



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 PRELIMINARE

TITOLO

D - IDRAULICA MARITTIMA
Studio della dinamica litoranea

REV.	DATA	FILE	OGGETTO	DIS.	APPR.
1					
2					
3					
4					
5					

ELABORATO N.

D004

DATA: 08/11/2019	SCALA: -	FILE: 1233_PP-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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

Indice generale

1	PREMESSA	7
2	CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA E TRASPORTO SOLIDO INDOTTI DAL MOTO ONDOSONO	8
2.1	DESCRIZIONE DEL MODELLO	8
2.2	DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO	8
2.3	DATI SEDIMENTOLOGICI	14
2.4	VALORI DEI PARAMETRI UTILIZZATI NEL MODELLO	17
2.5	CONDIZIONI AL CONTORNO	21
2.6	SCENARI ANALIZZATI	23
2.7	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	25
2.7.1	PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSONO	25
2.7.2	CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA	48
2.7.3	TRASPORTO SOLIDO E CONCENTRAZIONE DEI SEDIMENTI IN SOSPENSIONE	68
3	EFFETTI DELLE PORTATE DI PIENA DELLO SCOLMATORE D'ARNO	82
3.1	PREMESSA	82
3.2	CONDIZIONI AL CONTORNO	86
3.2.1	VALUTAZIONI SULLA PORTATA DELLO SCOLMATORE ALLA FOCE	86
3.2.2	VALUTAZIONI SUL TRASPORTO SOLIDO	89
3.2.3	VALUTAZIONI SULLE CORRENTI LITORANEE	90
3.3	VALORI DEI PARAMETRI UTILIZZATI NEL MODELLO	92
3.4	SCENARI ANALIZZATI	93
3.5	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	94
4	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	108
5	APPENDICE - DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO DELFT3D V.4	109

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 di fattibilità tecnico economica	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx
---	--	--

Indice delle figure

Figura 2.1 – Progetto GIS contenente i punti dei rilievi batimetrici utilizzati per costruire le batimetrie del modello.	9
Figura 2.2 – Griglie di calcolo dei modelli Delft3D-WAVE(in alto) e Delft3D-FLOW (in basso)	10
Figura 2.3 – Batimetria dello stato di fatto rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW (batimetria della griglia con risoluzione 200 m del modulo WAVE)	11
Figura 2.4 – 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).	12
Figura 2.5 – Batimetria della configurazione di progetto 1 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).	13
Figura 2.6 – Batimetria della Configurazione di progetto 2 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).	14
Figura 2.7 – Mappatura del diametro mediano D_{50} dei sedimenti (elaborazione GIS dei dati della campagna 2005 della Provincia di Pisa)	16
Figura 2.8 – Rose delle frequenze (blu), delle energie (rosso) e delle altezze significative massime (verde) (punto UNIGE 585, periodo 1979-2018)	21
Figura 2.9 – Curve di durata dell'altezza significativa (punto UNIGE 585, periodo 1979-2018) per settore di provenienza	21
Figura 2.10 – Layout di progetto configurazione 1 (a sinistra) e 2 (a destra)	23
Figura 2.11 – 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)	27
Figura 2.12 – 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)	28
Figura 2.13 – Campo d'onda per la Configurazione 1 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)	29
Figura 2.14 – Campo d'onda per la Configurazione 2 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)	30
Figura 2.15 – 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)	31
Figura 2.16 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 1 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)	32
Figura 2.17 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 2 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)	33
Figura 2.18 – 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)	34

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 di fattibilità tecnico economica	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx
--	---	---

Figura 2.19 – 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) 35

Figura 2.20 – Campo d’onda calcolato per la Configurazione 1 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) 36

Figura 2.21 – Campo d’onda calcolato per la Configurazione 2 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) 37

Figura 2.22 – 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) 38

Figura 2.23 – Campo d’onda calcolato per la Configurazione 1 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) 39

Figura 2.24 – Campo d’onda calcolato per la Configurazione 2 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 2.25 – 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 2.26 – 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 2.27 – Campo d’onda calcolato per la Configurazione 1 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 2.28 – Campo d’onda calcolato per la Configurazione 2 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) 44

Figura 2.29 – 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) 45

Figura 2.30 – Campo d’onda calcolato per la Configurazione 1 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) 46

Figura 2.31 – Campo d’onda calcolato per la Configurazione 2 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) 47

Figura 2.32 – 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) 50

Figura 2.33 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la Configurazione 1 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) 51

Figura 2.34 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la Configurazione 2 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) 52

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

Figura 2.35 – 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 250°N: Hs = 4.31 m, Tp = 9.40 s, U _w = 12.2 m/s)	53
Figura 2.36 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 1 di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: Hs = 4.31 m, Tp = 9.40 s, U _w = 12.2 m/s).....	54
Figura 2.37 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 2 di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: Hs = 4.31 m, Tp = 9.40 s, U _w = 12.2 m/s).....	55
Figura 2.38 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: Hs = 2.44 m, Tp = 6.73 s, U _w = 10.0 m/s)	56
Figura 2.39 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la Configurazione 1 di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: Hs = 2.44 m, Tp = 6.73 s, U _w = 10.0 m/s)	57
Figura 2.40 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la Configurazione 2 di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: Hs = 2.44 m, Tp = 6.73 s, U _w = 10.0 m/s)	58
Figura 2.41 – 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: Hs = 2.44 m, Tp = 6.73 s, U _w = 10.0 m/s)	59
Figura 2.42 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 1 di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: Hs = 2.44 m, Tp = 6.73 s, U _w = 10.0 m/s).....	60
Figura 2.43 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 2 di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: Hs = 2.44 m, Tp = 6.73 s, U _w = 10.0 m/s).....	61
Figura 2.44 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: Hs = 2.14 m, Tp = 7.30 s, U _w = 8.4 m/s)	62
Figura 2.45 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la Configurazione 1 di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: Hs = 2.14 m, Tp = 7.30 s, U _w = 8.4 m/s)	63
Figura 2.46 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la Configurazione 2 di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: Hs = 2.14 m, Tp = 7.30 s, U _w = 8.4 m/s)	64
Figura 2.47 – 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: Hs = 2.14 m, Tp = 7.30 s, U _w = 8.4 m/s).....	65
Figura 2.48 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 1 di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: Hs = 2.14 m, Tp = 7.30 s, U _w = 8.4 m/s).....	66
Figura 2.49 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 2 di progetto, particolare dell’area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: Hs = 2.14 m, Tp = 7.30 s, U _w = 8.4 m/s)	67
Figura 2.50 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Ponente Stato di fatto.....	71
Figura 2.51 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Ponente Configurazione 1 di progetto	72

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

Figura 2.52 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Ponente Configurazione 2 di progetto	73
Figura 2.53 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Mezzogiorno Stato di fatto	74
Figura 2.54 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Mezzogiorno Configurazione 1 di progetto	75
Figura 2.55 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Mezzogiorno Configurazione 2 di progetto	76
Figura 2.56 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Maestrale Stato di fatto	77
Figura 2.57 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Maestrale Configurazione 1 di progetto	78
Figura 2.58 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Maestrale Configurazione 2 di progetto	79
Figura 2.59 – Sezioni utilizzate per i bilanci della portata solida lungo il litorale dallo Scolmatore alle spiagge di Tirrenia	80
Figura 2.60 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 2.59 , nelle diverse configurazioni, per la mareggiata di Ponente	80
Figura 2.61 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 2.59, nelle diverse configurazioni, per la mareggiata di Mezzogiorno	81
Figura 2.62 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 2.59, nelle diverse configurazioni, per la mareggiata di Maestrale	81
Figura 3.1 – Rilievo geomorfologico della zona di mare antistante il Porto di Livorno eseguito a fine 2016 [4].....	83
Figura 3.2 – Area marina protetta Secche della Meloria e copertura del rilievo geomorfologico [4].....	83
Figura 3.3 – 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]).	84
Figura 3.4 – Evento meteomarinico 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/).	84
Figura 3.5 – Immagini satellitari ESA Sentinel-2 raccolte il 3 febbraio (a sinistra) e il 6 febbraio 2019 (a destra). La risoluzione è di 10 m e sono state evidenziate la batimetrica -10 m s.m.m. e l’areale della Posidonia [4]	85
Figura 3.6 – 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	88
Figura 3.7 – Esempio di mappa delle correnti superficiali nell’alto Tirreno prodotta dal modello del consorzio LaMMa (http://www.lamma.rete.toscana.it/mare/modelli/correnti).	90
Figura 3.8 – Esempio di mappa delle correnti superficiali nell’alto Tirreno fornita dal servizio CMEMS Copernicus	91
Figura 3.9 – Andamento della componente Nord della velocità superficiale fornita dal servizio CMEMS Copernicus	91
Figura 3.10 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Stato di fatto, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$)	97
Figura 3.11 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazione di progetto 1, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$)..	98

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 di fattibilità tecnico economica	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx
---	--	--

Figura 3.12 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazione di progetto 1, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{\text{sed}} = 0.5 \text{ kg/m}^3$).. 99

Figura 3.13 – Precipitazione dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazioni a confronto, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{\text{sed}} = 0.5 \text{ kg/m}^3$) ... 100

Figura 3.14 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Stato di fatto, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{\text{sed}} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)..... 101

Figura 3.15 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazione di progetto 1, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{\text{sed}} = 0.5 \text{ kg/m}^3$) 102

Figura 3.16 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazione di progetto 2, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{\text{sed}} = 0.5 \text{ kg/m}^3$) 103

Figura 3.17 – Precipitazione dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d’Arno (Configurazioni a confronto, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{\text{sed}} = 0.5 \text{ kg/m}^3$). 104

Figura 3.18 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (confronto tra le diverse configurazioni, mareggiata di Ponente, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{\text{sed}} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)..... 105

Figura 3.19 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (confronto tra le diverse configurazioni, mareggiata di Mezzogiorno, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{\text{sed}} = 0.5 \text{ kg/m}^3$) 106

Figura 3.20 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d’Arno (confronto tra le diverse configurazioni, mareggiata di Maestrale, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{\text{sed}} = 0.5 \text{ kg/m}^3$).... 107

Indice delle tabelle

Tabella 2.1 – Impostazioni e parametri modellistici adottati per il modulo Delft3D-Flow. 18

Tabella 2.2 – Impostazioni e parametri modellistici adottati per il modulo Delft3D-Wave..... 20

Tabella 2.3 – Caratteristiche delle mareggiate associate alle diverse durate medie; in giallo gli eventi simulati..... 22

Tabella 2.4 – Scenari analizzati nello studio della circolazione idrodinamica e del trasporto solido dei sedimenti in sospensione..... 24

Tabella 3.1 – 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]). 86

Tabella 3.2 – Portata massima derivata dallo Scolmatore per gli eventi del periodo 1981-2005. (Progetto di Adeguamento Idraulico del Canale Scolmatore d’Arno, 2011, [7]). 87

Tabella 3.3 – Scenari analizzati nello studio dell’interferenza del progetto con le portate di piena dello Scolmatore d’Arno..... 93

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

1 PREMESSA

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

La scelta di sviluppare lo studio con un elevato livello di approfondimento discende dalla necessità di individuare e risolvere le criticità tecniche, funzionali ed ambientali già a livello di progettazione di fattibilità tecnico economica; in questa fase devono infatti essere valutate e confrontate le diverse alternative progettuali, e gli elementi principali di valutazione e confronto non possono che essere quelli relativi alle citate criticità.

Le 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 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.

Lo studio è 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.

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

2 CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA E TRASPORTO SOLIDO INDOTTI DAL MOTO ONDOSI

2.1 Descrizione del modello

Le simulazioni sono state effettuate 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.

2.2 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 2011 dalla ditta GeoPolaris srl nell'area portuale di Livorno a cura dell'Autorità Portuale, al fine della redazione del PRP.
- 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.
- 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.

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.

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

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 2.1).

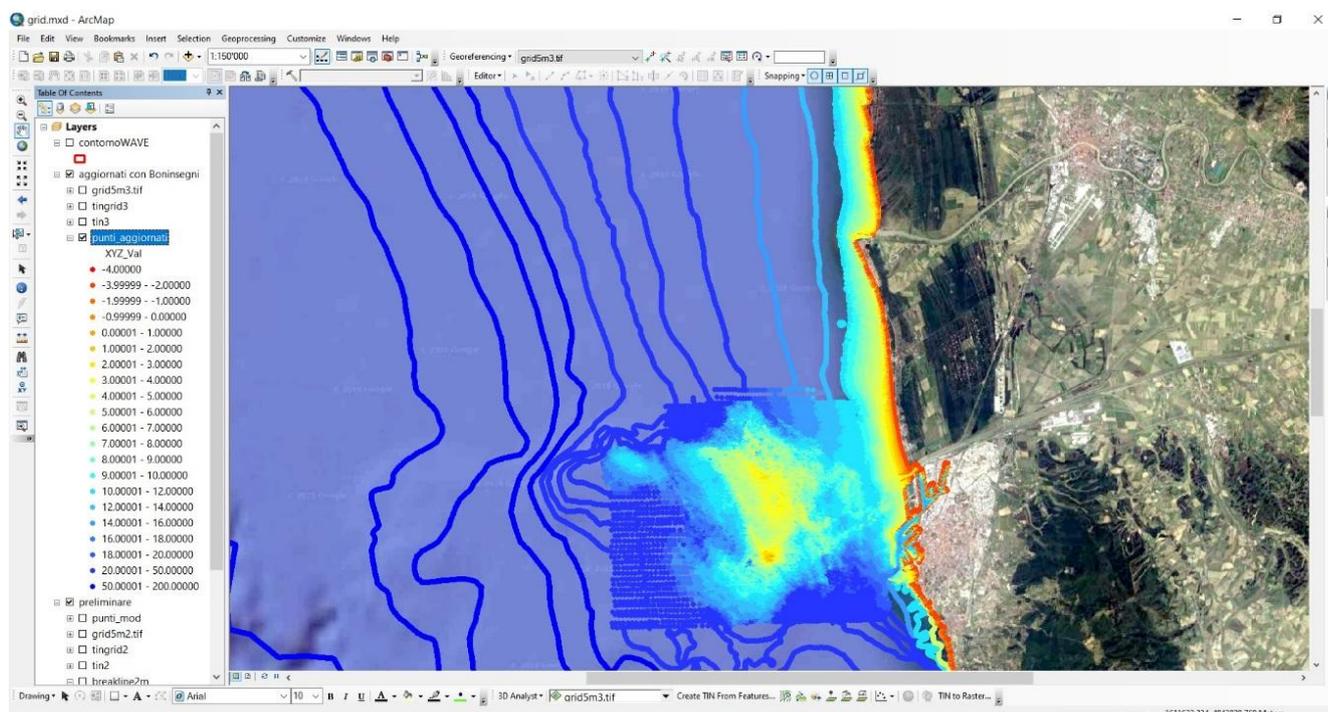


Figura 2.1 – Progetto GIS contenente i punti dei rilievi batimetrici utilizzati per costruire le batimetrie del modello.

I moduli del software Delft 3D utilizzano, in generale, griglie strutturate 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 2.2 (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 2.2 (immagine in basso), è invece unica, dal momento che l'impiego di più griglie annidate penalizza l'accuratezza dei calcoli idrodinamici.

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 2.3 si riporta la batimetria sull'intera griglia di calcolo WAVE, mentre Figura 2.4, Figura 2.5 e Figura 2.6 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:

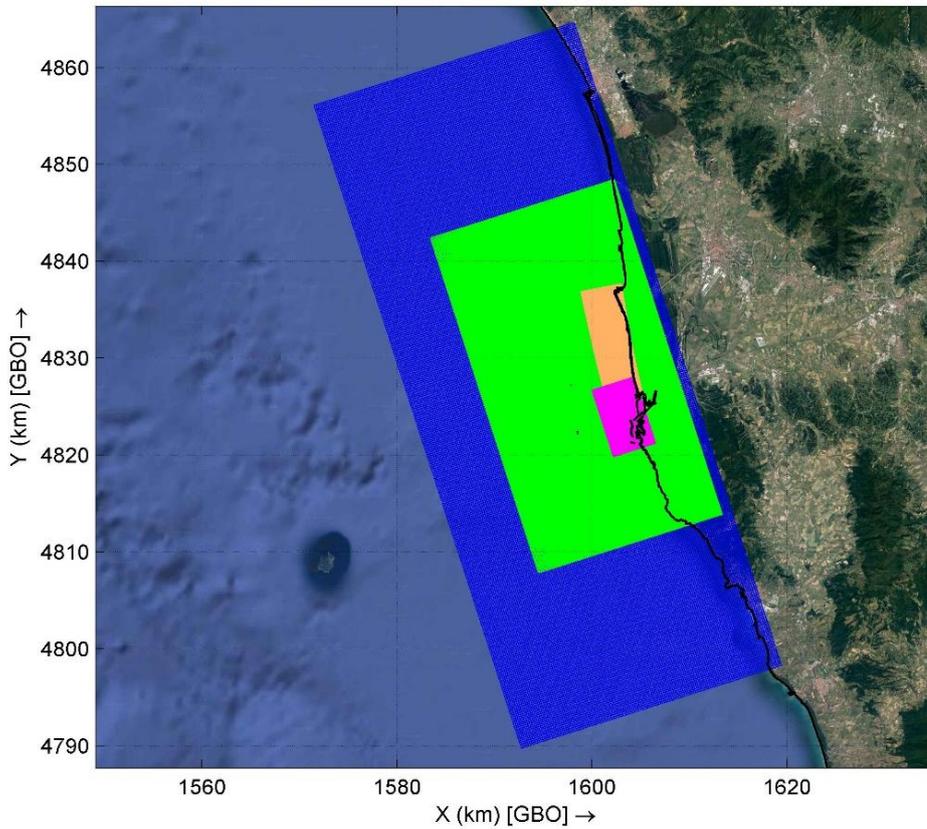
Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Griglie Delft3D-WAVE



Griglia Delft3D-FLOW e Delft3D-WAVE

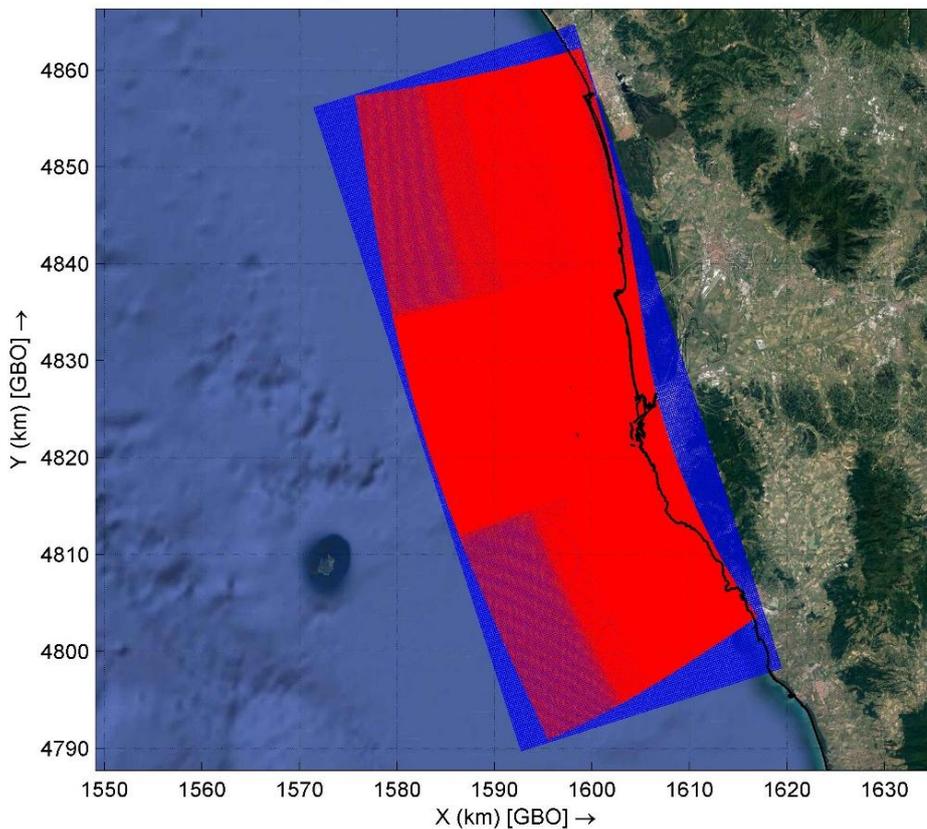


Figura 2.2 – Griglie di calcolo dei modelli Delft3D-WAVE(in alto) e Delft3D-FLOW (in basso)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Batimetria - Stato di fatto

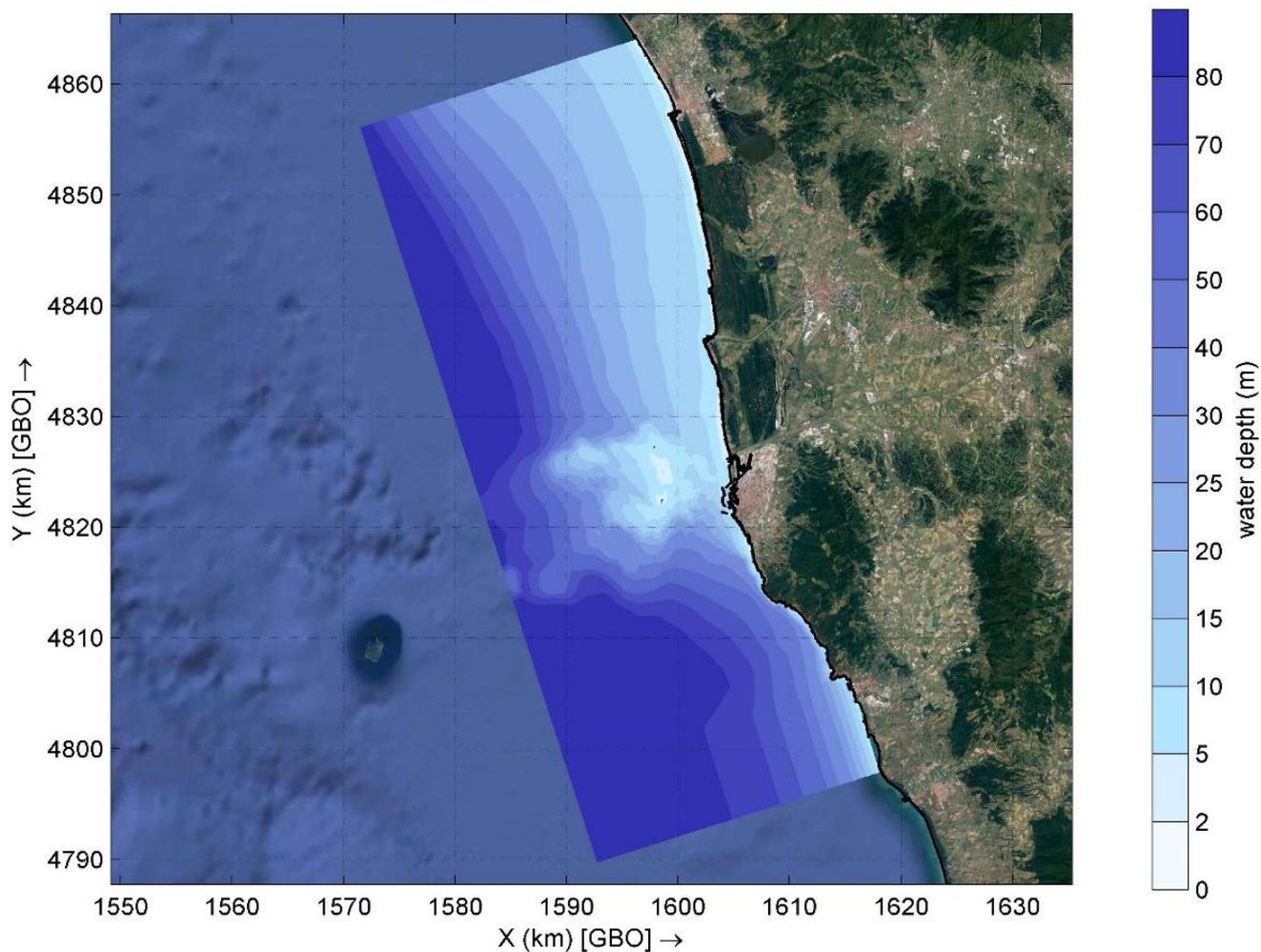


Figura 2.3 – Batimetria dello stato di fatto rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW (batimetria della griglia con risoluzione 200 m del modulo WAVE)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Batimetria - Stato di fatto - Particolare

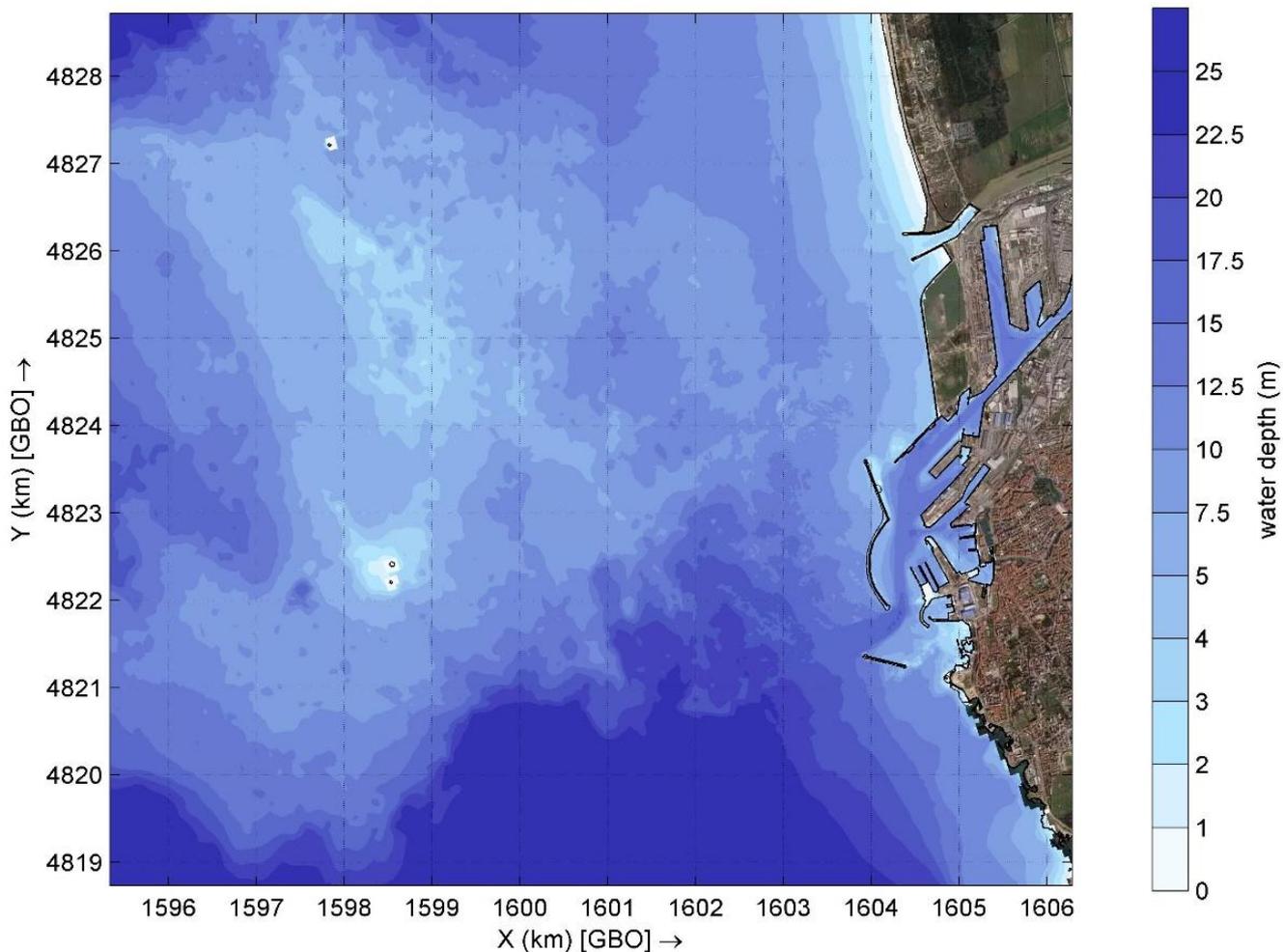


Figura 2.4 – Batimetria dello stato di fatto rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW (particolare delle griglie a maggiore risoluzione in corrispondenza delle Secche della Meloria e del porto di Livorno).

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Batimetria - Progetto Configurazione 1 - Particolare

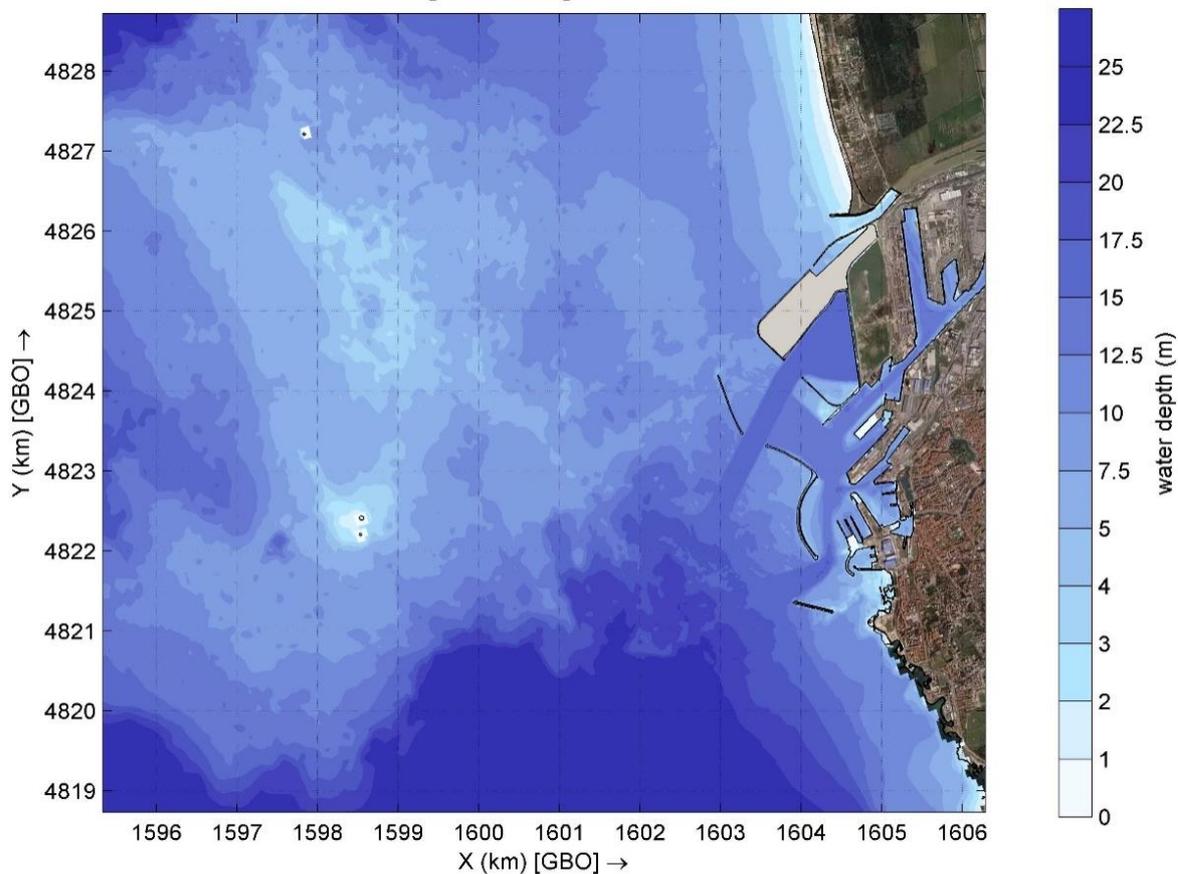


Figura 2.5 – Batimetria della configurazione di progetto 1 rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW (particolare delle griglie a maggiore risoluzione in corrispondenza delle Secche della Meloria e del porto di Livorno).

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Batimetria - Progetto Configurazione 2 - Particolare

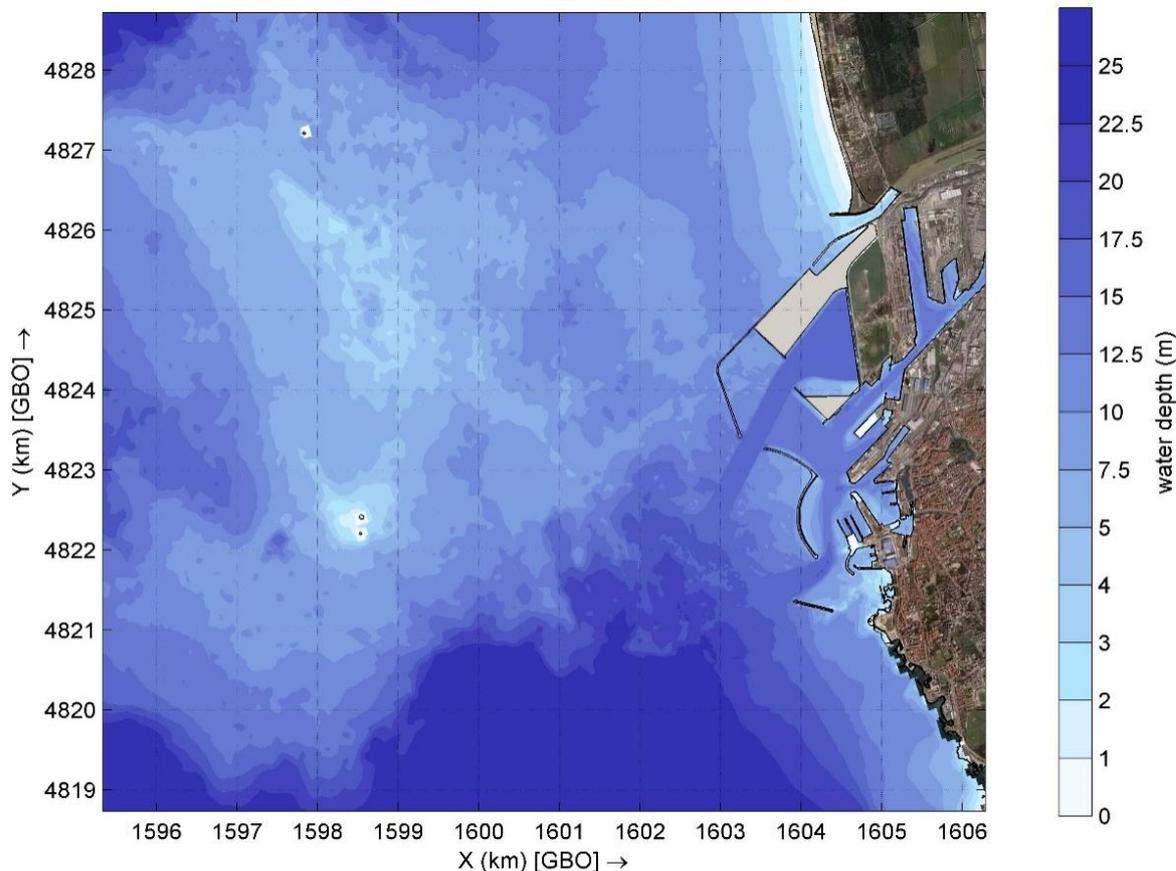


Figura 2.6 – Batimetria della Configurazione di progetto 2 rappresentata nei modelli Delft3D-WAVE e Delft3D-FLOW (particolare delle griglie a maggiore risoluzione in corrispondenza delle Secche della Meloria e del porto di Livorno).

2.3 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.

L'analisi delle portate solide dei due principali corsi d'acqua che insistono sul litorale (l'Arno e, più a Nord, il Serchio) non è affrontata nella presente indagine perché le foci di tali corsi d'acqua sono distanti dall'area portuale e non possono essere influenzate dall'intervento in progetto.

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 3.

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.

R.T.P.: F&M Ingegneria SpA – Haskoning DHV Nederland B.V. – HS Marine Srl – G&T Srl

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

Sono stati presi in esame, a tale scopo, i dati edimentologici 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.

La mappa di Figura 2.7 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 2.7 (a destra) rappresenta il particolare della mappa nel tratto di interesse per lo studio, che va dal Porto di Livorno alla foce dell'Arno. In tale tratto, e soprattutto a Sud, 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 μm . 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.

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 μm .

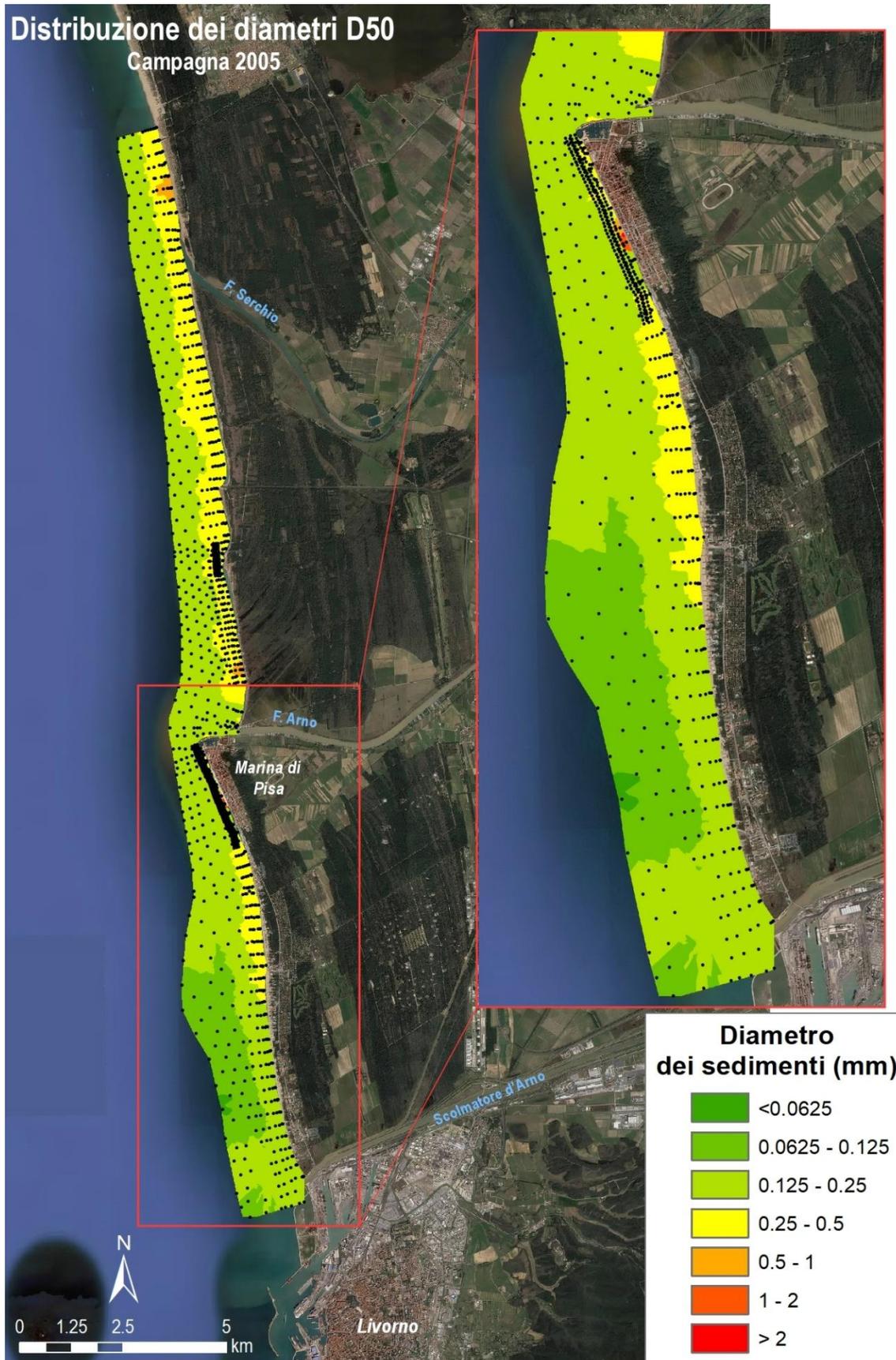


Figura 2.7 – Mappatura del diametro medio D_{50} dei sedimenti (elaborazione GIS dei dati della campagna 2005 della Provincia di Pisa)

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

2.4 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 2.1:

- è stata utilizzata una griglia strutturata curvilinea a maglie quadrangolari, predisponendo griglie diverse per ogni scenario analizzato (Stato di Fatto –SDF- e di Progetto, nelle configurazioni 1 e 2);
- 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 ($40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ secondo Strickler), mentre sugli affioramenti rocciosi delle Secche della Meloria ed in corrispondenza delle strutture portuali, è stato usato un valore di 0.04 ($25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ 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 "eddyviscosity" 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 "eddydiffusivity" orizzontale è pari a $10 \text{ m}^2/\text{s}$;
- i sedimenti sono rappresentati da un fuso avente diametro mediano $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ (§ 2.3);
- la densità dei sedimenti è di $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$, mentre lo spessore della coltre è positivo per profondità inferiori ai -10 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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.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	Specificata 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 2.1 – Impostazioni e parametri modellistici adottati per il modulo Delft3D-Flow.

