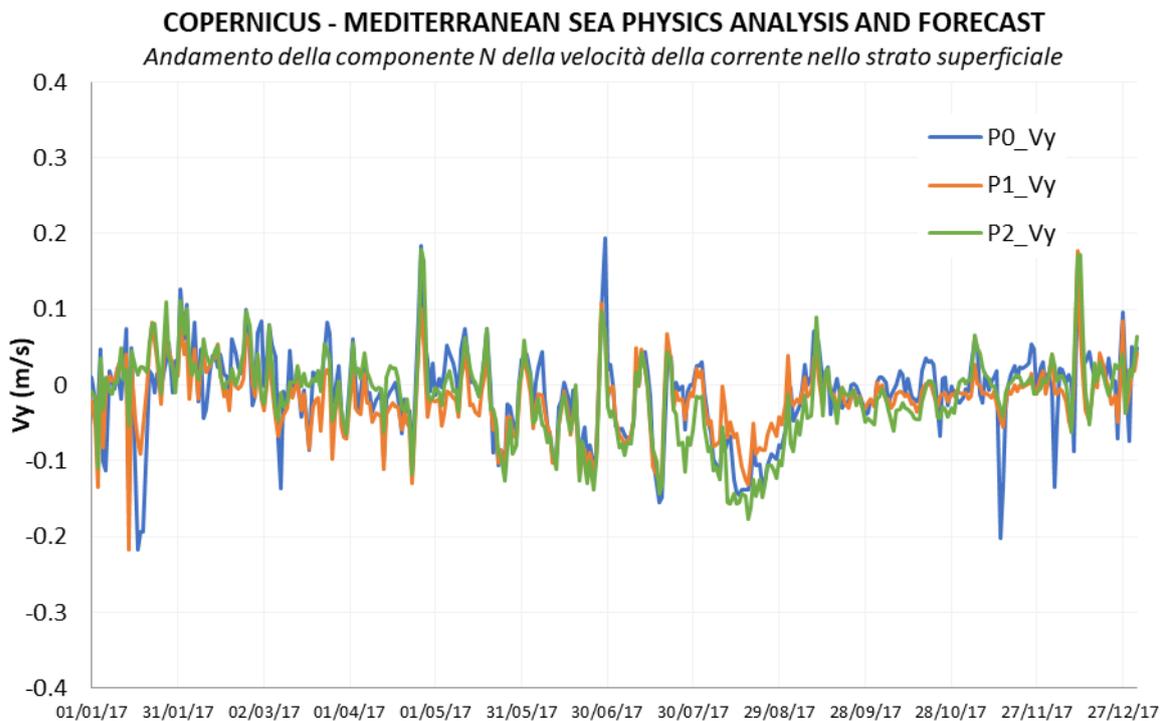


Figura 4.7 – Andamento della componente Nord della velocità superficiale fornita dal servizio CMEMS Copernicus

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

Nel caso in esame, non è stato possibile reperire serie storiche di dati del modello ROMS utili a caratterizzare la circolazione nel braccio di mare antistante la foce di Livorno. È stato possibile invece reperire i dati del servizio CMEMS Copernicus a scansione giornaliera per tutto l'anno 2017.

Nel grafico di Figura 4.7 è riportato l'andamento della componente Nord della velocità della corrente (sostanzialmente diretta parallelamente alla costa) calcolato in 3 punti davanti all'area di interesse (i punti sono rappresentati in Figura 4.6). Come si può osservare, la velocità della corrente oscilla tra valori massimi di quasi +0.2 m/s (verso Nord) e valori minimi di -0.2 m/s (verso Sud).

Le oscillazioni della velocità sono praticamente le medesime per tutti e 3 i punti considerati, e sono distribuite nel tempo secondo una sequenza irregolare, che dipende evidentemente dall'intermittente azione dei venti e delle mareggiate.

È di interesse osservare che, operando la media dei dati suddetti, non è individuabile una direzione prevalente delle correnti costiere. Una debole tendenza è identificabile solo alla scala stagionale, e vede una modesta prevalenza delle correnti dirette verso Nord nei mesi invernali e delle correnti con direzione meridionale nei mesi estivi.

Ai fini della presente indagine, non sembra pertanto significativo considerare, tra le forzanti, il campo di circolazione "medio" nel braccio di mare antistante l'area portuale. Le simulazioni sono state perciò effettuate considerando:

- a) la situazione "di calma" in cui le correnti sono assenti;
- b) la situazione in cui le correnti sono forzate dall'azione delle mareggiate.

## 4.2 Valori dei parametri utilizzati nel modello

Il presente paragrafo descrive le impostazioni utilizzate nel modello Delft3D per le simulazioni descritte in questo capitolo. La Configurazione del modello è simile a quella descritta nel § 3.4 per i moduli FLOW, MOR, SED e WAVE, con le modifiche di seguito riportate:

- la durata delle simulazioni è estesa a 36 ore, con time step di calcolo pari a 0.15 (9 s) e 0.2 minuti (12 s) rispettivamente per il caso di calma e con mareggiata;
- i processi attivati sono: trasporto di sedimenti e moto ondoso accoppiato all'idrodinamica (online Delft3D-Wave), senza vento;
- per i parametri fisici riguardanti la viscosità, di norma oggetto di calibrazione, sono stati usati i seguenti valori: il parametro "eddy viscosity" orizzontale è pari a  $1 \text{ m}^2/\text{s}$  (come in altri studi simili come tipologia [13] [14] [15] e prossimità geografica [16]), mentre la "eddy diffusivity" orizzontale è stata abbassata a  $1 \text{ m}^2/\text{s}$  (come suggerito dal manuale di Delft3D-FLOW [11] per griglie ad alta risoluzione e negli stessi studi sopra citati nel caso di dispersione di un plume);
- i sedimenti sono di tipo coesivo e sono implementati attraverso la velocità di caduta caratteristica del diametro medio di  $10 \text{ }\mu\text{m}$ , calcolata mediante la formula di Stokes e assunta pari a  $0.09 \text{ mm/s}$  in acqua salata;
- è stata esclusa la possibilità di flocculazione;
- la densità dei sedimenti è di  $2650 \text{ kg/m}^3$ ;
- il fondo è inerodibile;
- l'immissione di portata dallo Scolmatore è stata simulata mediante 5 punti di immissione di tipo Normal, con relativo idrogramma analogo a quello rappresentato in Figura 4.4.

Per il modulo WAVE di Delft3D sono stati utilizzati gli stessi parametri già descritti nel § 3.4.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

### 4.3 Scenari analizzati

Anche in questo caso sono stati analizzati lo stato di fatto e la configurazione di progetto dell'infrastruttura.

Per la portata proveniente dallo Scolmatore è stato ipotizzato e simulato uno scenario "medio" (414 m<sup>3</sup>/s) e uno scenario "raro" (1000 m<sup>3</sup>/s). La concentrazione dei sedimenti in sospensione nelle acque dello Scolmatore è stata posta pari a 500 mg/l.

Per lo stato del mare sono stati presi in considerazione sia uno scenario di calma che i tre scenari con le mareggiate già analizzate nel capitolo precedente, Ponente, Mezzogiorno e Maestrale, rispettivamente con direzione di provenienza 250°N, 170°N e 290°N e durata 1 giorno/anno (Tabella 3.3).

Le simulazioni sono state effettuate nell'ipotesi di fondo fisso, assumendo per i sedimenti provenienti dallo Scolmatore un diametro uniforme pari a 10 µm, rappresentativo della parte più fine dei sedimenti trasportati in sospensione nel plume di torbida (trattato da Delft3D come sedimento di tipo coesivo).

La Tabella 4.3 elenca le simulazioni effettuate, illustrate nei paragrafi che seguono.

Caso	Configurazione	Mareggiata	Piena Scolmatore
Scolm 1	Stato di fatto	calma	414 m <sup>3</sup> /s
Scolm 2	Progetto definitivo	calma	414 m <sup>3</sup> /s
Scolm 3	Stato di fatto	calma	1000 m <sup>3</sup> /s
Scolm 4	Progetto definitivo	calma	1000 m <sup>3</sup> /s
Scolm 5	Stato di fatto	250°N - 1 g/anno	414 m <sup>3</sup> /s
Scolm 6	Progetto definitivo	250°N - 1 g/anno	414 m <sup>3</sup> /s
Scolm 7	Stato di fatto	170°N - 1 g/anno	414 m <sup>3</sup> /s
Scolm 8	Progetto definitivo	170°N - 1 g/anno	414 m <sup>3</sup> /s
Scolm 9	Stato di fatto	290°N - 1 g/anno	414 m <sup>3</sup> /s
Scolm 10	Progetto definitivo	290°N - 1 g/anno	414 m <sup>3</sup> /s

Tabella 4.3 – Scenari analizzati nello studio dell'interferenza del progetto con le portate di piena dello Scolmatore d'Arno

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

#### 4.4 Risultati delle simulazioni

Le mappe riportate nelle figure seguenti, da Figura 4.8 a Figura 4.16, mostrano, per ciascuna delle portate ipotizzate alla foce dello Scolmatore (414 m<sup>3</sup>/s e 1000 m<sup>3</sup>/s), per gli stati di mare analizzati (calma e mareggiate con onde di durata 1 giorno/anno con provenienza da 250°N, 170°N e 290°N) e per le configurazioni considerate (Stato di fatto e configurazione di progetto) i risultati delle simulazioni, in termini di distribuzione della concentrazione di sedimenti in sospensione (kg/m<sup>3</sup>). Ogni mappa riporta i contorni delle aree sensibili dove è presente la *Posidonia Oceanica* (linea nera), della ZSC Secche della Meloria (linea rossa) e della proposta di SIC (pSIC) Tutela del *Tursiops Truncatus* (linea grigia).

Per le mappe che rappresentano la dinamica dispersiva in condizioni di mare calmo, sono stati estratti 3 diversi istanti temporali significativi per ogni configurazione. Come si è detto le portate immesse in mare dallo Scolmatore seguono l'andamento rappresentato dalle linee grigia e azzurra di Figura 4.4.

Con riferimento a tali idrogrammi, ponendo l'istante t=0 in corrispondenza dell'inizio dell'immissione di portata in mare (24 ore sull'asse dei tempi di Figura 4.4) le mappe riportate nel seguito si riferiscono ai seguenti istanti:

- t = 10 ore, al termine della fase crescente della piena (cioè della fase di sfioro);
- t = 26 ore, all'inizio della fase decrescente della piena, dopo 16 ore di portata con valore costante;
- t = 36 ore, al termine della simulazione, alla fine della fase decrescente della piena (portata nulla).

Per gli scenari in cui è stata considerata anche la mareggiata, le mappe mostrano per semplicità solo l'istante finale delle simulazioni (t=36 ore).

In Figura 4.8 è riportata la dispersione del plume per lo stato di fatto con mare calmo e portata di 414 m<sup>3</sup>/s. Nei vari istanti è possibile osservare come il getto di torbida proveniente dallo Scolmatore si estenda verso il mare fino a circa 5 km dalla foce, lambendo il bordo settentrionale dell'area occupata dalla Posidonia. La conformazione del getto è quasi simmetrica, caratterizzata dalla formazione di due vortici speculari, uno a Nord e uno a Sud della foce. La concentrazione di sedimenti presenti nel plume, inizialmente pari a 500 mg/l, si riduce via via che il plume si disperde in mare.

La configurazione di progetto è riportata in Figura 4.9. I risultati sono quasi uguali allo stato di fatto, tuttavia la presenza delle nuove opere induce il getto di foce a ridurre la sua estensione verso il largo, assumendo una traiettoria ruotata maggiormente verso Sud, aderente alle nuove opere. Ne consegue che il plume va ad interessare un minore areale di Posidonia verso il largo e, marginalmente, alcune porzioni di areale più meridionali. La presenza delle nuove opere portuali modifica quindi limitatamente la dinamica della torbida fluviale, che peraltro già allo stato attuale manifesta alcuni elementi di criticità rispetto all'impatto sulla prateria di fanerogame.

Vale comunque la pena di osservare che la portata scolmata corrisponde ad un evento con tempo di ritorno dell'ordine dei 5 anni; si tratta quindi di un evento che non può considerarsi ordinario e che impatta quindi in misura relativamente limitata sulla morfologia dei fondali. L'ipotesi di assenza di vento, onda e corrente, rende comunque questa prima analisi utile soprattutto a comprendere i caratteri generali del processo.

La deposizione di sedimenti sul fondale, conseguente agli scenari simulati per le diverse configurazioni (Figura 4.10), mostra come i trend di sedimentazione per lo stato di fatto e per il progetto siano sostanzialmente analoghi nei due casi, e come interessino per lo più le aree concentrate attorno alla foce. Per tutti gli scenari considerati si verificano coltri di deposito di minima entità.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

Lo stesso tipo di analisi è stato ripetuto per il caso, meno frequente, di un'onda di piena nello Scolmatore con valore massimo di 1000 m<sup>3</sup>/s (associabile ad un tempo di ritorno dell'ordine dei 30 anni). I risultati sono riportati in Figura 4.11 e Figura 4.12. Rispetto al caso precedente, si nota come l'estensione del plume verso il largo si incrementi fino a circa 7 km dalla foce e vada ad interessare i fondali fino a profondità dell'ordine di -10 m s.m.m.. Le concentrazioni in sospensione e la loro distribuzione risultano simili per le due configurazioni analizzate, anche se si possono evidenziare delle differenze non trascurabili. In particolare, nella configurazione di progetto, il plume risulta più compatto e la sua traiettoria è spostata più a Sud rispetto allo stato di fatto, poiché il getto uscente dalla foce del Calambrone tende a restare aderente alle nuove opere in progetto.

La deposizione di sedimenti sul fondale conseguente agli scenari simulati (Figura 4.13) mostra anche in questo caso come i trend di sedimentazione nelle due configurazioni analizzate risultino simili. Le coltri di deposito, per un tempo di ritorno dell'ordine dei 30 anni, sono leggermente più elevate e comunque dell'ordine del centimetro per l'idrogramma simulato. Ovviamente tutte queste considerazioni vanno pesate alla luce degli eventi, relativamente infrequenti (mediamente una volta ogni 2 anni), in cui si è verificata l'attivazione dello scolmatore (Tabella 4.2).

Successivamente, sono stati considerati gli scenari di piena (con la sola portata massima dello Scolmatore di 414 m<sup>3</sup>/s) in concomitanza con le mareggiate da Ponente (250°N), Mezzogiorno (170°N) e Maestrale (290°N); i risultati delle simulazioni sono riportati da Figura 4.14 a Figura 4.16. In questi scenari si è tenuto conto di onda e corrente, ottenendo risultati sostanzialmente diversi da quelli in assenza di tali forzanti.

Per la mareggiata di Ponente (Dir=250°N, Hs=4.31 m, Tp=9.4 s), le mappe di confronto tra le varie configurazioni (cfr. Figura 4.14) mettono in evidenza che il plume proveniente dallo Scolmatore non si diffonde verso il largo, ma viene schiacciato verso la costa per l'azione del moto ondoso e delle correnti ad esso associate. Il plume, in questo caso, non interessa di fatto le aree sensibili.