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.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 2.2:

- la griglia utilizzata è strutturata curvilinea a maglie quadrangolari. Sono state predisposte 4 griglie diverse per ogni scenario analizzato (SDF, configurazioni di progetto 1 e 2) per un totale di 12 griglie (Figura 2.2);
- 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 (Hs, Tp, Dir) sono uniformi;
- lo spettro utilizzato per le onde è di tipo Jonswap con coefficiente di appuntamento 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 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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

Delft3D-WAVE	
Griglie di calcolo	
Tipo di griglie	Delft3D strutturata curvilinea
Batimetria	Specificata 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 2.2 – Impostazioni e parametri modellistici adottati per il modulo Delft3D-Wave.

2.5 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).

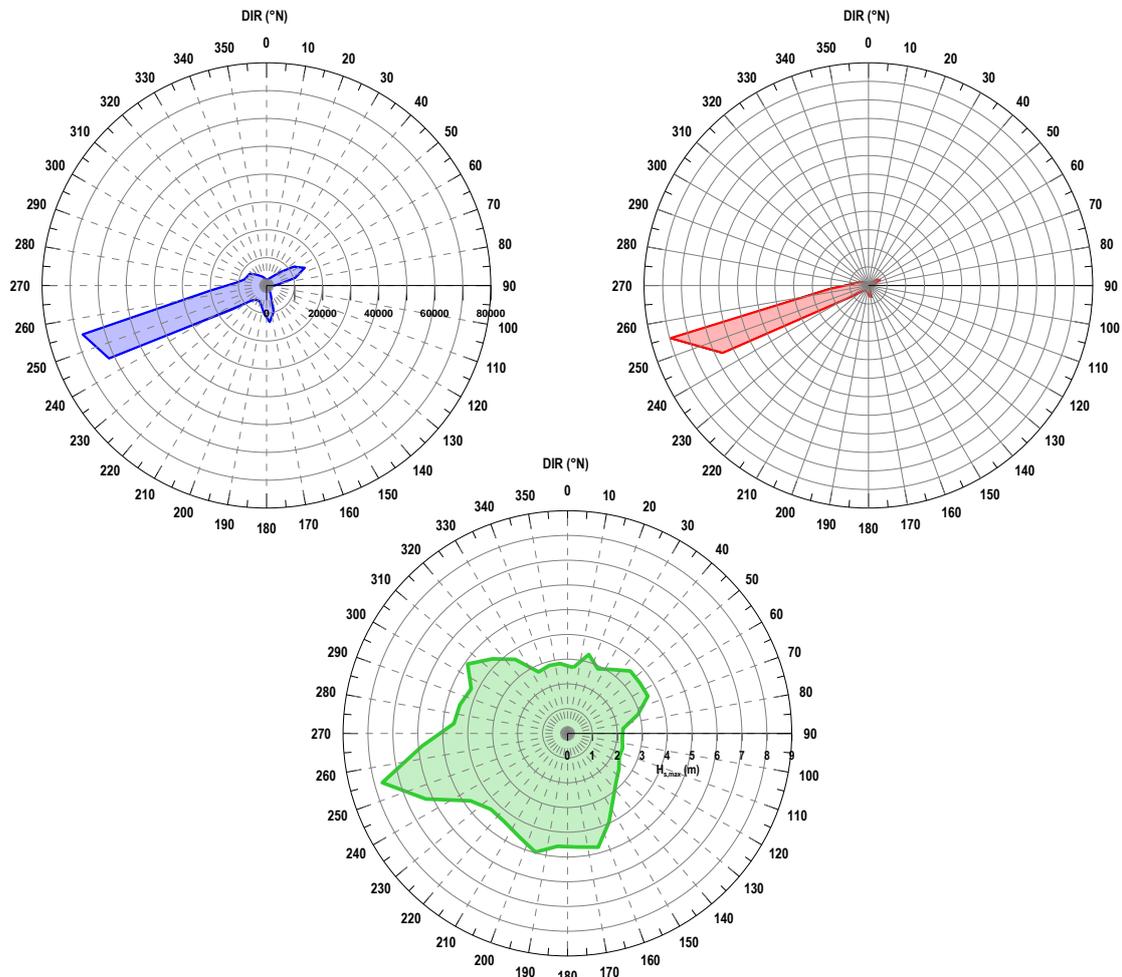


Figura 2.8 – Rose delle frequenze (blu), delle energie (rosso) e delle altezze significative massime (verde) (punto UNIGE 585, periodo 1979-2018)

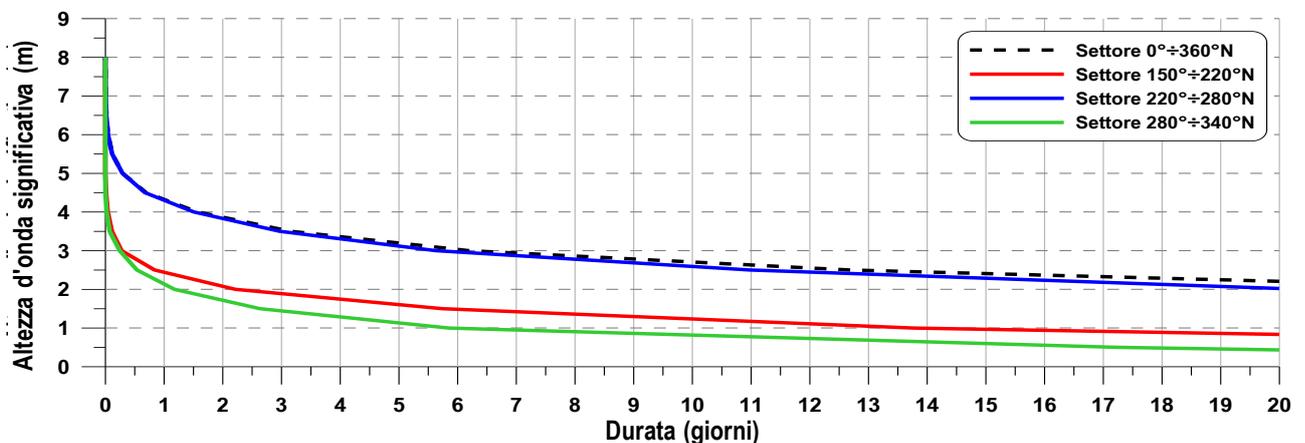


Figura 2.9 – Curve di durata dell'altezza significativa (punto UNIGE 585, periodo 1979-2018) per settore di provenienza

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.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 2.3 – 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.

2.6 Scenari analizzati

Sono state analizzate 3 configurazioni dell'infrastruttura portuale:

- stato di fatto (SDF),
- progetto configurazione 1,
- progetto configurazione 2.

Le configurazioni 1 e 2 (cfr. successiva Figura 2.10 si riferiscono rispettivamente alla soluzione progettuale così come individuata dal Documento Preliminare alla Progettazione (ovvero dal Piano Regolatore Portuale di Livorno) e al layout modificato dal R.T.P., in accordo con l'AdSP, inserendo la chiusura del varco nella Diga Nord in modo tale da ridurre le sollecitazioni del moto ondoso sulle opere interne, garantire una maggiore protezione dell'imboccatura e degli specchi acquei interni e migliorare l'operatività e la sicurezza sia dei nuovi bacini portuali che di quelli esistenti.

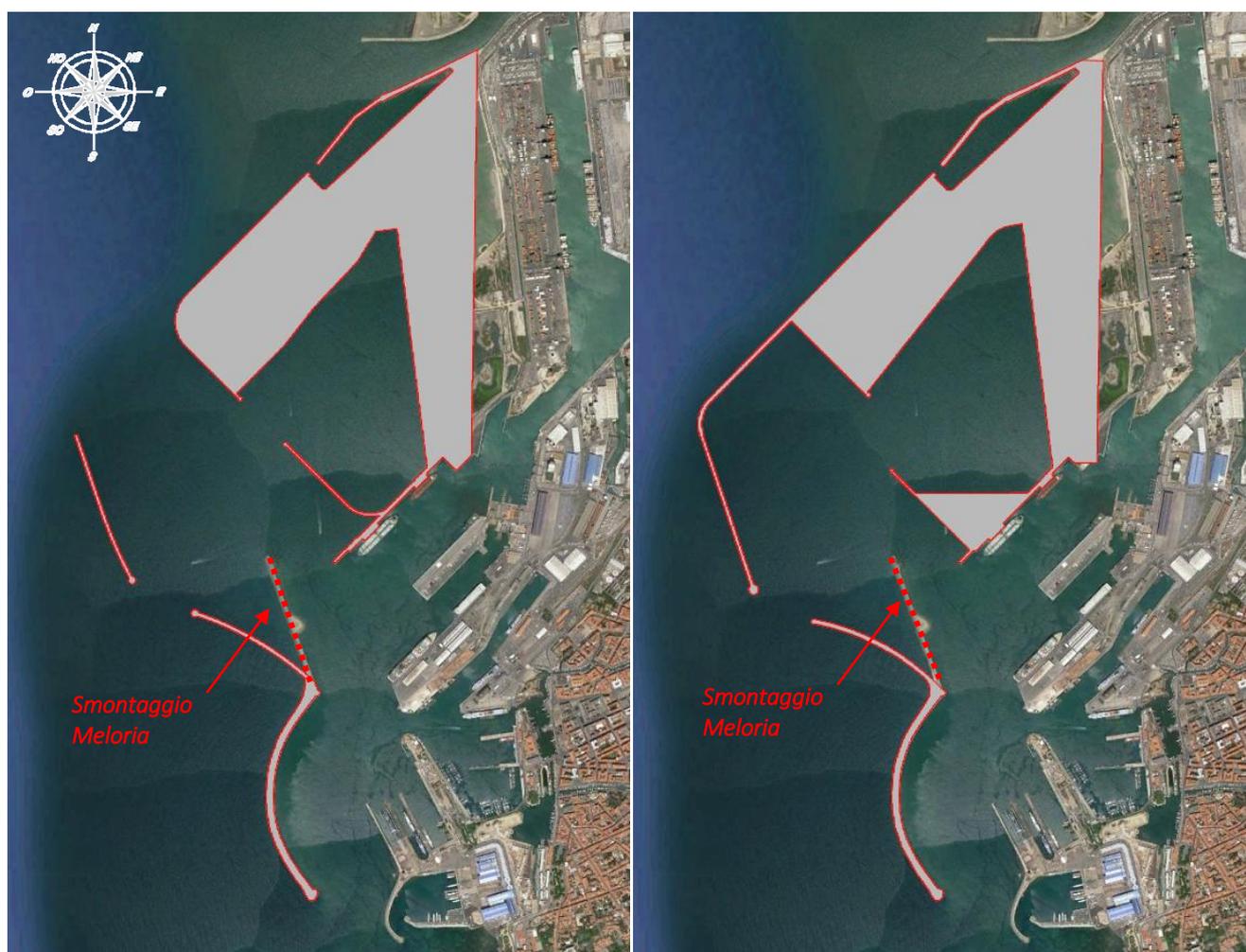


Figura 2.10 – Layout di progetto configurazione 1 (a sinistra) e 2 (a destra)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

Le simulazioni sono state effettuate per le tre mareggiate indicate nel paragrafo 2.5 (Tabella 2.3), 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 mediano uniforme pari a 200 µm (valore medio in base ai dati sedimentologici disponibili, si veda il par. 2.3).

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 2.4 sono elencate le 9 simulazioni effettuate, i cui risultati sono illustrati nei paragrafi che seguono.

Caso	Configurazione	Mareggiata	Durata
Circ 1	Stato di fatto	250°N	1 g/anno
Circ 2	Progetto Configurazione 1	250°N	1 g/anno
Circ 3	Progetto Configurazione 2	250°N	1 g/anno
Circ 4	Stato di fatto	170°N	1 g/anno
Circ 5	Progetto Configurazione 1	170°N	1 g/anno
Circ 6	Progetto Configurazione 2	170°N	1 g/anno
Circ 7	Stato di fatto	290°N	1 g/anno
Circ 8	Progetto Configurazione 1	290°N	1 g/anno
Circ 9	Progetto Configurazione 2	290°N	1 g/anno

Tabella 2.4 – 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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

2.7 Risultati delle simulazioni

2.7.1 Propagazione del moto ondoso

La Figura 2.11 riporta il campo d'onda calcolato con il modello nel caso della mareggiata più intensa tra quelle considerate, proveniente dal settore di 250°N, 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 2.12 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 sottocosta dopo aver aggirato le Secche su entrambi i lati.

Le successive immagini di Figura 2.13 e Figura 2.14 mostrano il medesimo campo d'onda calcolato con il modello nelle due configurazioni di progetto, tra le quali, come si è detto, la principale differenza sta nel fatto che, nella configurazione 2, la Diga Nord che delimita l'area portuale è prolungata fino a raggiungere la diga foranea più esterna, mentre nella configurazione 1 le due dighe sono staccate e lasciano aperto un varco di circa 860 m.

Il confronto tra la mappa relativa allo stato di fatto e quelle relative alle configurazioni 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 (da Figura 2.15 a Figura 2.17) rappresentano, con maggiore dettaglio e con una diversa scala dei colori, il campo d'onda nelle immediate adiacenze dell'area portuale, per i tre casi esaminati. Le mappe evidenziano che le differenze tra le tre 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, nelle configurazioni di progetto si riduce apprezzabilmente, soprattutto sul lato Sud della foce.

Le mappe di dettaglio evidenziano anche le differenze tra le 2 configurazioni di progetto. Queste consistono essenzialmente in una significativa attenuazione del moto ondoso all'interno della darsena portuale, che si verifica nella Configurazione 2 per effetto della chiusura del varco nella Diga Nord.

Le successive immagini (da Figura 2.18 a Figura 2.24) riportano i campi d'onda ottenuti per la mareggiata proveniente dalla direzione 170°N con altezza significativa dell'onda al largo di 2.44 m,

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 di fattibilità tecnico economica	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx
---	--	--

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 2.18 evidenzia in primo luogo come, per effetto sia della conformazione del litorale, sia della presenza delle Secche della Meloria, le onde provenienti dal settore 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 2.22 a Figura 2.24) 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 2.25 a Figura 2.31), infine, riportano i risultati delle simulazioni effettuate con il modello del moto ondoso per la mareggiata proveniente dalla direzione 290°N, 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 2.25 e Figura 2.26 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.

Le immagini di dettaglio (da Figura 2.27 e Figura 2.31), che mettono a confronto i risultati delle simulazioni per le due Configurazioni di progetto, evidenziano a loro volta il significativo effetto di attenuazione del moto ondoso all'interno della darsena portuale che si verifica per la Configurazione 2, in ragione del prolungamento della Diga Nord.

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

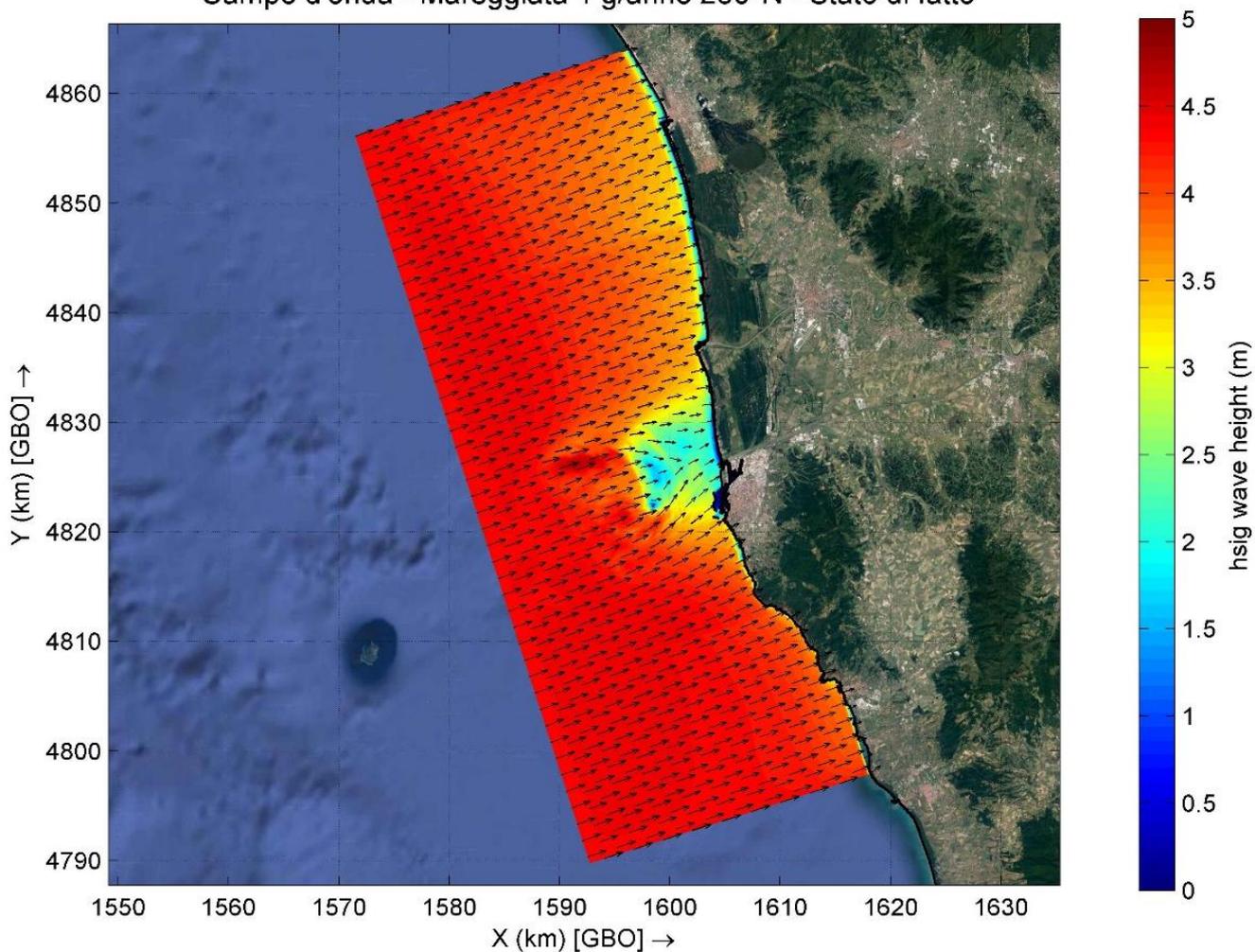


Figura 2.11 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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

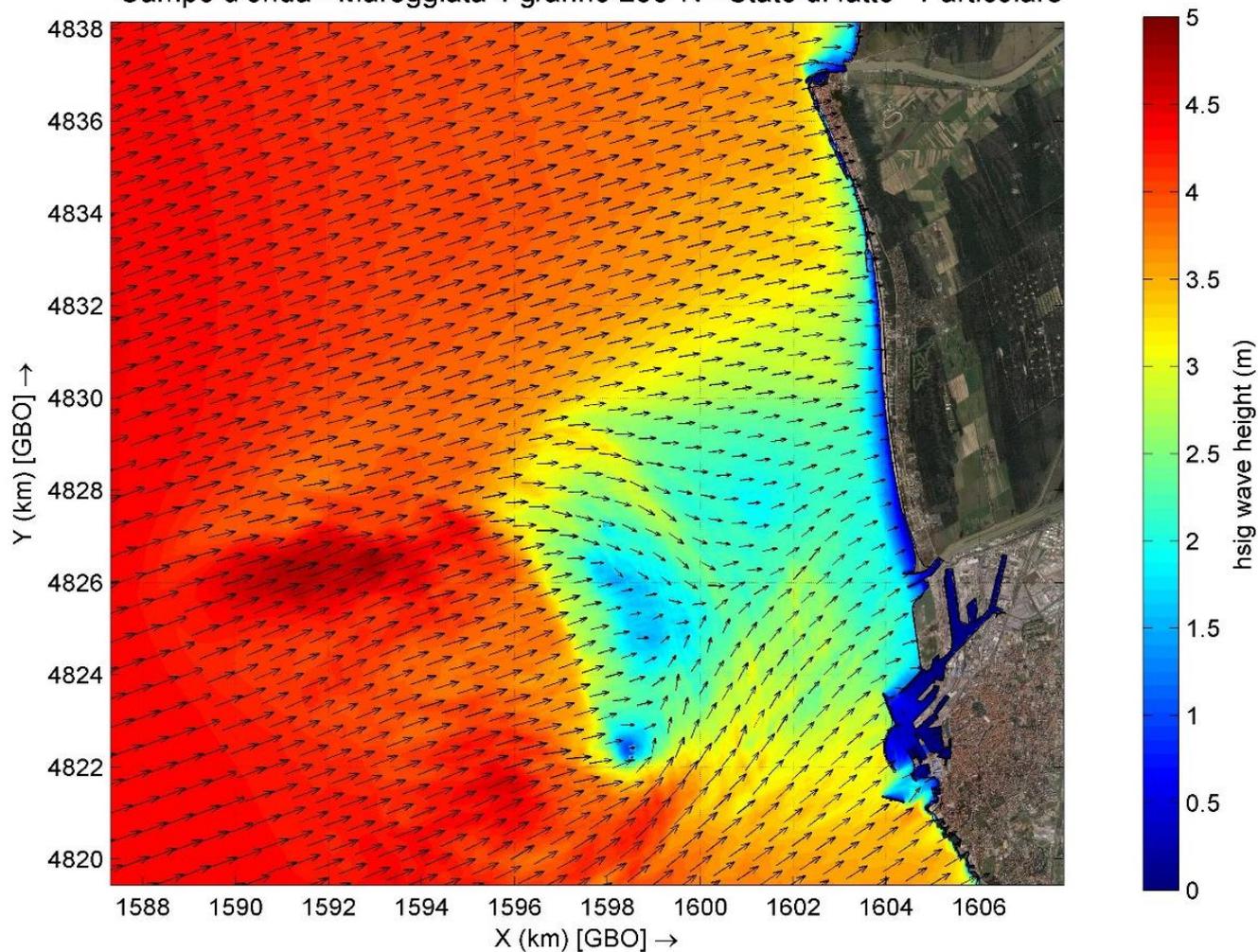


Figura 2.12 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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

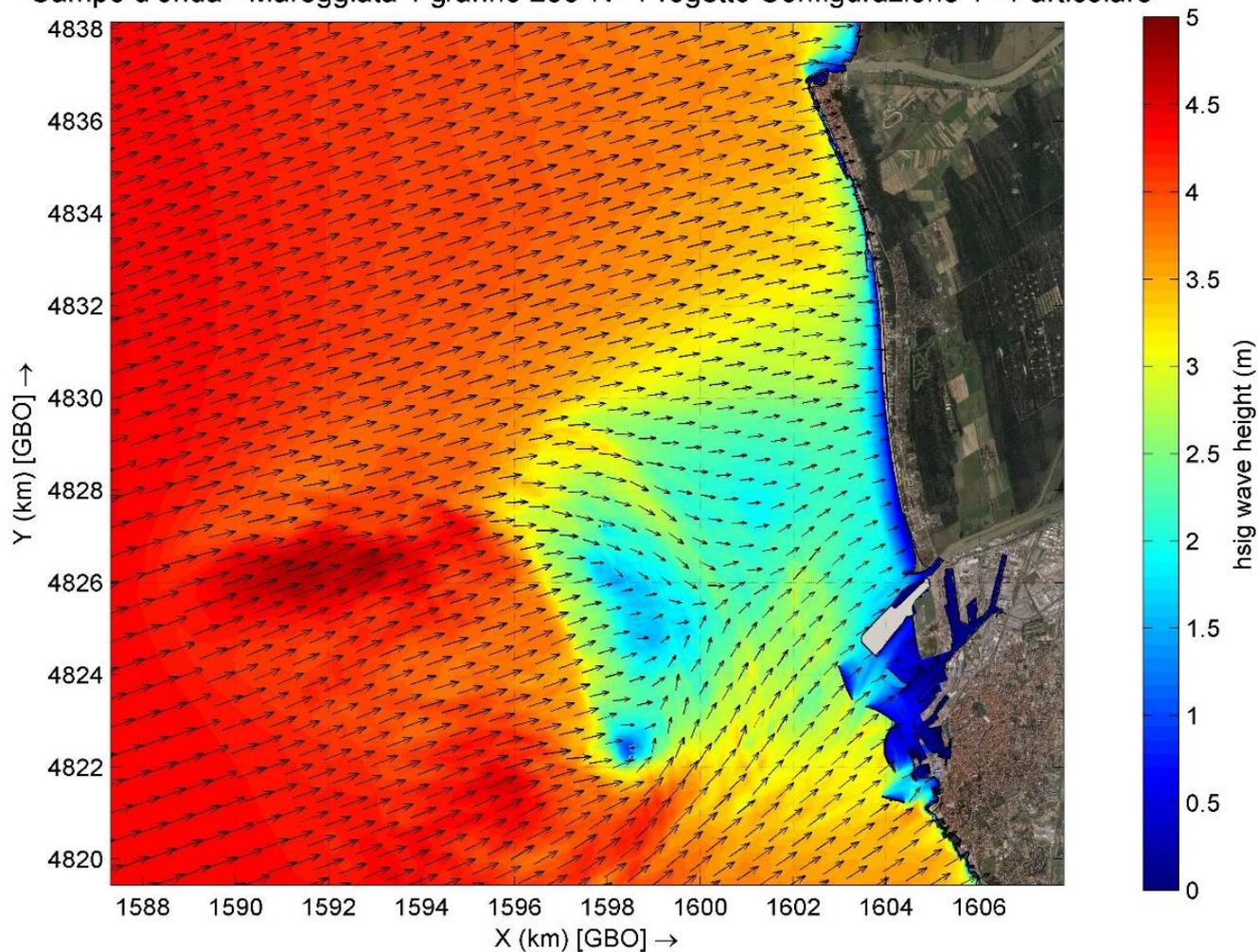


Figura 2.13 – Campo d'onda per la Configurazione 1 di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 250°N - Progetto Configurazione 2 - Particolare

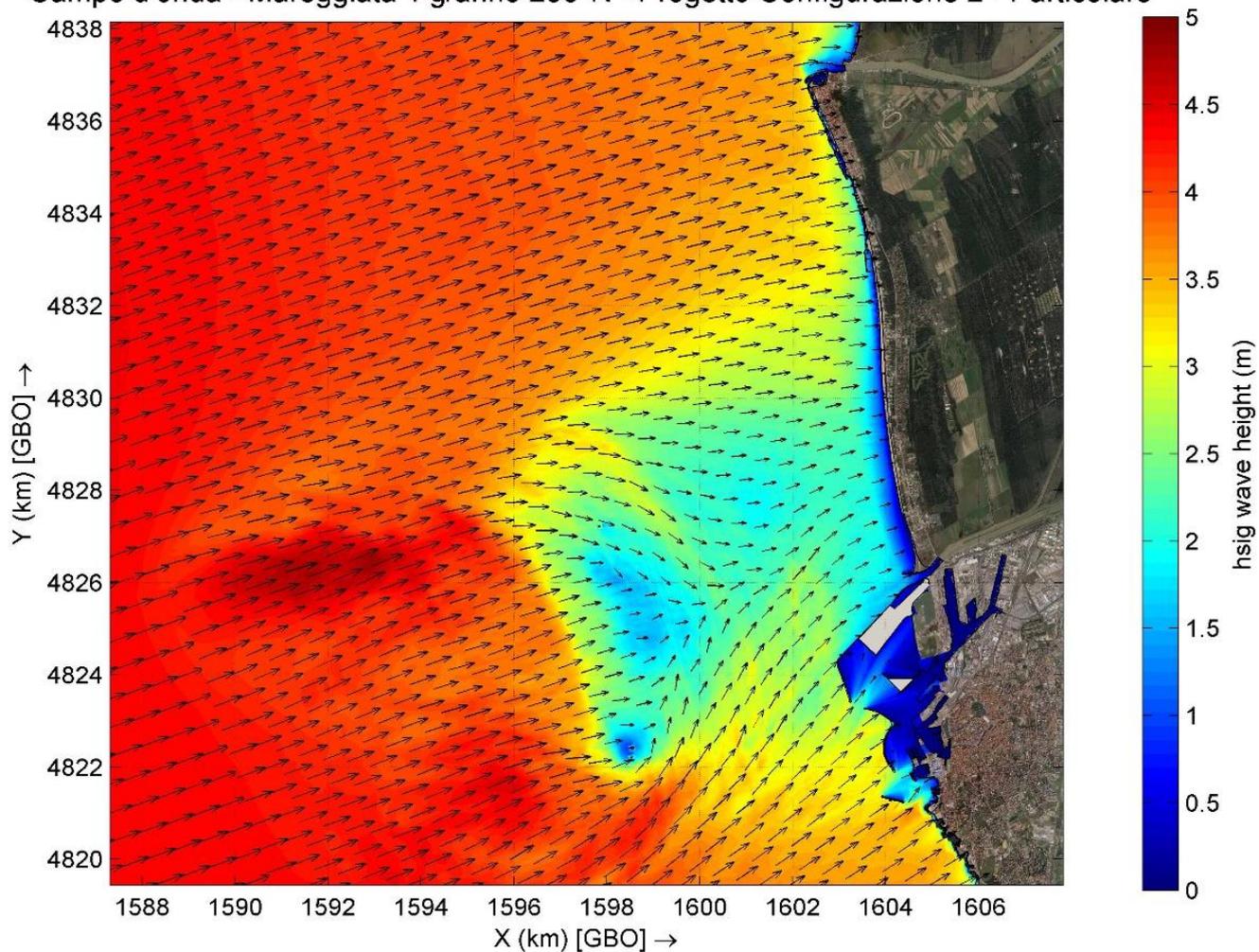


Figura 2.14 – Campo d'onda per la Configurazione 2 di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

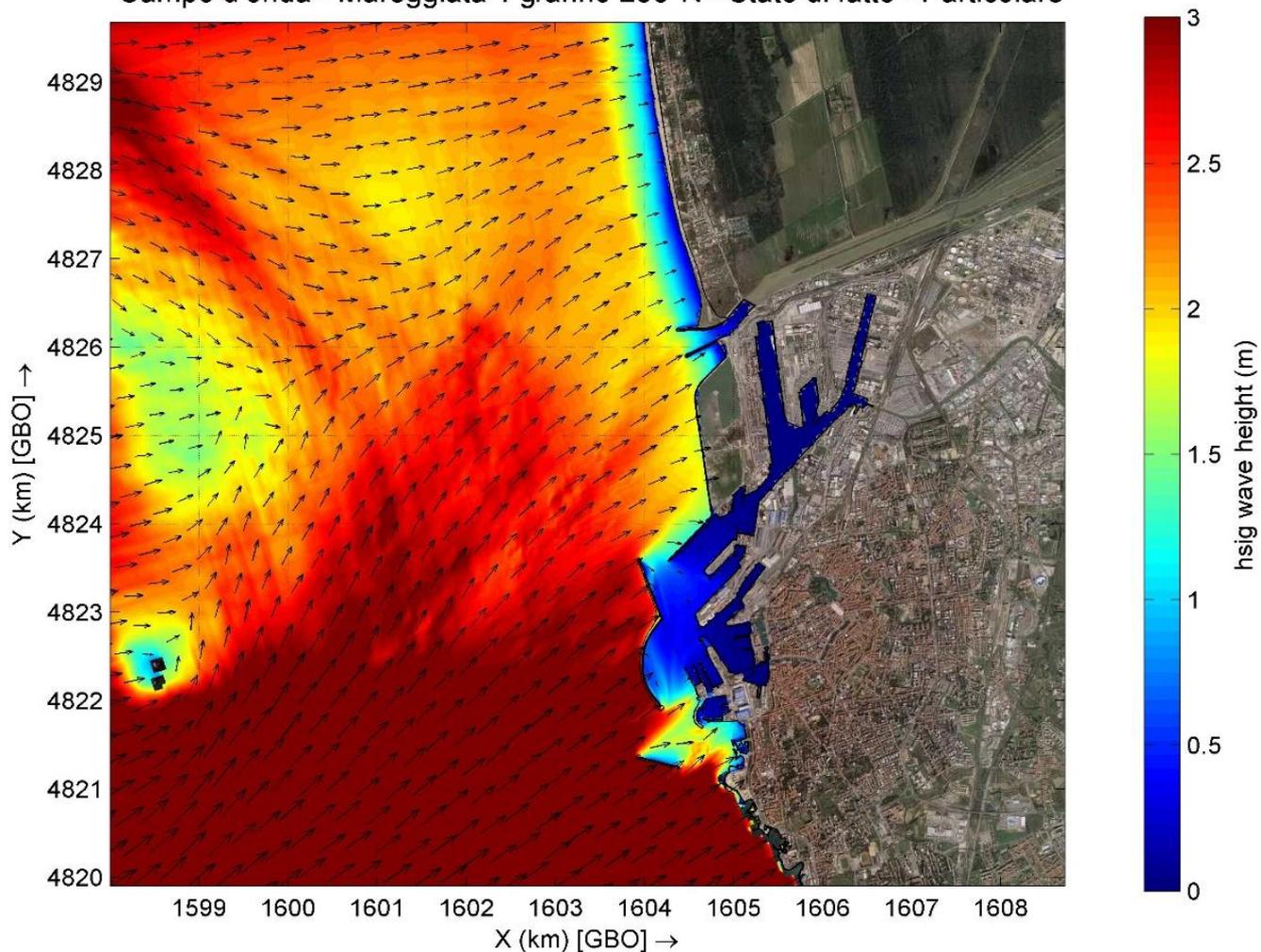


Figura 2.15 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

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

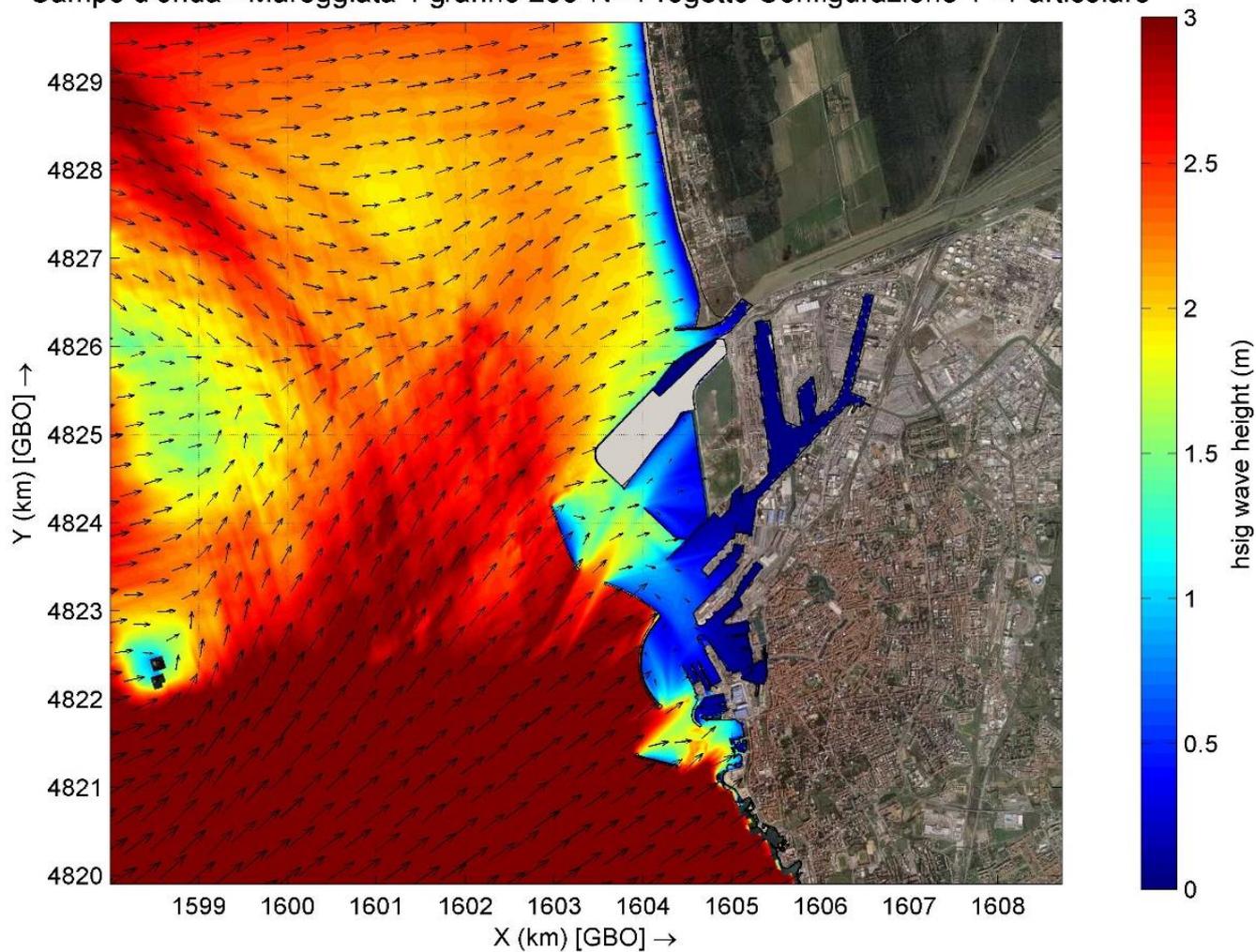


Figura 2.16 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 1 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 250°N - Progetto Configurazione 2 - Particolare

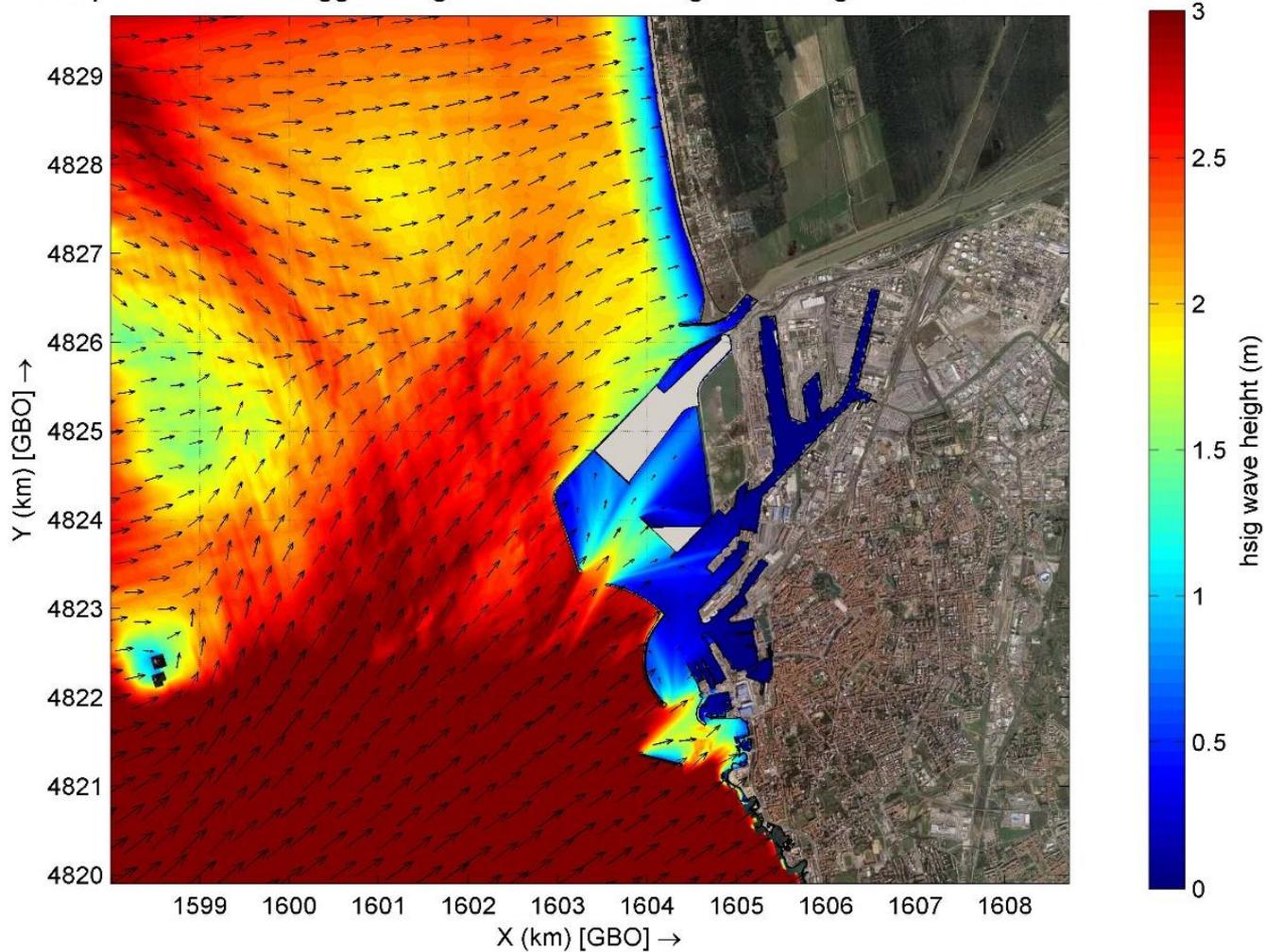


Figura 2.17 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 2 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

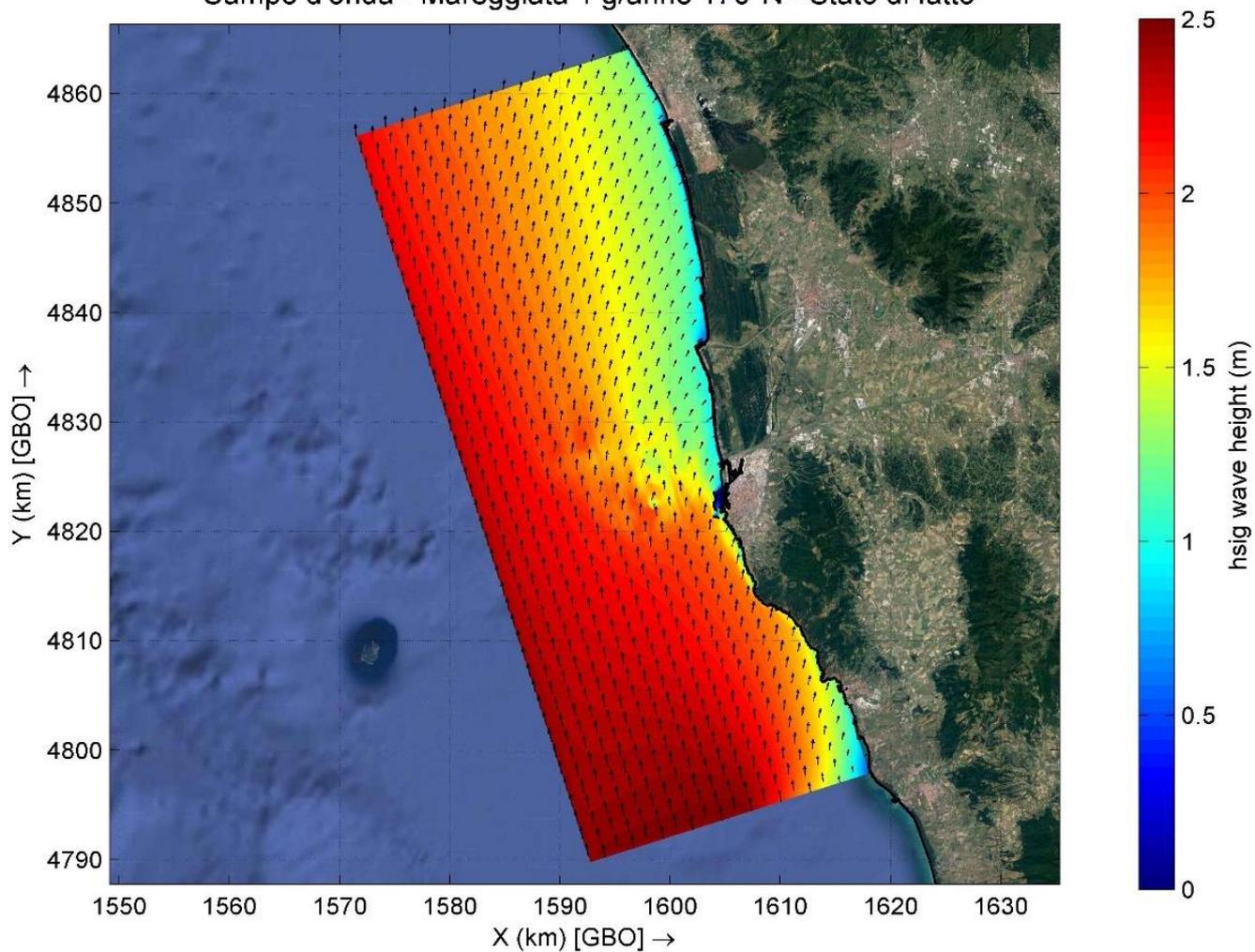


Figura 2.18 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

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

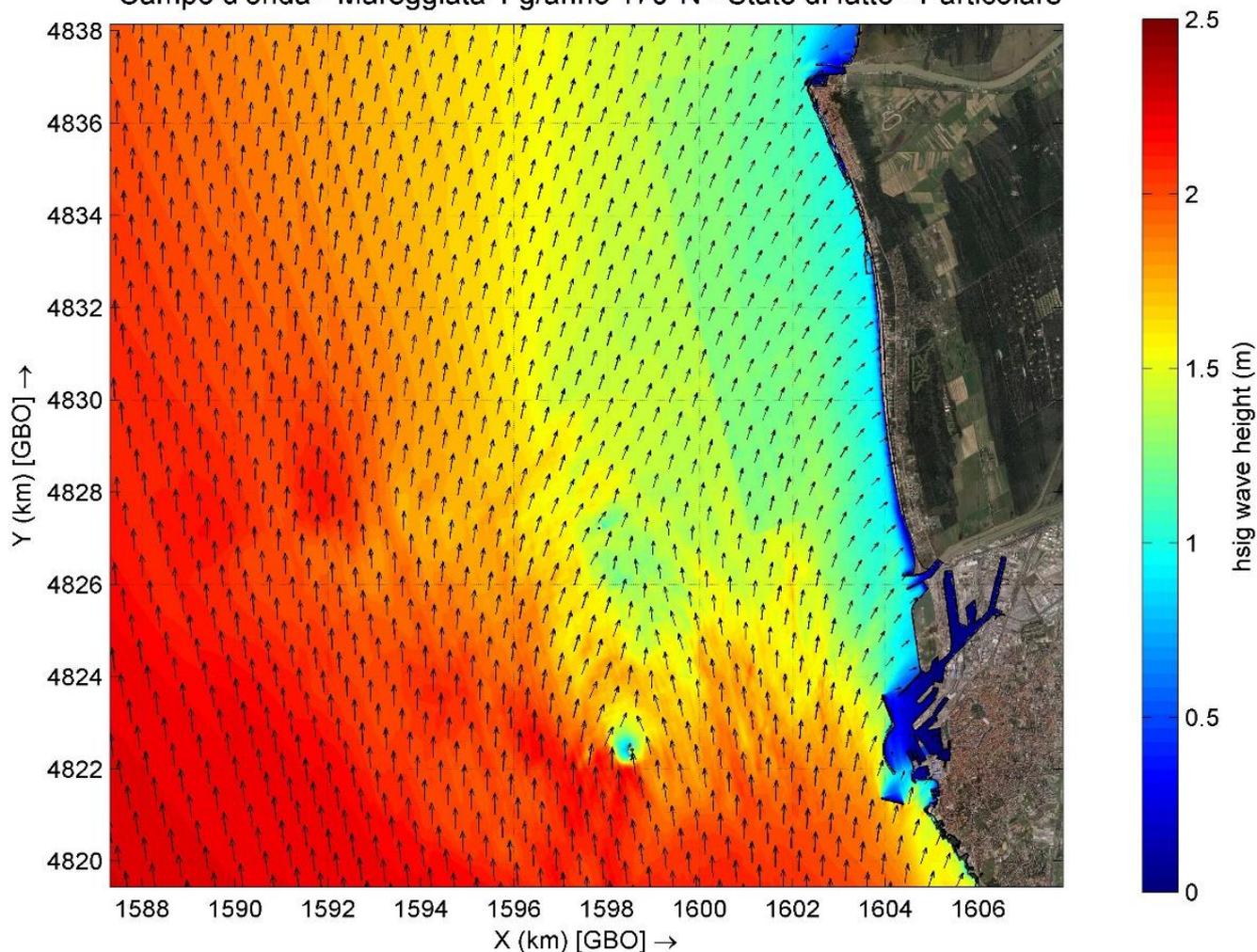


Figura 2.19 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

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

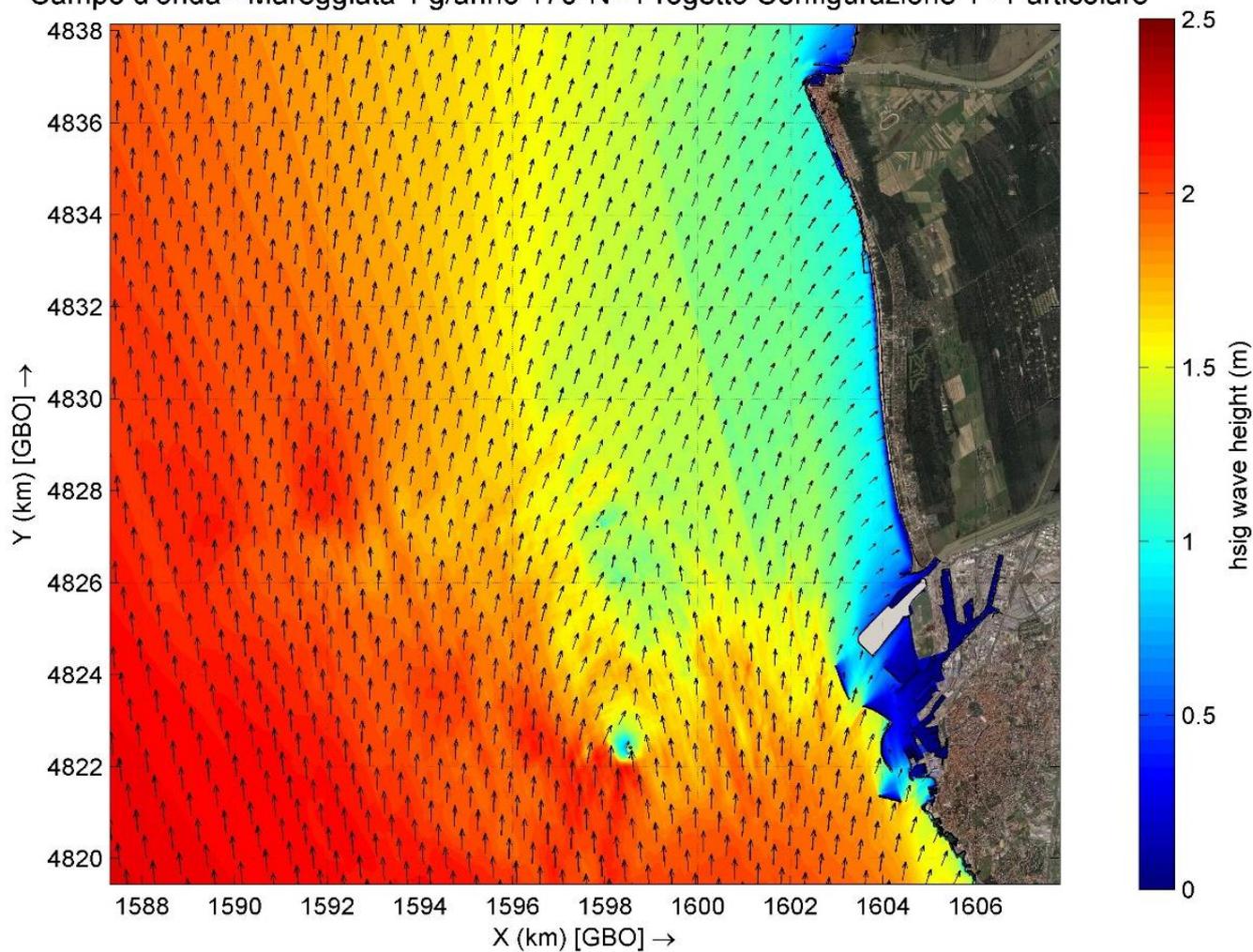


Figura 2.20 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 1 di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 170°N - Progetto Configurazione 2 - Particolare

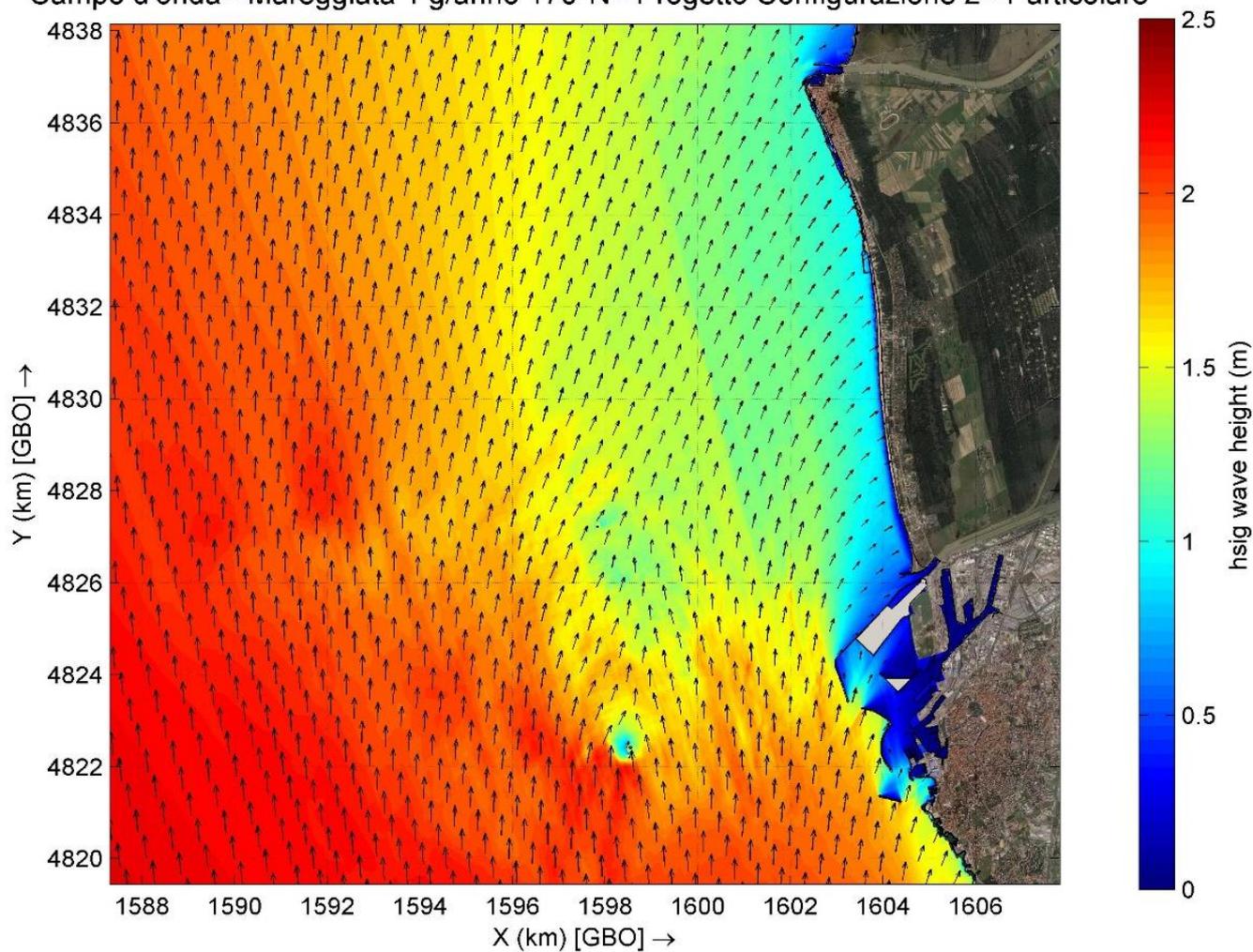


Figura 2.21 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 2 di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

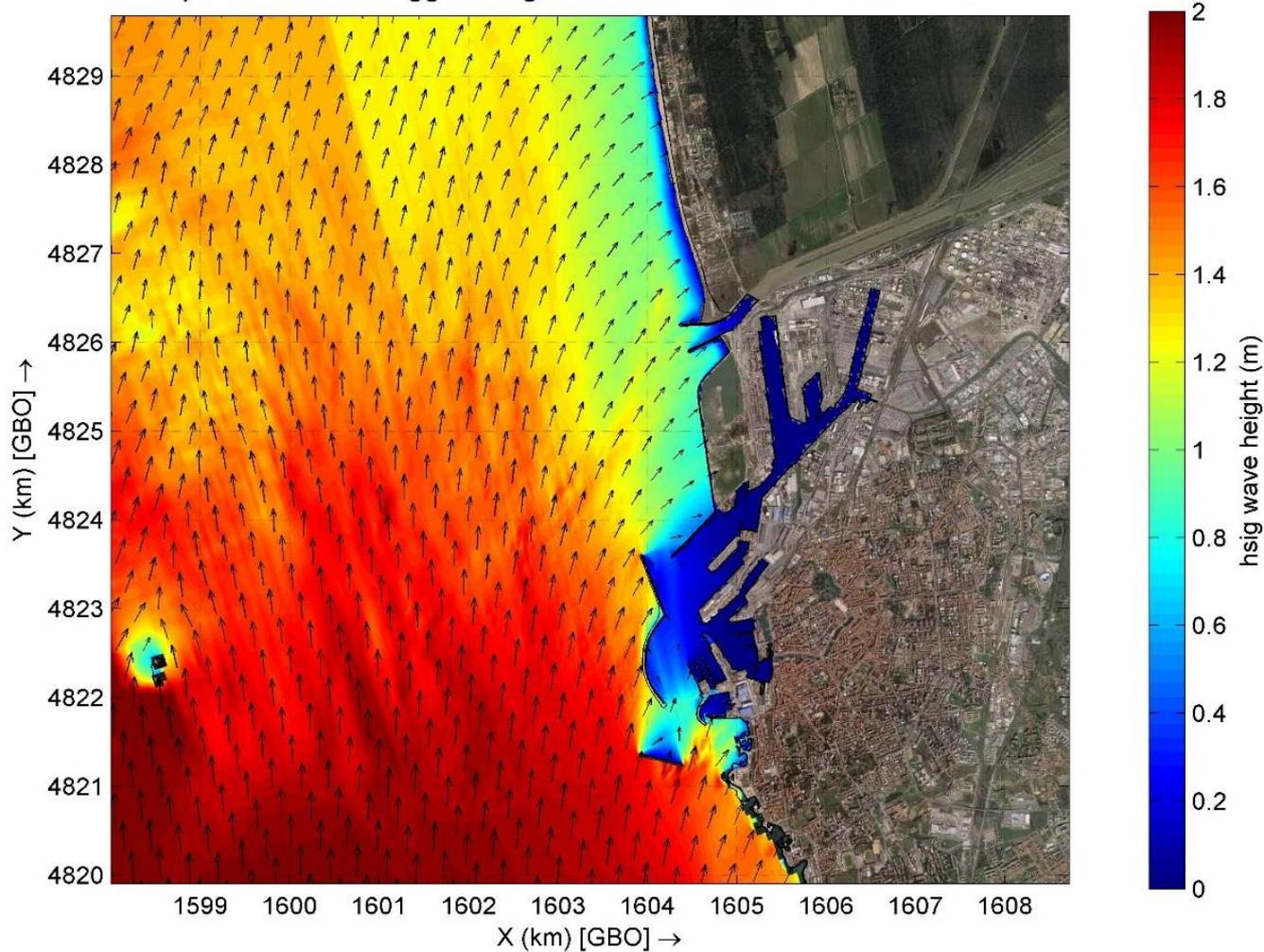


Figura 2.22 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

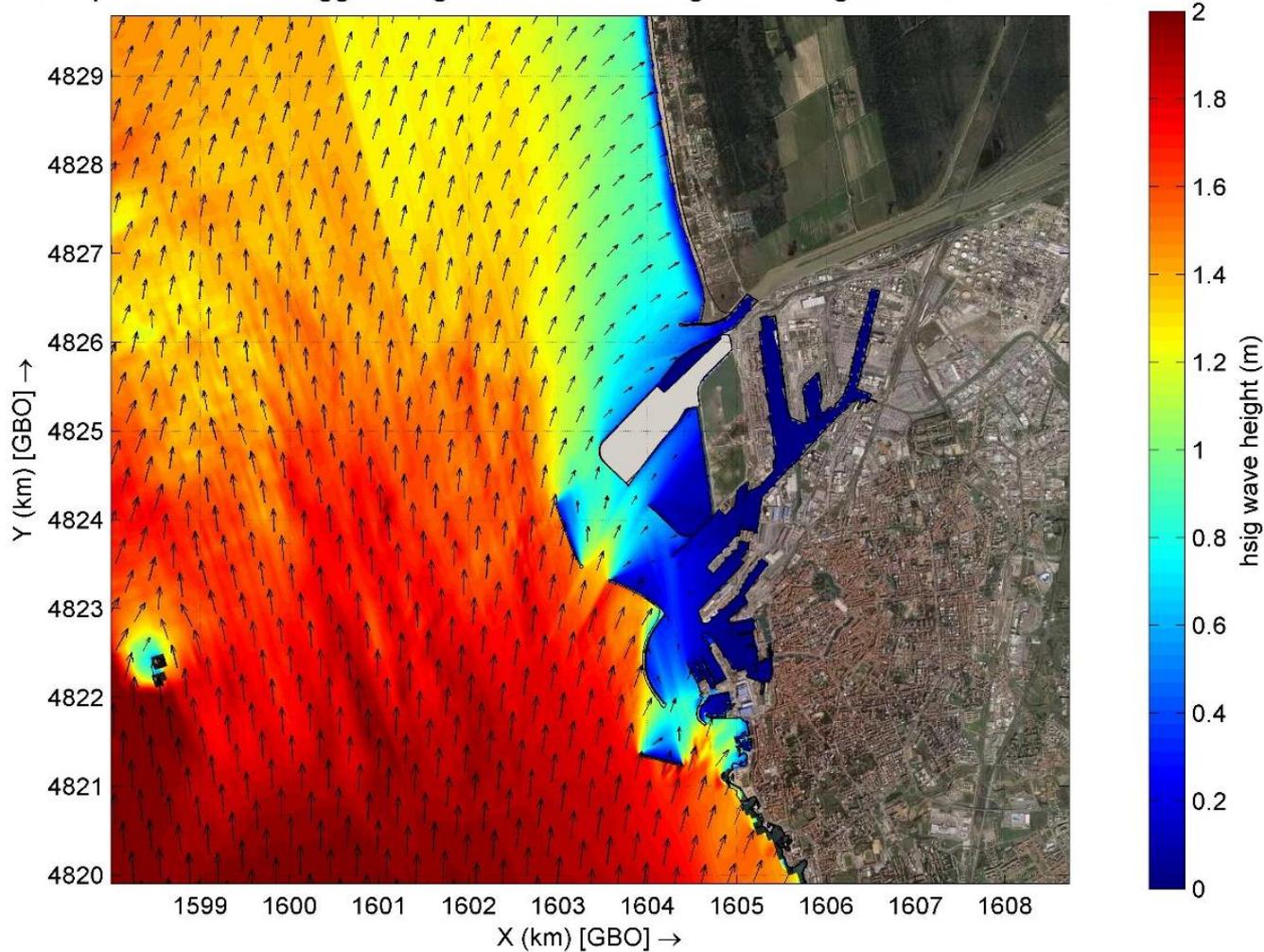


Figura 2.23 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 1 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 170°N - Progetto Configurazione 2 - Particolare

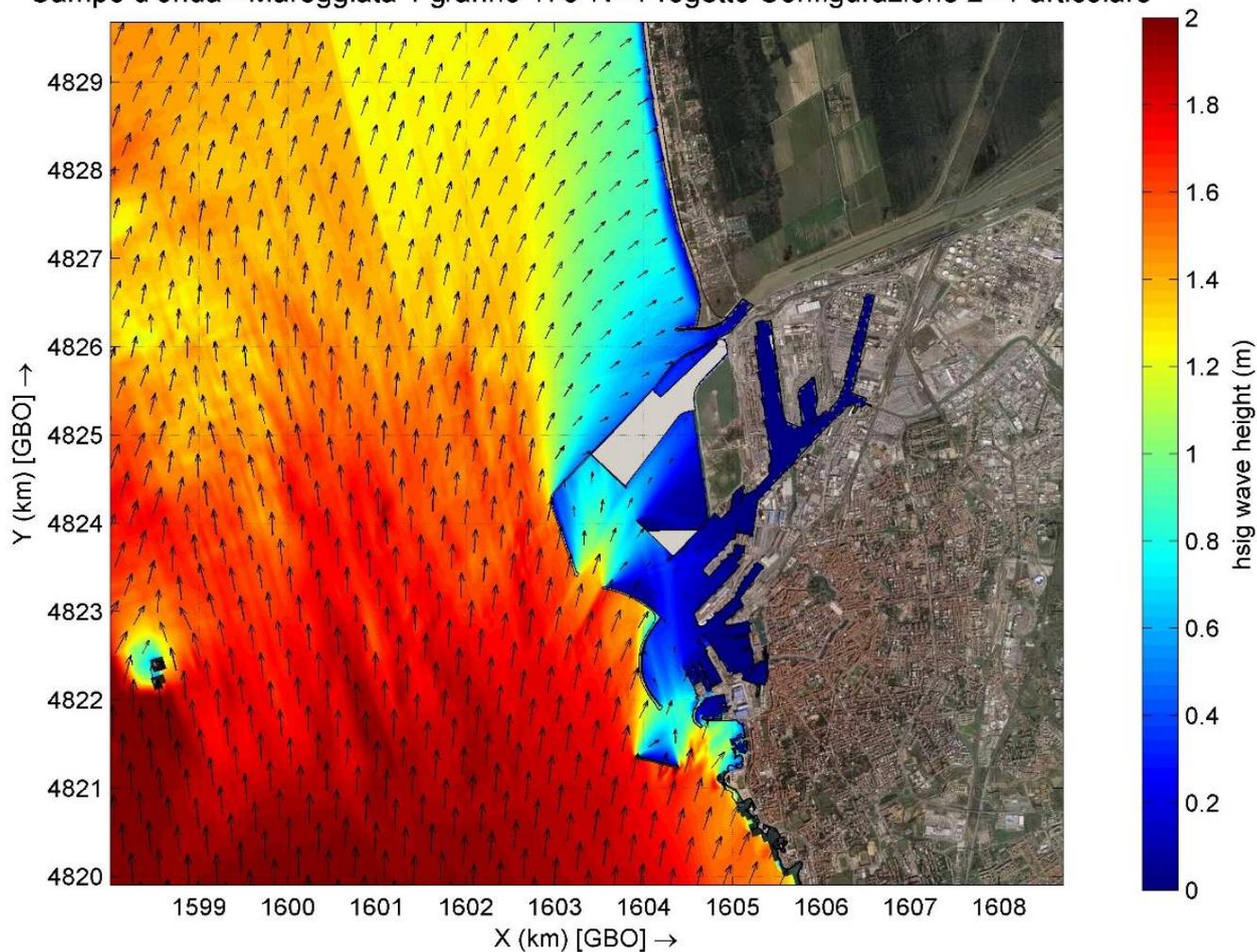


Figura 2.24 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 2 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

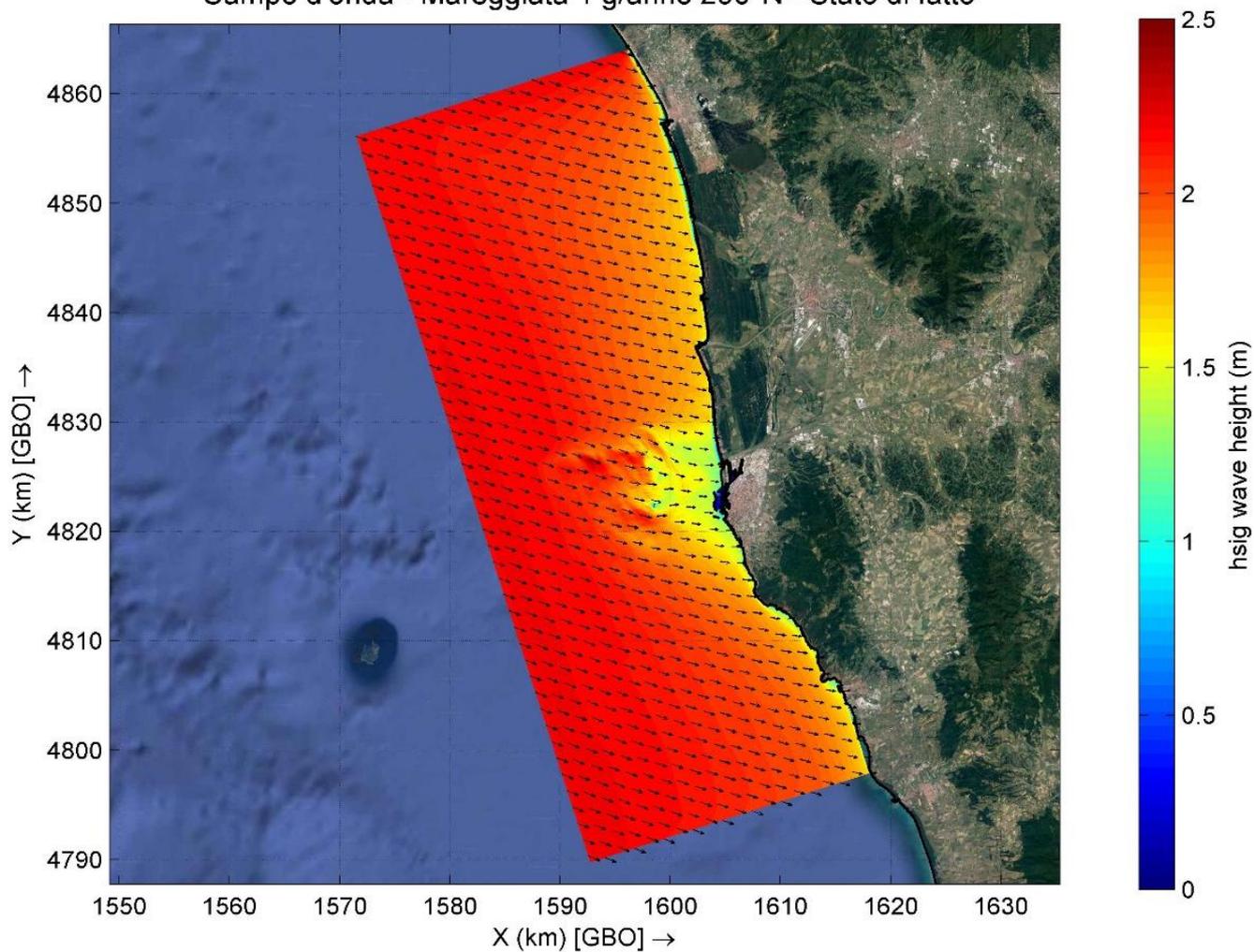


Figura 2.25 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

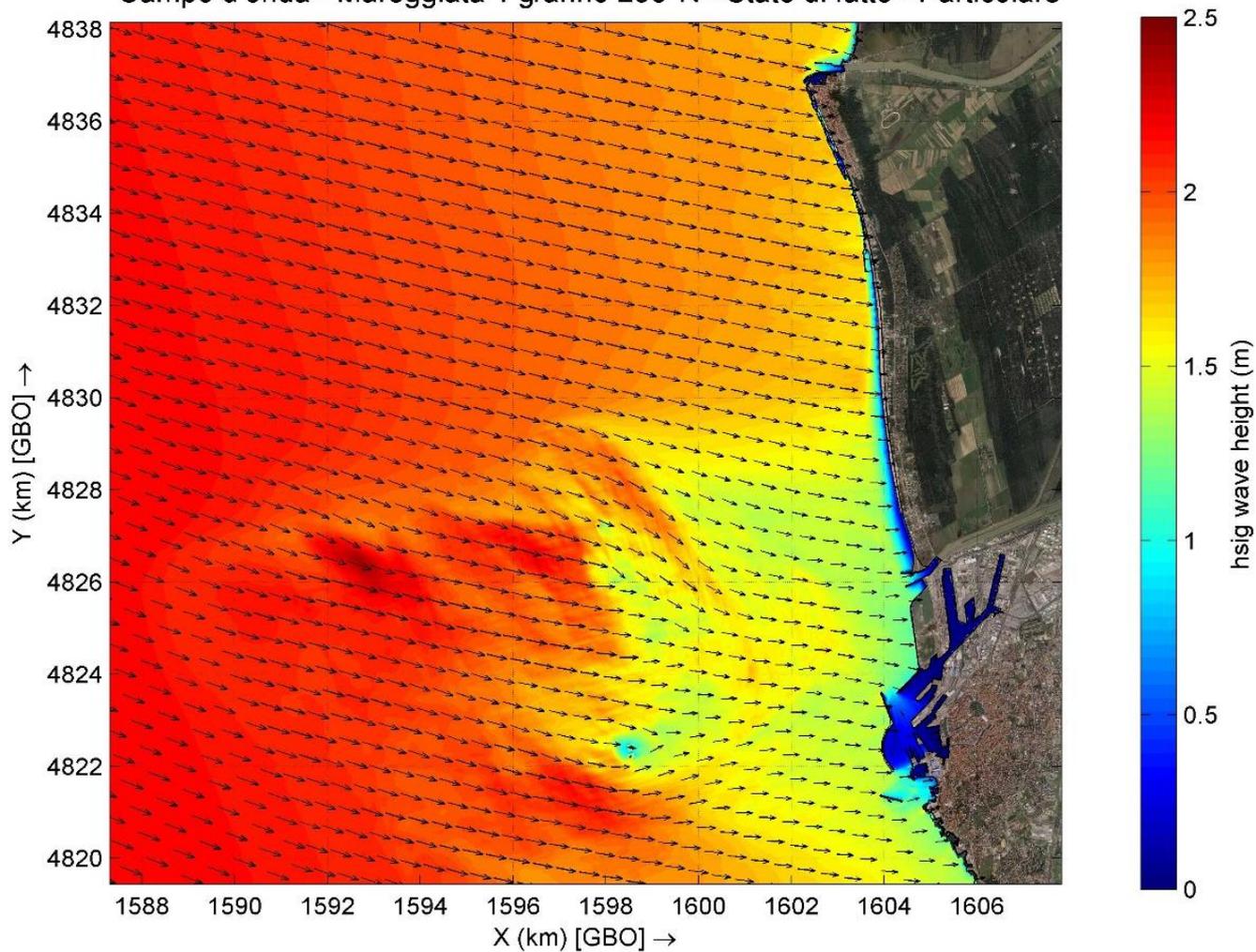


Figura 2.26 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

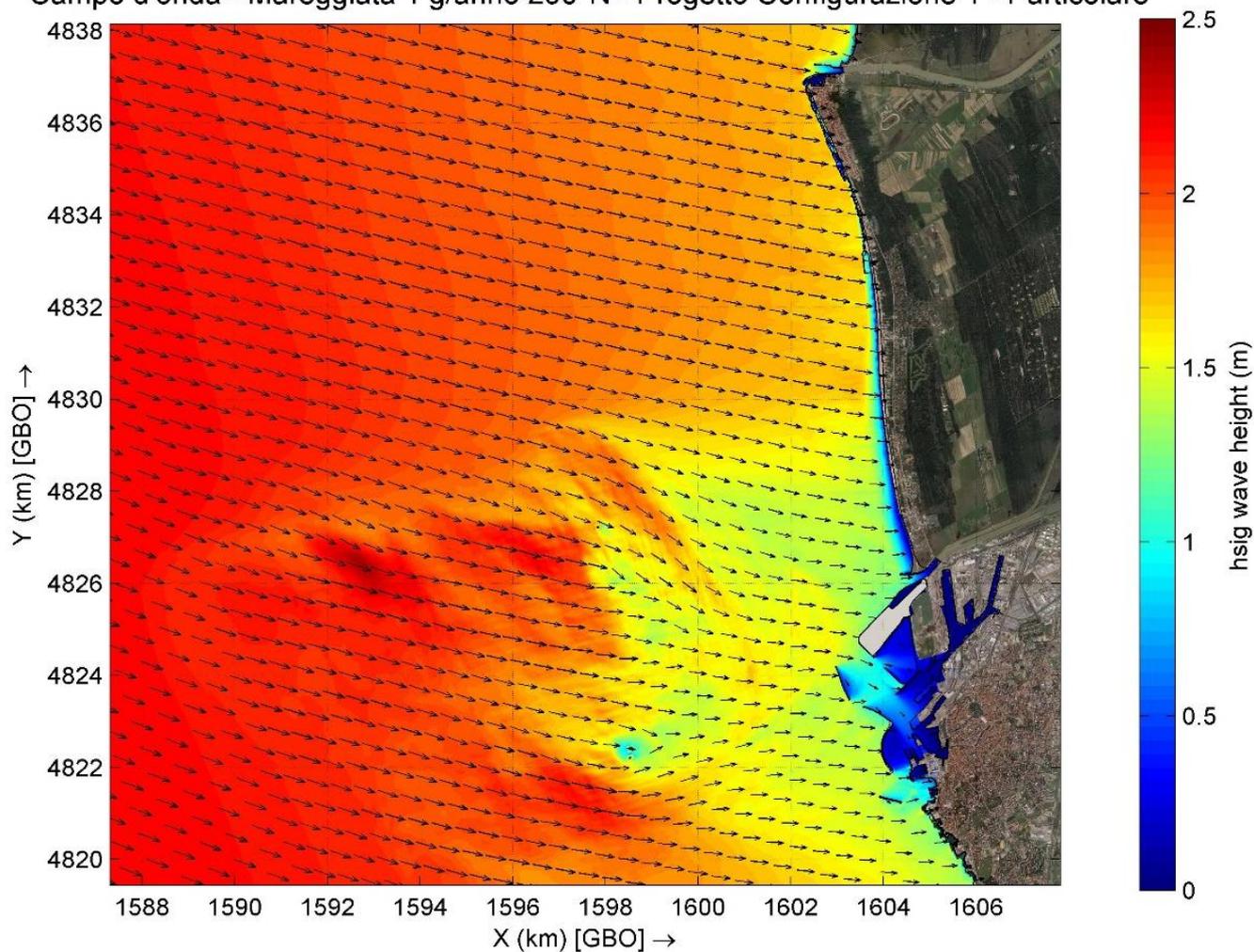


Figura 2.27 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 1 di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 290°N - Progetto Configurazione 2 - Particolare