Il confronto tra i risultati relativi allo stato di fatto e alla configurazione di progetto evidenzia che l'intervento, in questo caso, non determina significative variazioni della distribuzione della concentrazione dei sedimenti in sospensione.

Per la mareggiata di Mezzogiorno (Dir=170°N, Hs=2.44 m, Tp=6.73 s), le mappe che confrontano le due configurazioni sono riportate in Figura 4.15. A differenza della mareggiata di Ponente, le correnti indotte dal moto ondoso in questo caso favoriscono una maggiore propagazione del plume verso il largo, in direzione ovest e nord-ovest. La propagazione del plume resta tuttavia circoscritta alla fascia di mare antistante la foce, a causa delle circolazioni locali che si instaurano per effetto combinato delle correnti indotte dal moto ondoso e dalle correnti fluviali.

Nella configurazione di progetto, la distribuzione dei sedimenti in sospensione è simile a quella relativa allo stato di fatto, anche se la presenza delle opere limita l'espansione del plume verso Sud e riduce l'espansione verso Nord lungo i litorali. In entrambi i casi, comunque, il plume dei sedimenti in sospensione non interferisce con il limite dell'areale della Posidonia.

I risultati del confronto tra le due configurazioni per la mareggiata di Maestrale (Dir=290°N, Hs=2.14 m, Tp=7.3 s) sono riportati in Figura 4.16. Essi evidenziano come nello stato di fatto il plume di sedimenti tenda ad espandersi a Sud verso il bacino portuale, ma anche come contemporaneamente si propaghi verso il largo seguendo una traiettoria che lo porta verso nord-ovest, restando comunque all'esterno del limite dell'areale della Posidonia. Nella configurazione di progetto, a causa del diverso assetto delle correnti nell'intorno della foce e delle nuove opere portuali, il plume tende ad orientarsi principalmente verso nord ovest, anche in questo caso senza raggiungere il limite dell'area in cui si trova la Posidonia.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

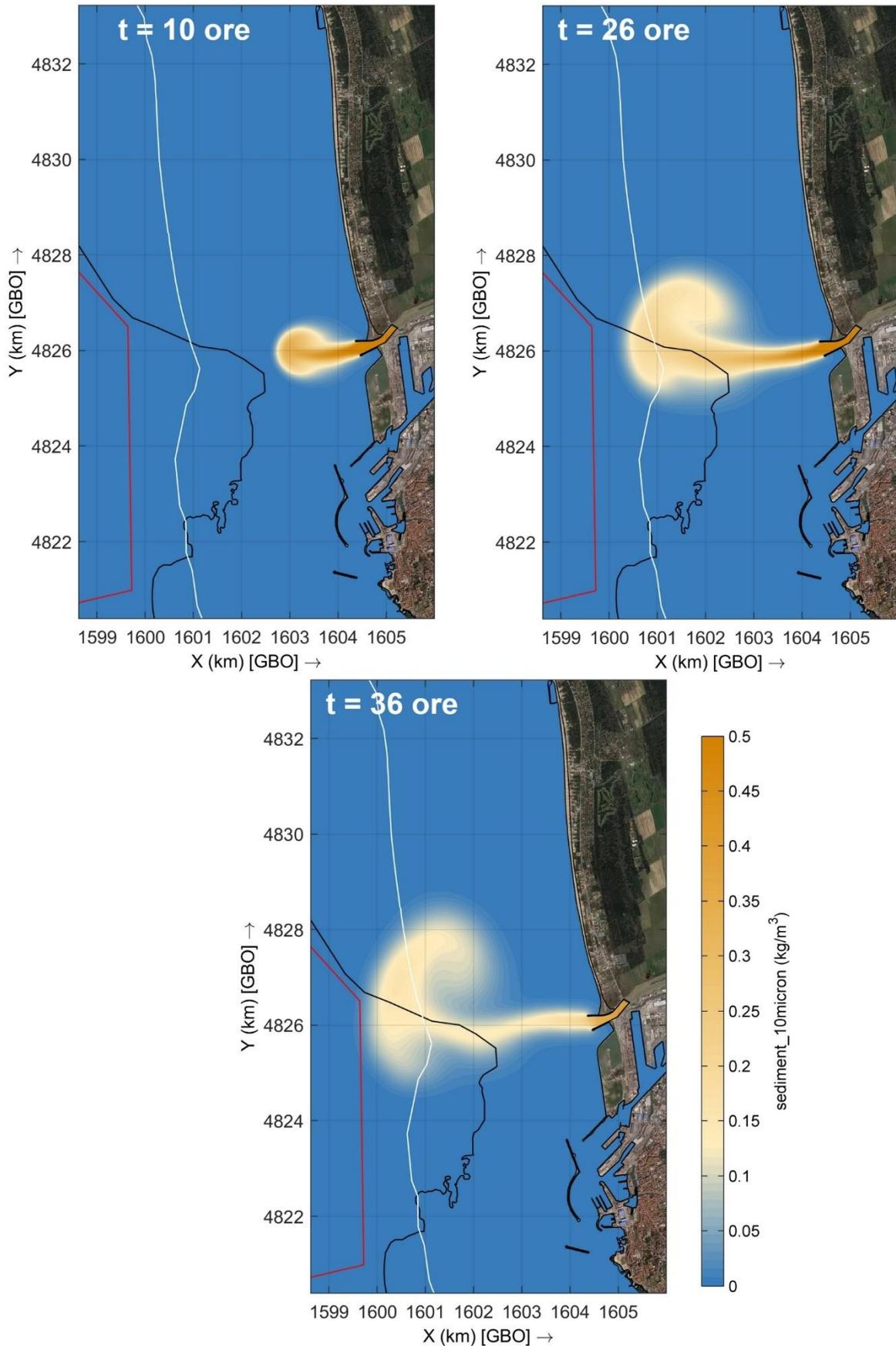


Figura 4.8 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Stato di fatto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$ )

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

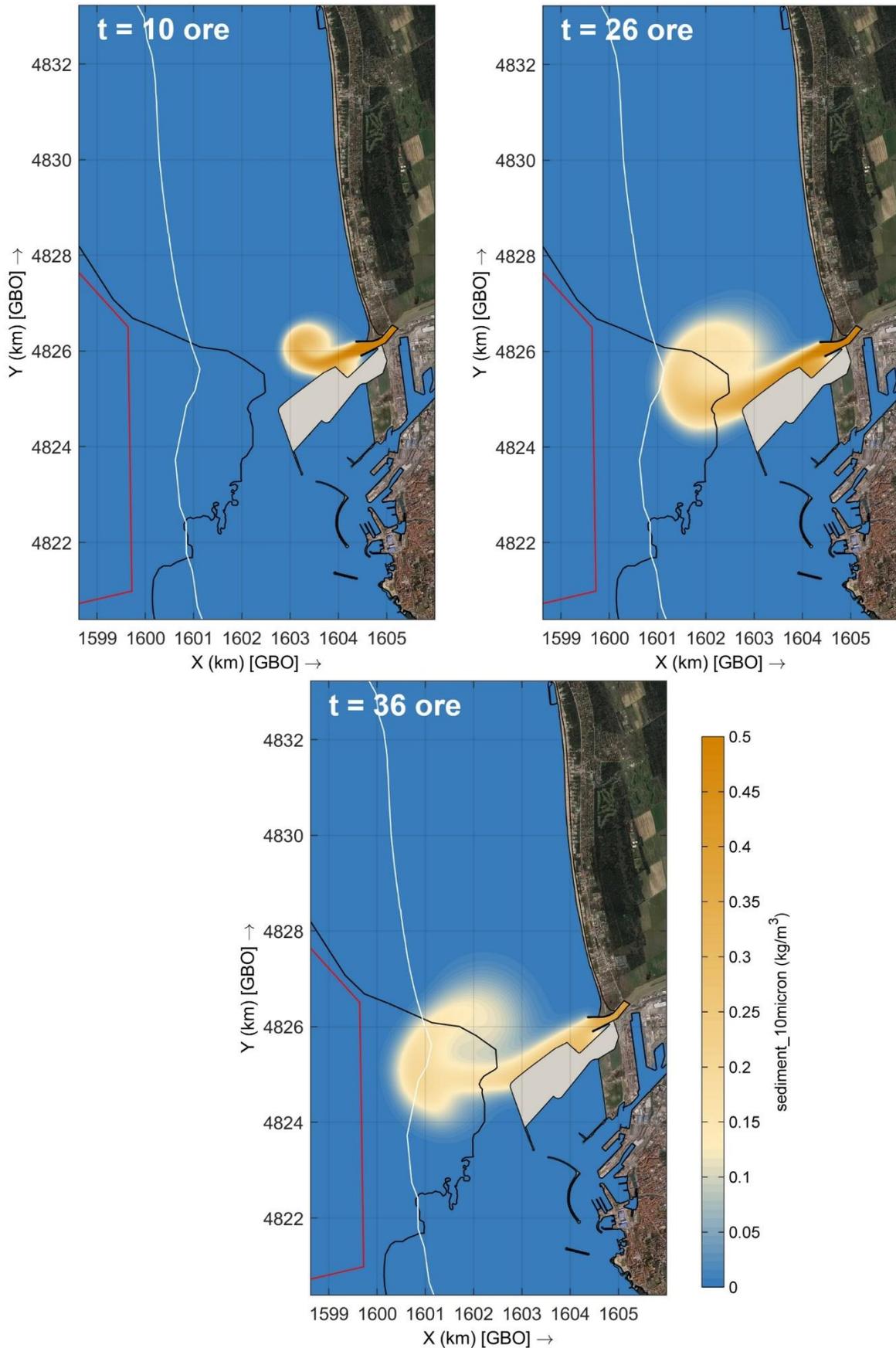


Figura 4.9 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazione di progetto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$ )

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

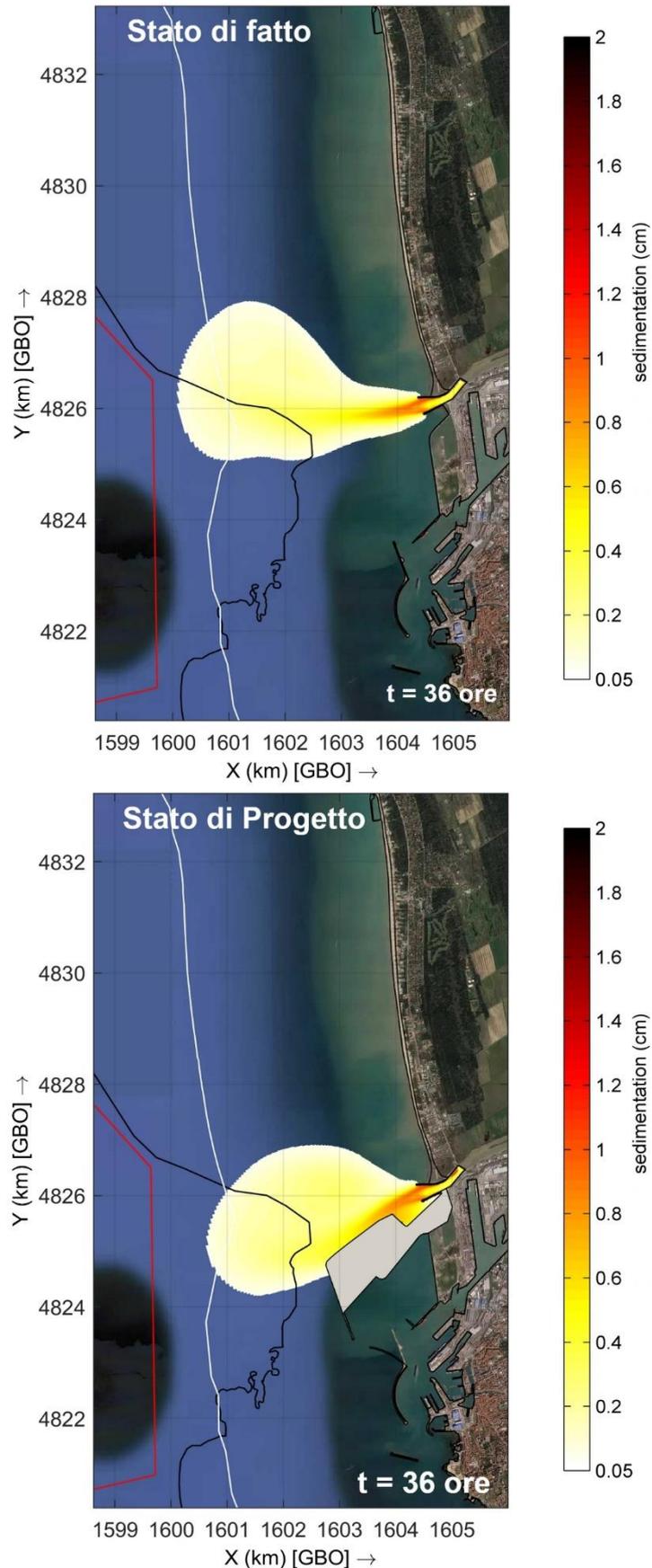


Figura 4.10 – Precipitazione dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazioni a confronto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

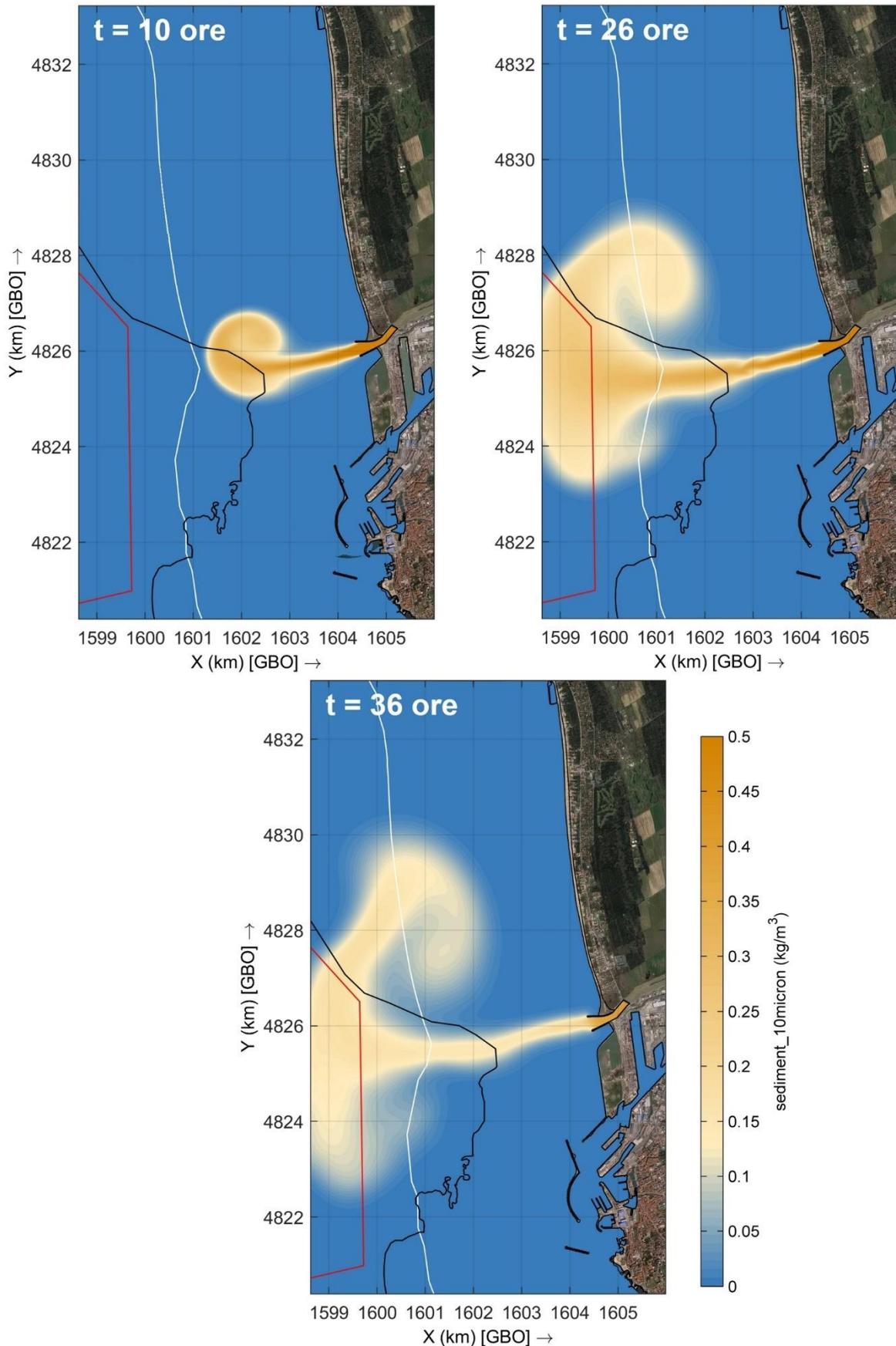


Figura 4.11 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Stato di fatto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$ )

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

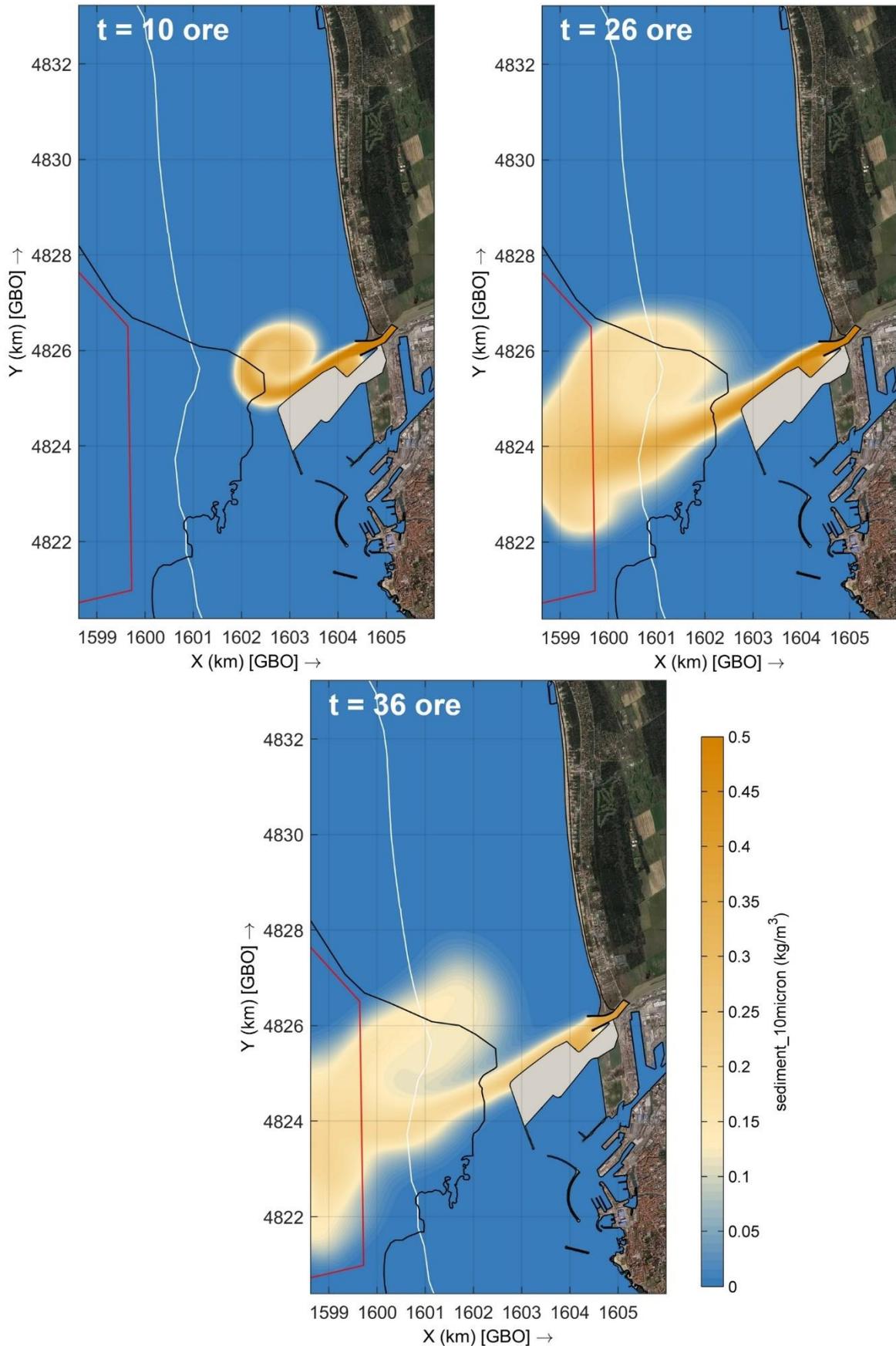


Figura 4.12 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazione di progetto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$ )

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

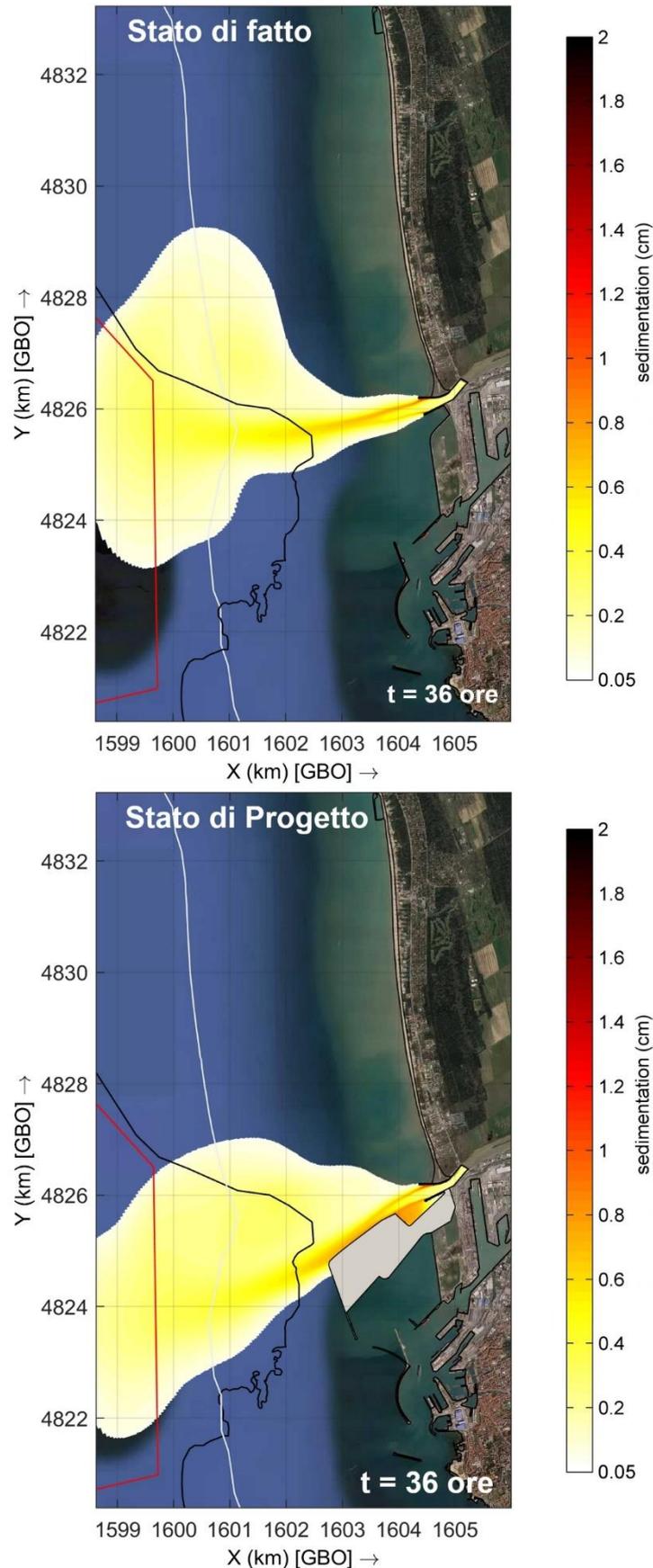


Figura 4.13 – Precipitazione dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazioni a confronto, assenza di onda e corrente litoranea,  $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$ )

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

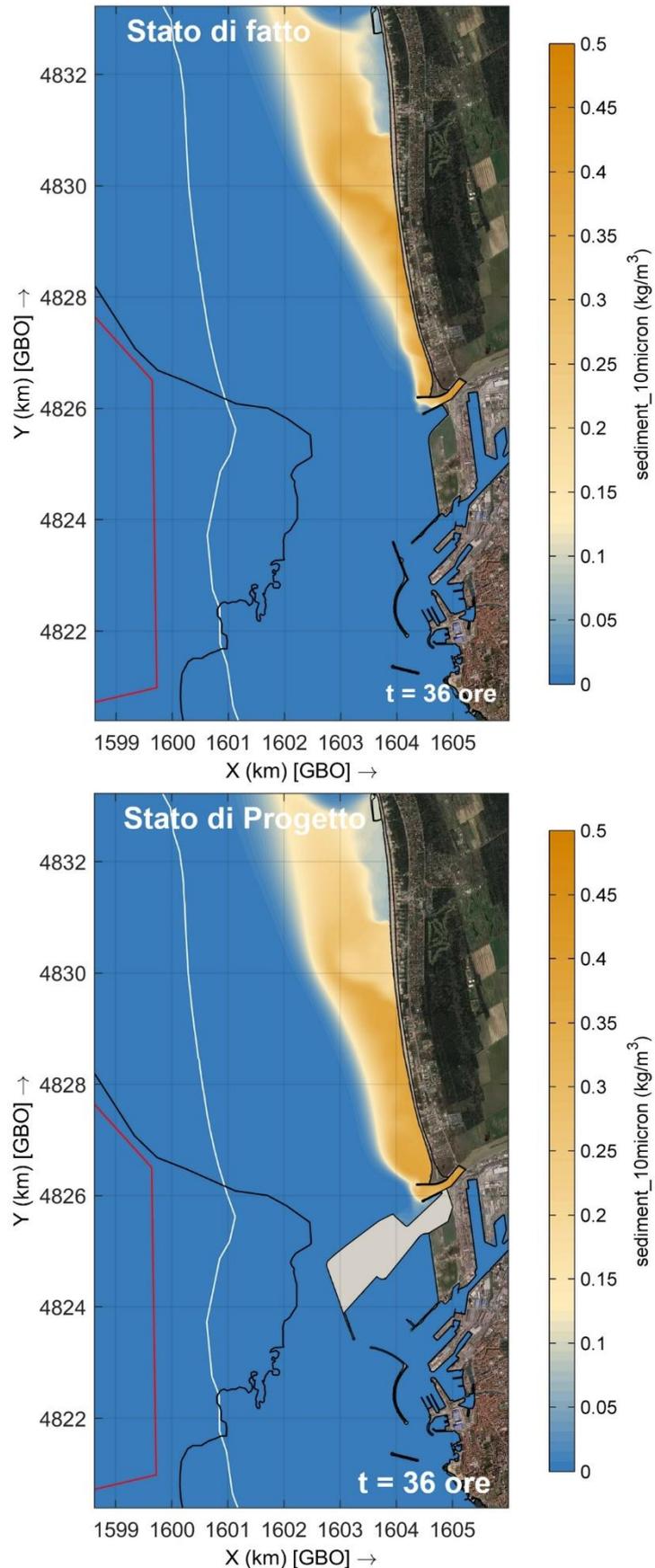


Figura 4.14 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazioni a confronto, mareggiata di Ponente,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$ )

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

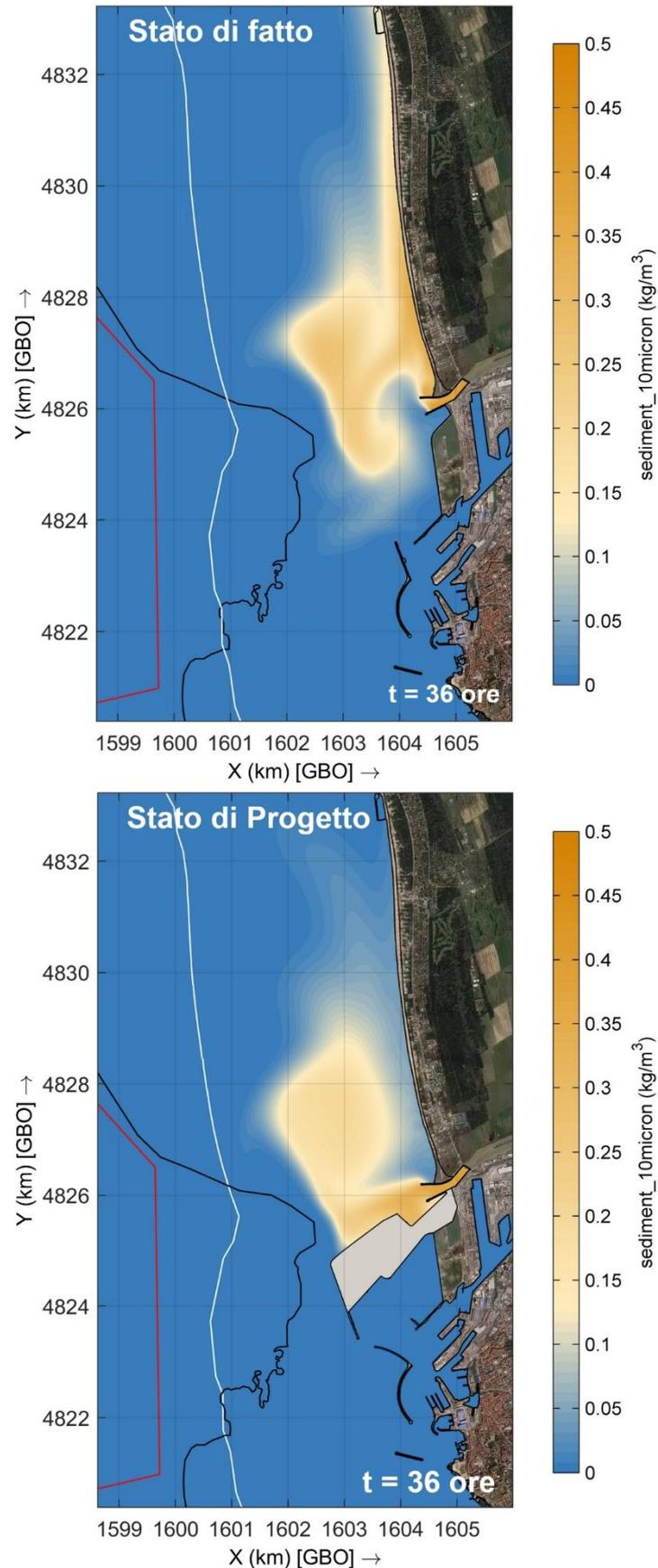


Figura 4.15 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazioni a confronto, mareggiata di Mezzogiorno,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$ )