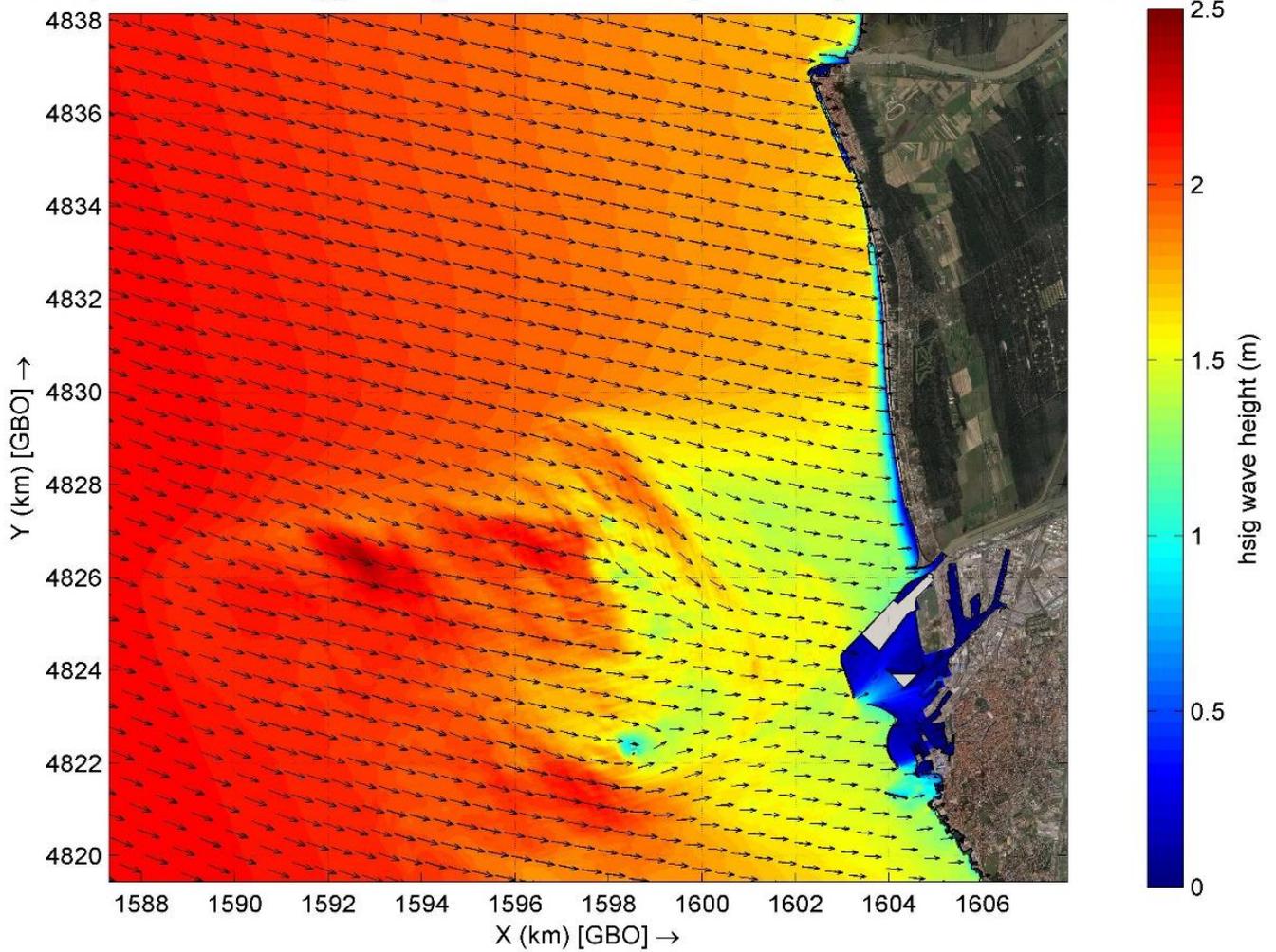


Figura 2.28 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 2 di progetto, particolare del tratto da Livorno a foce Arno (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

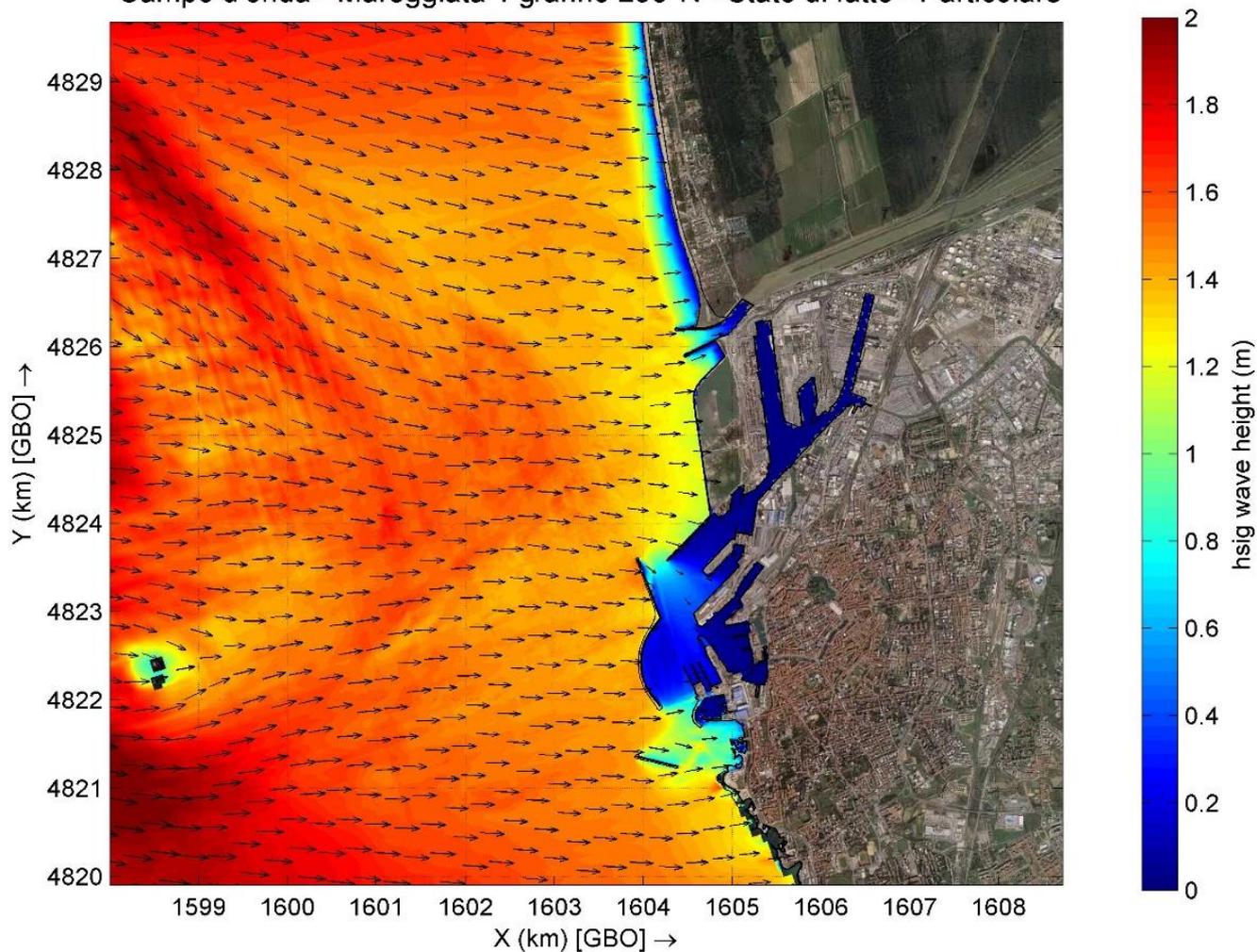


Figura 2.29 – Campo d'onda calcolato con Delft3D-WAVE per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

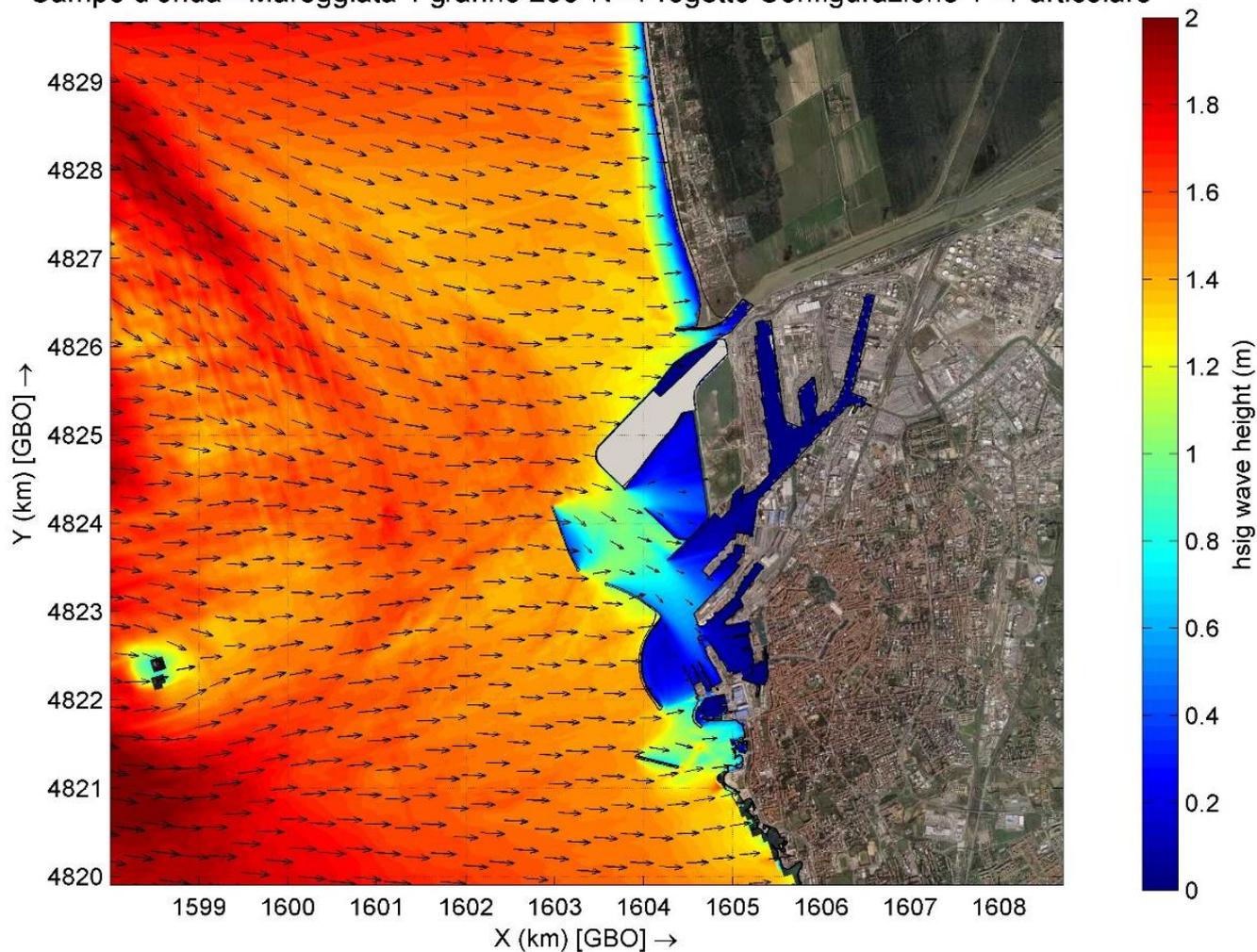


Figura 2.30 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 1 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

Campo d'onda - Mareggiata 1 g/anno 290°N - Progetto Configurazione 2 - Particolare

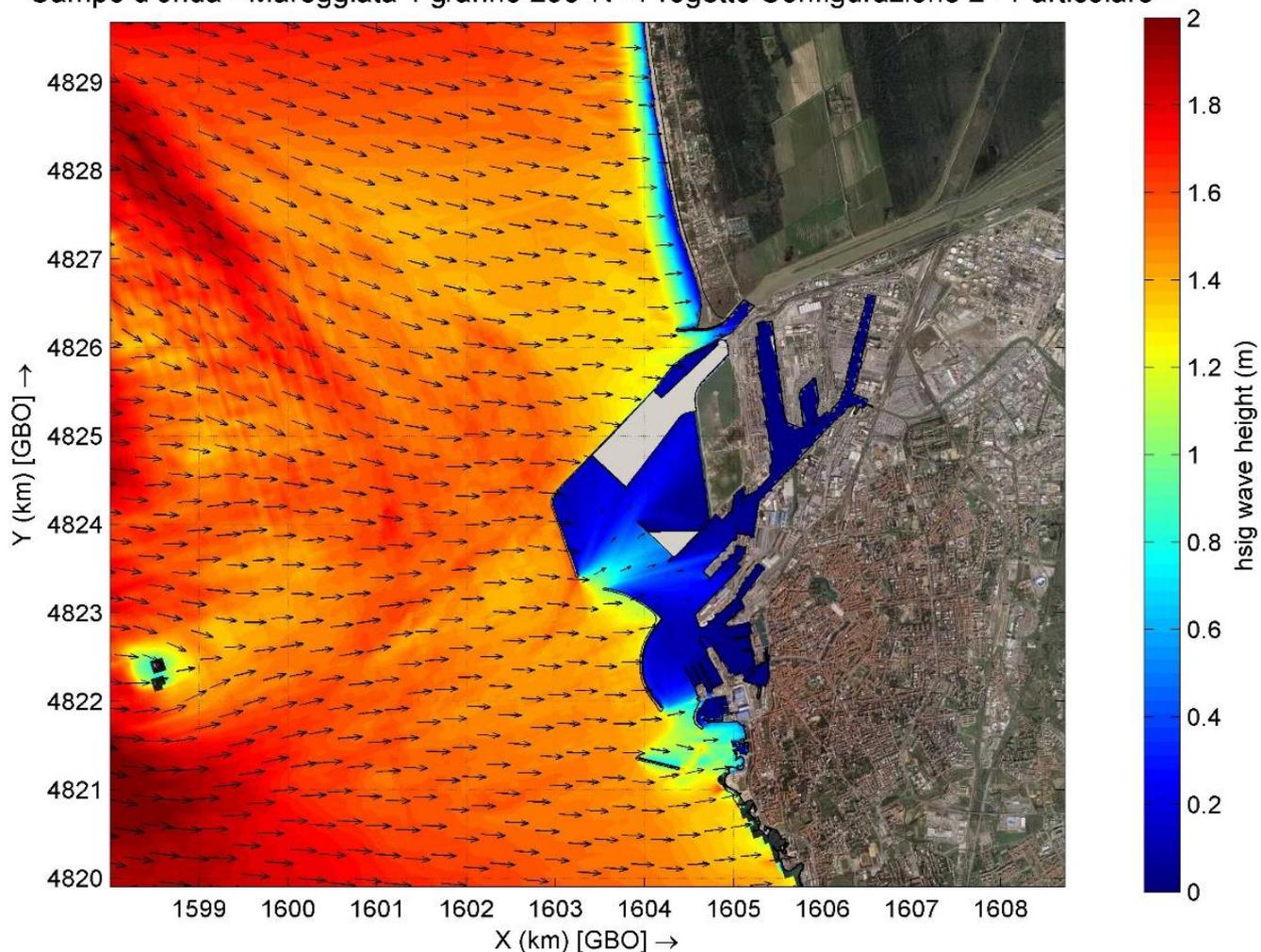


Figura 2.31 – Campo d'onda calcolato per la Configurazione 2 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

Progetto:	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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

2.7.2 Circolazione idrodinamica

Le mappe riportate nelle seguenti immagini da Figura 2.32 a Figura 2.49 riportano, per ciascuna delle 3 mareggiate considerate (onde di durata 1gg/anno con provenienza da 250°N, 170°N e 290°N) e delle 3 configurazioni analizzate (Stato di Fatto, Progetto Configurazione 1 e Progetto Configurazione 2) 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 rappresentate (da Figura 2.32 a Figura 2.34) 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 da Figura 2.32 a Figura 2.34 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.

Le successive mappe (da Figura 2.35 a Figura 2.37), 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 dalle opere di armamento della foce dello Scolmatore, si sviluppa una corrente litoranea diretta verso Nord con intensità massima dell’ordine di 0.3÷0.4 m/s. Nelle configurazioni di progetto (Figura 2.36 e Figura 2.37) la corrente litoranea suddetta è ancora presente, anche se caratterizzata da velocità inferiori.

A Sud della foce dello Scolmatore, nello stato di fatto si sviluppa una vorticità anti-oraria che indice una corrente diretta verso Nord a ridosso della spiaggia. Nelle due configurazioni di progetto, per la presenza delle nuove aree di colmata, il campo di moto locale si modifica sostanzialmente e nello specchio d’acqua davanti alla foce dello Scolmatore si realizza una zona di sostanziale calma di corrente.

È di interesse il fatto che, nella prima Configurazione di progetto (Figura 2.36), il varco della larghezza di circa 860 m che resta aperto tra la Diga Nord e la diga foranea più esterna induce una corrente di intensità non trascurabile (0.3 m/s) che penetra nel bacino portuale attraverso il varco stesso; come si vedrà nel seguito, tale corrente contribuisce all’interrimento dei bacini portuali. Nella seconda Configurazione (Figura 2.37) il varco è chiuso e all’interno del bacino portuale vi è calma di corrente.

Le mappe rappresentate nelle successive figure (da Figura 2.38 a Figura 2.43) 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 non trascurabile (0.3÷0.4 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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

Questa corrente risulta sensibilmente 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.

Di modesta intensità è anche il campo di corrente indotta dalla mareggiata di Maestrale, che proviene dalla direzione è 290°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 2.44 a Figura 2.49).

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 da entrambe le configurazioni di progetto non producono effetti significativi, dal momento che esse si trovano sottoflutto rispetto all'azione della mareggiata. Anche in questo caso è peraltro significativo osservare come, nella prima Configurazione (Figura 2.48), il bacino portuale sia attraversato da una corrente non trascurabile, che penetra attraverso il varco tra la Diga Nord e la diga foranea. Con la seconda Configurazione di progetto (Figura 2.49) questa corrente si annulla.

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

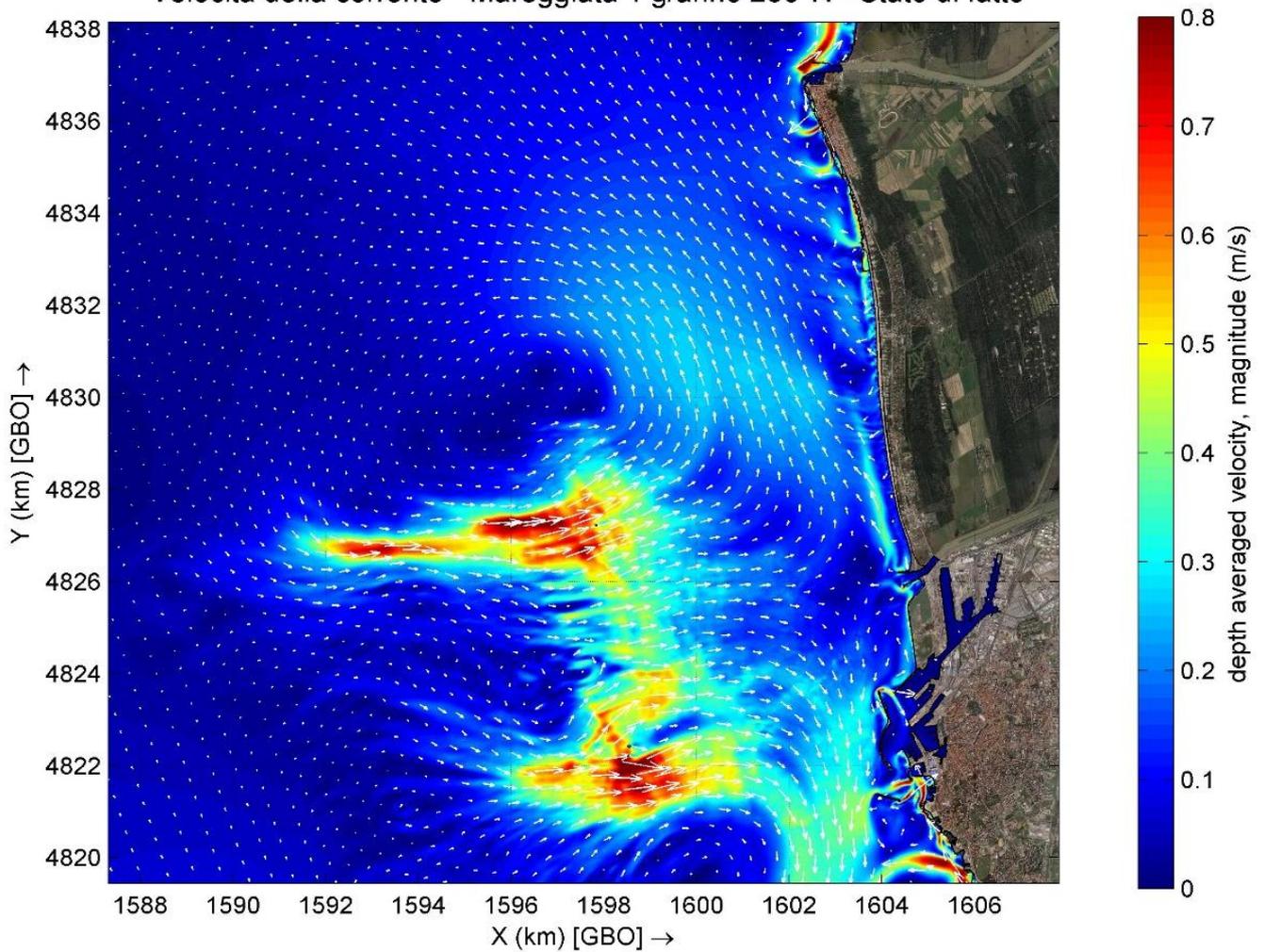


Figura 2.32 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

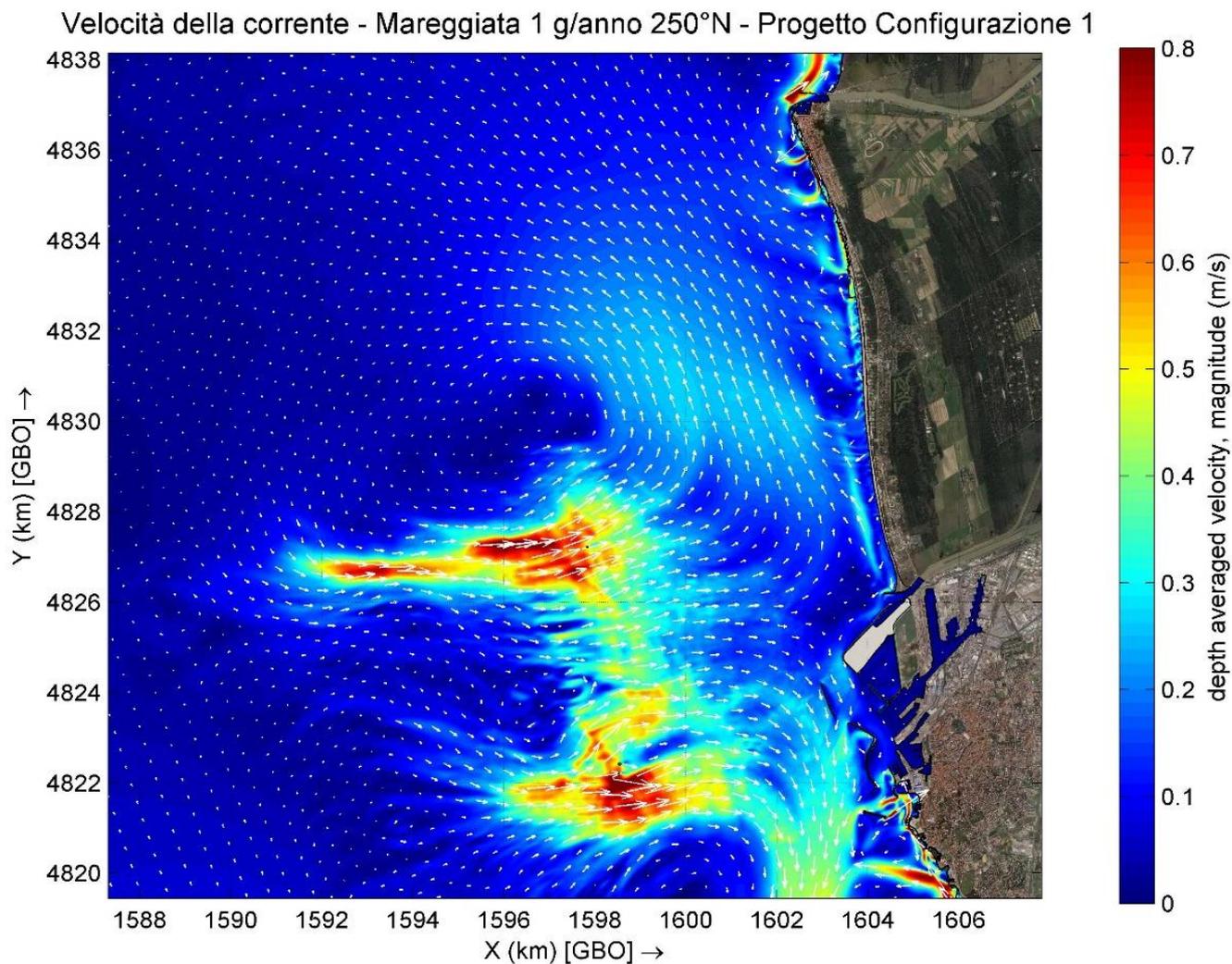


Figura 2.33 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la Configurazione 1 di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

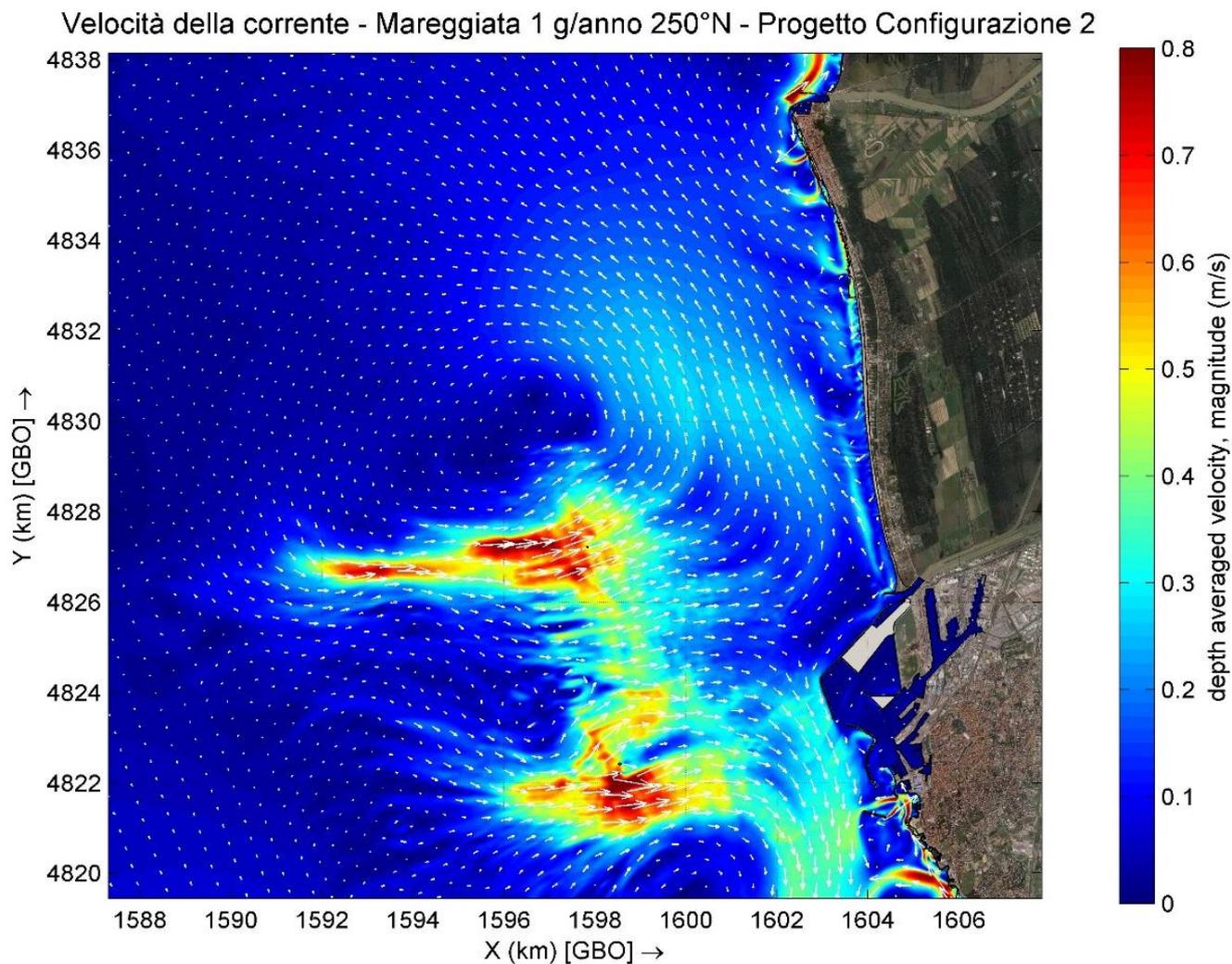


Figura 2.34 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la Configurazione 2 di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

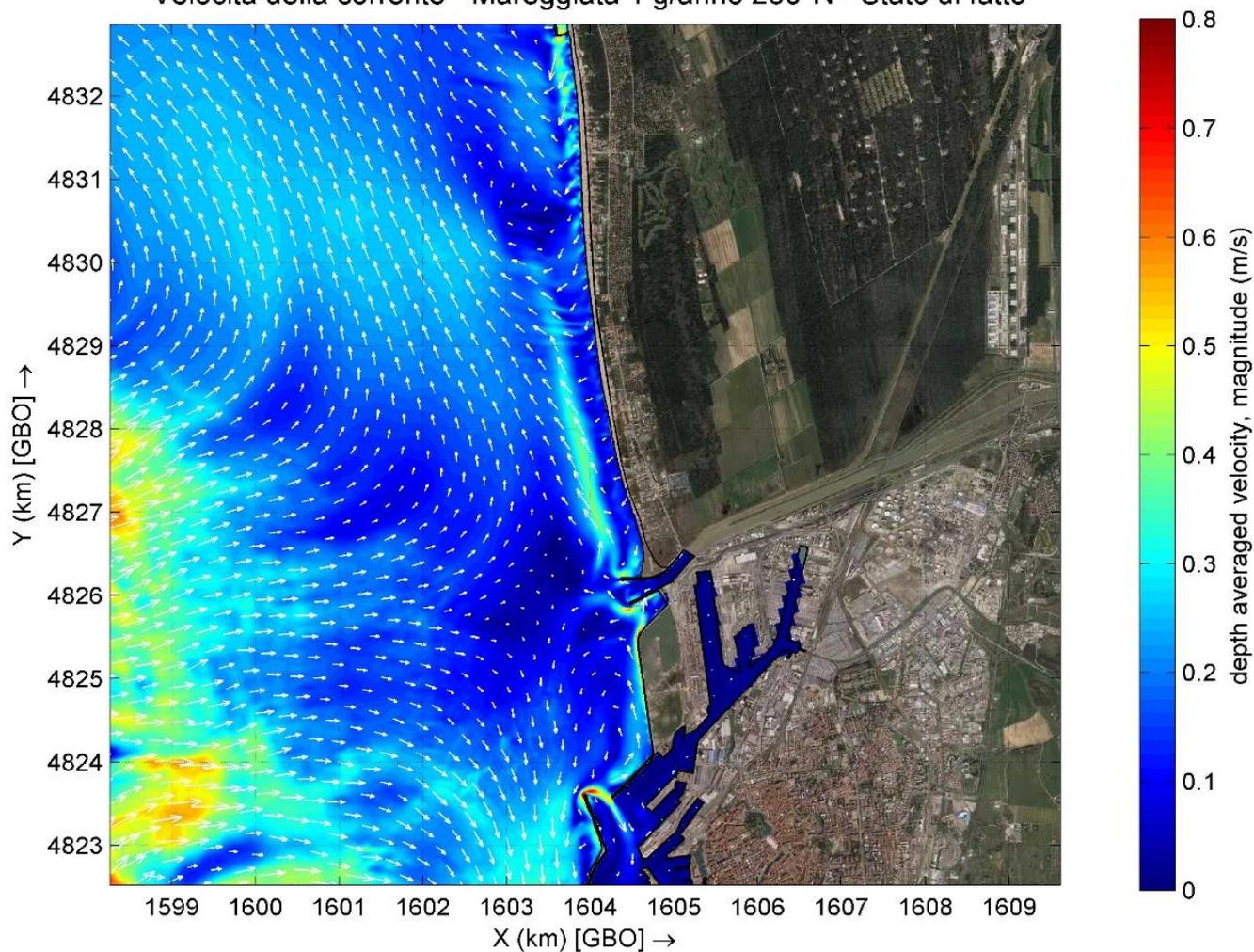


Figura 2.35 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

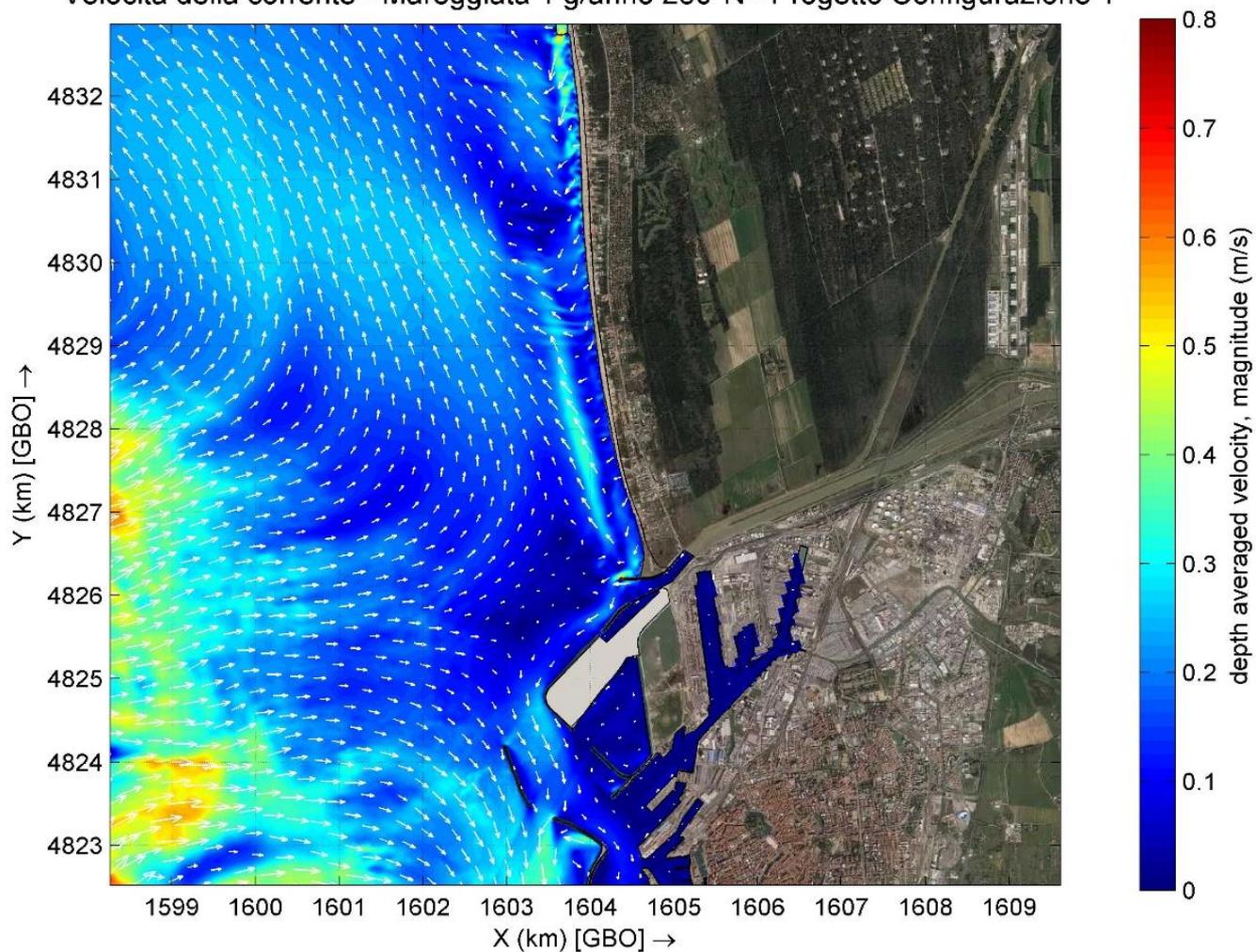


Figura 2.36 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 1 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Velocità della corrente - Mareggiata 1 g/anno 250°N - Progetto Configurazione 2

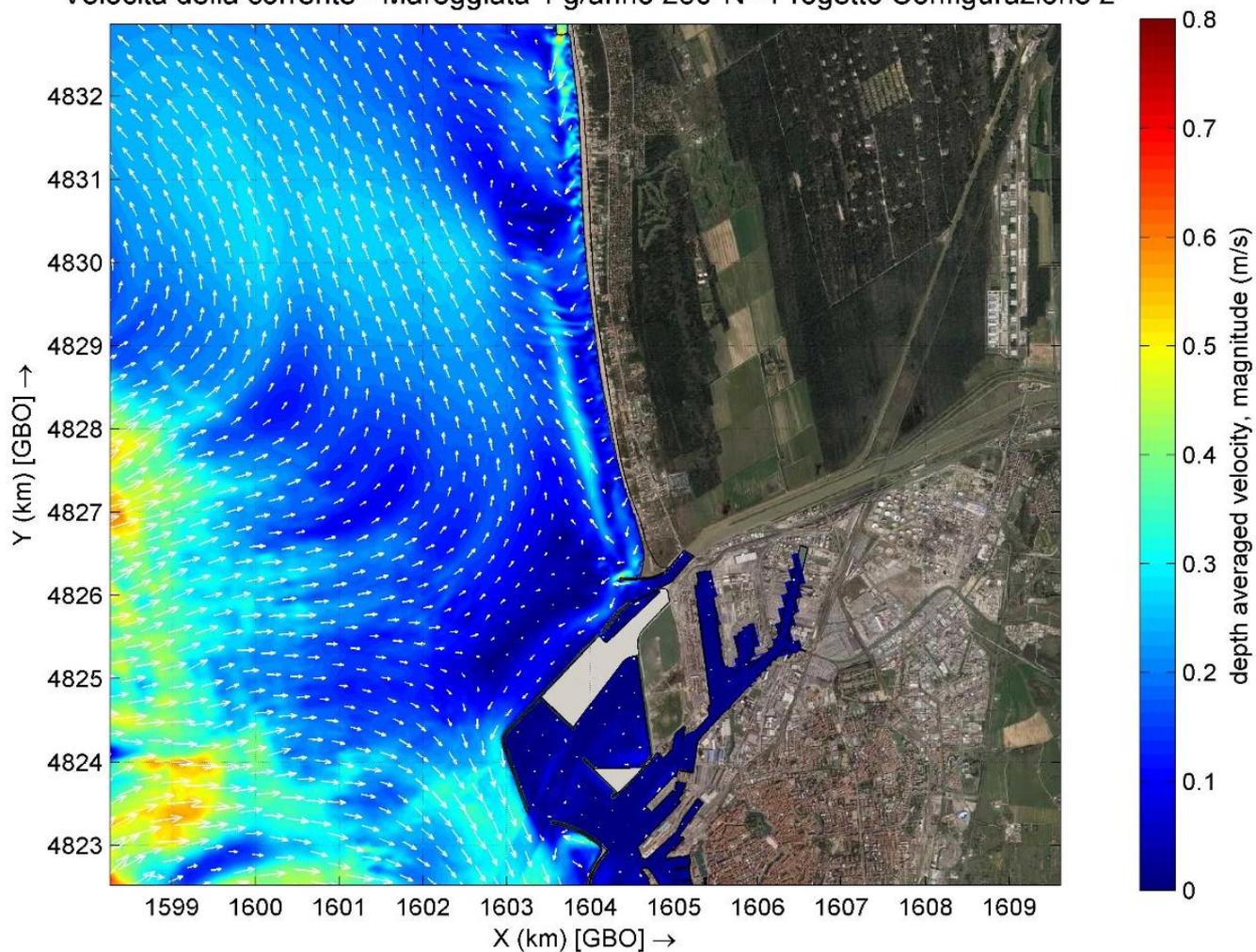


Figura 2.37 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 2 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 250°N: $H_s = 4.31$ m, $T_p = 9.40$ s, $U_w = 12.2$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