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

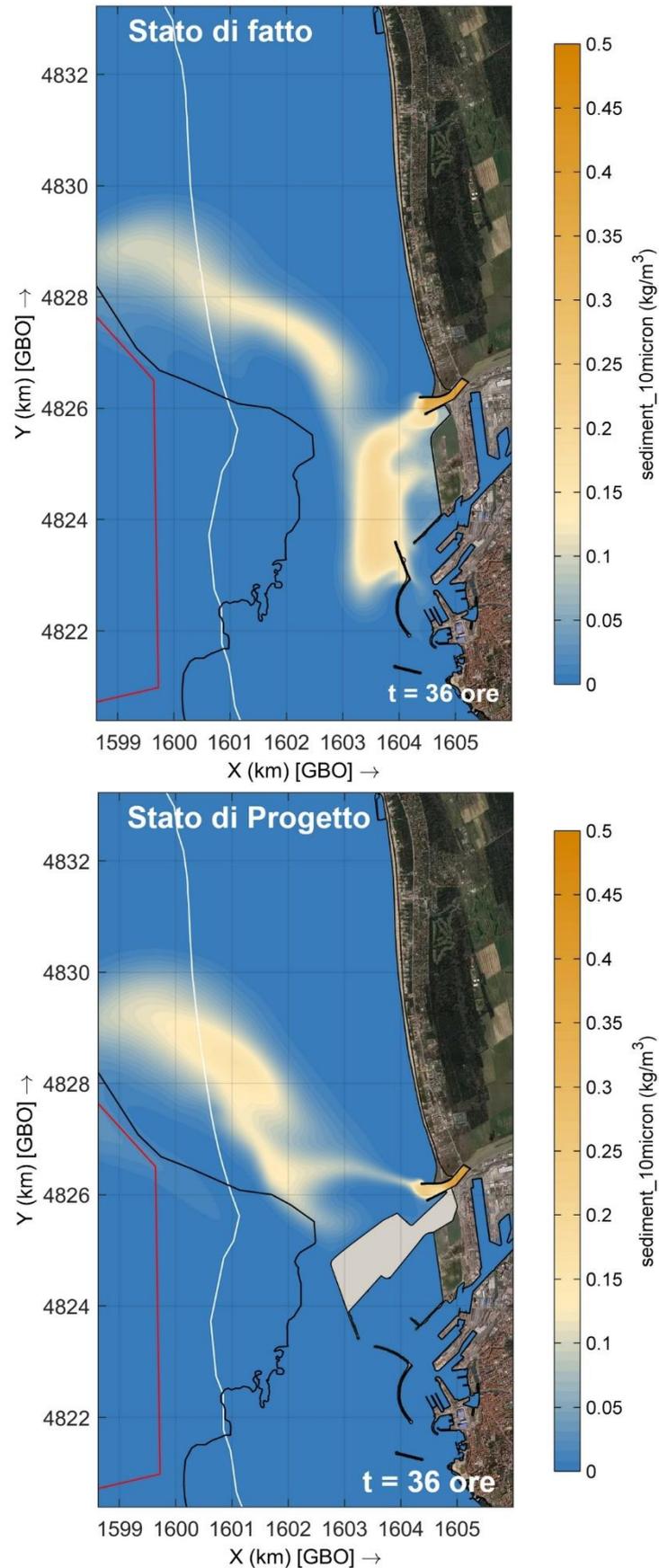


Figura 4.16 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno  
(Configurazioni a confronto, mareggiata di Maestrale,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$ )

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

## 5 VALUTAZIONE DEI FENOMENI DI INTERRIMENTO

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati dello studio dei fenomeni di interrimento prodotti dalla dinamica litoranea e le considerazioni in merito alle strategie di manutenzione degli specchi acquei navigabili.

Lo studio, in particolare, è finalizzato alla valutazione, in termini qualitativi e quantitativi, dell'interrimento del canale di accesso al porto e del nuovo bacino portuale rispetto a due potenziali forzanti: le mareggiate e le piene del Canale Scolmatore.

L'analisi dell'evoluzione del fondale per effetto della dinamica litoranea è stata condotta con riferimento ad un "anno tipo", rappresentativo delle condizioni meteomarine medie che si possono verificare nel paraggio nel corso di un anno.

Per quanto riguarda le piene del Canale Scolmatore, sono stati analizzati gli effetti degli eventi "medio" e "massimo" già definiti nel Capitolo 4 per la valutazione degli effetti delle piene in concomitanza con le mareggiate.

Lo studio è stato eseguito impiegando il software di calcolo DELFT3D nella sua configurazione completa, che include sia la componente idrodinamica che morfodinamica. In particolare, sono stati utilizzati i moduli FLOW/MOR/SED che simulano la circolazione delle correnti e il trasporto solido, e il modulo WAVE, che simula la propagazione del moto ondoso e l'azione generativa del moto ondoso sulle correnti. I parametri impiegati nel modello e le griglie di calcolo utilizzate sono quelle definite in precedenza per lo studio della dinamica litoranea e del trasporto solido (Capitolo 3) e per lo studio delle piene del Canale Scolmatore (Capitolo 4).

### 5.1 Interrimento generato dal trasporto solido indotto dalle mareggiate

#### 5.1.1 Definizione del dominio di calcolo

Le simulazioni modellistiche si basano sulla corretta schematizzazione dei fondali del litorale antistante l'area portuale di Livorno e la foce del Canale Scolmatore d'Arno. I dati utilizzati per la costruzione del modello sono riportati nel par. 3.2, mentre per l'implementazione delle opere si è fatto riferimento agli elaborati progettuali.

Il progetto prevede il dragaggio del canale di accesso alla Piattaforma Europa alla quota di -17 m s.l.m. per un'estensione pari a circa 1300 m, dall'imboccatura del porto fino a raccordarsi al largo alla batimetrica -17 m s.l.m. All'interno del porto, l'imboccatura ed il bacino interno sono alla quota di -16 m s.l.m. mentre il canale di collegamento verso il bacino S. Stefano ed il bacino stesso sono alla quota di -13 m s.l.m.

La planimetria degli interventi, così come è stata schematizzata nel modello, è riportata in Figura 5.1. Nella figura sono evidenziate le 2 aree considerate per il calcolo dell'interrimento, rappresentate dal canale esterno (area 1) e dai canali e bacini interni al porto (area 2).

I valori dei parametri utilizzati nel modello ricalcano quanto già esposto nel Capitolo 3. Si ricorda in particolare che il fondo è considerato ovunque erodibile ad eccezione delle aree ricoperte dalla Posidonia Oceanica o quelle occupate dalle opere portuali (scogliere e cassoni) mentre l'evoluzione morfologica del fondo è implementata mediante la formula di Van Rijn (1993) per sedimento non coesivo.

## Batimetria - Progetto definitivo - Particolare

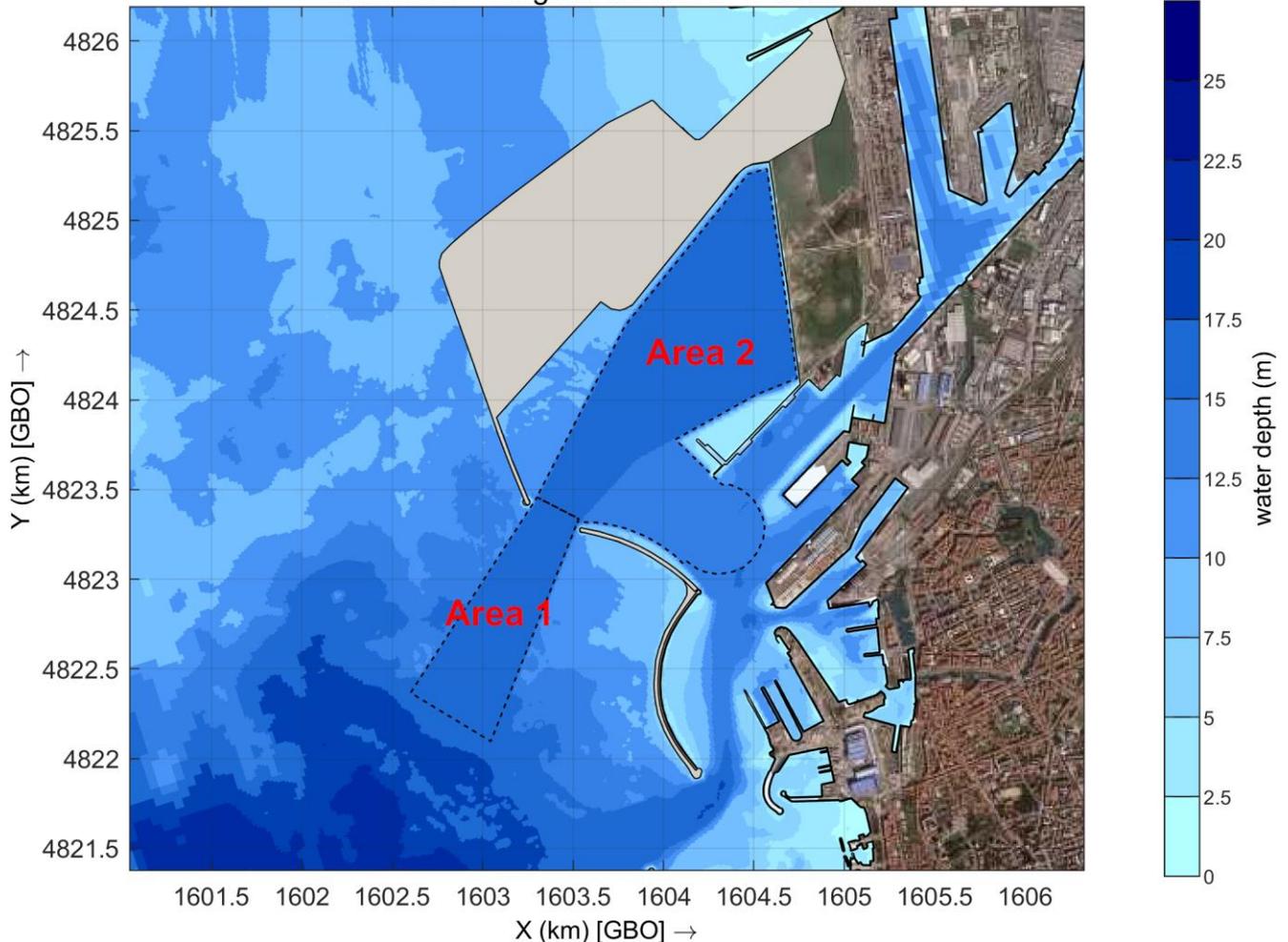


Figura 5.1 – Batimetria della configurazione di progetto rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW

### 5.1.2 Dati sedimentologici

Sono stati presi in esame, come già riportato nel par. 3.3, i dati sedimentologici raccolti nel 2005 da parte della Provincia di Pisa nell'ambito del "Programma provinciale di interventi prioritari di recupero e di riequilibrio del litorale". I dati raccolti in tale ambito consistono in una serie di circa 1300 campioni di sedimento superficiale, prelevati dai fondali antistanti il litorale nel tratto tra Livorno e la foce del Serchio.

I dati 2005 sono stati integrati per la parte più prossima al porto di Livorno con 33 campioni raccolti durante la campagna di indagine 2020 per la deperimetrazione del SIN, avvenuta nell'ambito del presente progetto. Il dataset così composto è stato elaborato con geoprocessing GIS e restituito su grid a scala di colori (risoluzione 2.5 m) del valore mediano  $D_{50}$  della granulometria dei sedimenti sul fondale (Figura 3.7).

Osservando la distribuzione dei diametri  $D_{50}$  e a seguito di alcune simulazioni preliminari, per la valutazione dei fenomeni di interrimento è stato assunto un fuso granulometrico così caratterizzato:

- $D_{10} = 0.02$  mm
- $D_{50} = 0.2$  mm
- $D_{90} = 2$  mm

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

Questa assunzione vuole tener conto sia della distribuzione del diametro medio sull'intera area di studio, rappresentata dalla classe 0.125-0.250 mm, sia del fatto che in prossimità del porto i campioni evidenziano una certa variabilità tra sedimenti più fini e più grossolani, che è stata rappresentata mediante l'utilizzo di un fuso particolarmente largo rispetto al valore mediano.

### 5.1.3 Condizioni al contorno

L'interrimento generato dal trasporto solido indotto dalle mareggiate è stato stimato con riferimento all'intervallo temporale di un anno. Nel dettaglio, è stato individuato un "anno tipo", ricavato a partire dalla serie storica (cfr. Elaborato "Relazione idraulico marittima", 1233\_PD-D-001) disponibile nel punto al largo (punto UNIGE 585, periodo 1979-2018), rappresentativo delle condizioni medie di moto ondoso caratteristiche del paraggio.

Per la definizione dell'anno tipo è stata condotta un'analisi basata sull'energia  $E$  del moto ondoso ( $E \propto H_s^2 \cdot T_P$ ): per ciascun anno è stata calcolata l'energia associata alle mareggiate, suddivise per classi di direzione di  $15^\circ$ , escludendo le mareggiate meno rilevanti per il trasporto solido nella zona di interesse (mareggiate caratterizzate da altezza d'onda significativa inferiore ai 2.5 m). A partire dall'energia totale dell'intera serie storica, dividendo per il numero di anni, è stato possibile determinare l'energia mediamente associata ad un anno di eventi meteomarinari (Figura 5.2). L'"anno tipo" è stato individuato ricercando l'anno a cui fossero associati la distribuzione direzionale il valore dell'energia più simili ai valori medi così individuati.

In Figura 5.3 si riporta il dettaglio del confronto, in termini di distribuzione direzionale dell'energia, tra i tre anni più simili all'anno medio (1992, 2012 e 2018) in termini di energia complessiva. Il confronto è stato eseguito anche in termini di energia per classe di altezza d'onda (Figura 5.4).

Dall'analisi dei grafici dell'energia è possibile ricavare che l'anno più simile all'anno medio risulta essere il 2012.

La stima degli interrimenti è stata quindi eseguita simulando l'intera serie storica di eventi di moto ondoso (mareggiate con altezza significativa maggiore di 2.5 m) registrati nel 2012, accorpati per una durata complessiva di circa 11 giorni consecutivi (Figura 5.5).

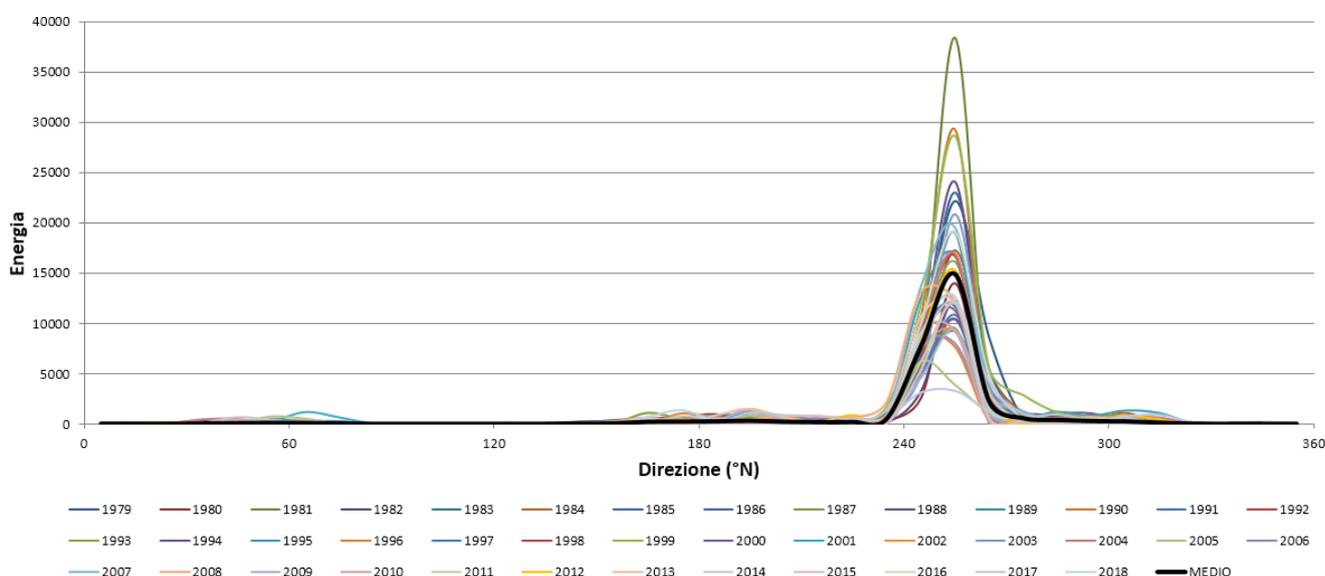


Figura 5.2 – Energia del moto ondoso per classi di direzione e per anno

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

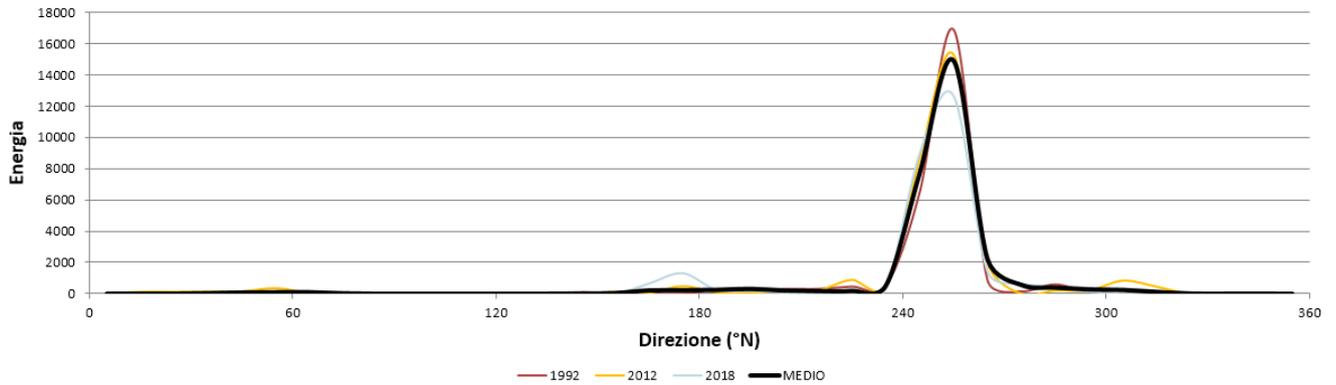


Figura 5.3 – Energia del moto ondoso per classi di direzione e per anno – Confronto 1992, 2012, 2018 e anno medio

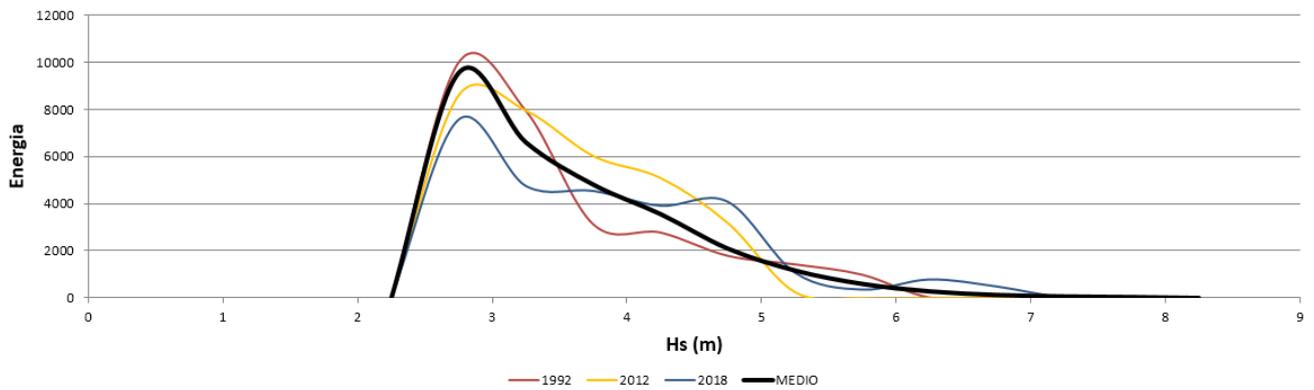


Figura 5.4 – Energia del moto ondoso per classi di altezza d'onda e per anno – Confronto 1992, 2012, 2018 e anno medio

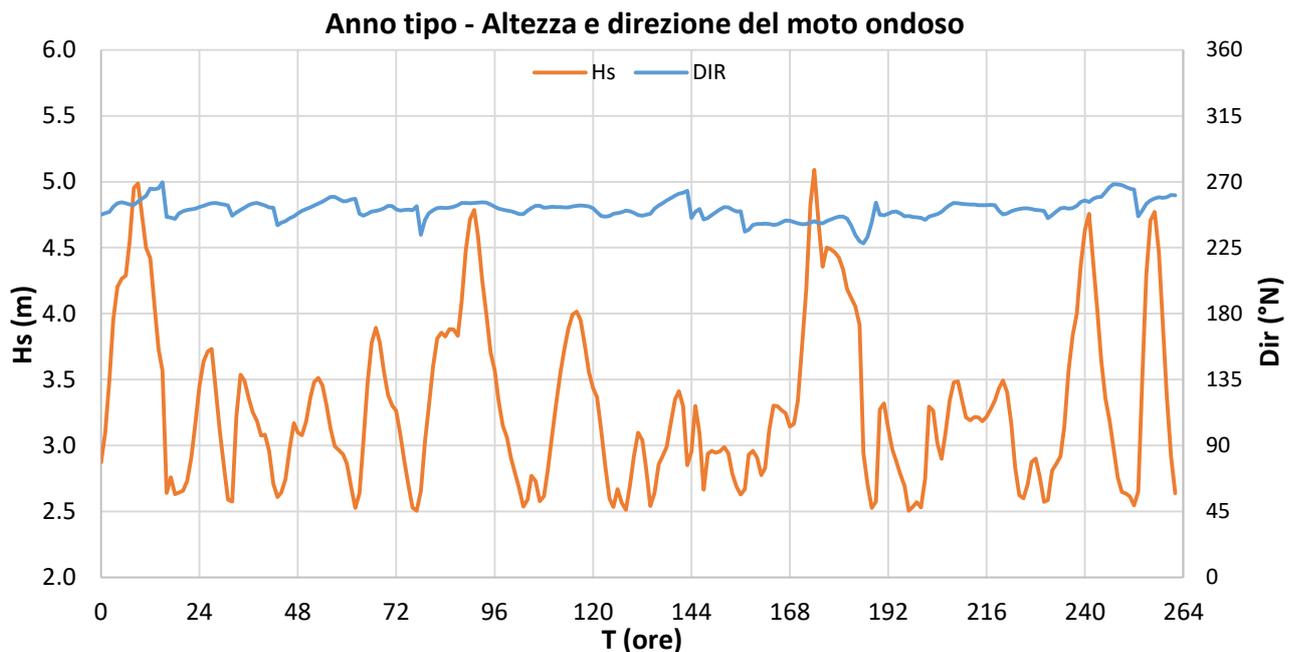


Figura 5.5 – Serie temporale di altezza d'onda significativa e direzione d'onda per l'anno tipo

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

Dalla Figura 5.5 emerge che l'altezza d'onda massima è di circa 5.1 m, mentre la direzione media di propagazione è di circa 250 °N.

Nelle simulazioni è stato considerato l'effetto del vento, generato a partire dalla serie temporale delle onde secondo la formulazione proposta dallo Shore Protection Manual [17] per il caso di mare pienamente sviluppato, in modo analogo a quanto esposto nel par. 3.5, applicato sia al modulo WAVE che al modulo FLOW.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno applicate all'idrodinamica, è stato assunto un livello del mare pari a 0.0 m s.m.m. costante nel tempo ed applicato sul bordo occidentale del modello in mare aperto. Lungo i bordi settentrionale e meridionale sono state applicate invece condizioni di gradiente di livello nullo (condizioni di Neumann), per permettere l'instaurarsi di correnti litoranee all'interno del dominio di calcolo senza effetti di bordo.

#### 5.1.4 Risultati della simulazione

I risultati della simulazione per l'anno tipico, in termini di evoluzione dei fondali rispetto alla condizione iniziale, sono rappresentati in Figura 5.6 mediante una scalacromatica che evidenzia la tendenza all'erosione o deposizione al termine della simulazione.

Dai risultati ottenuti si può osservare che le zone caratterizzate da una più marcata tendenza evolutiva del fondale sono quelle interessate dalle maggiori velocità della corrente che, in modo analogo a quanto riportato nel par. 3.7.2 per la mareggiata di Ponente, si manifestano tra la zona delle Secche della Meloria e la nuova Diga Nord, lasciando una zona di calma al largo della foce del Canale Scolmatore. Nelle aree interessate dalla presenza delle praterie di *Posidonia Oceanica* non si rilevano sostanziali modifiche alle quote dei fondali, dato che, come si è detto, tali aree sono state considerate inerodibili.

Nella zona del canale di accesso al porto si verifica un limitato effetto di interrimento della cunetta, che avviene per erosione delle sponde a partire dall'imboccatura del porto fino al raccordo lato mare della batimetrica -17 m s.l.m.. In particolare, risulta molto attiva la dinamica sulla sponda NO del canale, mentre la sponda SE è caratterizzata da variazioni più contenute. All'interno del porto non si riscontrano invece particolari tendenze evolutive.

Il modello consente anche di ottenere una stima in termini quantitativi dell'interrimento dovuto alle mareggiate che, pur dovendo essere intesa come una valutazione di massima per le inevitabili incertezze insite nell'analisi modellistica, può fornire utili indicazioni pratiche, ad esempio, per la programmazione degli interventi manutentivi.

Per il canale esterno (area 1) il volume di interrimento risulta essere pari a circa 30'000 m<sup>3</sup>, mentre per i canali e bacini interni al porto (area 2) il volume di interrimento è trascurabile, anche in relazione all'accuratezza dei calcoli modellistici (≈600 m<sup>3</sup>).

## Progetto definitivo

### Evoluzione del fondo

Anno tipico

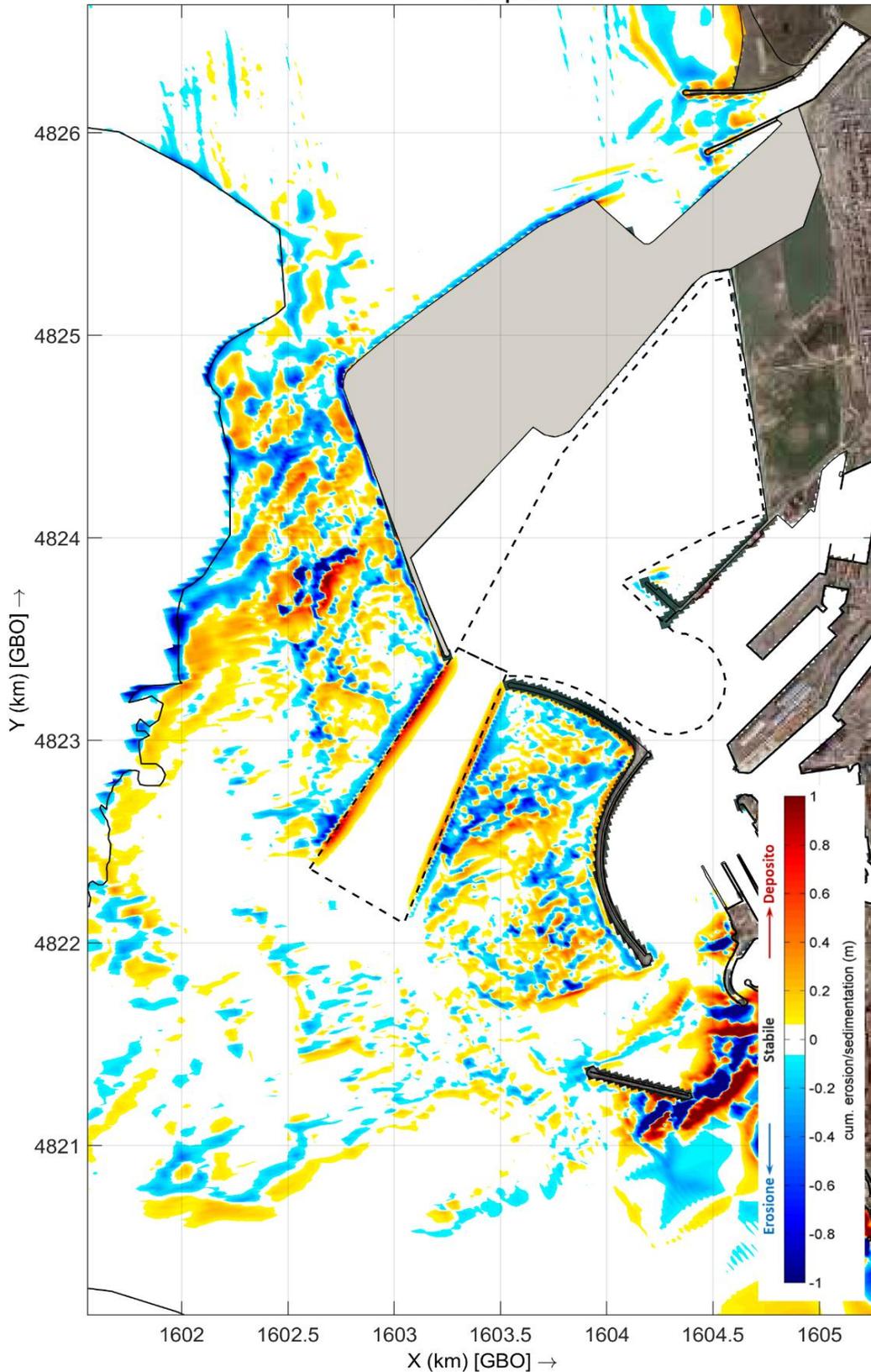


Figura 5.6 – Evoluzione dei fondali per l'anno tipico

## 5.2 Interrimento generato dalle piene dello Scolmatore

### 5.2.1 Definizione del dominio di calcolo

Il modello e le griglie di calcolo impiegate per la valutazione dell'interrimento generato dalle piene dello Scolmatore sono già stati descritti nel par. 5.1.1, a cui si rimanda. Anche in questo caso per il calcolo dell'interrimento sono stati considerati il canale esterno (area 1) e i canali e bacini interni al porto (area 2) come riportati nella precedente Figura 5.1.