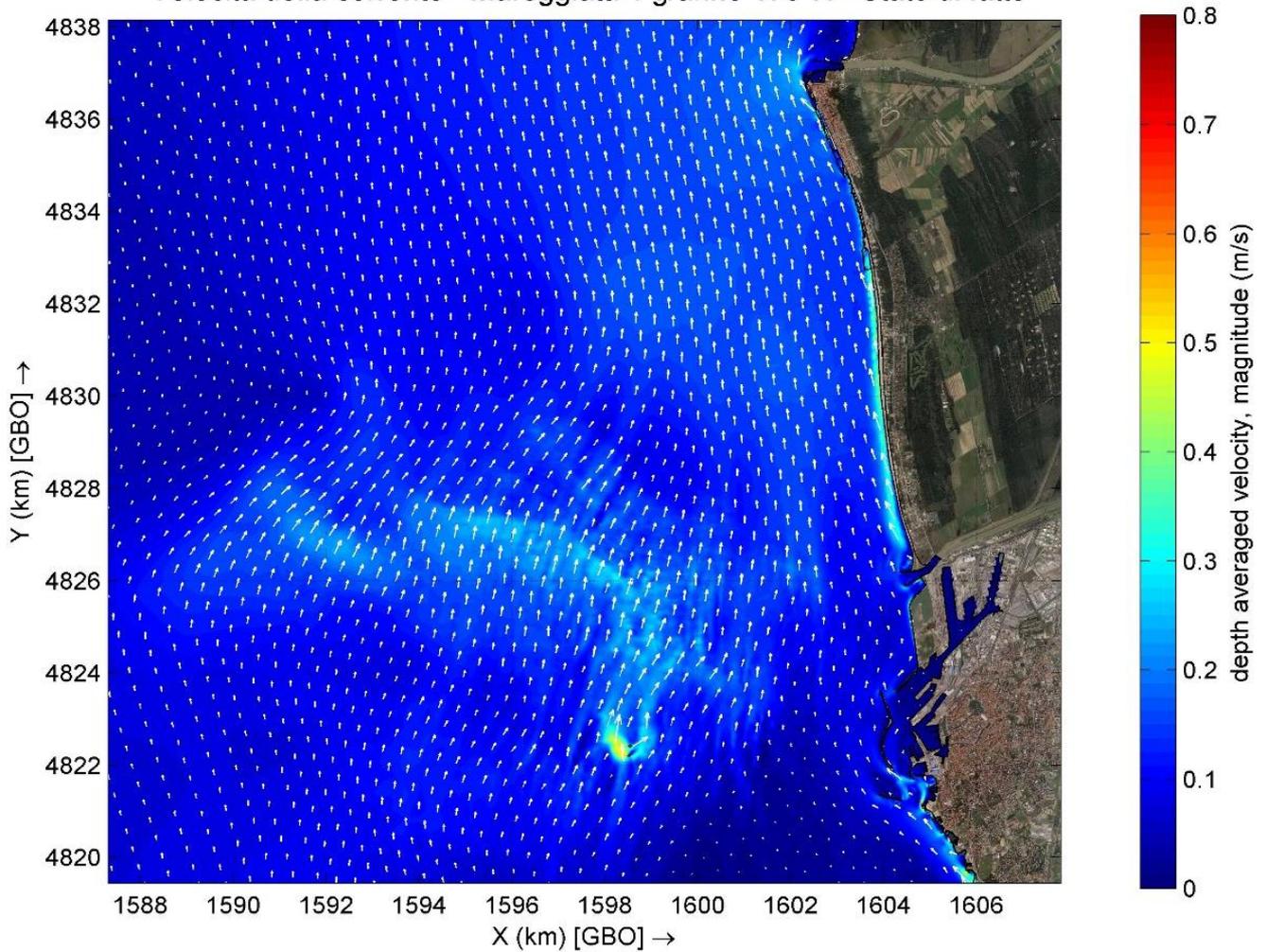


Figura 2.38 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

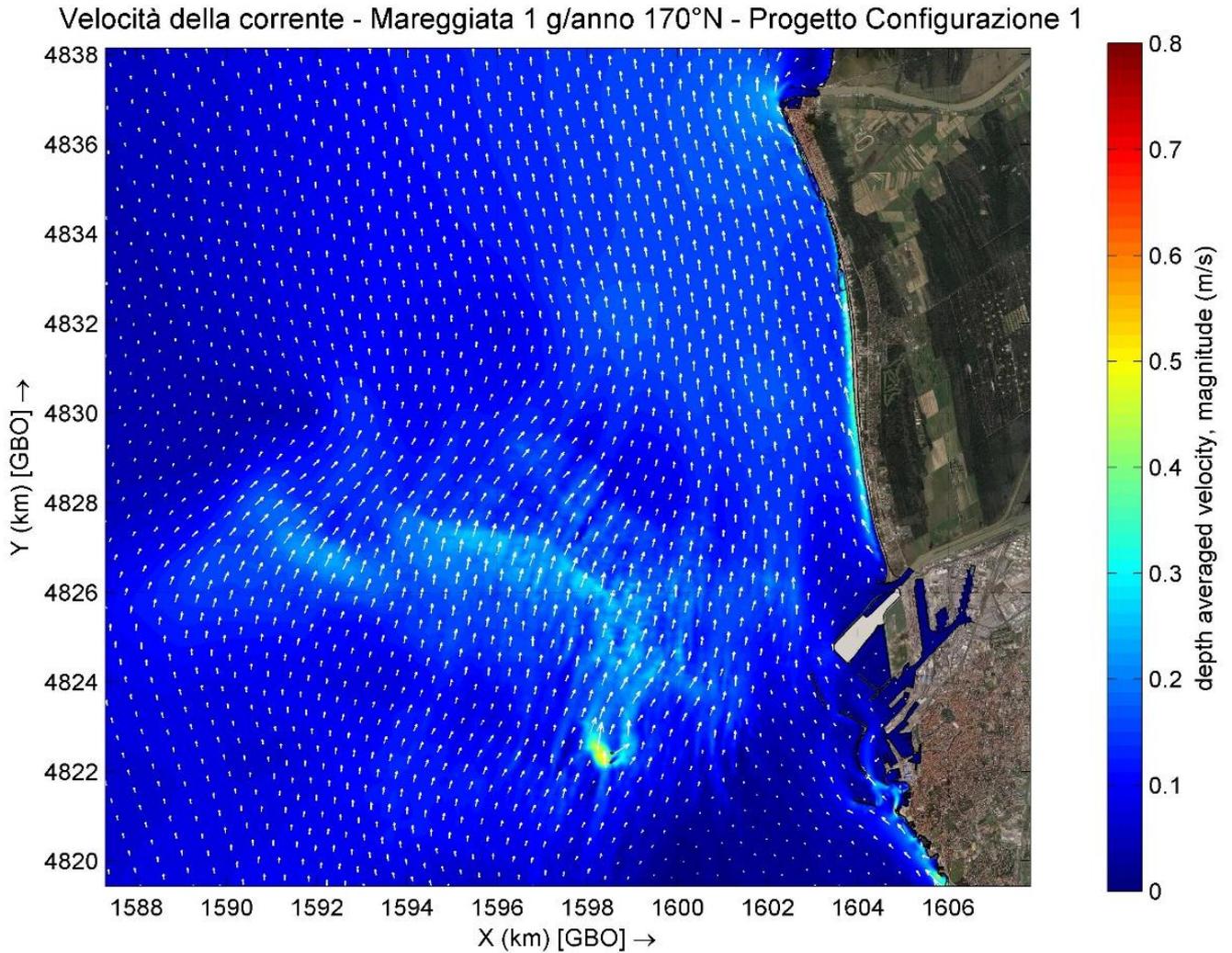


Figura 2.39 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la Configurazione 1 di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Velocità della corrente - Mareggiata 1 g/anno 170°N - Progetto Configurazione 2

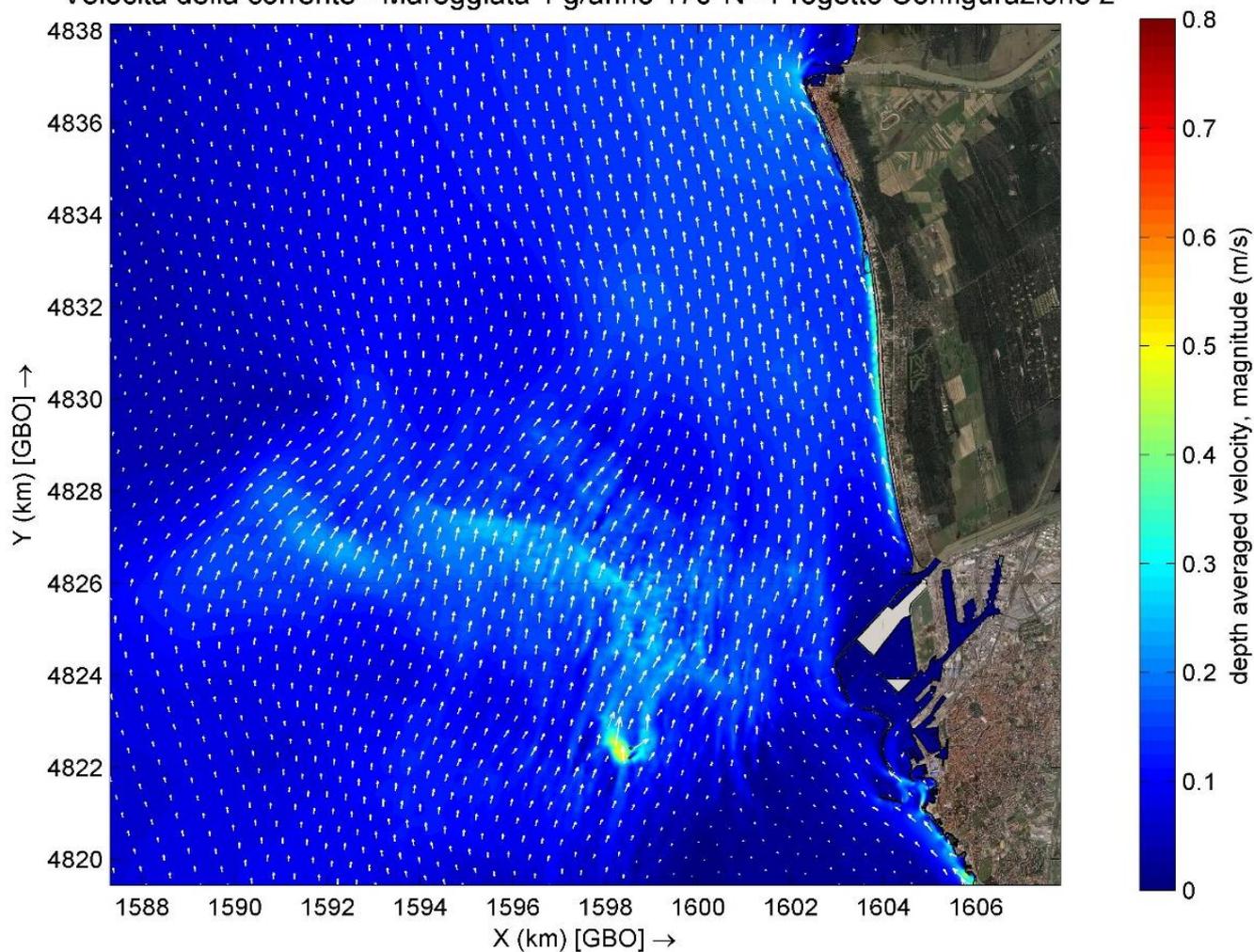


Figura 2.40 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la Configurazione 2 di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

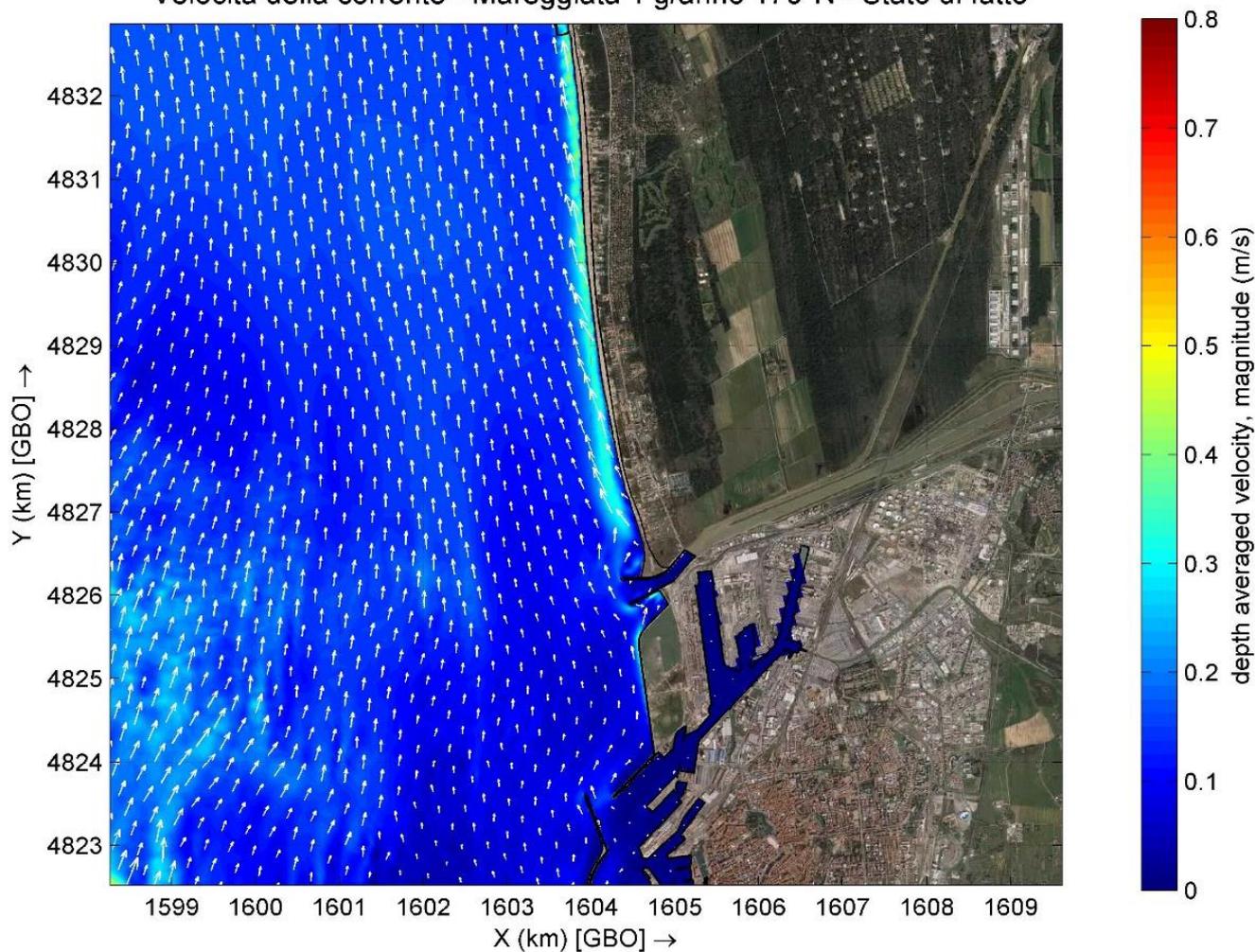


Figura 2.41 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

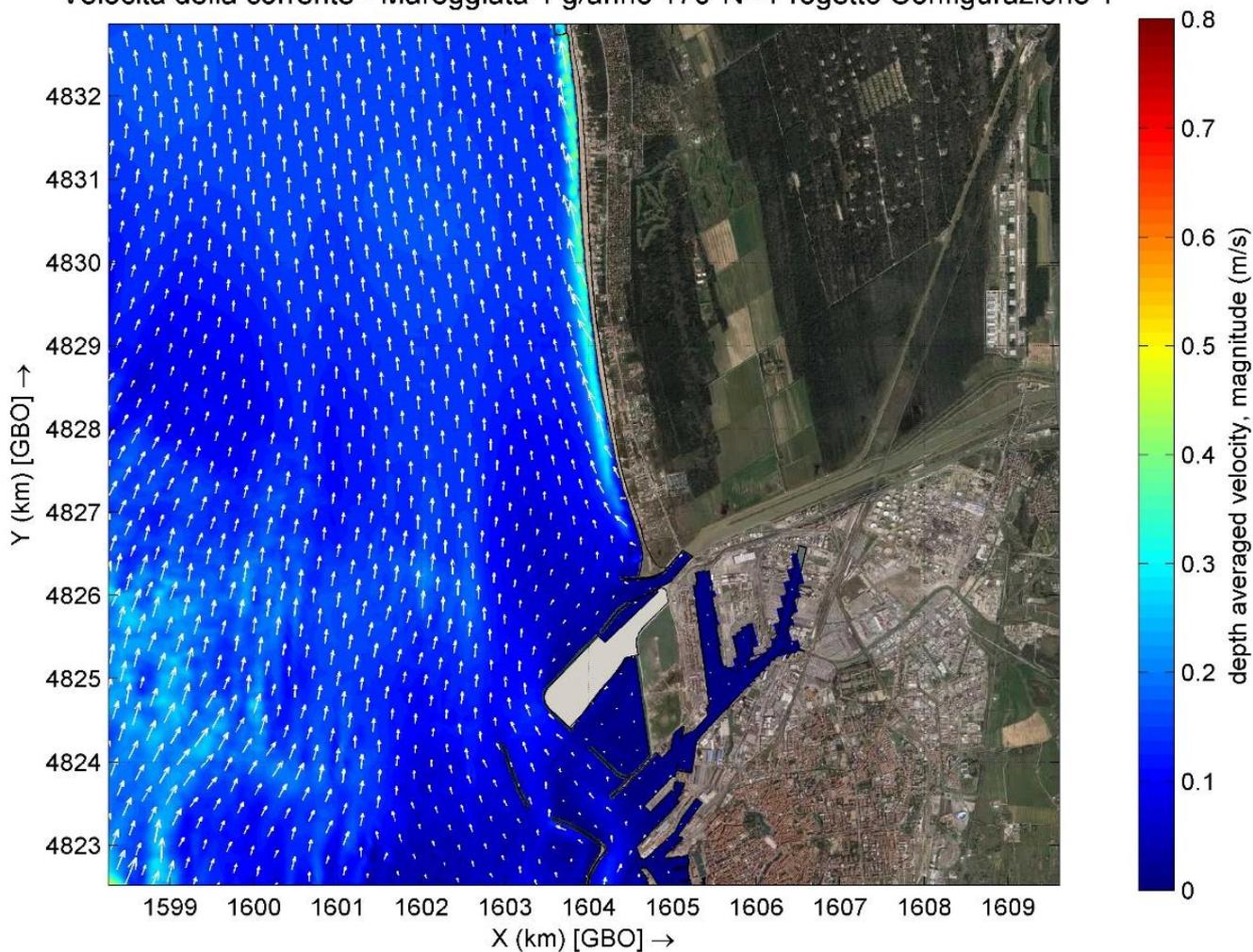


Figura 2.42 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 1 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

Velocità della corrente - Mareggiata 1 g/anno 170°N - Progetto Configurazione 2

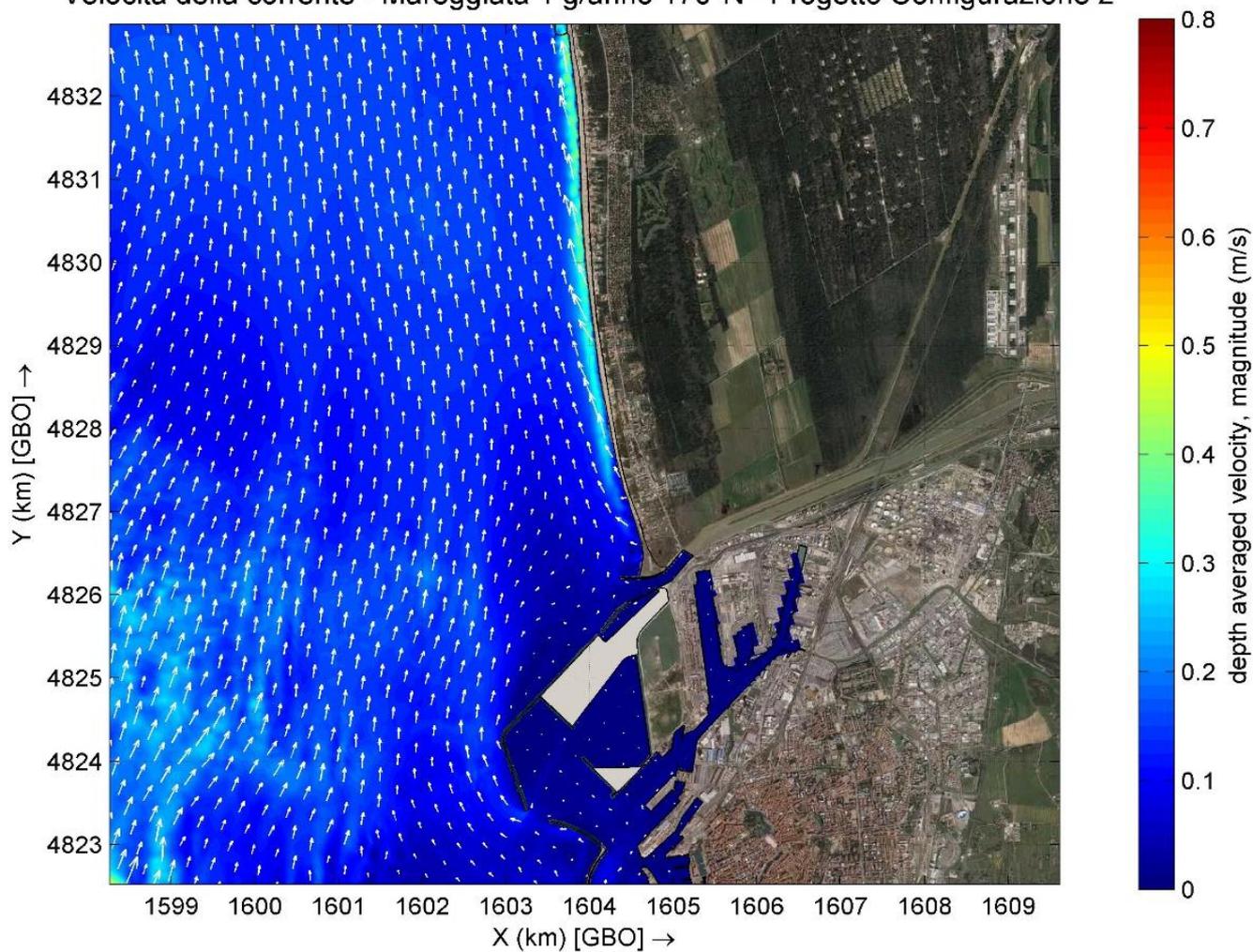


Figura 2.43 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 2 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 170°N: $H_s = 2.44$ m, $T_p = 6.73$ s, $U_w = 10.0$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

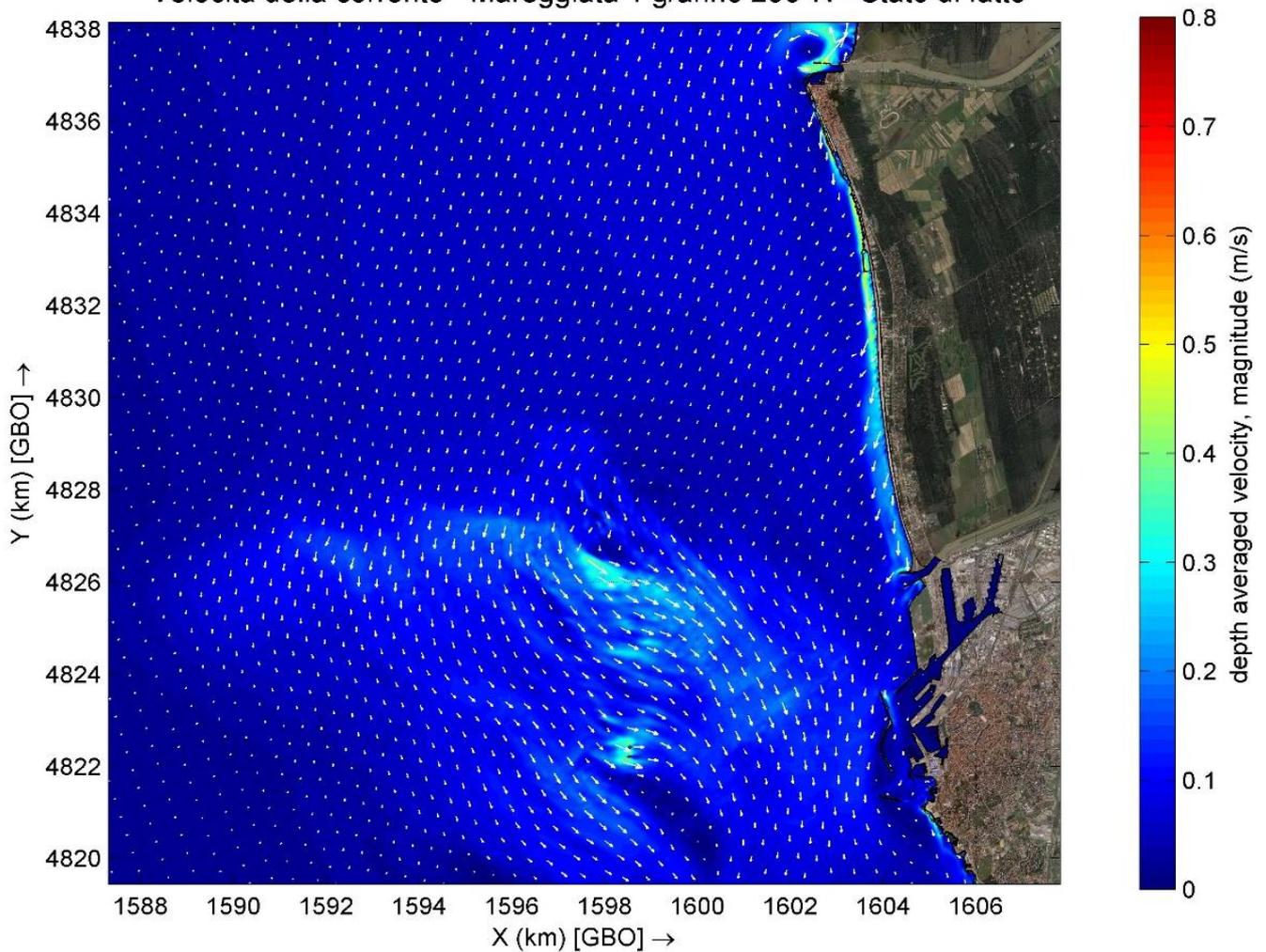


Figura 2.44 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Velocità della corrente - Mareggiata 1 g/anno 290°N - Progetto Configurazione 2

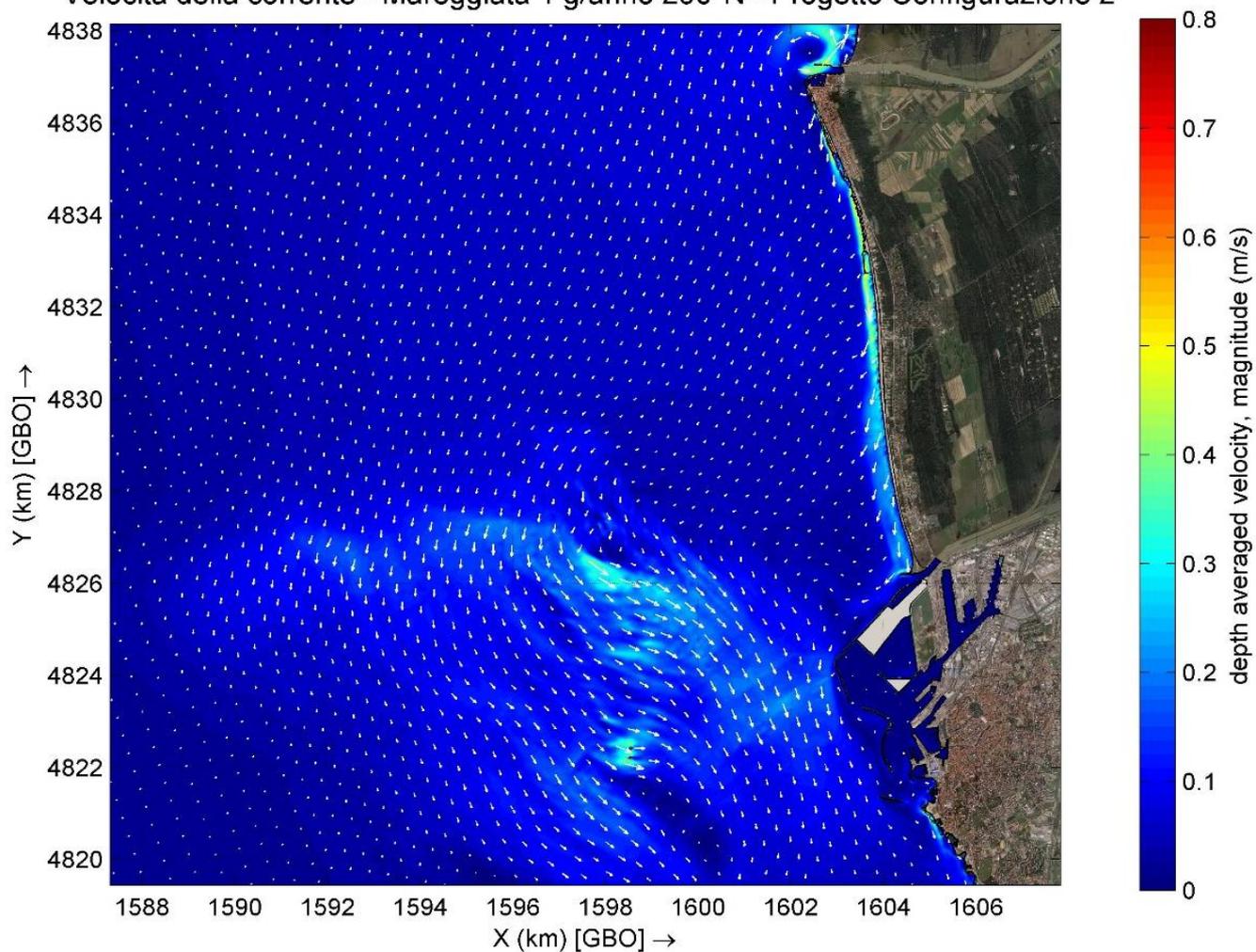


Figura 2.46 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per la Configurazione 2 di progetto (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

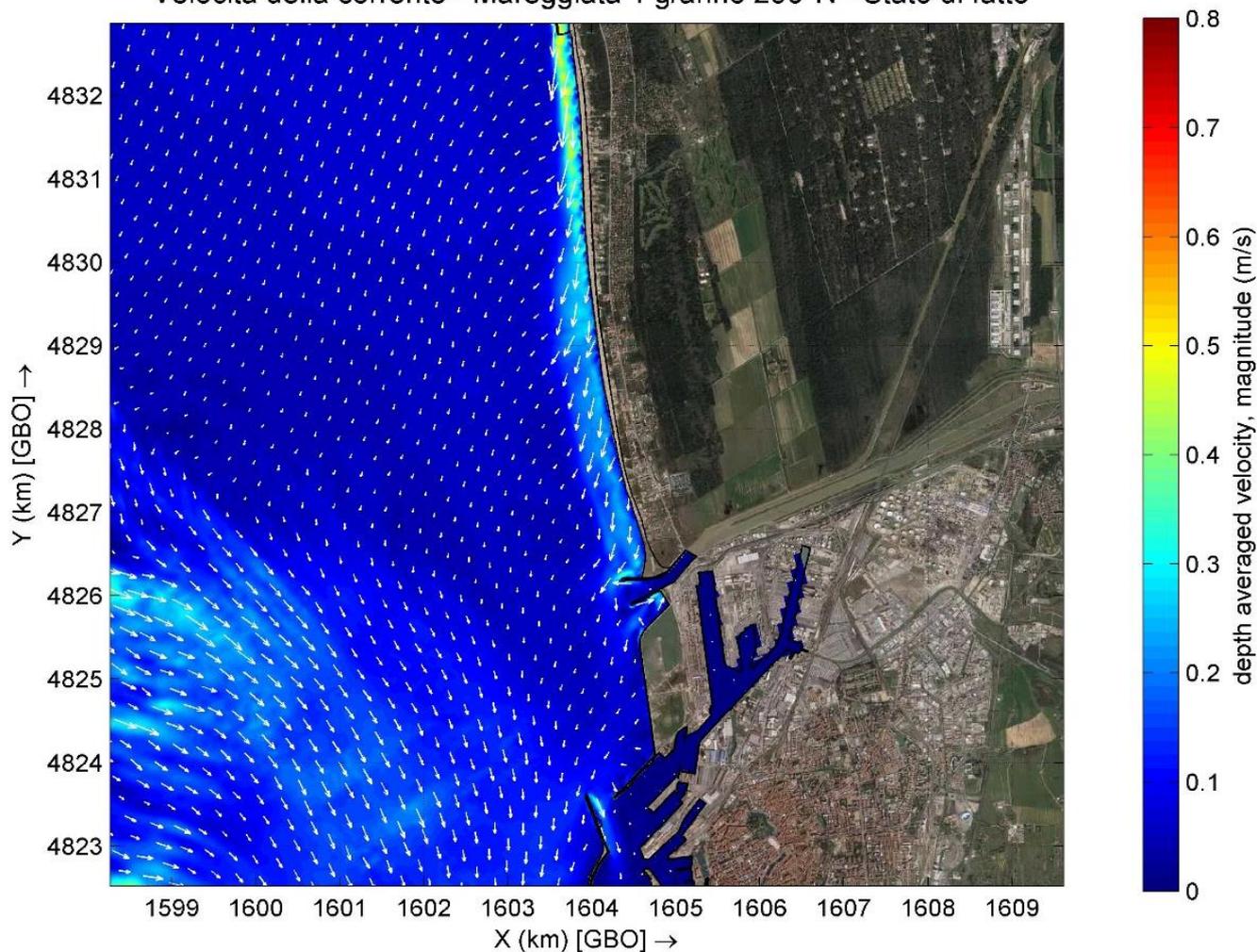


Figura 2.47 – Velocità della corrente calcolata con Delft3D-FLOW per lo stato di fatto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

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

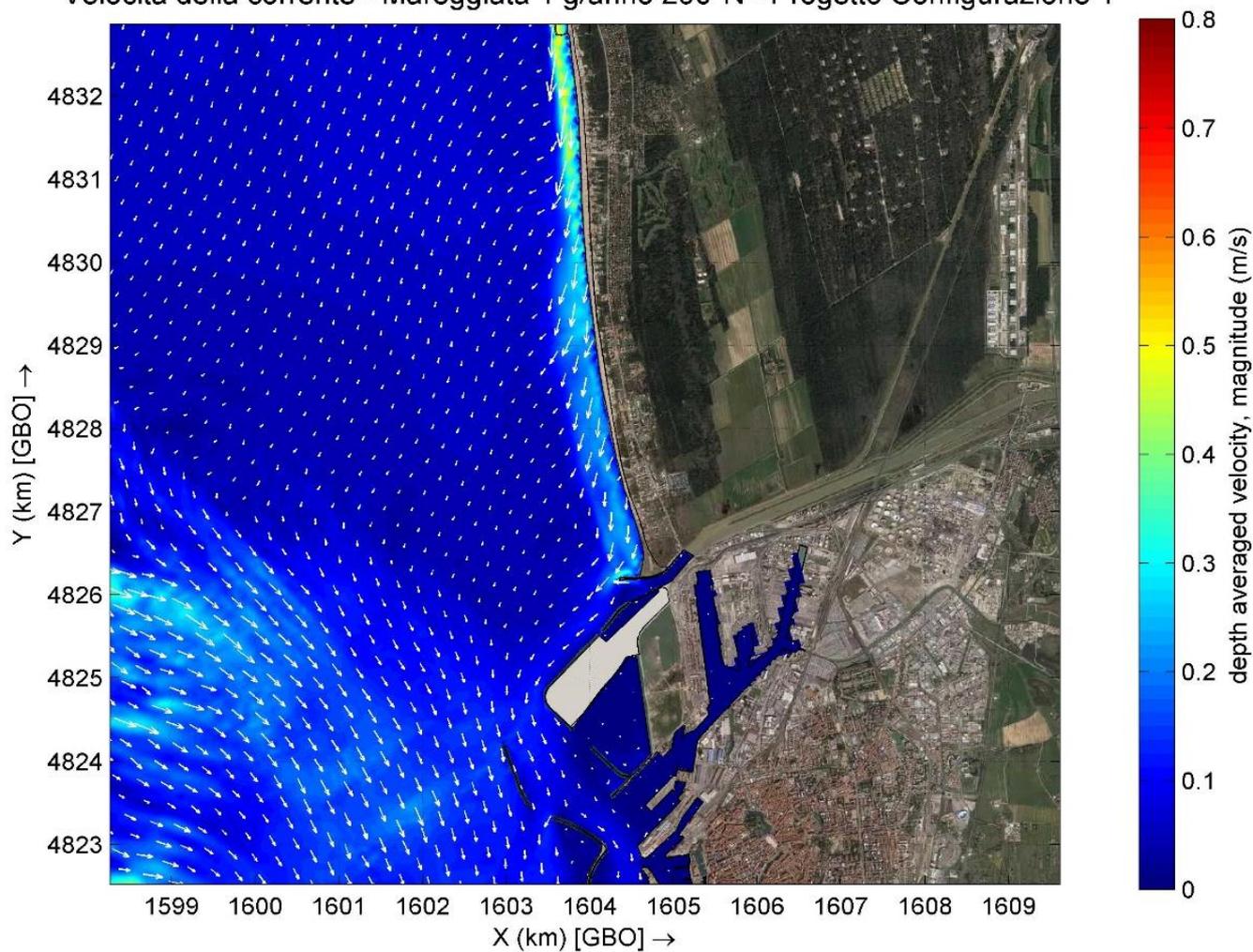


Figura 2.48 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 1 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Velocità della corrente - Mareggiata 1 g/anno 290°N - Progetto Configurazione 2

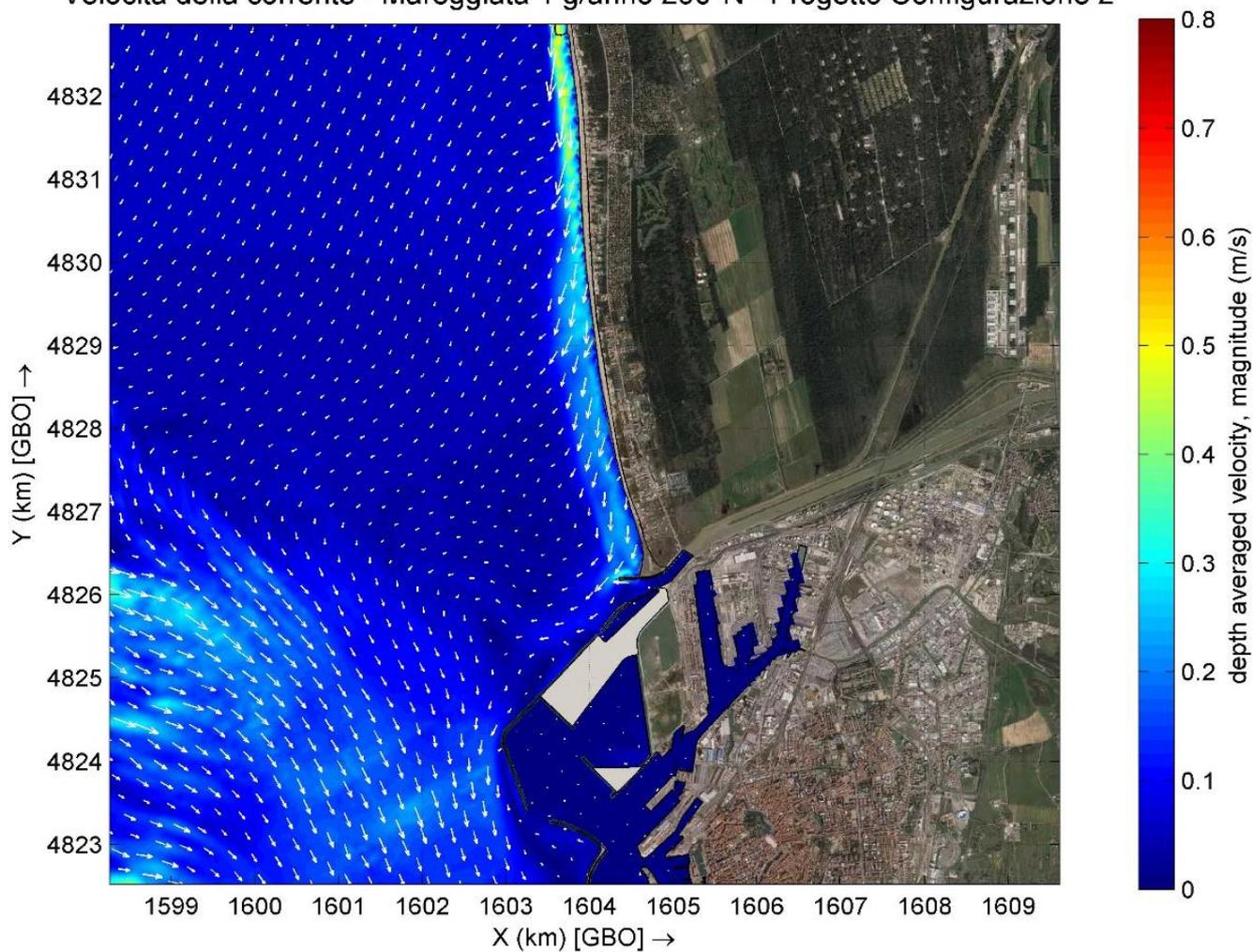


Figura 2.49 – Velocità della corrente calcolata per la Configurazione 2 di progetto, particolare dell'area di intervento (mareggiata con frequenza 1 giorno/anno e direzione 290°N: $H_s = 2.14$ m, $T_p = 7.30$ s, $U_w = 8.4$ m/s)

Progetto:	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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

2.7.3 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 ovviamente la mareggiata di Ponente, proveniente da 250°N e 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 questa mareggiata è peraltro associata la quasi totalità dell'energia del moto ondoso incidente, ed 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 (da Figura 2.50 a Figura 2.52) rappresentano con una scala di colori la concentrazione dei sedimenti in sospensione (kg/m^3) raggiunta durante la mareggiata nelle tre configurazioni esaminate (stato di fatto e due configurazioni di progetto).