I valori dei parametri utilizzati nel modello ricalcano quanto già esposto nel Capitolo 4. Si ricorda in particolare che il fondo in questo caso viene considerato inerosibile mentre i sedimenti vengono immessi direttamente dal Canale Scolmatore. Si tratta di sedimenti di tipo coesivo, implementati attraverso la velocità di caduta caratteristica del diametro medio di  $10\ \mu\text{m}$ , calcolata mediante la formula di Stokes e assunta pari a  $0.09\ \text{mm/s}$  in acqua salata, escludendo la possibilità di flocculazione.

### 5.2.2 Condizioni al contorno

In base alle considerazioni espresse e ai risultati ottenuti nel precedente Capitolo 4, sono stati ipotizzati due scenari di piena: uno scenario "medio" ( $414\ \text{m}^3/\text{s}$ ) e uno scenario "raro" ( $1000\ \text{m}^3/\text{s}$ ), entrambi caratterizzati da una concentrazione dei sedimenti in sospensione nelle acque dello Scolmatore pari a  $500\ \text{mg/l}$ .

L'andamento temporale dell'onda di piena è stato ipotizzato di forma trapezoidale, con una durata complessiva di 36 ore. Si è assunto inoltre che fosse coincidente per l'evento "medio" e per l'evento "massimo" (Figura 5.7).

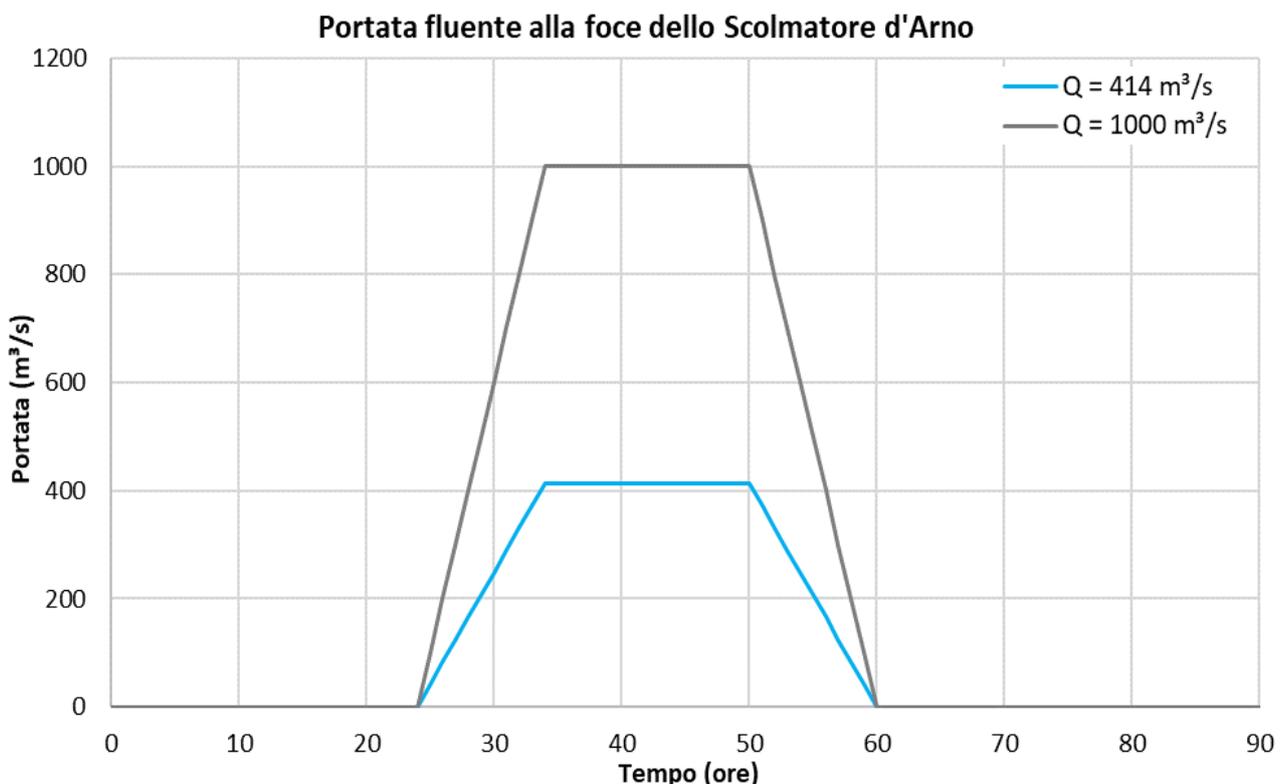


Figura 5.7 – Portate fluenti nello Scolmatore per lo scenario "raro" ( $Q=1000\ \text{m}^3/\text{s}$ ) e lo scenario "medio" ( $Q=414\ \text{m}^3/\text{s}$ )

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

Per lo stato del mare sono stati presi in considerazione i tre scenari con le mareggiate già analizzate nel Capitolo 3, Ponente, Mezzogiorno e Maestrale, rispettivamente con direzione di provenienza 250°N, 170°N e 290°N e durata 1 giorno/anno (Tabella 3.3).

Tuttavia, a seguito di alcune simulazioni preliminari e dei risultati già esposti nel Capitolo 4, gli scenari che vengono presentati fanno riferimento agli unici casi che mostrano attinenza per il problema dell'interrimento, vale a dire:

- Mareggiata 250°N con frequenza 1 g/anno e piena “media” dello Scolmatore (414 m<sup>3</sup>/s)
- Mareggiata 250°N con frequenza 1 g/anno e piena “massima” dello Scolmatore (1000 m<sup>3</sup>/s)

Per quanto riguarda le condizioni al contorno applicate all'idrodinamica, è stato assunto un livello del mare pari a 0 m s.l.m. costante nel tempo ed applicato sul bordo occidentale del modello in mare aperto e condizioni di gradiente di livello nullo (condizioni di Neumann) per i bordi settentrionale e meridionale, per permettere l'instaurarsi di correnti litoranee all'interno del dominio di calcolo senza effetti di bordo. La prima delle due simulazioni di fatto è la medesima già presa in considerazione nel precedente cap. 4 (Figura 4.14).

### 5.2.3 Risultati delle simulazioni

Le mappe riportate in Figura 5.8 e Figura 5.9 mostrano, per ciascuna delle portate ipotizzate alla foce dello Scolmatore (414 m<sup>3</sup>/s e 1000 m<sup>3</sup>/s), i risultati delle simulazioni in termini di distribuzione della concentrazione di sedimenti in sospensione (kg/m<sup>3</sup>) e di precipitazione dei sedimenti fluviali al termine della simulazione. Ogni mappa riporta i contorni delle aree sensibili dove è presente la *Posidonia Oceanica* (linea nera), della ZSC Secche della Meloria (linea rossa) e del pSIC Tutela del *Tursiops truncatus* (linea grigia).

I risultati per il caso della piena “media” concomitante ad una mareggiata di Ponente (Dir=250°N, Hs=4.31 m, Tp=9.4 s) mettono in evidenza che il plume proveniente dallo Scolmatore, per effetto del moto ondoso e delle correnti ad esso associato, viene schiacciato verso la costa ed indirizzata verso Nord lungo la fascia costiera del Calambrone e di Tirrenia per poi espandersi verso il largo nel tratto ancora più settentrionale.

Osservando la precipitazione di sedimenti fluviali, si deduce che la piena “media” dello Scolmatore non produce effetti sul canale di accesso al porto.

I risultati per il caso della piena “massima” concomitante ad una mareggiata di Ponente (Dir=250°N, Hs=4.31 m, Tp=9.4 s) mostrano un comportamento simile rispetto alla piena “media”, solo caratterizzato da una maggiore espansione del plume di sedimenti provenienti dallo scolmatore. Di fatto il getto uscente dallo Scolmatore, diffondendosi verso il largo, tende a ruotare verso nord e i sedimenti da esso trasportati vengono raccolti dal filone della corrente litoranea, che in quell'area è diretta verso Calambrone. Come conseguenza, la precipitazione di sedimenti fluviali, di fatto, non interessa né il canale di accesso al porto né l'interno del bacino portuale.

In base a questi risultati, che rappresentano comunque una stima di larga massima, dal momento che sono caratterizzati dalle medesime incertezze già espresse per il caso dell'interrimento dovuto alle mareggiate, si conclude che le piene del Canale Scolmatore qui considerate non producono effetti apprezzabili per quanto riguarda l'interrimento dei bacini portuali e del canale di accesso.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

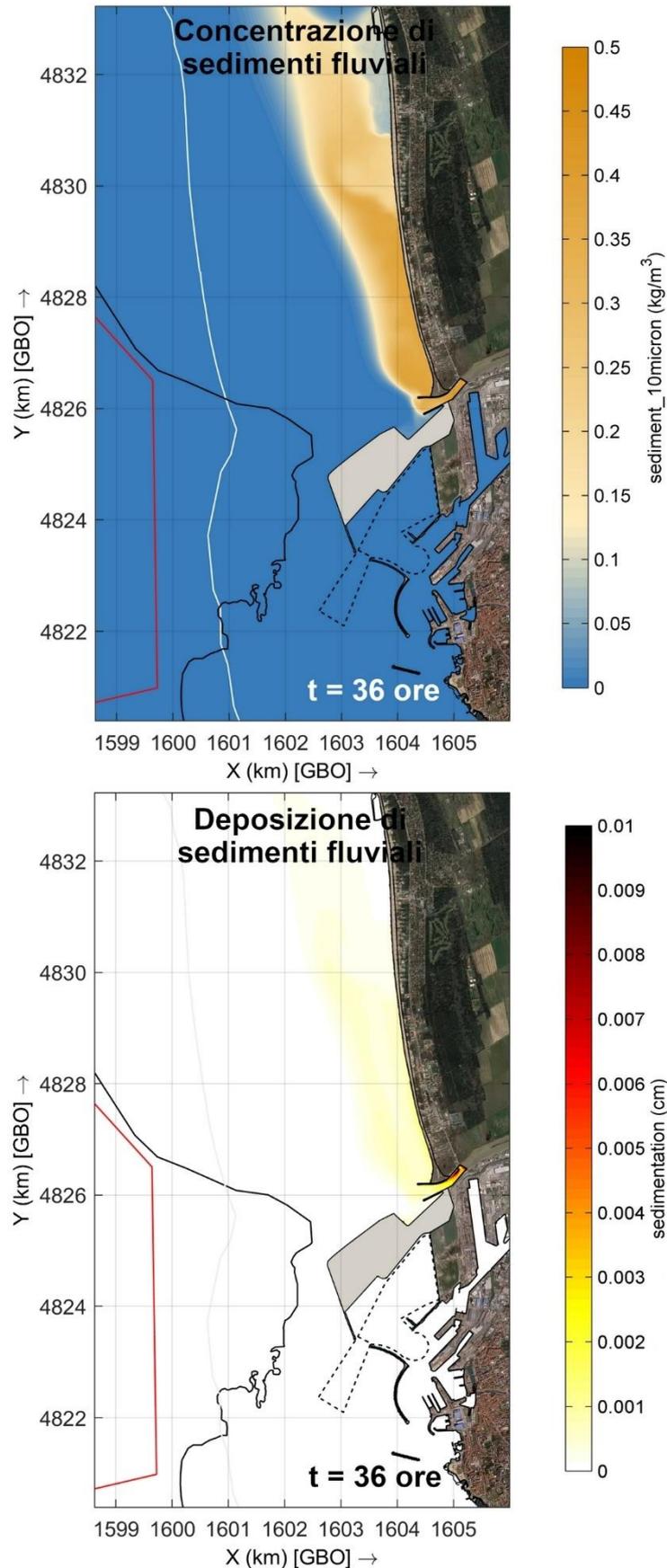


Figura 5.8 – Concentrazione (in alto) e deposizione (in basso) dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d'Arno (mareggiata di Ponente,  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$ )