Per tutte e tre le configurazioni, 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 che compete al tratto posto 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 sostanzialmente smorzata dalla presenza delle Secche della Meloria e dà ragione del fatto che il tratto di litorale posto più a Nord è storicamente più vulnerabile alle mareggiate rispetto a quello posto più a Sud.

Il confronto tra lo stato di fatto (Figura 2.50) e le due configurazioni di progetto (Figura 2.51 e Figura 2.52) mette a sua volta in evidenza che l'entità del trasporto solido non si modifica 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 del litorale locale. Ciò non comporta il rischio di un sostanziale deficit di apporto sedimentario sul litorale settentrionale, dal momento che, come si è visto in precedenza, la corrente litoranea diretta verso Nord è attiva solo nello stesso tratto di circa 3.5 km, esaurendosi rapidamente verso Nord, dove prevalgono circolazioni locali e apporti dal litorale settentrionale. Va peraltro segnalato che, proprio in questo tratto, potrebbe prodursi un locale squilibrio rispetto alla dinamica attuale, 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.

Il confronto tra le mappe evidenzia anche che, per le due configurazioni di progetto, è 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 possibile un refluento dei sedimenti entro 3.5 km verso Nord per compensare l'eventuale squilibrio cui si accennava sopra.

Il confronto tra i risultati ottenuti per la Configurazione 1 (Figura 2.51) e la Configurazione 2 (Figura 2.52) mostra variazioni modeste relativamente al trasporto solido all'interno dell'area portuale. È necessario tuttavia tenere presente il fatto che le simulazioni sono state effettuate considerando la messa in sospensione e il trasporto di sedimenti sabbiosi, aventi diametro medio (D_{50}) di 200 μm , ma non rappresentano la dinamica dei sedimenti fini. Come i risultati esposti nel paragrafo precedente hanno dimostrato, il varco della larghezza di circa 860 m che nella Configurazione 1 separa la Diga

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

Nord dalla diga foranea più esterna, consente l'ingresso nel bacino portuale di correnti di non trascurabile intensità, che evidentemente possono introdurre nel bacino quantità rilevanti di sedimenti fini che, una volta entrati nel bacino, vi si possono sedimentare in ragione delle correnti più ridotte o assenti.

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 (da Figura 2.53 a Figura 2.55) 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.

Anche in questo caso si osserva come, per entrambe le configurazioni 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.

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 di progetto. Si osservano infatti minime differenze nelle diverse configurazioni simulate (da Figura 2.56 a Figura 2.58). Anche in questo caso si deve fare presente che la presenza del varco tra la Diga Nord e la diga foranea esterna (che compete alla sola Configurazione 1) potrebbe favorire l'ingresso di sedimenti fini all'interno dell'area portuale. Questa circostanza, anche in questo caso non evidenziata dalle mappe (che si riferiscono ai soli sedimenti sabbiosi), è invece scongiurata per la Configurazione 2, in cui il varco suddetto è chiuso.

Le successive figure (da Figura 2.59 a Figura 2.62) illustrano alcuni risultati quantitativi ottenuti sulla base dei risultati delle simulazioni del trasporto solido; le figure riportano il bilancio, in termini di m^3/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 2.60), 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 3.6 km), per poi assumere direzione variabile in corrispondenza delle sezioni successive. Si rileva tuttavia che il trasporto nelle due configurazioni di progetto (per le quali si ottengono risultati praticamente identici) è inferiore (addirittura di verso contrario a ridosso della foce) a quello relativo allo stato di fatto nel tratto di circa 3 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 2.61 e Figura 2.62 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 2.61), 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 nelle configurazioni di progetto è sensibilmente inferiore a quello calcolato nello stato di fatto, a conferma

<p>Progetto:</p> <p>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</p>	<p>Livello progettazione:</p> <p>Progetto di fattibilità tecnico economica</p>	<p>Elaborato:</p> <p>IDRAULICA MARITTIMA</p> <p>1233_PP-D-004_0.docx</p>
---	--	--

del fatto che le opere in progetto forniscono una protezione non trascurabile rispetto all'azione d'onda proveniente dal settore meridionale. Si tratta peraltro di differenze che, pesate rispetto all'energia associata al settore di Mezzogiorno, hanno complessivamente un significato trascurabile.

Minime o nulle sono infine le differenze che si osservano tra lo stato di fatto e le configurazioni di progetto nel caso della mareggiata di Maestrale (Figura 2.62), 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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Stato di fatto
Concentrazione di sedimenti
Mareggiata 1 g/anno 250°N

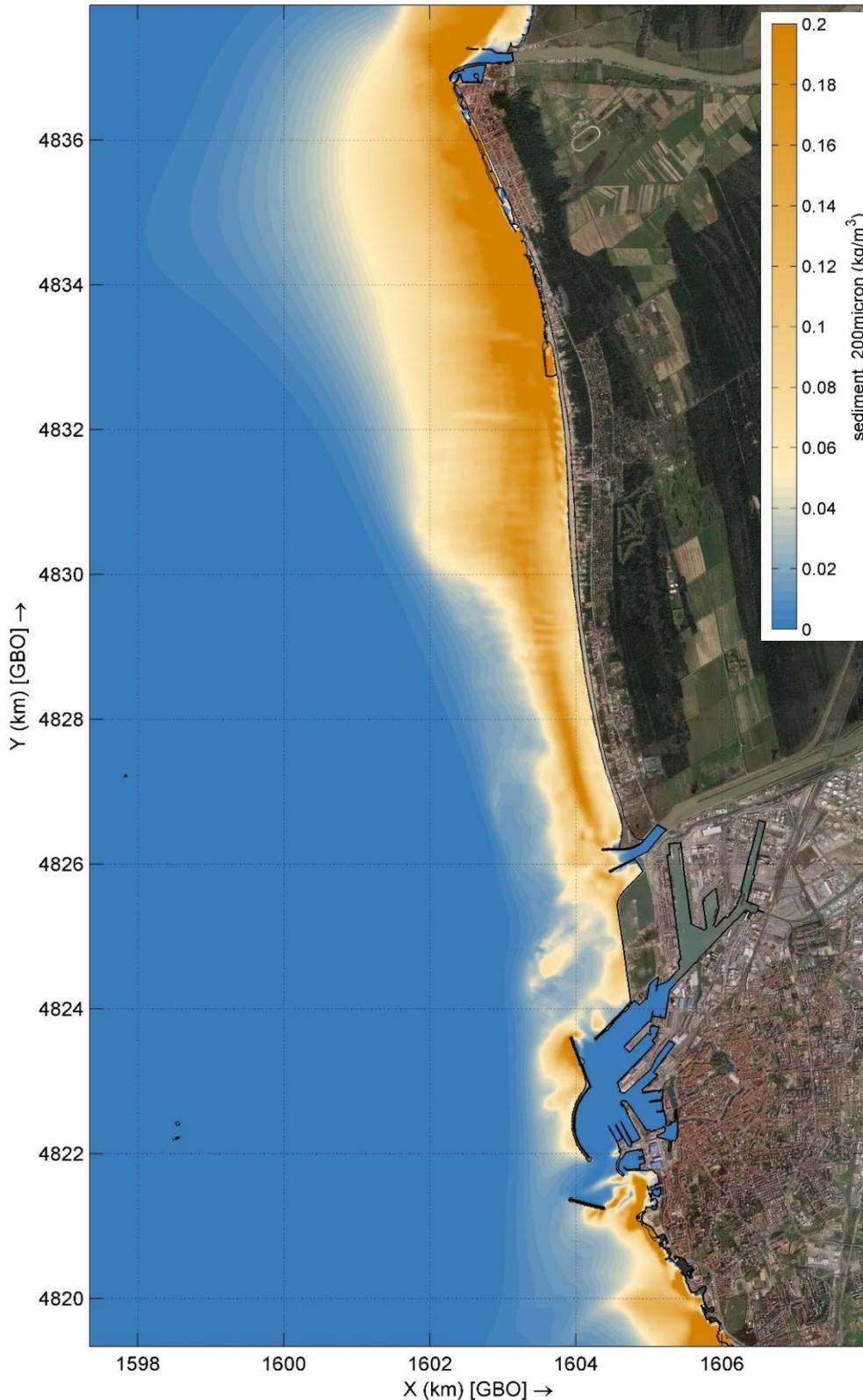


Figura 2.50 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Ponente
Stato di fatto

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

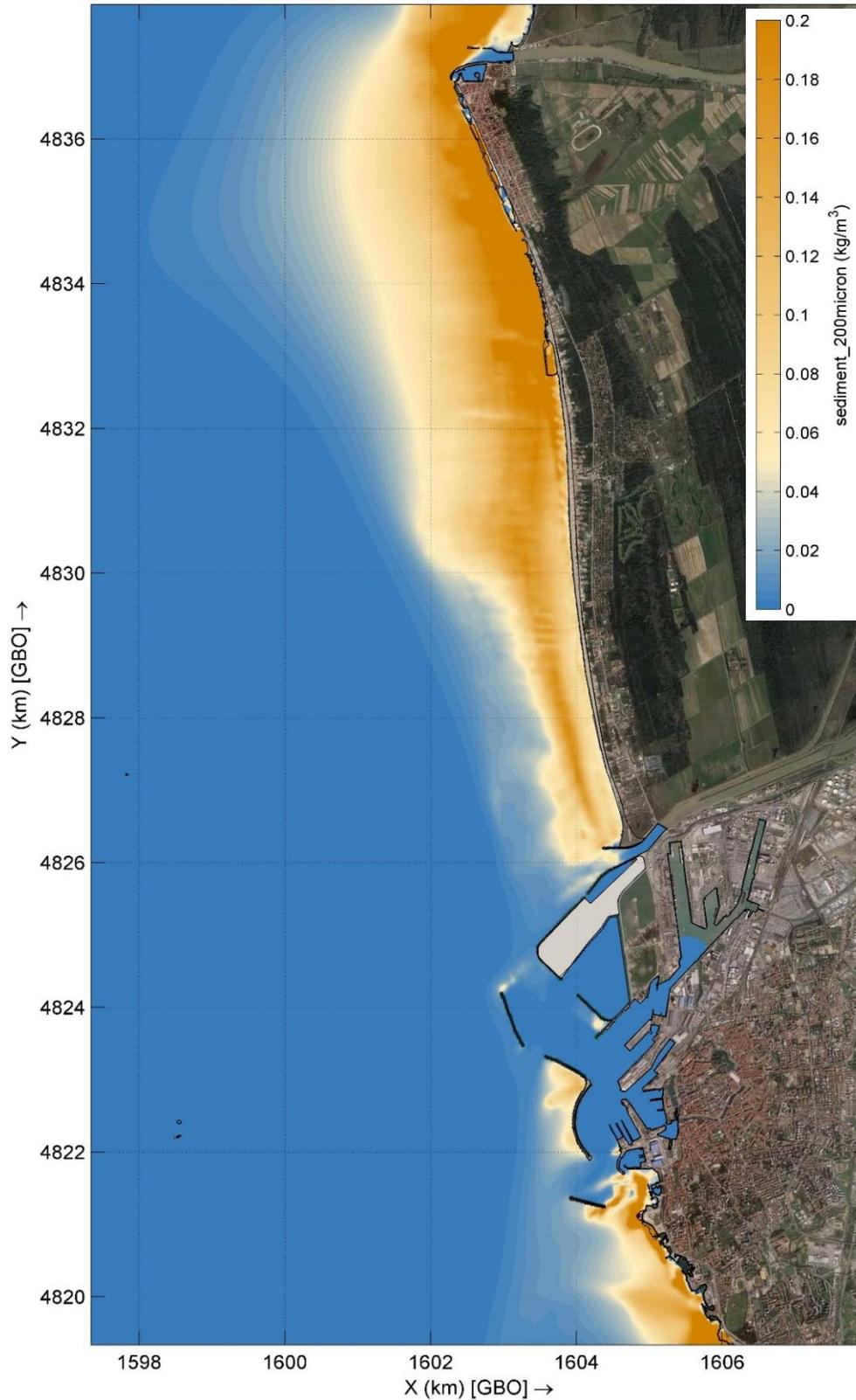


Figura 2.51 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Ponente Configurazione 1 di progetto

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Progetto Configurazione 2 Concentrazione di sedimenti Mareggiata 1 g/anno 250°N

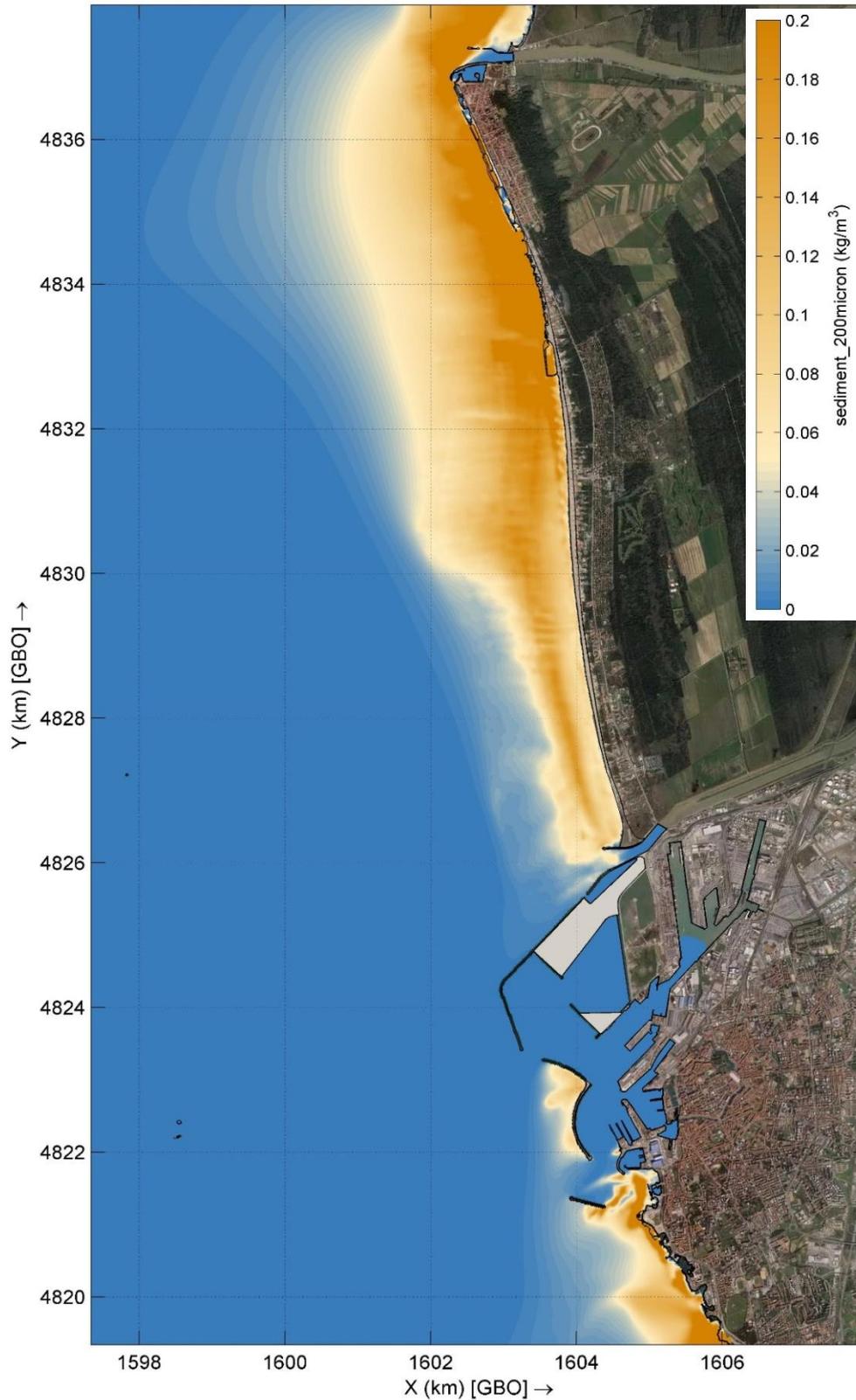


Figura 2.52 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Ponente Configurazione 2 di progetto

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Stato di fatto
Concentrazione di sedimenti
Mareggiata 1 g/anno 170°N

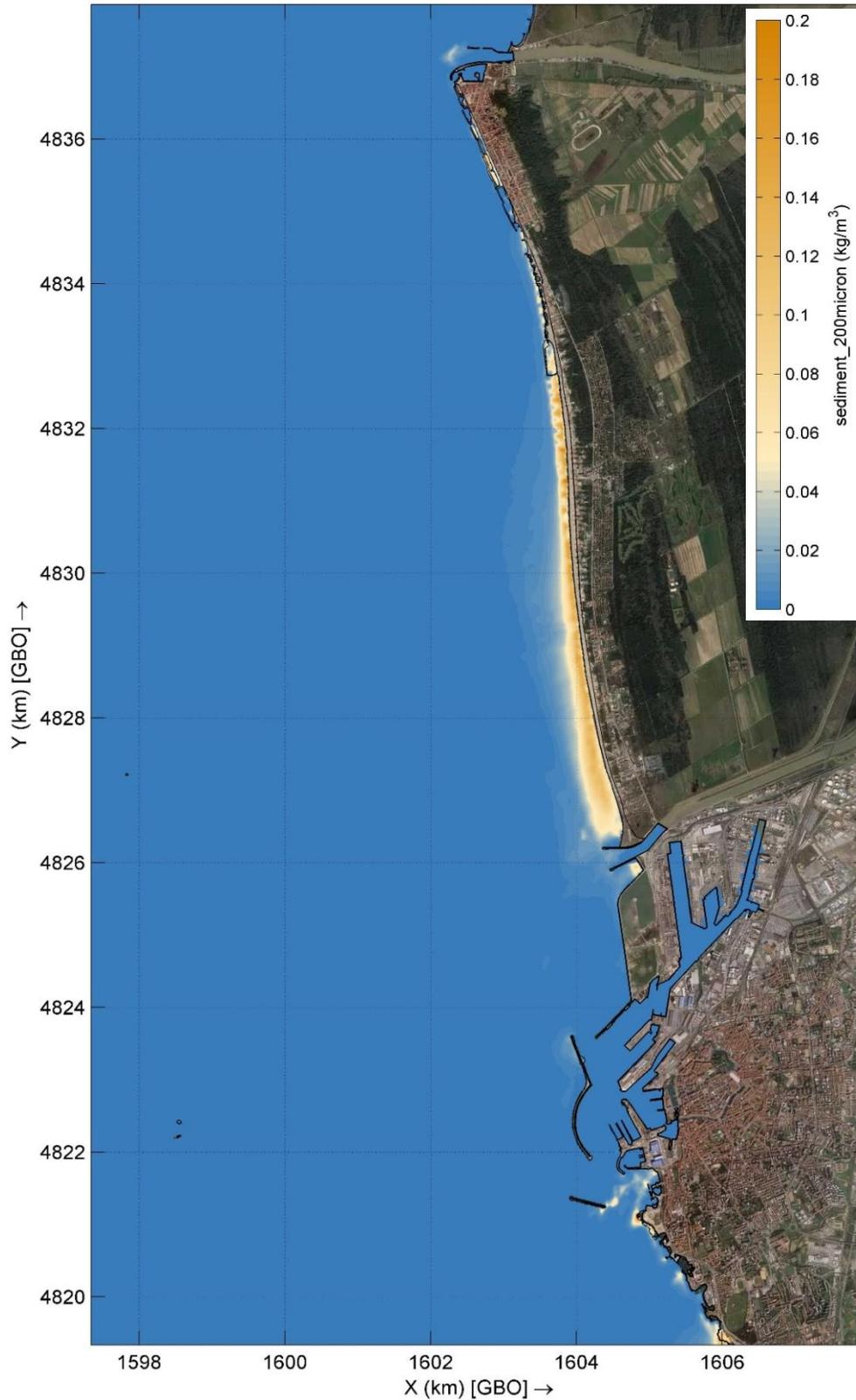


Figura 2.53 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Mezzogiorno Stato di fatto

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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

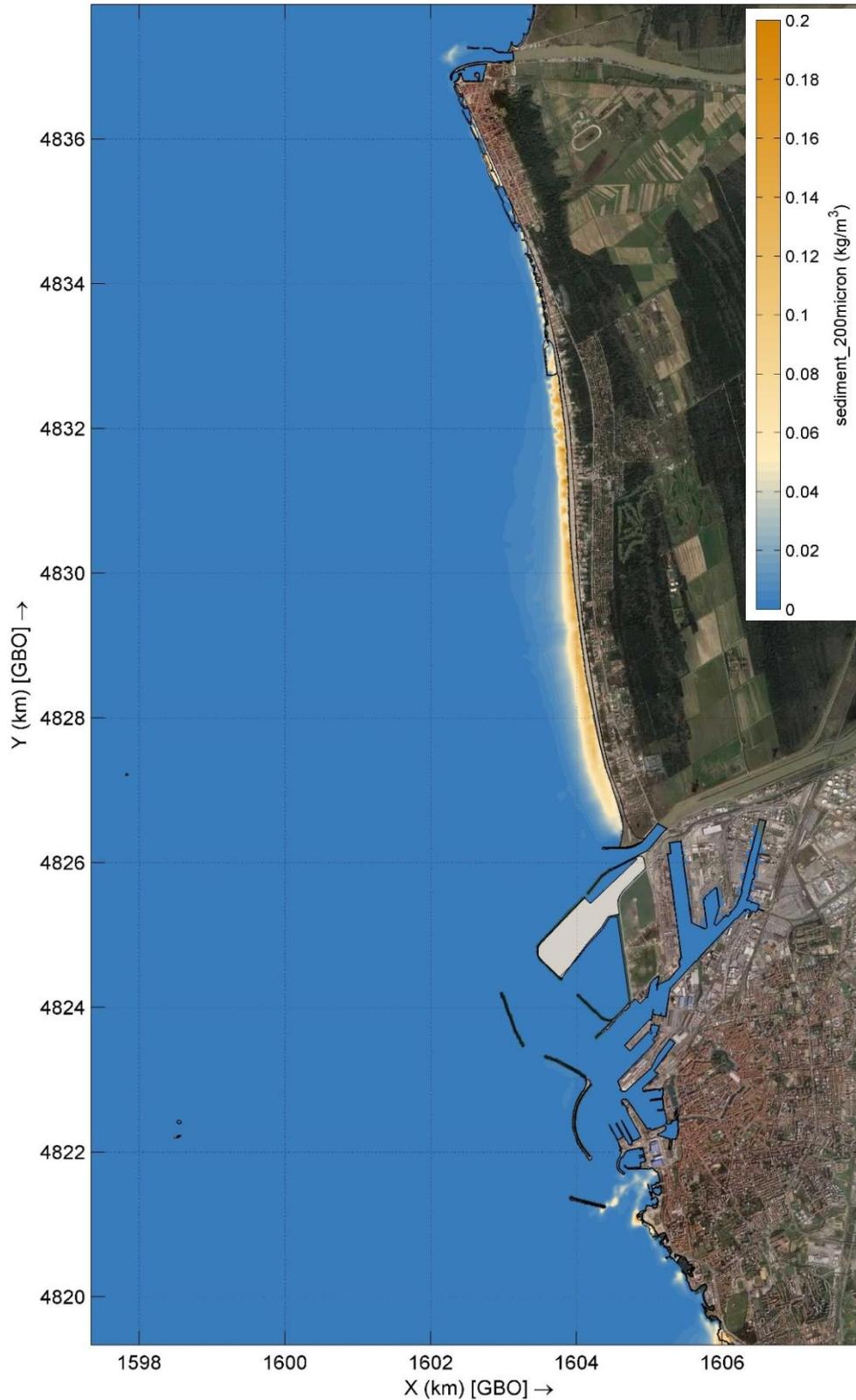


Figura 2.54 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Mezzogiorno Configurazione 1 di progetto

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Progetto Configurazione 2 Concentrazione di sedimenti Mareggiata 1 g/anno 170°N

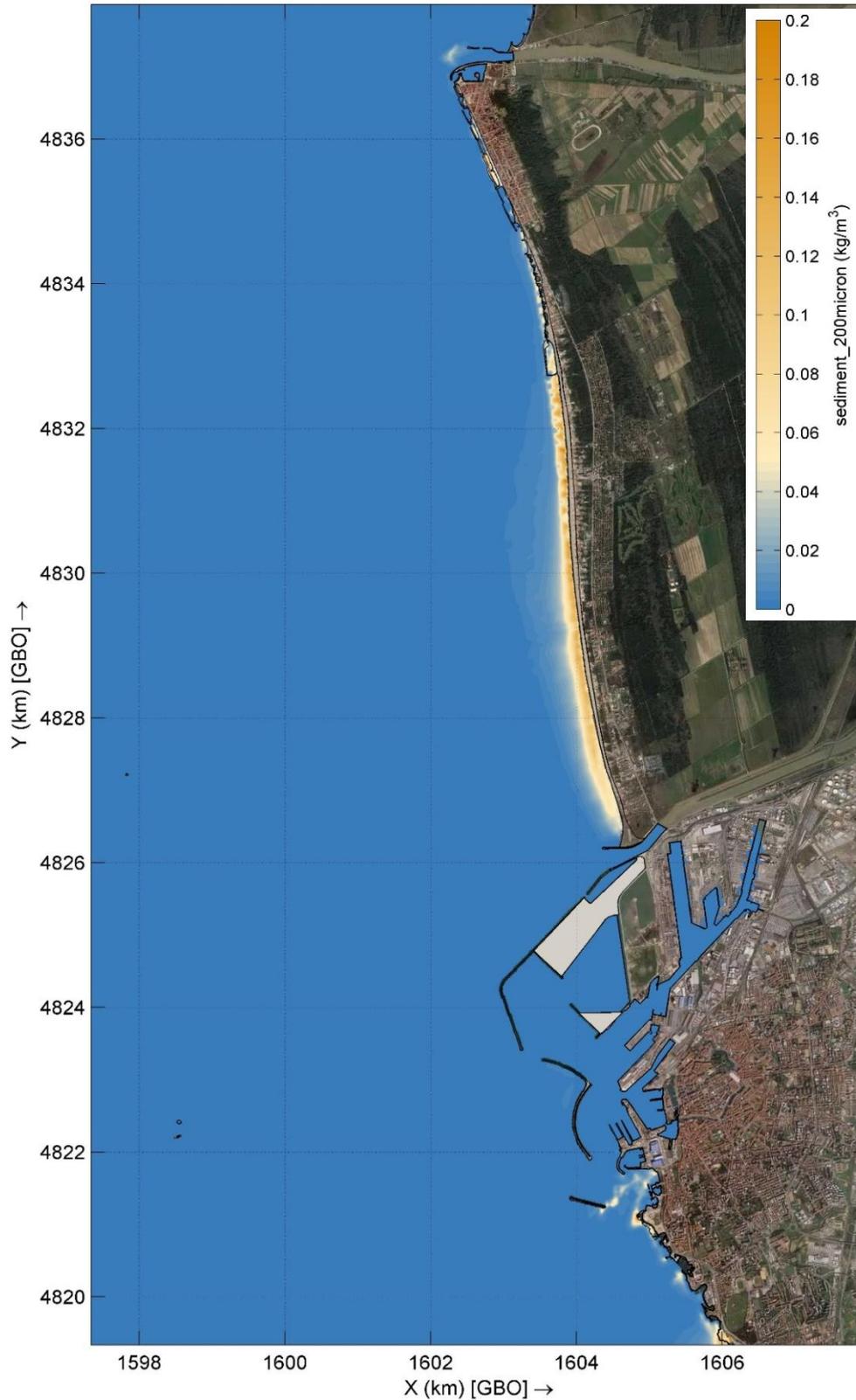


Figura 2.55 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Mezzogiorno Configurazione 2 di progetto

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Stato di fatto
Concentrazione di sedimenti
Mareggiata 1 g/anno 290°N

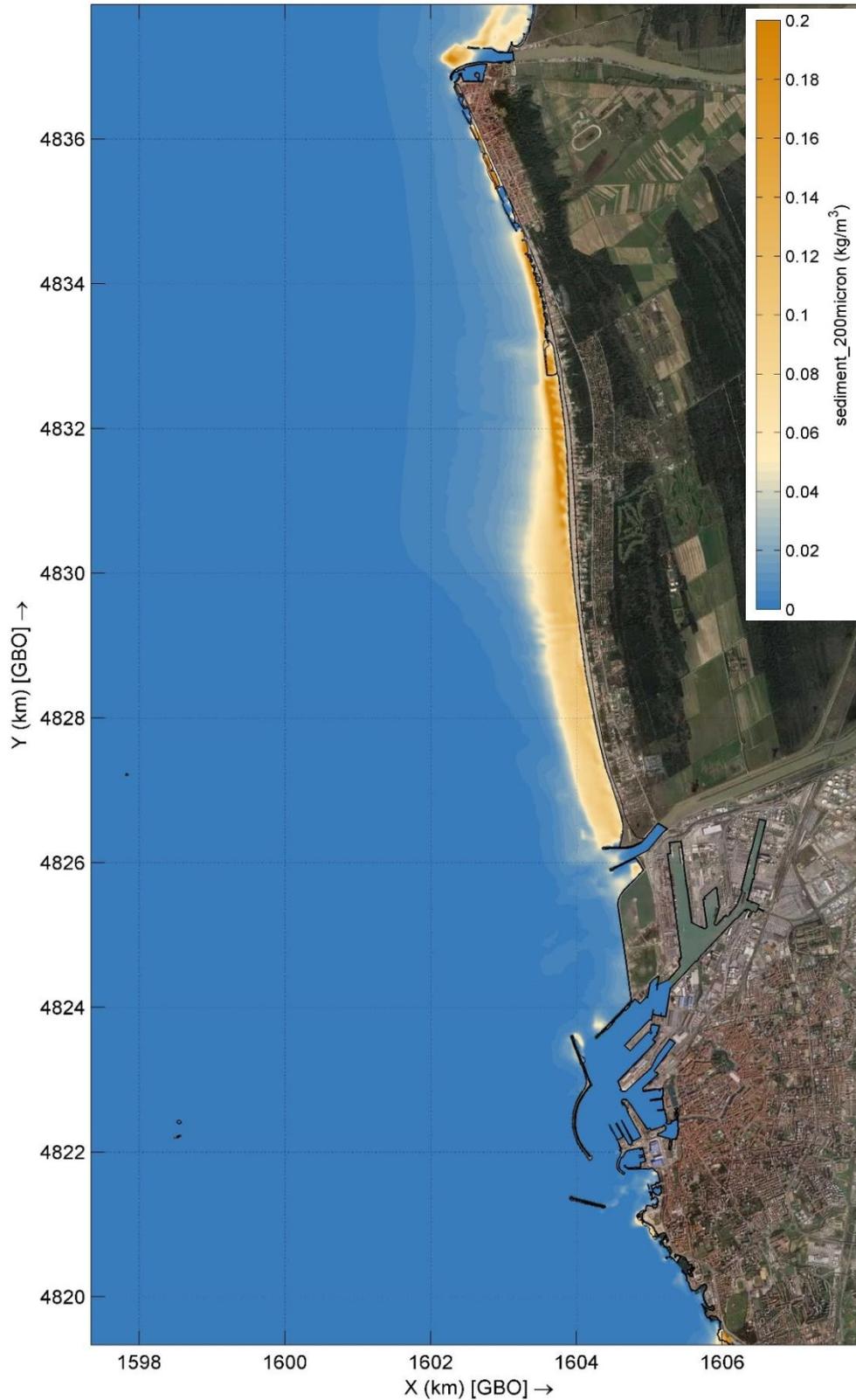


Figura 2.56 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Maestrale
Stato di fatto

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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



Figura 2.57 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Maestrale Configurazione 1 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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Progetto Configurazione 2 Concentrazione di sedimenti Mareggiata 1 g/anno 290°N

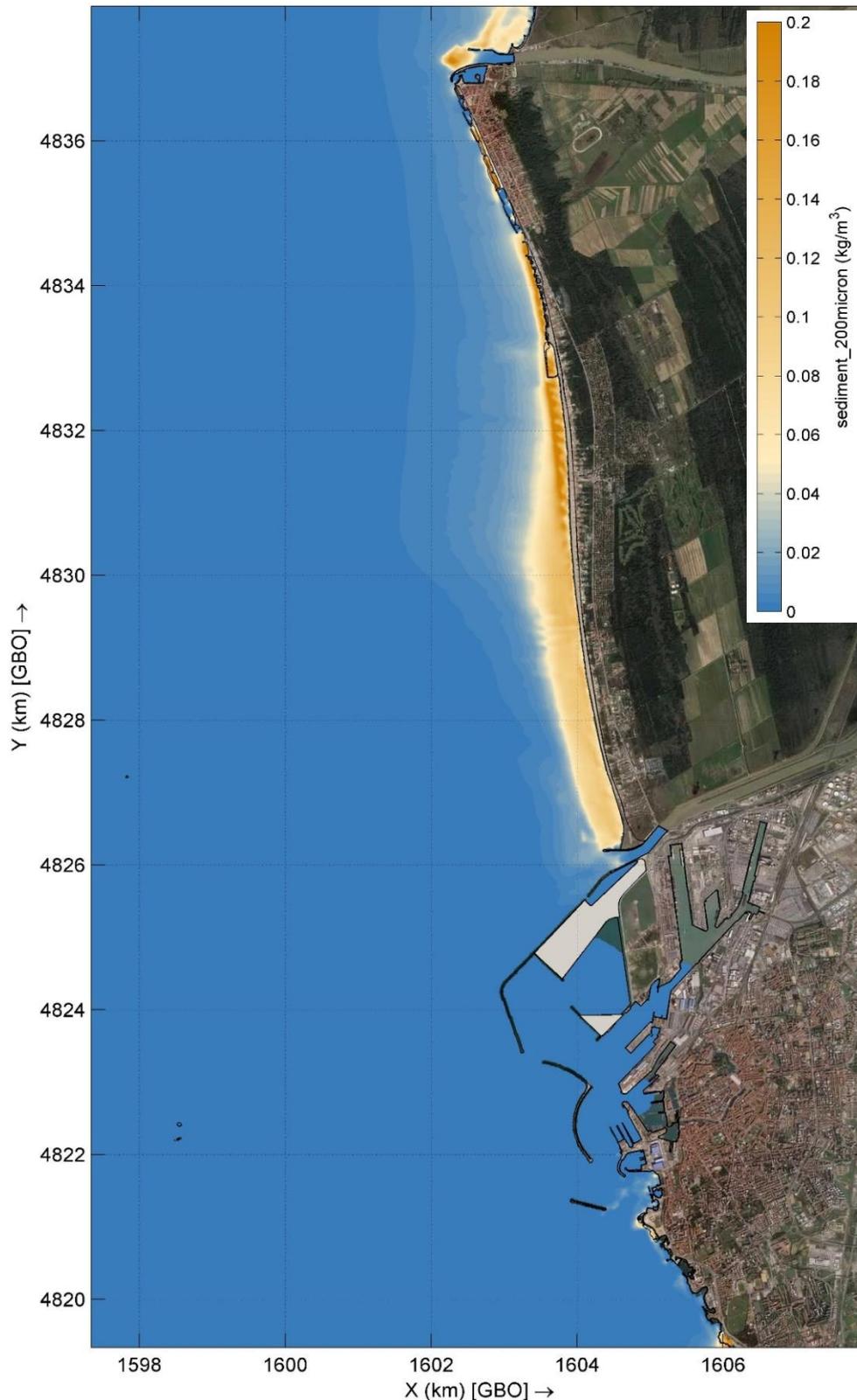


Figura 2.58 – Concentrazione dei sedimenti sabbiosi in sospensione per la mareggiata di Maestrale Configurazione 2 di progetto

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

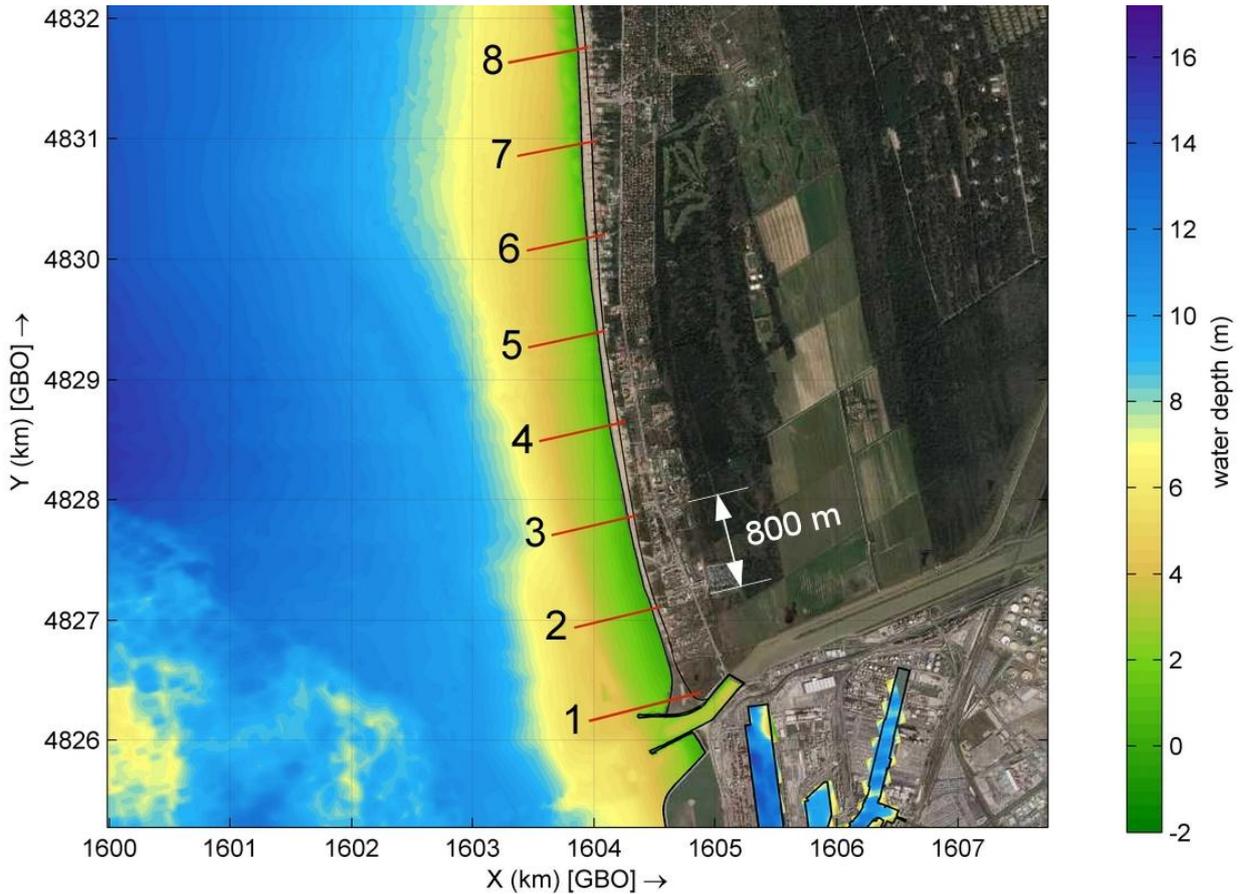


Figura 2.59 – Sezioni utilizzate per i bilanci della portata solida lungo il litorale dallo Scolmatore alle spiagge di Tirrenia