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx

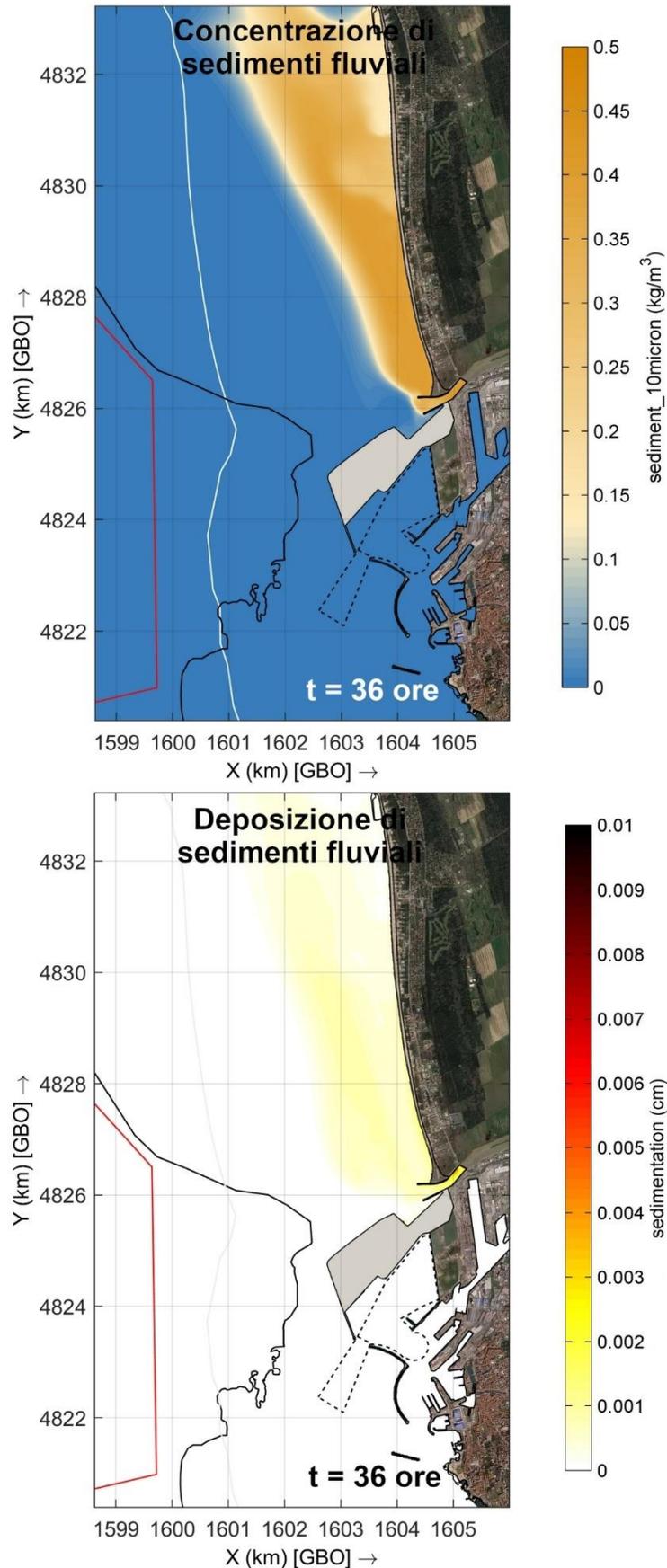


Figura 5.9 – Concentrazione (in alto) e deposizione (in basso) dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d'Arno (mareggiata di Ponente,  $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$ )

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

## 6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Provincia di Pisa, *Rimodulazione del Progetto Preliminare di adeguamento idraulico del Canale Scolmatore d'Arno. Studio idrodinamico e morfodinamico marino*. Gennaio 2013.
- [2] Bini M., Casarosa N., Ribolini A., *L'evoluzione diacronica della linea di riva del litorale pisano (1938-2004) sulla base del confronto di immagini aeree georeferenziate*, *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A*, 113 (2008)
- [3] Gandolfi G., Paganelli L., *Il litorale pisano versiliese (area campione Alto Tirreno) composizione provenienza e dispersione delle sabbie*, *Boll. Soc. Geol. It.* 94: 1273-1295 (1975).
- [4] *Autorità Portuale di Livorno, Indagine geomorfologica e transetti video subacquei dell'area antistante la Piattaforma Europa. Relazione e tavola allegata*. Gennaio 2017.
- [5] *Centro funzionale della Regione Toscana, Report di evento 1-3 febbraio 2019*.
- [6] *Distretto Appennino Settentrionale, Unit of Management: Arno (ITN002). Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA). Relazione*. Marzo 2016
- [7] Provincia di Pisa, *Rimodulazione del Progetto Preliminare di adeguamento idraulico del Canale Scolmatore d'Arno. Relazione Tecnico-Illustrativa*. Giugno 2011.
- [8] Regione Toscana – Servizio Idrologico Regionale. *Realizzazione del secondo stralcio del monitoraggio del trasporto solido nei corsi d'acqua della Toscana*, prof. Enio Paris. 2011.
- [9] S. Covelli et al., *Transport and dispersion of particulate Hg associated with a river plume in coastal Northern Adriatic environments*, *Marine Pollution Bulletin* 55 (2007) 436–450, doi:10.1016/j.marpolbul.2007.09.006
- [10] Azienda Speciale per il Porto di Monfalcone. *Escavo del canale del Porto di Monfalcone. Servizio di monitoraggio sull'ambiente marino. Clima meteomarinario e scenari di circolazione nell'area del Golfo di Panzano*. HydroSoil S.r.l., 2016.
- [11] Deltares, *Delft3D-Flow User Manual, Manual version 3.15*, 30 Agosto 2018.
- [12] Deltares, *Delft3D-Wave User Manual, Manual version 3.05*, 30 Agosto 2018.
- [13] Olsen Associates, Inc. *Calibration of a Delft3D model for Bald Head Island and the Cape Fear River Entrance - Phase I*. April 2012.
- [14] Aptim Environmental & Infrastructure, Inc. *Blind Pass Inlet Management Study Appendix and Sub Appendices*. 2017.
- [15] Briere C., Giardino A., and van der Werf, J.: *Morphological modeling of bar dynamics with Delft3D: the quest for optimal free parameter settings using an automatic calibration technique*, *Coastal Engineering Proceedings: sediment, 1*, 1–12, 2011.
- [16] Bonamano et al. *The Civitavecchia Coastal Environment Monitoring System (C-CEMS) a new tool to analyze the conflicts between coastal pressures and sensitivity areas*, *Ocean Sci.*, 12, 87–100, 2016 doi:10.5194/os-12-87-2016.
- [17] U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center. *Shore Protection Manual*, 1984.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

## 7 APPENDICE - Descrizione del codice di calcolo Delft3D v.4

### Introduzione

Delft3D è una suite modellistica 2D/3D appositamente sviluppata per le indagini sull'idrodinamica, il trasporto di sedimenti, la morfologia e la qualità delle acque in ambienti fluviali, lagunari e costieri. Il software è stato applicato, dimostrando la sua validità, in molti siti in tutto il mondo come Olanda, USA, Hong Kong, Singapore, Australia, Venezia, UAE, etc. Esso viene continuamente sviluppato ed aggiornato impiegando le più moderne e innovative tecniche modellistiche, che conseguono dal lavoro di ricerca dell'istituto Deltares, situato a Delft, in Olanda.

Delft3D può essere applicato a: circolazione dovuta a marea, vento, gradienti di densità e moto ondoso; propagazione di onde corte con spettro direzionale su batimetrie irregolari, incluse le interazioni onde-correnti; avvezione e dispersione di effluenti; calcolo morfodinamico online (scavi locali, dinamica del fondo a brevi scale temporali e spaziali); trasporto di sedimenti coesivi e non coesivi; processi di variazione della qualità dell'acqua inclusa modellazione ecologica; trasporto di particelle inclusi spandimenti oleosi e modellazione di plume di dragaggio; variazioni morfologiche 2D iniziali e/o dinamiche (variabili nel tempo), inclusi gli effetti delle onde sulla risospensione dei sedimenti e il trasporto al fondo.

Delft3D è configurato come un sistema modellistico totalmente integrato sia per un approccio multidisciplinare sia per specifici calcoli 3D, ed è composto da diversi moduli, raggruppati attorno ad un'interfaccia unica, e comunque capaci di interagire tra di loro.

Tutti i moduli di Delft3D sono interfacciati dinamicamente per scambiare dati e risultati dove le formulazioni dei processi lo richiedono. Tutte le funzionalità sono integrate in un'interfaccia grafica (GUI) user-friendly. I processi di base simulati da ciascuno dei moduli sono:

- **Delft3D-FLOW e MOR:** idrodinamica 2D e 3D, salinità, temperatura, trasporto e diffusione, trasporto solido e morfologia accoppiati con l'idrodinamica (online);
- **Delft3D-WAVE:** propagazione di onde corte (utilizzando SWAN);
- **D-Water Quality:** modulo generale di qualità delle acque;
- **Delft3D-SED:** trasporto di sedimenti coesivi e non coesivi;
- **Delft3D-ECO:** modellazione ecologica e dei complessi fenomeni di eutrofizzazione;
- **D-Waq PART:** trasporto di particelle, modellazione degli spandimenti oleosi.

Il sistema include anche le seguenti applicazioni per le attività di pre-processing e post-processing:

- **RGFGRID:** per generare griglie strutturate ortogonali curvilinee;
- **QUICKIN:** per preparare e manipolare dati grid-oriented, come la batimetria, le condizioni iniziali, i livelli idrici, la salinità, i costituenti e altri parametri;
- **Delft3D-QUICKPLOT:** per la visualizzazione e l'animazione dei risultati delle simulazioni.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

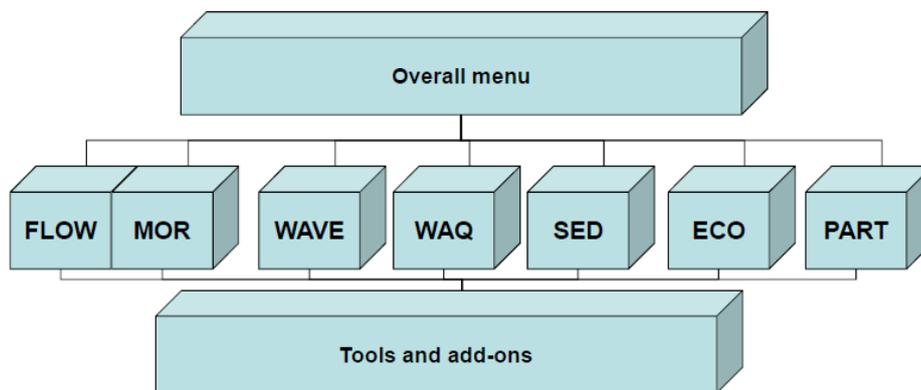
Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-004\_3.docx



Architettura della suite Delft3D 4

### **Modulo idrodinamico**

Il modulo idrodinamico Delft3D-FLOW è un programma di simulazione idrodinamica multidimensionale che calcola il moto non stazionario e i fenomeni di trasporto che derivano da forzanti tidali e meteorologiche su di una griglia curvilinea adattabile ai contorni. Nelle simulazioni 3D il modulo idrodinamico applica sulla verticale la cosiddetta trasformazione in coordinate sigma, che risulta in una rappresentazione smussata della topografia del fondo. Essa comporta anche un'elevata efficienza computazionale a causa del numero costante di strati sulla verticale in tutto il dominio di calcolo.

Il modulo idrodinamico è basato sulle equazioni complete di Navier-Stokes, a cui è applicata l'approssimazione per le acque basse (shallow waters). Le equazioni del moto sono risolte mediante una procedura basata su di uno schema alle differenze finite, ad elevata accuratezza ed incondizionatamente stabile. Le funzionalità supportate sono:

- due sistemi di coordinate nel piano orizzontale, ovvero Cartesiane e sferiche;
- due sistemi di coordinate nella direzione verticale, ovvero coordinate sigma adattate al contorno e strati orizzontali del tipo Z-grid;
- decomposizione del dominio sia nel piano orizzontale che lungo la direzione verticale;
- forze generate dalla marea (solo in combinazione con griglie sferiche),
- simulazione del prosciugamento e dell'allagamento delle piane intertidali (contorni mobili);
- gradienti di densità dovuti a distribuzione non uniforme della temperatura e della salinità (correnti di densità);
- scelta tra diverse formulazioni degli sforzi di resistenza al fondo e dei modelli di chiusura della turbolenza;
- incremento degli stress al fondo dovuto alle onde;
- azione dovuta al vento sulla superficie dell'acqua modellata da una legge quadratica;
- campi di vento e barometrici variabili nello spazio (specificati sulla griglia del modello idrodinamico o su di una griglia meteo più grossolana), inclusa la correzione della pressione idrostatica sul contorno aperto (opzionale);
- simulazione della portata termica, della portata di effluenti e dell'immissione di acqua di raffreddamento in qualunque posizione e a qualunque profondità nel dominio di calcolo (modulo di avvezione-diffusione);
- effetto del flusso di calore attraverso la superficie libera;
- analisi online dei parametri del modello in termini di ampiezza e fase di Fourier, per consentire la generazione di mappe co-tidali;

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

- simulazione del moto di boe lagrangiane (drifters/drogues);
- avvezione-diffusione di sostanze con tasso di decadimento del primo ordine;
- simulazione accoppiata (online) del trasporto di sedimenti (limo o sabbia) incluso il calcolo di erosione e deposizione e feedback verso l'idrodinamica per il calcolo del termine di pressione baroclina, il modello di chiusura della turbolenza e le variazioni del fondo;
- l'influenza dei moti elicoidali sulla corrente (ad esempio nelle curve dei fiumi). Questo fenomeno è particolarmente importante per gli studi sulla sedimentazione e sull'erosione;
- interazioni onde-correnti, tenendo in conto della distribuzione di tali interazioni sulla verticale;
- molte opzioni per le condizioni al contorno, come assegnazione di livelli idrici, velocità, portata e condizioni di riflessione debole;
- diverse opzioni per definire le condizioni al contorno, come assegnare le serie temporali oppure assegnare le costituenti armoniche e astronomiche;
- opzioni per il decadimento lineare delle sostanze conservative;
- visualizzazione online dei parametri del modello e possibilità di produrre animazioni.

I risultati del modulo idrodinamico sono utilizzati in tutti gli altri moduli di Delft3D. È disponibile un accoppiamento con il modulo di trasporto dei sedimenti (Delft3D-SED) per simulare i processi di trasporto dei sedimenti coesivi e non coesivi, ad esempio nel caso di studi sull'erosione e sulla sedimentazione. È disponibile un accoppiamento dinamico con il modulo del moto ondoso (Delft3D-WAVE) per l'interazione onde-correnti, mentre per le simulazioni morfodinamiche il modulo idrodinamico è integrato con il modulo del moto ondoso e con il modulo di sedimentazione ed erosione per costituire un modello morfodinamico completo.

Il modello Delft3D-FLOW può essere lanciato in modalità di calcolo parallelo su clusters di computer ad alte prestazioni e a memoria distribuita. La versione parallela è basata sul diffuso standard MPI, e la suddivisione del dominio di calcolo può essere effettuato automaticamente e/o definita dall'utente. Su macchine singole con processori multi-core l'accelerazione del calcolo può anche essere ottenuta attivando l'opzione multithreading D-Flow FM realizzata in OpenMP, che rappresenta l'opzione di default.

### ***Modulo di moto ondoso***

Il modulo di moto ondoso Delft3D-WAVE può essere impiegato per simulare la dinamica di onde casuali a cresta corta generate dal vento in acque costiere (che possono includere estuari, bocche tidali, isole barriera con piane tidali, canali, ecc.). Questo modulo di moto ondoso calcola la propagazione delle onde, la generazione delle onde dovuta al vento, le interazioni non lineari onda-onda e la dissipazione (whitecapping, frangimento indotto dalla profondità, attrito sul fondo), per determinate topografie del fondo, campi di vento, livelli idrici e campi di corrente in acque profonde, intermedie e di profondità definita.

Attualmente il modulo di moto ondoso di Delft3D è basato sul modello SWAN, acronimo per Simulating WAVes Nearshore, che è un modello spettrale di terza generazione (vedi ad es. Holthuijsen et al. (1993); Ris (1997)). Il modello SWAN è il successore del modello stazionario di seconda generazione HISWA (Holthuijsen et al., 1989), ed ha il grande vantaggio, rispetto a HISWA, che i processi fisici sono in esso esplicitamente rappresentati con formulazioni allo stato dell'arte e che il modello stesso è incondizionatamente stabile (schema totalmente implicito). Inoltre, il modello SWAN può effettuare simulazioni utilizzando una griglia curvilinea (e quindi accoppiarsi in modo più efficace con il modulo idrodinamico di Delft3D) e può – per esempio – generare l'output in termini di spettri mono e bi-dimensionali. Inoltre, gli sforzi indotti dal moto ondoso, calcolati da SWAN sulla base dei gradienti dei

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

“radiation stress” (invece che sulla base della dissipazione come in HISWA), possono essere utilizzati come forzanti per il modulo idrodinamico per calcolare le correnti indotte dal moto ondoso e il wave set-up.

Il modello SWAN è basato sull'equazione di bilancio dell'azione d'onda in forma discreta ed è completamente spettrale (in tutte le direzioni e frequenze). Quest'ultima caratteristica implica che possono essere rappresentati adeguatamente campi di onde casuali a creste corte che si propagano simultaneamente da direzioni anche molto differenti. SWAN calcola l'evoluzione di onde casuali a creste corte in regioni costiere di acque profonde, intermedie e basse, considerando anche la presenza di correnti locali. Il modello SWAN tiene conto della propagazione (rifrattiva) – come il modello HISWA – e descrive esplicitamente con formulazioni allo stato dell'arte i processi di generazione del moto ondoso dovuti al vento, i processi dissipativi dovuti a whitecapping, attrito sul fondo e frangimento per effetto della profondità, nonché le interazioni non lineari onda-onda (sia triadi che quadruplette). Il solutore adotta schemi di propagazione pienamente impliciti per evitare tempi di calcolo eccessivi e per ottenere simulazioni robuste nelle applicazioni pratiche. Va sottolineato peraltro che, sebbene in SWAN siano implementate tecniche numeriche particolarmente efficienti, i tempi di calcolo per una tipica simulazione di propagazione del moto ondoso possono essere di molto superiori a quelli richiesti dal modello HISWA. Il modello SWAN è stato ripetutamente verificato e validato in situazioni di laboratorio e complesse situazioni reali (si veda ad esempio. Ris (1997); Ris et al. (1999)). Si deve evidenziare che il modello SWAN (come del resto il modello HISWA) non tiene conto degli effetti della diffrazione.

Il modello SWAN è stato sviluppato presso la Delft University of Technology (Olanda) dove è continuamente oggetto di ulteriori aggiornamenti. Esso è considerato come l'attuale standard di settore per la modellazione del moto ondoso sottocosta e per gli studi di protezione costiera. Il modello SWAN è stato rilasciato come software di dominio pubblico. Nella corrente versione della suite Delft3D 4 è utilizzata la versione di SWAN numerata come 40.72 ABCDE.

Il modulo di moto ondoso può essere utilizzato per la progettazione di porti e di installazioni offshore e per progetti di gestione e sviluppo dei litorali. Esso può essere utilizzato anche per la ricostruzione dei campi d'onda del passato (wave hindcast). La dimensione tipica delle aree sulle quali è possibile applicare il modello va dai 2x2 km ai 50x50 km.

Opzionalmente, il modulo di moto ondoso può essere accoppiato con gli altri moduli di Delft3D. In questo modo si può ottenere un accoppiamento diretto ed efficiente tra, ad esempio, il modulo idrodinamico (per le correnti indotte dal moto ondoso) e il modulo di trasporto dei sedimenti (per la risospensione indotta dalle onde).

I calcoli del moto ondoso sono effettuati, in Delft3D, o su di una griglia regolare rettilinea oppure su una griglia curvilinea. La griglia curvilinea può anche (ma non necessariamente) essere la medesima utilizzata dal modulo idrodinamico Delft3D-FLOW. Il sistema Delft3D è infatti in grado di trasferire automaticamente tra i due moduli (accoppiamento bi-direzionale) tutte le grandezze di interesse per la simulazione accoppiata

Inoltre, il modulo Delft3D-WAVE può essere eseguito in calcolo parallelo su cluster di computer a memoria distribuita, utilizzando lo standard MPI. Su singole macchine con processori multi-core, l'accelerazione computazionale può essere ottenuta utilizzando l'opzione di multithreading che adotta lo standard OpenMP.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

## **Modulo morfodinamico**

Il modulo di trasporto dei sedimenti integra gli effetti di onde, correnti, trasporto solido, sulla dinamica morfologica, in relazione alle dimensioni dei sedimenti che possono variare dal campo dei limi a quello delle ghiaie. Esso è stato progettato per simulare il comportamento morfodinamico di fiumi, estuari, e coste a scale temporali variabili dai giorni agli anni.

I tipici problemi da affrontare mediante l'impiego del modulo morfologico includono le complesse interazioni tra onde, correnti, trasporto di sedimenti e topografia del fondo. Per rappresentare tali complesse interazioni, i singoli moduli inclusi in Delft3D interagiscono tra di loro attraverso un'interfaccia comune ben strutturata.

Una simulazione morfologica in Delft3D è definita come una struttura ad albero di processi e sottoprocessi fino ai processi elementari che contengono le chiamate ai moduli di calcolo. L'utente può costruire processi di complessità crescente, che vanno dalla singola corsa del modulo idrodinamico a simulazioni morfodinamiche che si estendono per la durata di anni, con condizioni al contorno variabili nel tempo. Questo modulo simula i processi sulla medesima griglia curvilinea utilizzata dal modulo idrodinamica, il che consente una rappresentazione molto efficiente ed accurata di aree dalla geometria complicata.

Il modulo Delft3D-MOR include o è in grado di impiegare le componenti seguenti:

- **Wave:** il modello SWAN, che tiene conto della propagazione (refrattiva) e rappresenta i processi di generazione del moto ondoso per effetto del vento, le dissipazioni dovute a whitecapping, attrito sul fondo e frangimento dovuto alla profondità e interazioni non lineari onda-onda (sia quadruplette che triadi) trattati esplicitamente con formulazioni allo stato dell'arte;
- **Hydrodynamics:** il modulo idrodinamico (Delft3D-FLOW) impiegato da Delft3D-MOR è basato sulle equazioni delle onde lunghe in acque basse (shallow water), ed include gli effetti di marea, vento, correnti di densità, onde, e modelli di turbolenza fino a k-epsilon. Il modulo include un solutore per il trasporto di salinità, temperatura e sostanze conservative. Esso calcola automaticamente gli effetti della salinità e della temperatura sulla densità e sul bilancio della quantità di moto. Il modulo utilizza una griglia curvilinea nel piano orizzontale. Le dimensioni della griglia verticale sono proporzionali alla profondità locale (sigma-coordinates). Tuttavia, per rendere le simulazioni morfologiche efficienti viene utilizzato un approccio semplificato a singolo strato, con parametri mediati sulla verticale. Gli effetti dei moti elicoidali, ad esempio nelle curve degli alvei fluviali, sono calcolati da un modulo idrodinamico secondario che prende in considerazione l'avvezione dei flussi spiraliformi e gli effetti delle correnti secondarie sulla corrente principale. Gli effetti del moto ondoso includono i gradienti dei "radiation stress" associati con la dissipazione delle onde, i flussi di massa indotti dalle onde e le azioni delle onde sul fondo, valutate con diverse formulazioni.
- **Sediment transport:** il modulo di trasporto solido calcola il trasporto al fondo e in sospensione sulla griglia curvilinea per un determinato periodo di tempo. Il trasporto al fondo è calcolato come una funzione locale del moto ondoso, del campo idrodinamico e delle caratteristiche del fondo. In base a questi stessi parametri viene anche calcolato il carico di equilibrio dei sedimenti in sospensione. A questo punto il modulo riconosce due modalità di trasporto: quella del trasporto totale (di equilibrio), e quella del trasporto in sospensione. Nel primo modo, il trasporto totale è semplicemente la somma del trasporto al fondo e del carico di equilibrio dei sedimenti in sospensione. Nel secondo modo la risospensione, la deposizione, l'avvezione e la diffusione dei sedimenti sospesi sono calcolati da uno specifico solutore di trasporto. In questo caso, viene adottato un approccio quasi 3D, in cui i profili verticali della concentrazione dei sedimenti in

<b>Progetto:</b> Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	<b>Livello progettazione:</b> Progetto Definitivo	<b>Elaborato:</b> IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
---	--	--

sospensione e della velocità sono dati da specifiche funzioni di forma. Il trasporto al fondo e il trasporto in sospensione di equilibrio possono essere modellati secondo diverse formulazioni, tra le quali Engelund-Hansen, Meyer-Peter-Muller, Bijker, Bailarde Van Rijn per le sabbie, e adottando una formulazione separata per il trasporto dei limi. In tutte le formulazioni possono essere presi in considerazione gli effetti della pendenza del fondo sul modulo e sulla direzione del trasporto, nonché gli effetti di strati del fondo non erodibili.

- **Bottom change:** la procedura per l'aggiornamento delle quote del fondo contiene uno schema esplicito di tipo Lax-Wendroff per far variare la batimetria sulla base della dinamica del trasporto solido. Sono disponibili diverse opzioni per scegliere intervalli di calcolo fissati o automatici, strati fissi (non erodibili), varie tipologie di condizioni al contorno, tra cui la schematizzazione di azioni di dragaggio.

Tutti i moduli funzionano sulla stessa griglia rettangolare o curvilinea. Il modulo idrodinamico impiega uno schema ADI pienamente implicito per le equazioni della quantità di moto e di continuità. Il solutore idrodinamico dispone di robuste procedure per trattare le situazioni di allagamento/prosciugamento del terreno sia per il caso 2D che 3D. Nel solutore del trasporto può essere applicato un filtro Forrester che garantisce comunque la positività delle concentrazioni.

Il modello di aggiornamento delle quote del fondo utilizza, come si è detto, uno schema esplicito di tipo Lax-Wendroff, che rende necessario soddisfare un criterio di stabilità del tipo di Courant. Peraltro, l'impiego di passi intermedi semplificati per la "correzione della continuità" consente di mantenere l'onere computazionale entro livelli ragionevoli.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx
--	---	---

## **Bibliografia**

- Bailard, J. A., 1981. "An Energetics Total Load Sediment Transport Model for Plane Sloping Beaches." *Journal of Geophysical Research* 86 (C11): 10938–10954.
- Battjes, J. and J. Janssen, 1978. "Energy loss and set-up due to breaking of random waves." In *Proceedings 16th International Conference Coastal Engineering*, ASCE, pages 569–587.
- Battjes, J. and M. Stive, 1985. "Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves." *Journal of Geophysical Research* 90 (C5): 9159–9167.
- Beji, S. and J. Battjes, 1993. "Experimental investigation of wave propagation over a bar." *Coastal Engineering* 19: 151–162.
- Bijker, E. W., 1967. Some considerations about scales for coastal models with moveable bed. Tech. Rep. 50, WL | Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
- Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, 1996: The "SWAN" wave model for shallow water, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, 668-676
- Booij, N., R. Ris and L. Holthuijsen, 1999. "A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation." *Journal of Geophysical Research* 104 (C4): 7649–7666.
- Casulli, V., 1999. "A semi-implicit finite difference method for non-hydrostatic, free surface flows." *International Journal Numerical Methods In Fluids* 30: 425–440.
- Delft3D-FLOW UM, 2018. Delft3D-FLOW User Manual. Deltares, 3.15 ed.
- Delft3D-WAVE UM, 2018. Delft3D-WAVE User Manual. Deltares, 3.05 ed.
- Delft3D Functional Specifications, 2018. Deltares, 2.20 ed.
- Eckart, C., 1958. "Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures." *American Journal of Science* 256: 225–240.
- Eldeberky, Y. and J. Battjes, 1995. "Parameterization of triad interactions in wave energy models, Gdansk, Poland." In *Proceedings Coastal Dynamics Conference '95*, pages 140–148.
- Engelund, F. and E. Hansen, 1967. A monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. TekniskForlag, Copenhagen.
- Fredsøe, J., 1984. "Turbulent boundary layer in wave-current interaction." *Journal of Hydraulic Engineering* 110: 1103–1120.
- Goda, Y., H. Takeda and Y. Moriya, 1967. Laboratory investigation of wave transmission over breakwaters. Tech. Rep. 13, Rep. port and Harbour Res. Institution. (from Seelig, 1979).
- Holthuijsen, L., N. Booij and T. Herbers, 1989. "A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents." *Coastal Engineering* 13: 23–54.
- Holthuijsen, L., N. Booij and R. Ris, 1993. "A spectral wave model for the coastal zone." In *Proceedings of 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, New Orleans, pages 630–641.
- Komen, G., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann and P. Janssen, 1994. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press.
- Lesser, G., J. van Kester and J. A. Roelvink, 2000. On-line sediment transport within Delft3DFLOW. Tech. Rep. Z2899, wl.
- Lesser, G. R., J. A. Roelvink, J. A. T. M. van Kester and G. S. Stelling, 2004. "Development and validation of a three-dimensional morphological model." *Coastal Engineering* 51: 883–915.

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto Definitivo	IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-004_3.docx

Meyer-Peter, E. and R. Müller, 1948. "Formulas for bed load transport." In Proceedings of the 2nd Congress IAHR, Stockholm, vol. 2, pages 39–64.

Rijn, L. C. van, 1984a. "Sediment transport, Part I: bed load transport." Journal of Hydraulic Engineering 110 (10): 1431–1456.

Rijn, L. C. van, 1984b. "Sediment transport, Part II: suspended load transport." Journal of Hydraulic Engineering 110 (11): 1613–1640.

Rijn, L. C. van, 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, The Netherlands.

Rijn, L. C. van, 2003. "Sediment transport by currents and waves; general approximation formulae Coastal Sediments." In Corpus Christi, USA.

Rijn, L. C. van, J. A. Roelvink and W. T. Horst, 2000. Approximation formulae for sand transport by currents and waves and implementation in DELFT-MOR. Tech. Rep. Z3054.40, WL | Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.

Soulsby, R. L., L. Hamm, G. Klopman, D. Myrhaug, R. R. Simons and G. P. Thomas, 1993b. "Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer." Coastal Engineering 21: 41–69.

Thatcher, M. L. and D. R. F. Harleman, 1972. A mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries. Report no. 144, MIT School of Engineering Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering.

Walstra, D. J. R. and J. A. Roelvink, 2000. "3D Calculation of Wave Driven Cross-shore Currents." In Proceedings 27th International Conference on Coastal Engineering, Sydney, Australia, July 16-21, 2000, pages 1050–1063.

Walstra, D. J. R., J. A. Roelvink and J. Groeneweg, 2000. "Calculation of Wave-Driven Currents in a 3D Mean Flow Model." In Proceedings 27th International Conference on Coastal Engineering, Sydney, Australia, July 16-21, 2000.

SWAN UM, 2000. SWAN Cycle III version 40.11 User Manual. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 0.00 ed.