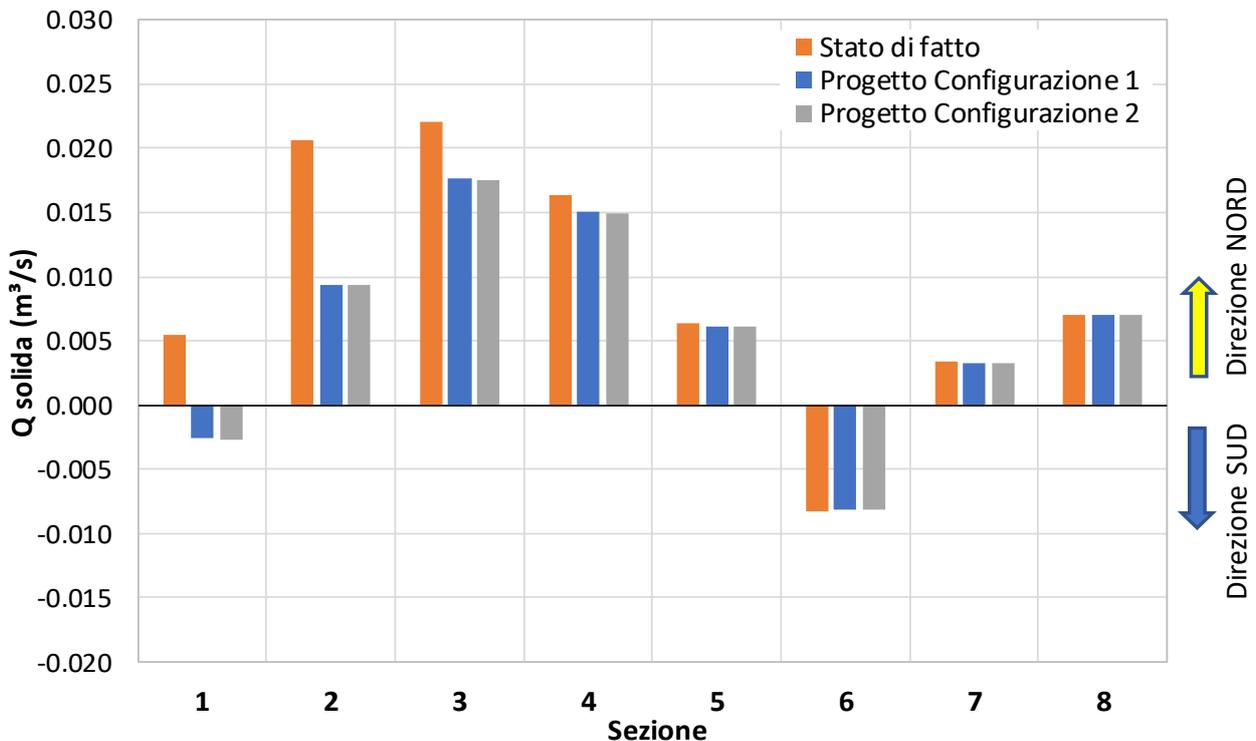


Figura 2.60 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 2.59, nelle diverse configurazioni, per la mareggiata di Ponente

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

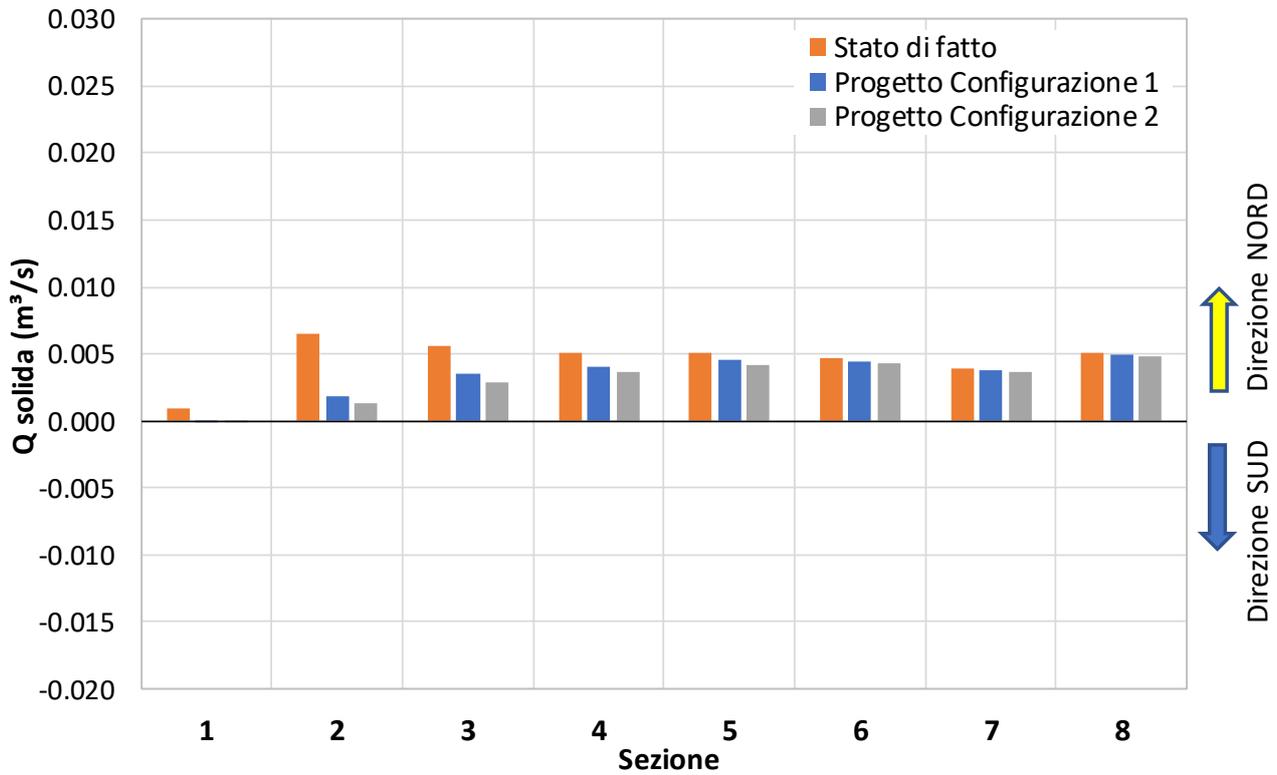


Figura 2.61 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 2.59, nelle diverse configurazioni, per la mareggiata di Mezzogiorno

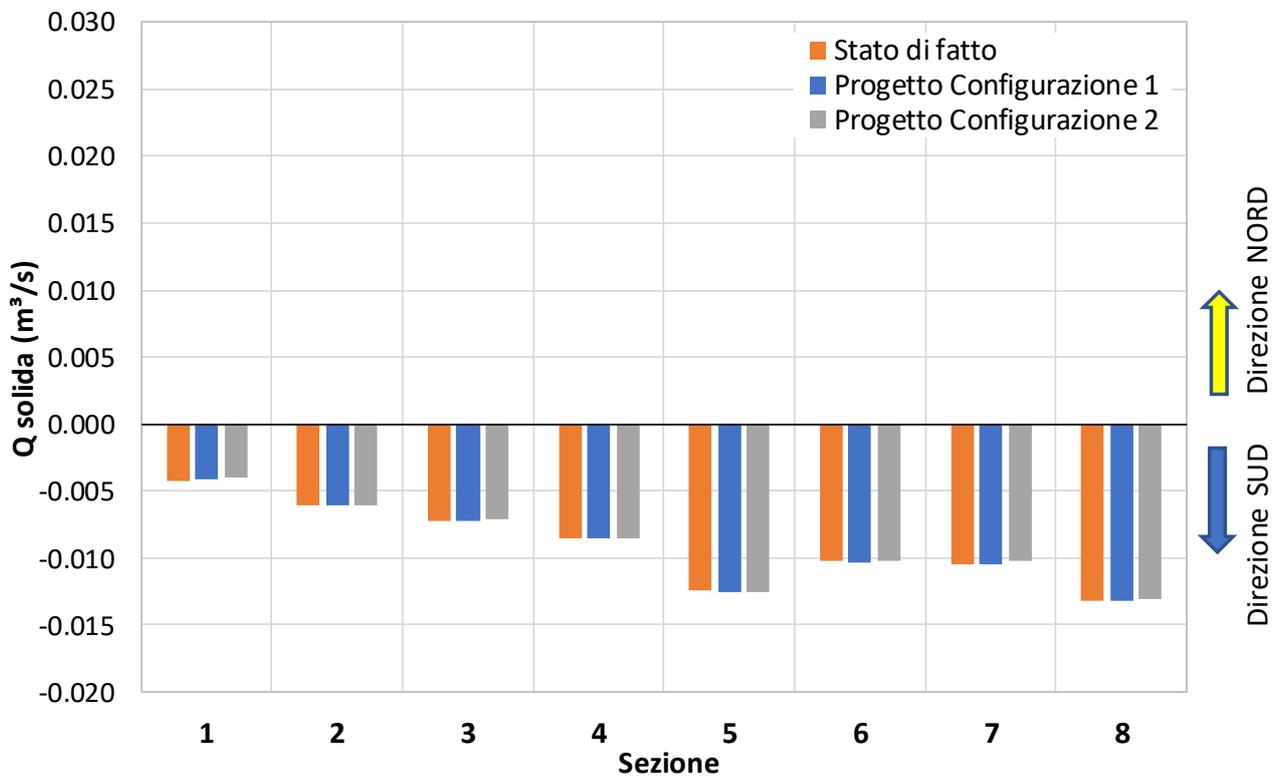


Figura 2.62 – Portata solida nelle sezioni individuate in Figura 2.59, nelle diverse configurazioni, per la mareggiata di Maestrale

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

3 Effetti delle portate di piena dello Scolmatore d'Arno

3.1 Premessa

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 e fu completata nel 1985.

Il canale deriva le acque del Fiume Arno attraverso un sistema di 4 paratoie a ventola che si abbattono 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, raccoglie inoltre le acque provenienti dal Padule di Fuccionchio, raccolte dal C. Usciana attraverso un bypass che sottopassa l'Arno in corrispondenza dell'opera di presa dello Scolmatore stesso.

Nell'ottica della valutazione delle potenziali interferenze dell'opera in progetto sulla dinamica costiera del tratto compreso tra il porto di Livorno e 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 § 3.2.1). 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. 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 auto-perpetuarsi 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 3.1.

Se confrontata con l'estensione dell'Area Marina Protetta Secche della Meloria, riportata in Figura 3.2, l'area indagata dal rilievo geomorfologico 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*.

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

Il rilievo geomorfologico sostanzialmente evidenzia come le aree occupate dalle fanerogame in buono stato di conservazione si trovino ad una distanza di almeno 2.5 km dalla foce dello Scolmatore, su fondali aventi una profondità di circa -10 m s.m.m. o inferiore. Per questo motivo nelle mappe riportate nel seguito, sono sempre state rappresentate sia le aree dove la *Posidonia Oceanica* è stata effettivamente rilevata sia quelle dove è ipotizzabile la sua presenza, cioè all'interno dell'isobata -10 m s.m.m..

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 m³/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 m³/s (Figura 3.3), 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 3.4).

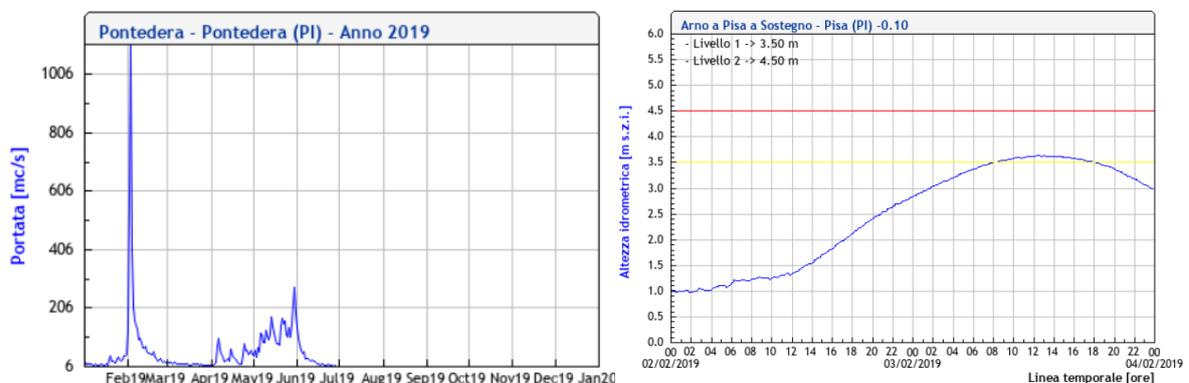


Figura 3.3 – A sinistra, portata misurata sull'Arno a Pontedera nel corso del 2019 (<http://www.sir.toscana.it/>), a destra livello idrometrico dell'Arno a Pisa Sostegno tra il 2 e il 4 febbraio 2019 ([5]).

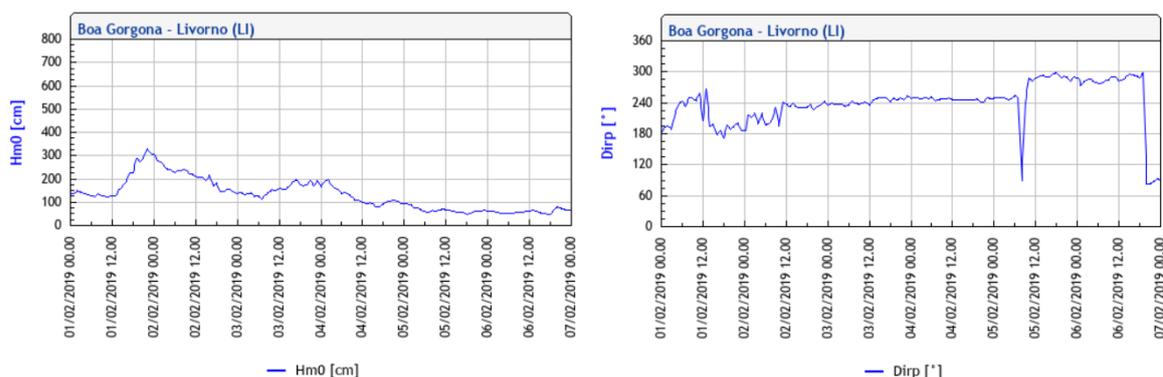


Figura 3.4 – Evento meteo-marino 1-3 febbraio 2019. Altezza d'onda significativa (a sinistra) e direzione dell'onda (a destra) misurate alla boa Gorgona (<http://www.sir.toscana.it/>).

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

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 3.5), 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 m³/s il 3 febbraio e di circa 160 m³/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 sia ormai circoscritta nei pressi 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.

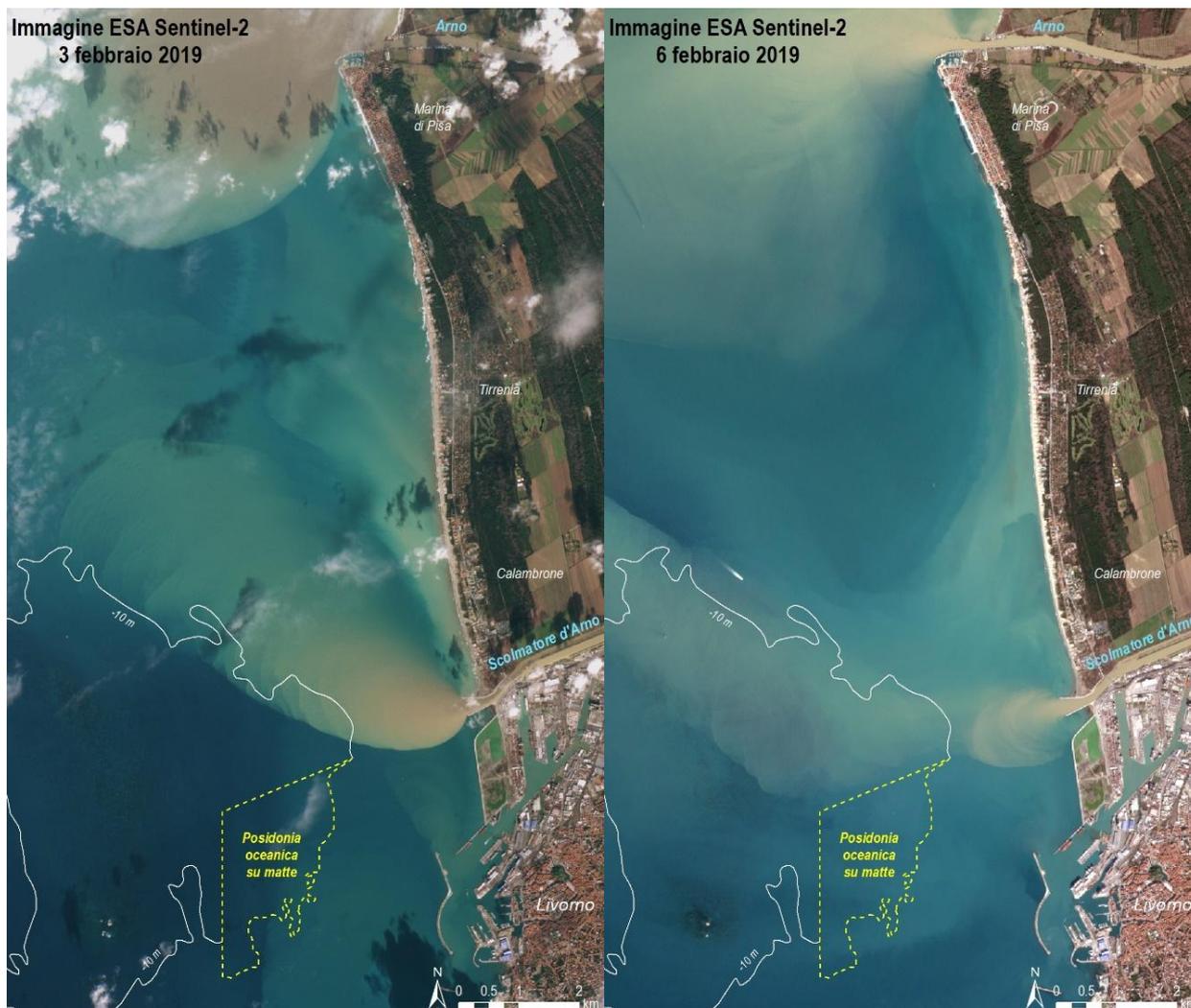


Figura 3.5 – Immagini satellitari ESA Sentinel-2 raccolte il 3 febbraio (a sinistra) e il 6 febbraio 2019 (a destra). La risoluzione è di 10 m e sono state evidenziate la batimetrica -10 m s.m.m. e l'areale della Posidonia [4]

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

3.2 Condizioni al contorno

3.2.1 Valutazioni sulla portata dello Scolmatore alla foce

Come già riportato nel paragrafo 3.1, 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 (PGRA) 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 m³/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 3.1 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 ³ /s)	Arno Valle (m ³ /s)	Scolmatore (m ³ /s)	% derivata
30	3329	2300	1029	31%
200	3684	2497	1187	32%

Tabella 3.1 – 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]).

Per queste ultime, si tratta peraltro di valori superiori all'attuale capacità di portata dello Scolmatore, stimata intorno ai 700 m³/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 alluvionali risultano infatti assai diffusi nelle aree contermini al canale, derivanti anche da 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 m³/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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.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 m³/sec, ben inferiore a quella di progetto pari a 1.400 m³/sec (Tabella 3.2).

<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 3.2 – 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 3.2, pari a **414** m³/s, che è stato considerato rappresentativo della portata che mediamente può essere scaricata in mare.

Alcune simulazioni di verifica sono state effettuate anche considerando la portata massima prevedibile al completamento degli interventi in corso di realizzazione, che come si è detto è pari a **1000** m³/s.

Il valore di 1000 m³/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, 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 valutata in circa 730 m³/s, la durata dello sfioro è stata di circa 27 ore, e il volume derivato è stato di circa 50*10⁶ m³. 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 m³/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 m³/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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

In Figura 3.6 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".

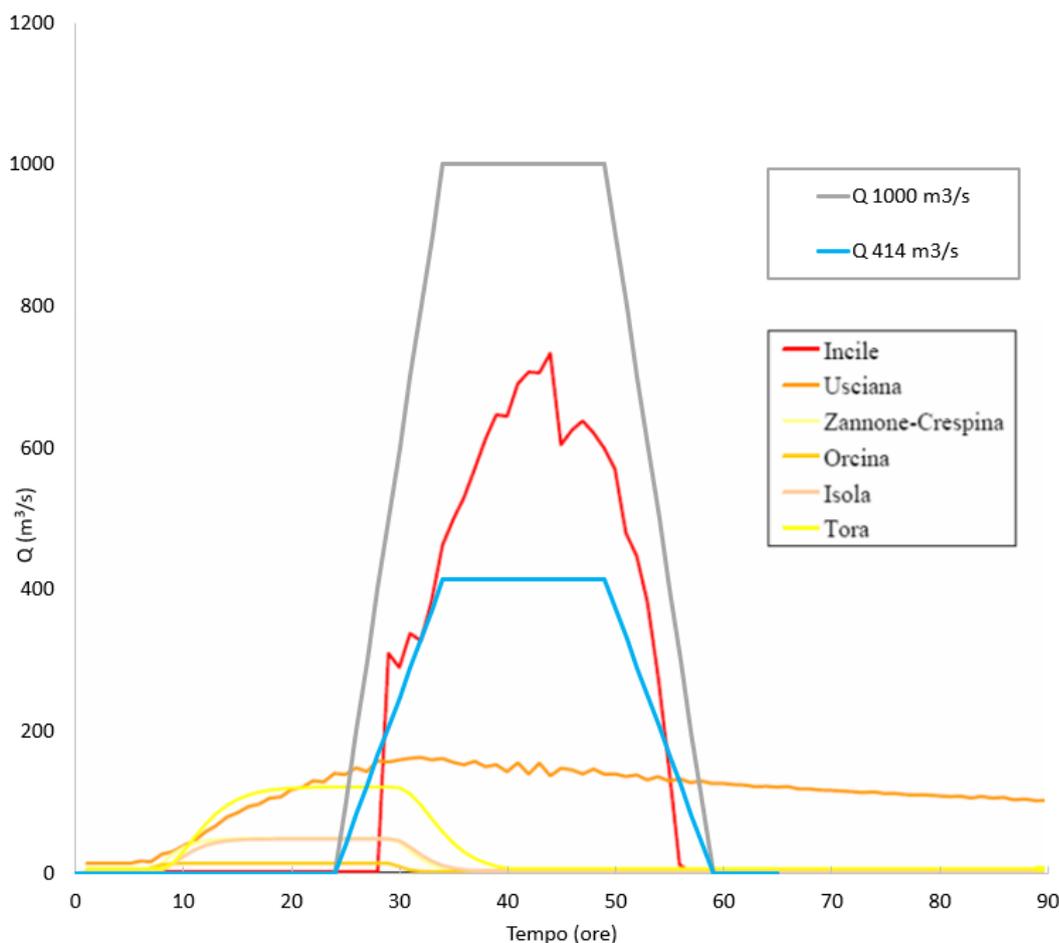


Figura 3.6 – Portate fluenti nello Scolmatore per l'evento con $Tr=50$ anni [7] e, in grigio e azzurro, portate massima ($Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$) e media ($Q=414 \text{ m}^3/\text{s}$) ipotizzate nel presente studio

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

3.2.2 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 μm), 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 μm e quindi caratterizzati da velocità di caduta ridottissima (0.1 mm/s).

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

3.2.3 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 3.7); il modello è basato sul codice di calcolo ROMS (Regional Ocean Modeling System).

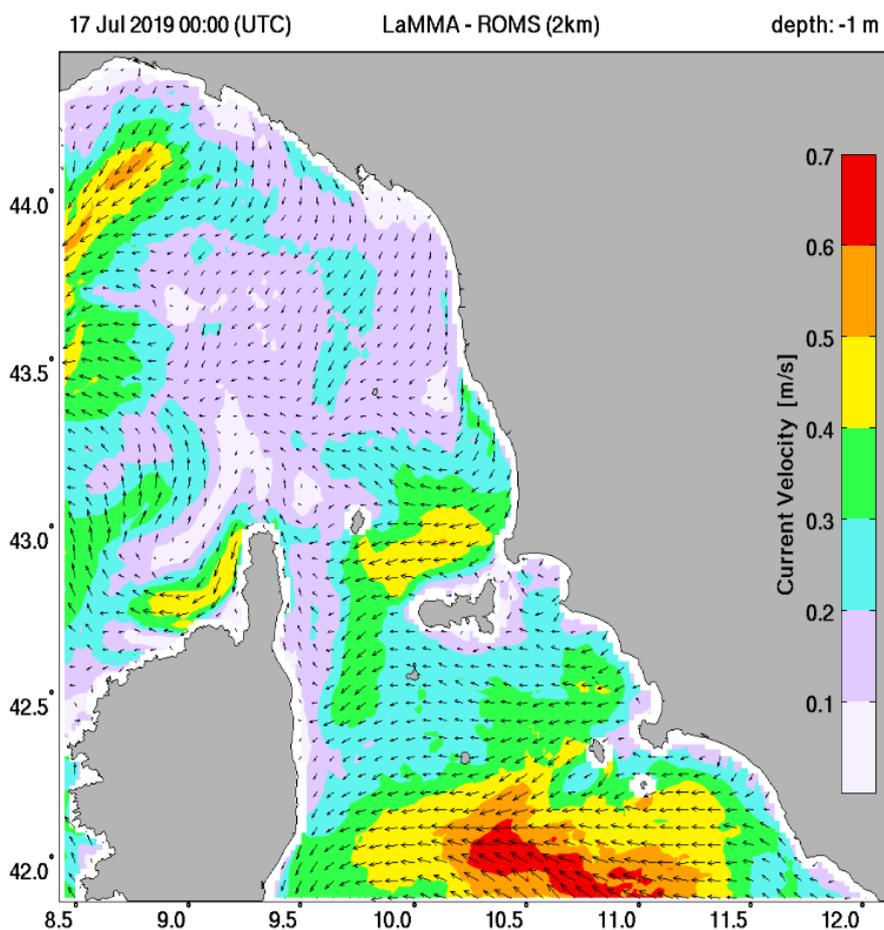


Figura 3.7 – Esempio di mappa delle correnti superficiali nell’alto Tirreno prodotta dal modello del consorzio LaMMA (<http://www.lamma.rete.toscana.it/mare/modelli/correnti>).

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 EuropeanModelling 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.

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

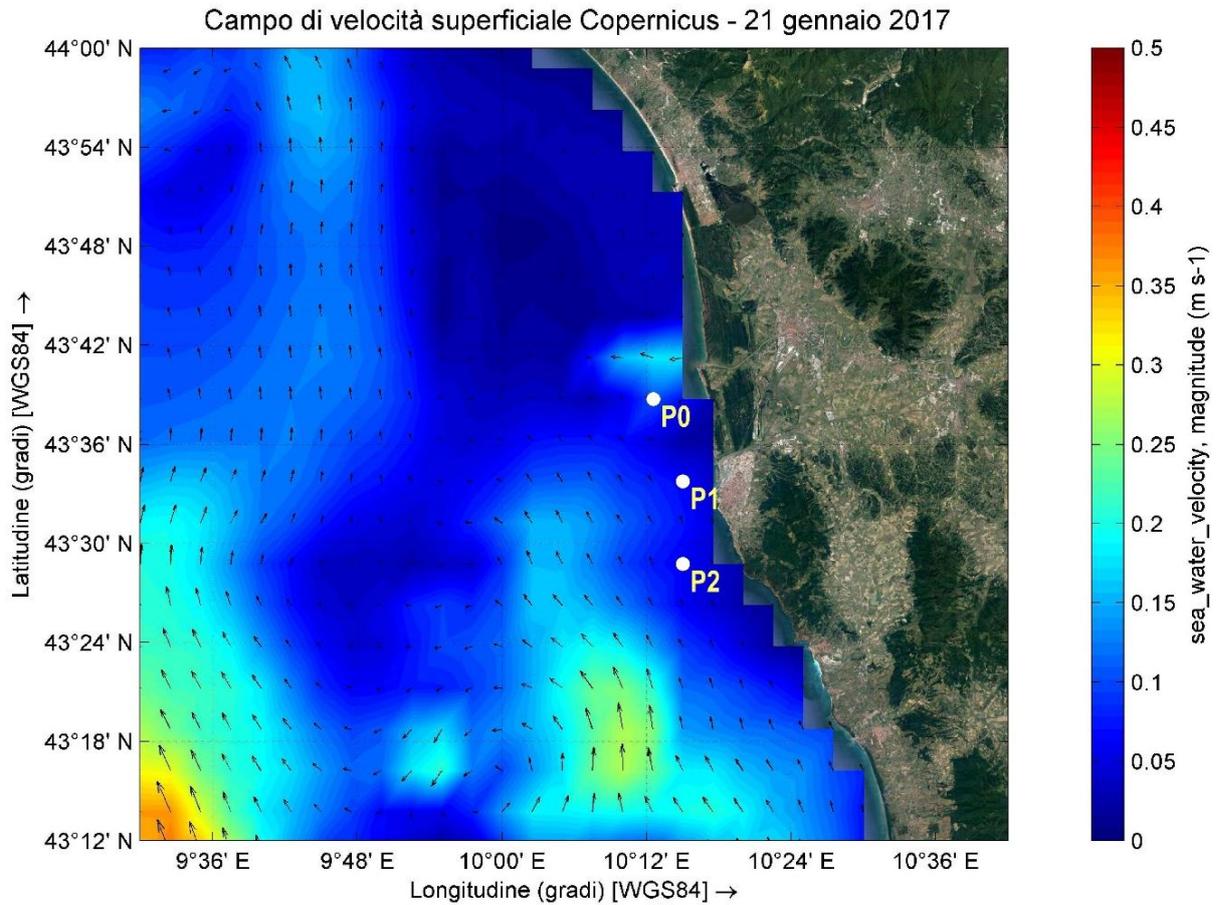


Figura 3.8 – Esempio di mappa delle correnti superficiali nell’alto Tirreno fornita dal servizio CMEMS Copernicus

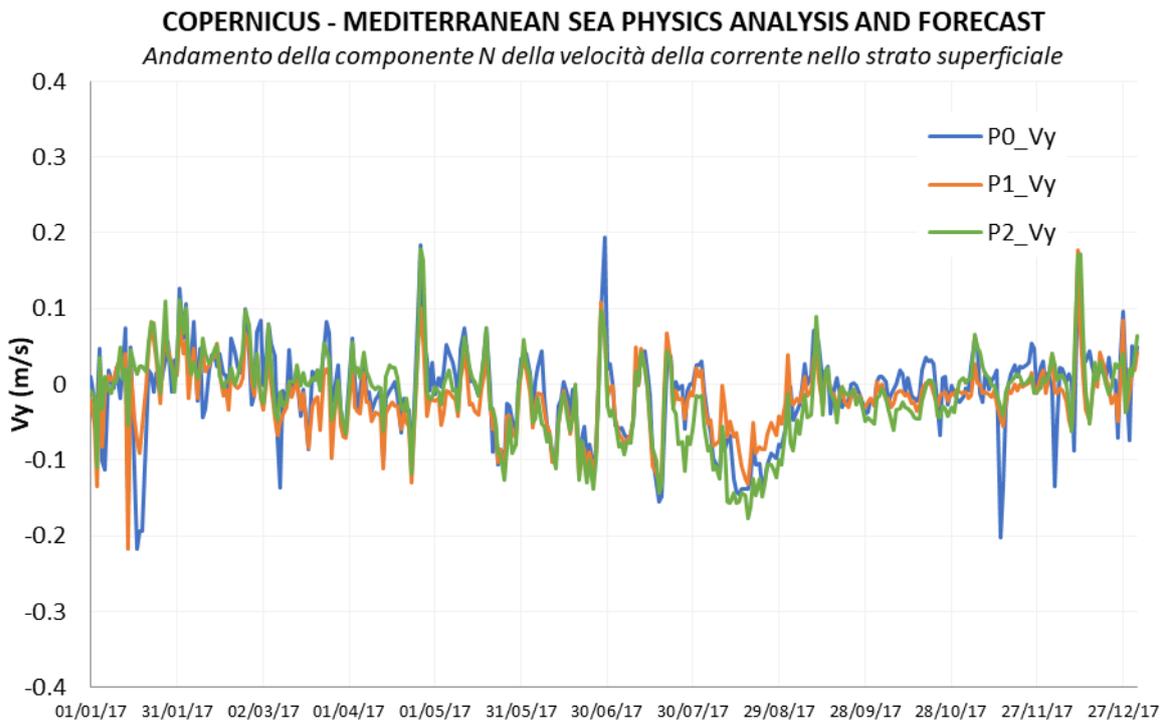


Figura 3.9 – Andamento della componente Nord della velocità superficiale fornita dal servizio CMEMS Copernicus

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.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 3.9 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 3.8). 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:

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

3.3 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 § 2.4 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 "eddyviscosity" orizzontale è pari a 1 m²/s (come in altri studi simili come tipologia [13] [14] [15] e prossimità geografica [16]), mentre la "eddydiffusivity" orizzontale è stata abbassata a 1 m²/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 µm, calcolata mediante la formula di Stokes e assunta pari a 0.09 mm/s in acqua salata;
- è stata esclusa la possibilità di flocculazione;
- la densità dei sedimenti è di 2650 kg/m³;
- il è fondo 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 **Errore. L'origine iferimento non è stata trovata.**

Per il modulo WAVE di Delft3D sono stati utilizzati gli stessi parametri già descritti nel § 2.4.

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

3.4 Scenari analizzati

Anche in questo caso sono state analizzate 3 configurazioni dell'area portuale:

- a) stato di fatto (SDF)
- b) progetto Configurazione 1
- c) progetto Configurazione 2

Per la portata proveniente dallo Scolmatore è stato ipotizzato e simulato uno scenario "medio" (414 m³/s) e uno scenario "raro" (1000 m³/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 2.3).

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 3.3 elenca le 15 simulazioni effettuate, illustrate nei paragrafi che seguono.

Caso	Configurazione	Mareggiata	Piena Scolmatore
Scolm 1	Stato di fatto	calma	414 m ³ /s
Scolm 2	Progetto Configurazione 1	calma	414 m ³ /s
Scolm 3	Progetto Configurazione 2	calma	414 m ³ /s
Scolm 4	Stato di fatto	calma	1000 m ³ /s
Scolm 5	Progetto Configurazione 1	calma	1000 m ³ /s
Scolm 6	Progetto Configurazione 2	calma	1000 m ³ /s
Scolm 7	Stato di fatto	250°N - 1 g/anno	414 m ³ /s
Scolm 8	Progetto Configurazione 1	250°N - 1 g/anno	414 m ³ /s
Scolm 9	Progetto Configurazione 2	250°N - 1 g/anno	414 m ³ /s
Scolm 10	Stato di fatto	170°N - 1 g/anno	414 m ³ /s
Scolm 11	Progetto Configurazione 1	170°N - 1 g/anno	414 m ³ /s
Scolm 12	Progetto Configurazione 2	170°N - 1 g/anno	414 m ³ /s
Scolm 13	Stato di fatto	290°N - 1 g/anno	414 m ³ /s
Scolm 14	Progetto Configurazione 1	290°N - 1 g/anno	414 m ³ /s
Scolm 15	Progetto Configurazione 2	290°N - 1 g/anno	414 m ³ /s

Tabella 3.3 – Scenari analizzati nello studio dell'interferenza del progetto con le portate di piena dello Scolmatore d'Arno.

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

3.5 Risultati delle simulazioni

Le mappe riportate nelle figure seguenti, da Figura 3.10 a Figura 3.20, mostrano, per ciascuna delle portate ipotizzate alla foce dello Scolmatore (414 m³/s e 1000 m³/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 3 configurazioni considerate (Stato di fatto, Progetto Configurazione 1 e Progetto Configurazione 2) i risultati delle simulazioni, in termini di distribuzione della concentrazione di sedimenti in sospensione (kg/m³). Ogni mappa riporta i contorni delle aree sensibili dove è presente la *Posidonia Oceanica*; in particolare, le linee a tratto continuo rappresentano le aree dove la presenza della specie è indicata nel rilievo geomorfologico del 2016 [4], mentre le linee tratteggiate (che coincidono, di fatto, con l'isobata -10 m s.m.m.) delimitano a loro volta le zone all'esterno dell'area del rilievo dove, per continuità, la presenza della *Posidonia* è stata ritenuta molto probabile (si veda il par. 3.1).

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 3.6.

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 3.6) 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 6 ore di portata con valore costante;
- t = 36 ore, al termine della simulazione, 10 ore dopo il termine 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.

In Figura 3.10 è riportata la dispersione del plume per lo stato di fatto con mare calmo e portata di 414 m³/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.

Le configurazioni di progetto sono riportate in Figura 3.11 e Figura 3.12; esse forniscono risultati quasi analoghi tra loro, ma con alcune differenze rispetto allo stato di fatto. In particolare, la presenza delle nuove opere portuali inibisce la formazione del vortice meridionale e induce il getto ad assumere una traiettoria diretta maggiormente verso Sud e ad interessare in parte anche porzioni più meridionali dell'areale della *Posidonia*. L'asimmetria nel campo delle correnti si riflette sulla distribuzione della concentrazione di sedimenti in sospensione, riportata nelle mappe: il plume tende infatti a diffondersi maggiormente sul suo lato settentrionale e a restare invece più contenuto sul lato meridionale.

L'estensione del plume verso il largo è leggermente più contenuta rispetto allo stato di fatto, essendo ridotta di almeno 500 m, mentre le concentrazioni di sedimenti sulle aree sensibili sono di fatto analoghe nei due casi. La presenza delle nuove opere portuali non modifica quindi la dinamica della torbida fluviale, che peraltro già allo stato attuale manifesta alcuni elementi di criticità rispetto all'impatto sulla prateria di fanerogame.

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

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, inoltre, rende questa prima analisi molto "accademica" e utile a comprendere i caratteri generali del processo più che a quantificarne le conseguenze.

La precipitazione di sedimenti sul fondale conseguente ai tre scenari simulati per le diverse configurazioni (Figura 3.13) mostra come i trend di sedimentazione siano pressoché identici per le due configurazioni di progetto e come entrambe si discostino moderatamente dallo stato di fatto con un leggero spostamento verso Sud dell'area di sedimentazione, che risulta più concentrata attorno alla foce e caratterizzata, peraltro, da coltri molto modeste.

Lo stesso tipo di analisi è stato ripetuto sulle 3 configurazioni per il caso, più raro, di un'onda di piena sullo Scolmatore con valore massimo di 1000 m³/s (associabile ad un tempo di ritorno dell'ordine dei 30 anni). I risultati sono riportati nelle figure da Figura 3.14 a Figura 3.16. Rispetto al caso precedente, per tutte le configurazioni si nota che l'estensione del plume verso il largo si incrementa fino a circa 7 km dalla foce e va ad interessare i fondali fino a profondità dell'ordine di -10 m s.m.m.. Le concentrazioni in sospensione e la loro distribuzione risultano tuttavia molto simili producendo però effetti quasi analoghi per tutte le 3 configurazioni analizzate. Anche in questo scenario, come spiegato in precedenza, la traiettoria del plume nelle configurazioni di progetto è spostata leggermente più a Sud (anche se in misura molto meno evidente che per la portata inferiore) rispetto allo stato di fatto.

La precipitazione di sedimenti sul fondale conseguente ai tre scenari simulati per le diverse configurazioni (Figura 3.17) mostra anche in questo come i trend di sedimentazione siano pressoché identici per le due configurazioni di progetto e come entrambe si discostino dallo stato di fatto per la minore estensione verso il largo e lo spostamento verso Sud dell'area di sedimentazione. 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 3.2).

Successivamente, sono stati considerati gli scenari di piena (con la sola portata massima dello Scolmatore di 414 m³/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 3.18 a Figura 3.20. In questi scenari si è tenuto conto di vento, 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 3.18) 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 alle configurazioni di progetto evidenzia inoltre alcune differenze sulla dinamica litoranea dei sedimenti: nello stato di fatto, infatti, il getto carico di sedimenti uscente dallo Scolmatore si diffonde in gran parte lungo il litorale a Nord della foce (litorale di Calambrone) ed interessa in misura minore il litorale a Sud, verso il porto di Livorno. Nelle configurazioni di progetto, invece, i sedimenti si diffondono invece maggiormente verso Sud ed in misura minore verso Nord. La differenza è sostanziale per la Configurazione 1, per la quale si evidenzia un significativo flusso di sedimenti fluviali verso i bacini interni del porto di Livorno, mentre è assai

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 di fattibilità tecnico economica	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx
---	--	--

meno evidente per la Configurazione 2, che evita l'interrimento dei bacini portuali e sposta parte del flusso verso il largo, mantenendosi comunque a distanza dall'areale della Posidonia.

Per la mareggiata di Mezzogiorno (Dir=170°N, Hs=2.44 m, Tp=6.73 s) le mappe che confrontano le varie configurazioni sono riportate in Figura 3.19 .

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 SW. In tutte e tre le configurazioni esaminate, il plume arriva a lambire e ad interessare parzialmente, con concentrazioni modeste, l'areale della Posidonia. Anche in questo caso, nelle configurazioni di progetto si riduce il flusso di sedimenti fluviali convogliato lungo il litorale a Nord della foce dello Scolmatore, che risulta praticamente inesistente. Si conferma inoltre il fatto che la Configurazione 2 di progetto, senza varco sulla Diga Nord, consente una maggior protezione del bacino portuale nei confronti della penetrazione dei sedimenti fluviali provenienti dallo Scolmatore.

I risultati del confronto tra le diverse configurazioni per la mareggiata di Maestrale (Dir=290°N, Hs=2.14 m, Tp=7.3 s) sono riportati in Figura 3.20. Anche in questo caso il plume tende ad essere inizialmente confinato verso la costa, ma è comunque in grado di avanzare verso il largo seguendo una traiettoria che lo porta verso Nord-Ovest, senza comunque interessare né l'areale della Posidonia né i bacini portuali. Come nel precedente scenario, ciò dipende dal campo di corrente che si instaura con questa mareggiata di modesta intensità, che induce deboli correnti dirette a Sud solamente in prossimità della spiaggia del Calambrone e sugli affioramenti rocciosi delle Secche della Meloria.

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

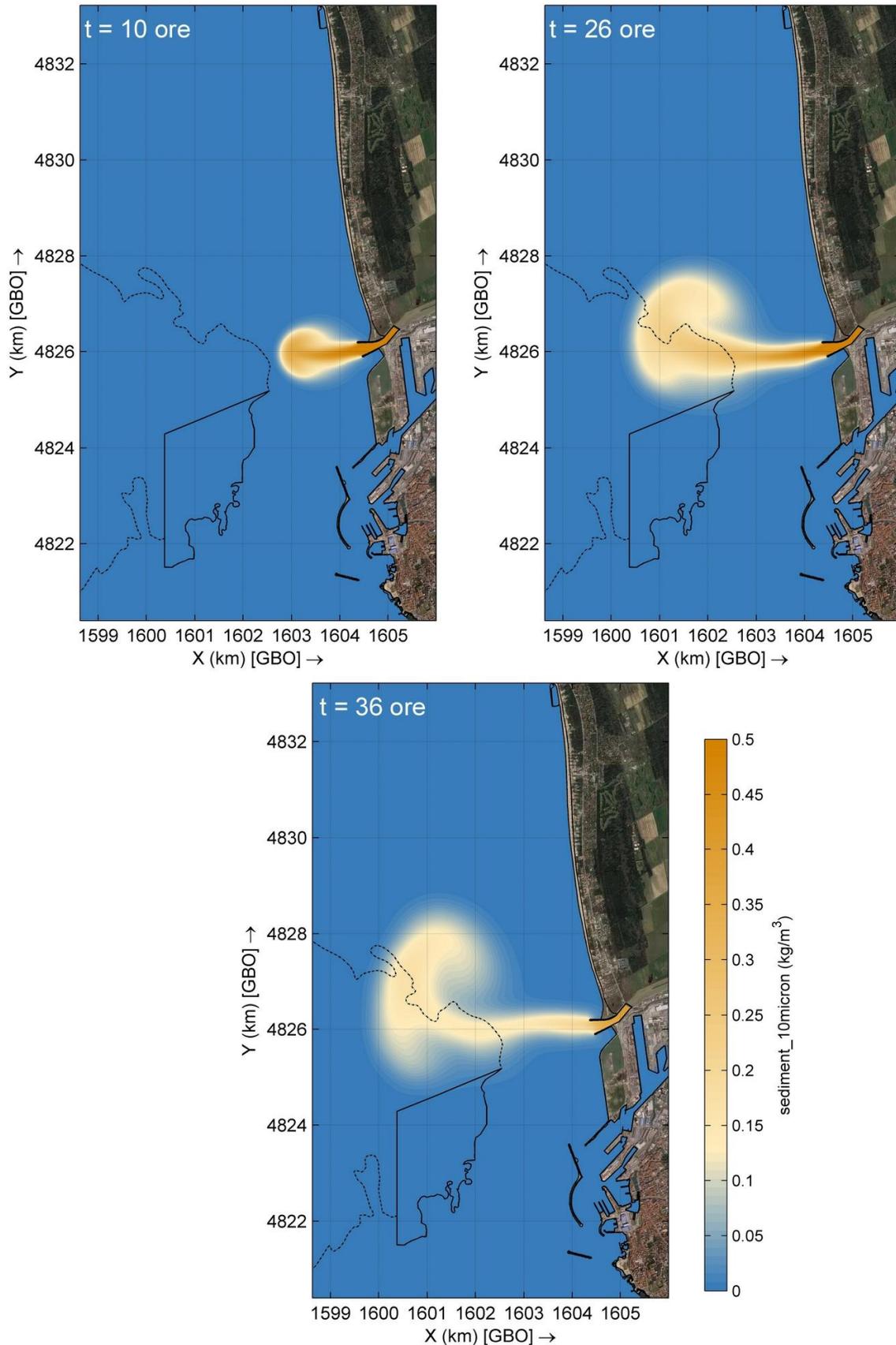


Figura 3.10 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Stato di fatto, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

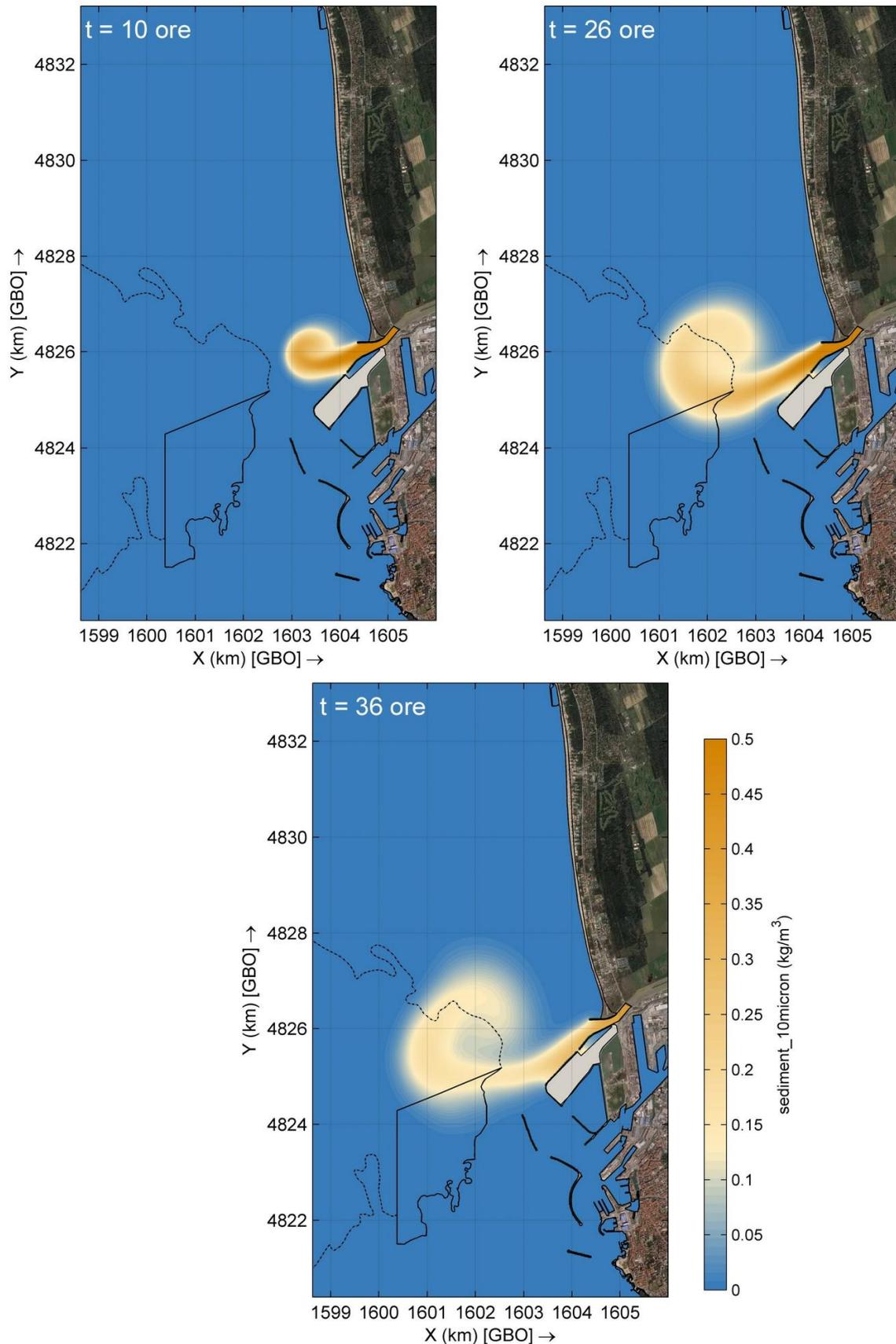


Figura 3.11 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazione di progetto 1, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

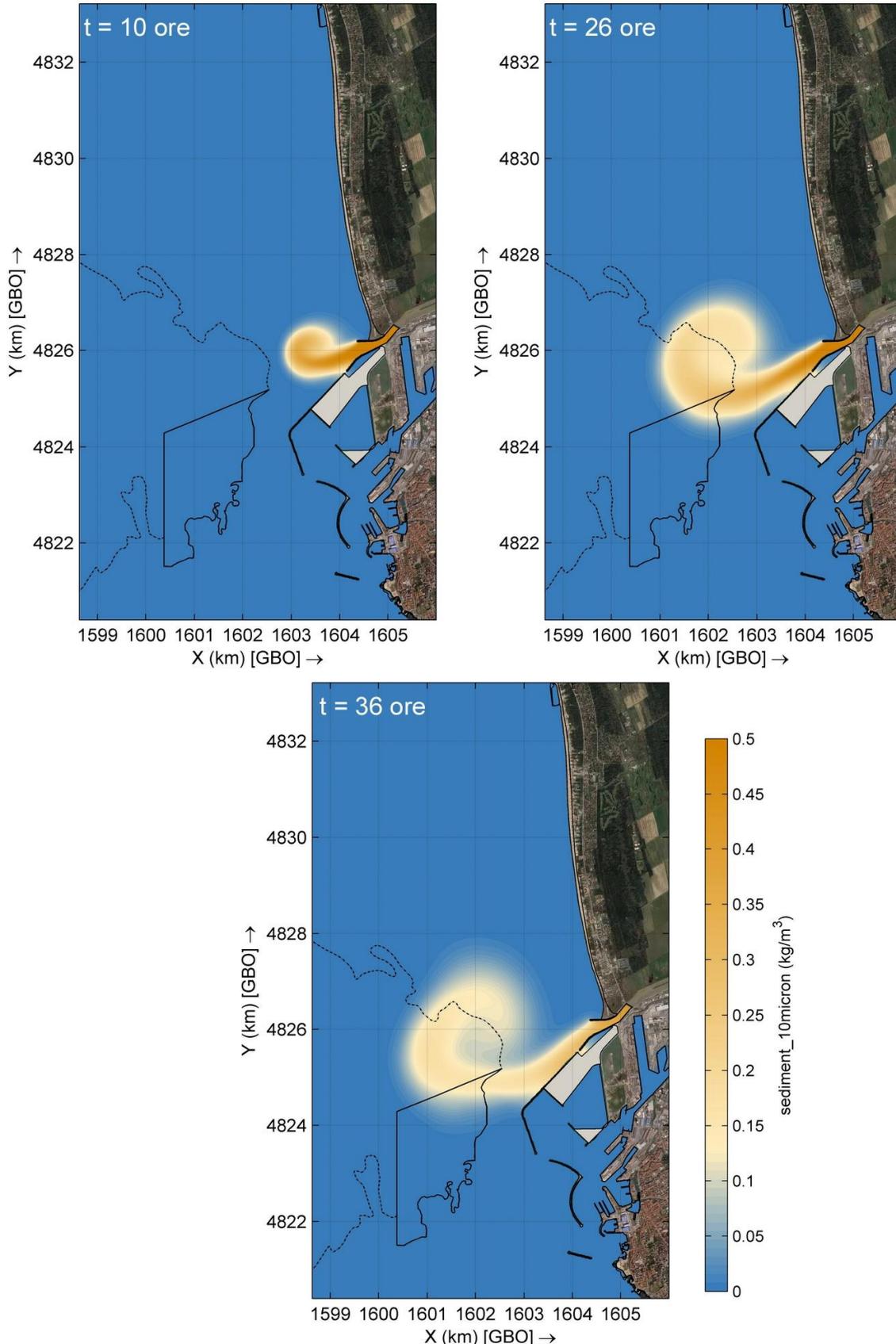


Figura 3.12 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazione di progetto 1, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

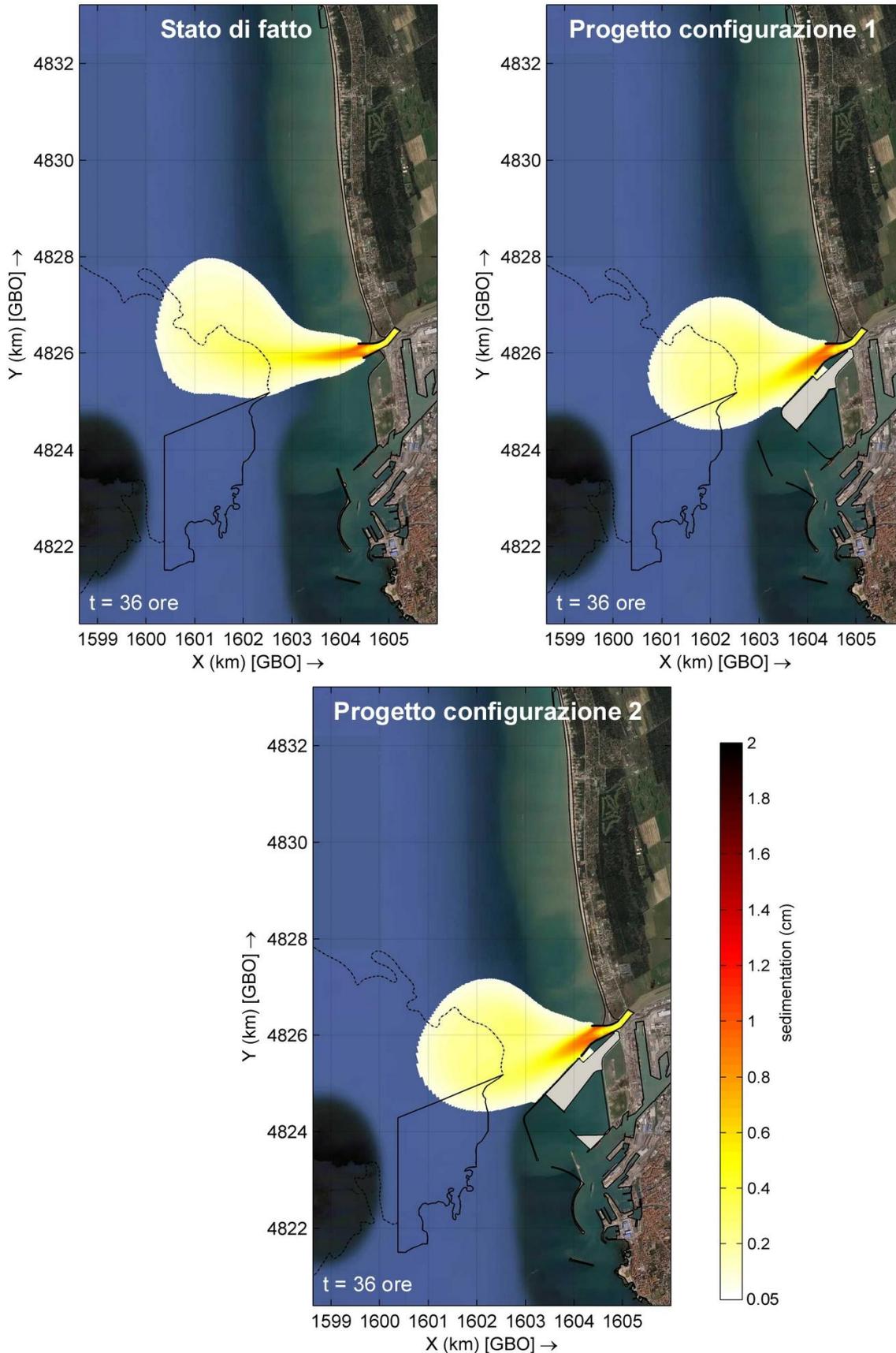


Figura 3.13 – Precipitazione dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazioni a confronto, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

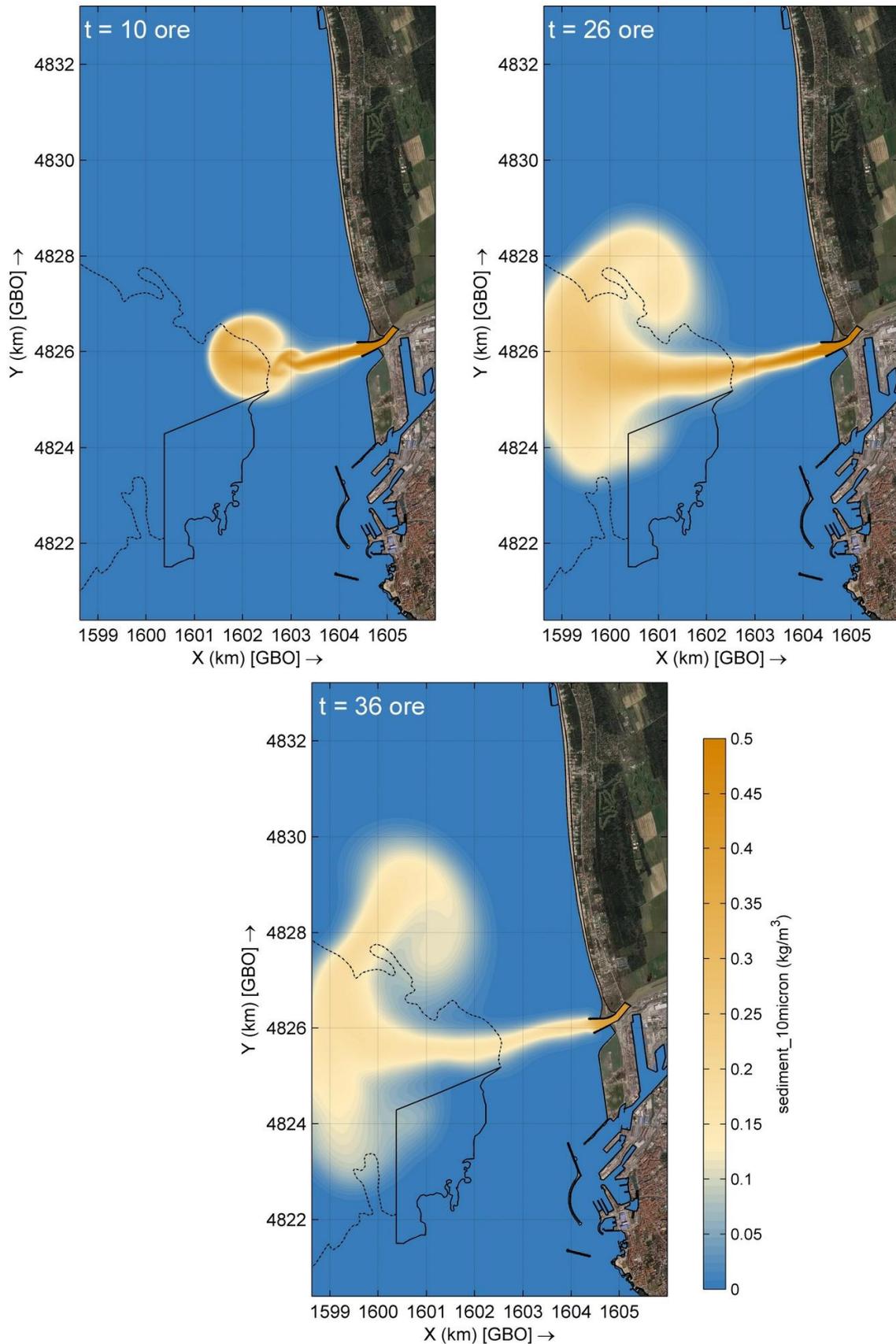


Figura 3.14 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Stato di fatto, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

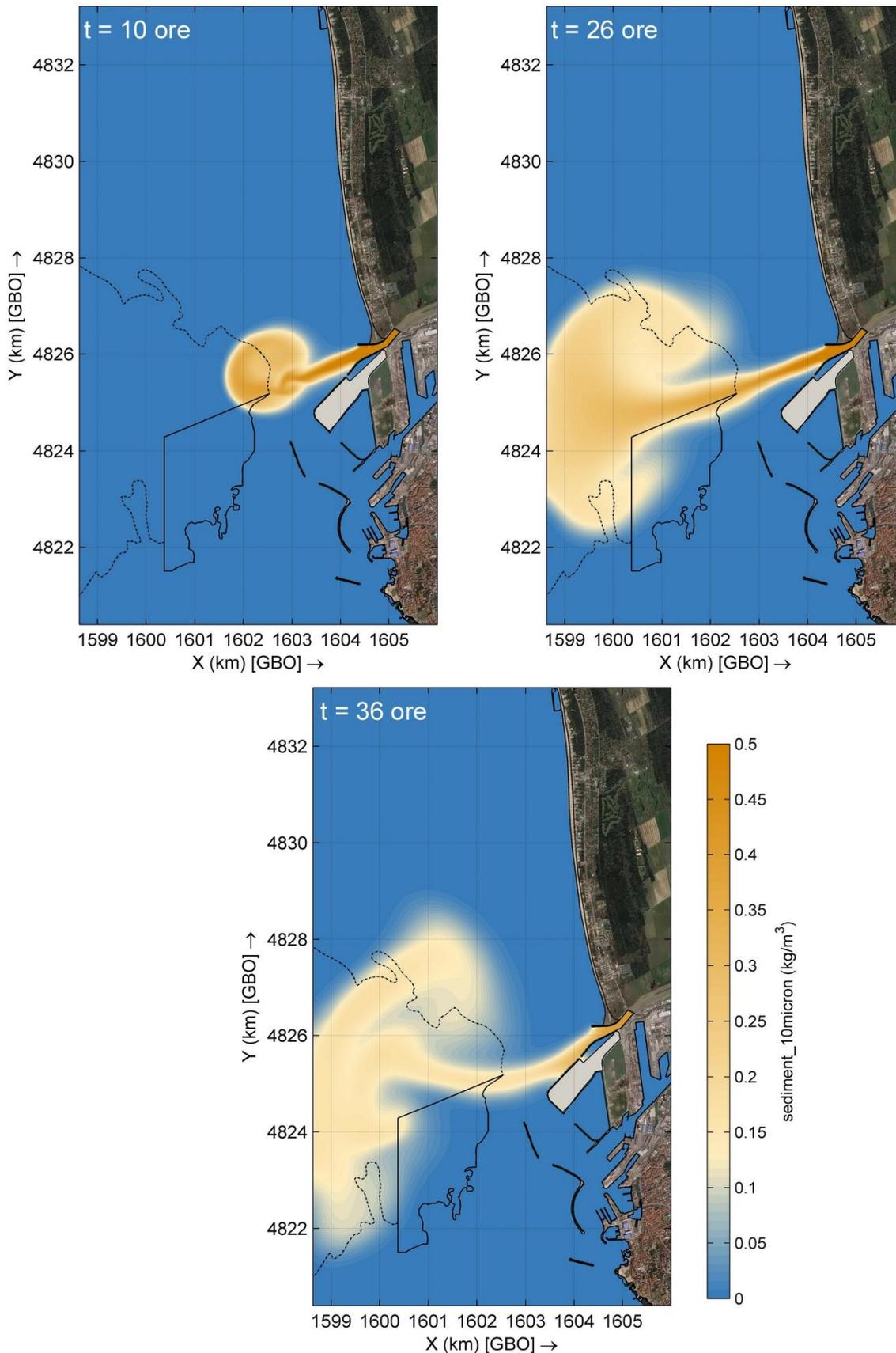


Figura 3.15 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazione di progetto 1, assenza di onda e correnti litoranea, $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

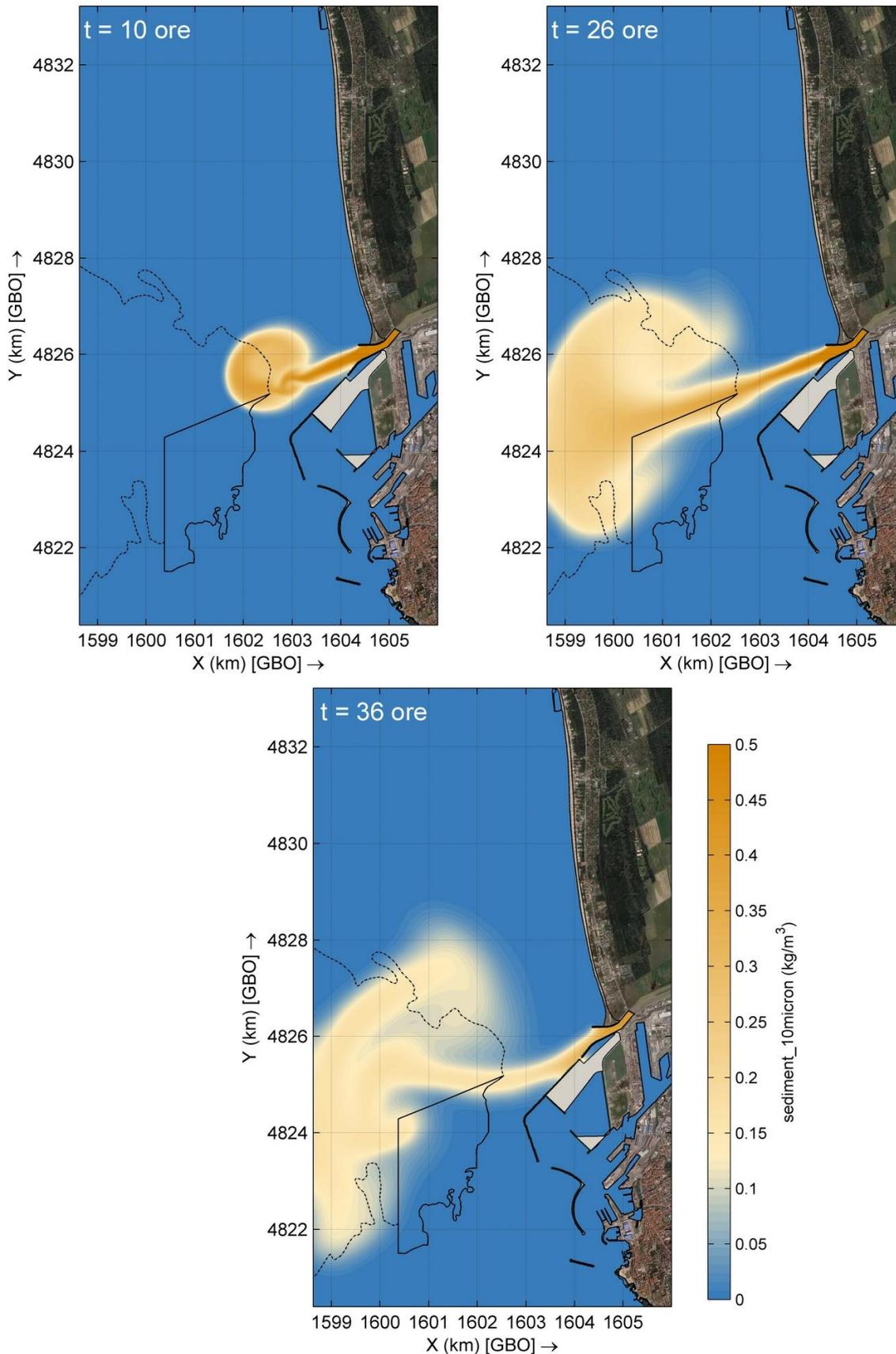


Figura 3.16 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazione di progetto 2, assenza di onda e correnti litoranea, $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

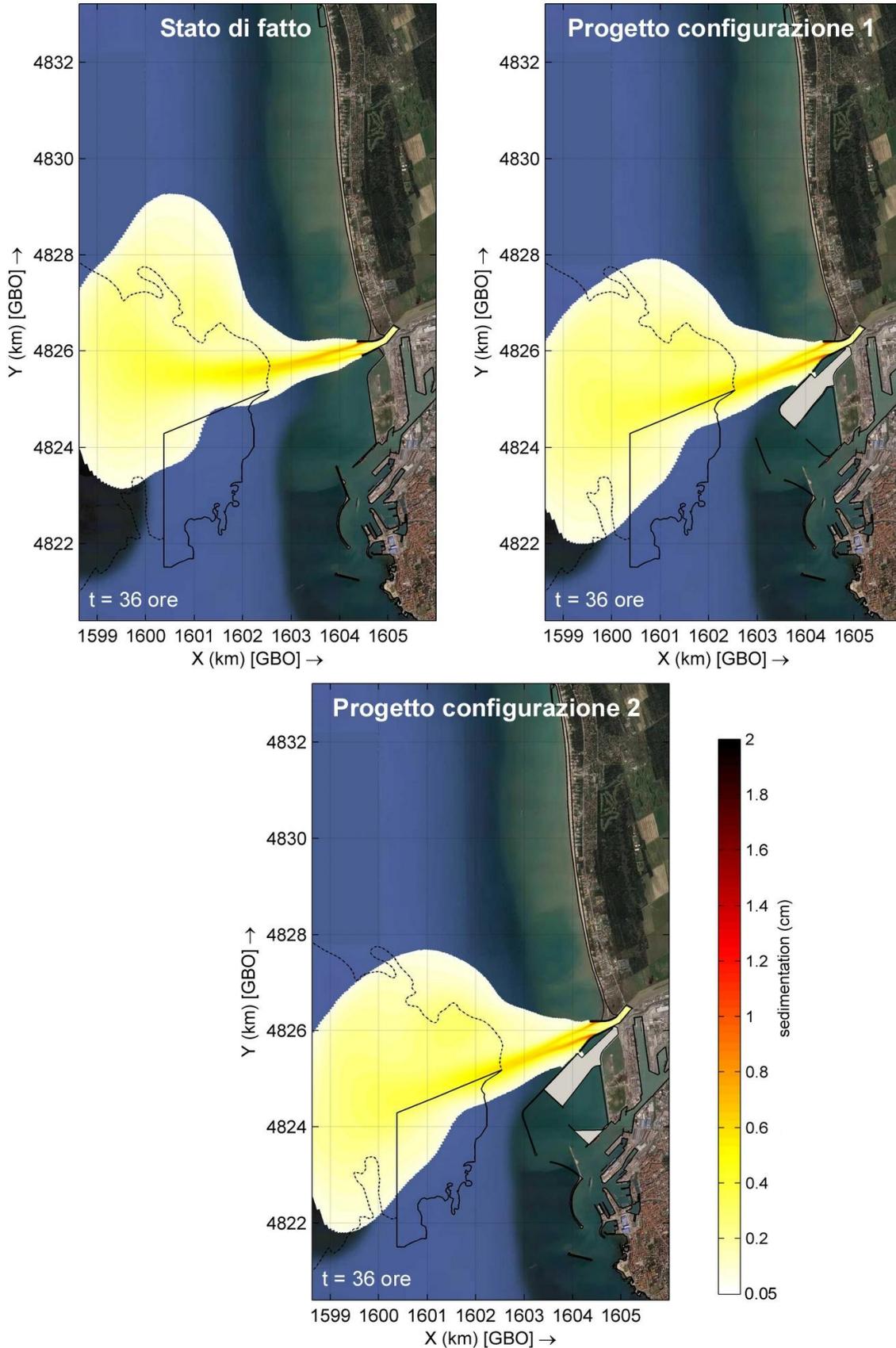


Figura 3.17 – Precipitazione dei sedimenti fluviali coesivi a seguito della piena dello Scolmatore d'Arno (Configurazioni a confronto, assenza di onda e corrente litoranea, $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

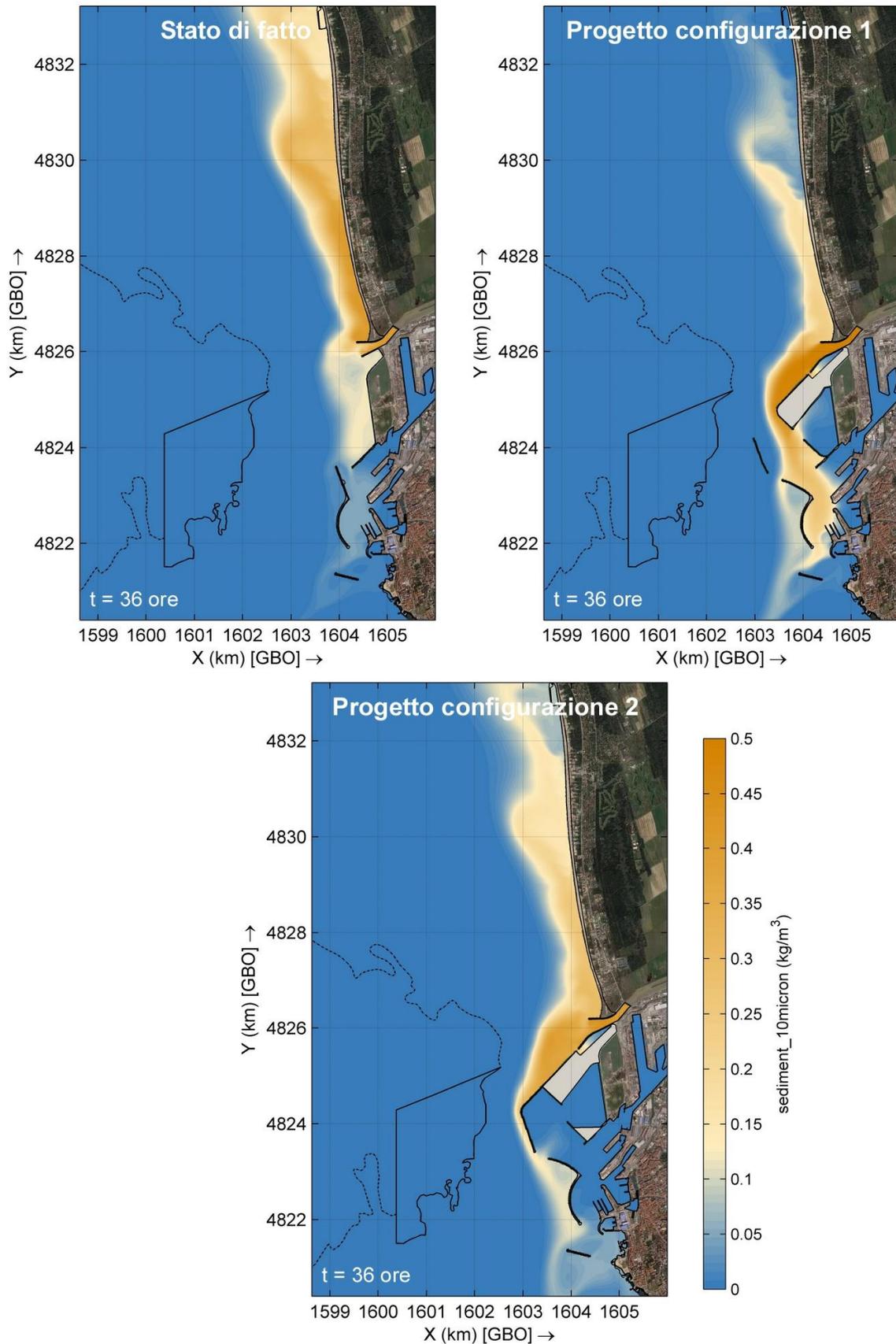


Figura 3.18 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (confronto tra le diverse configurazioni, mareggiata di Ponente, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

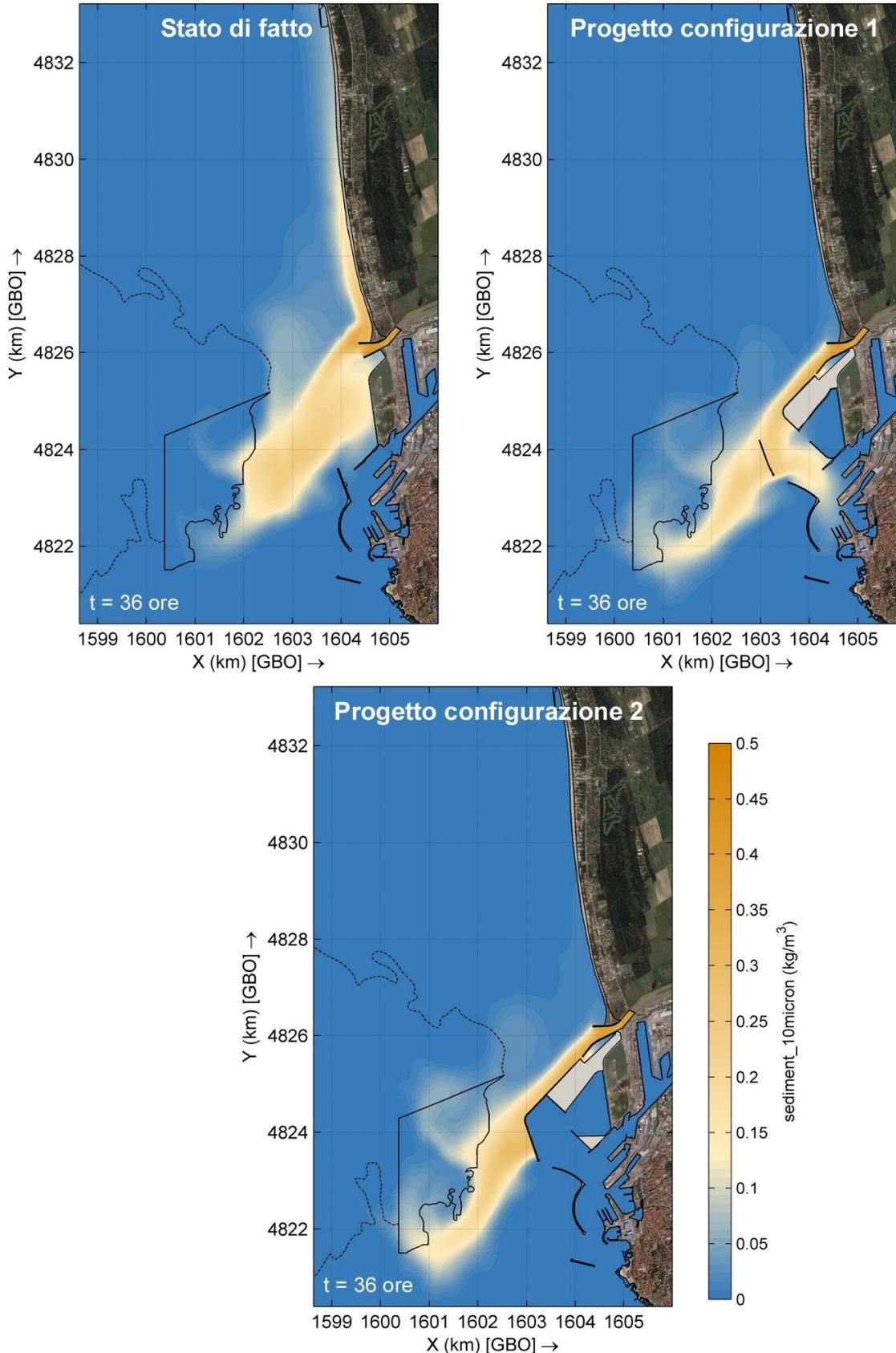


Figura 3.19 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (confronto tra le diverse configurazioni, mareggiata di Mezzogiorno, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.docx

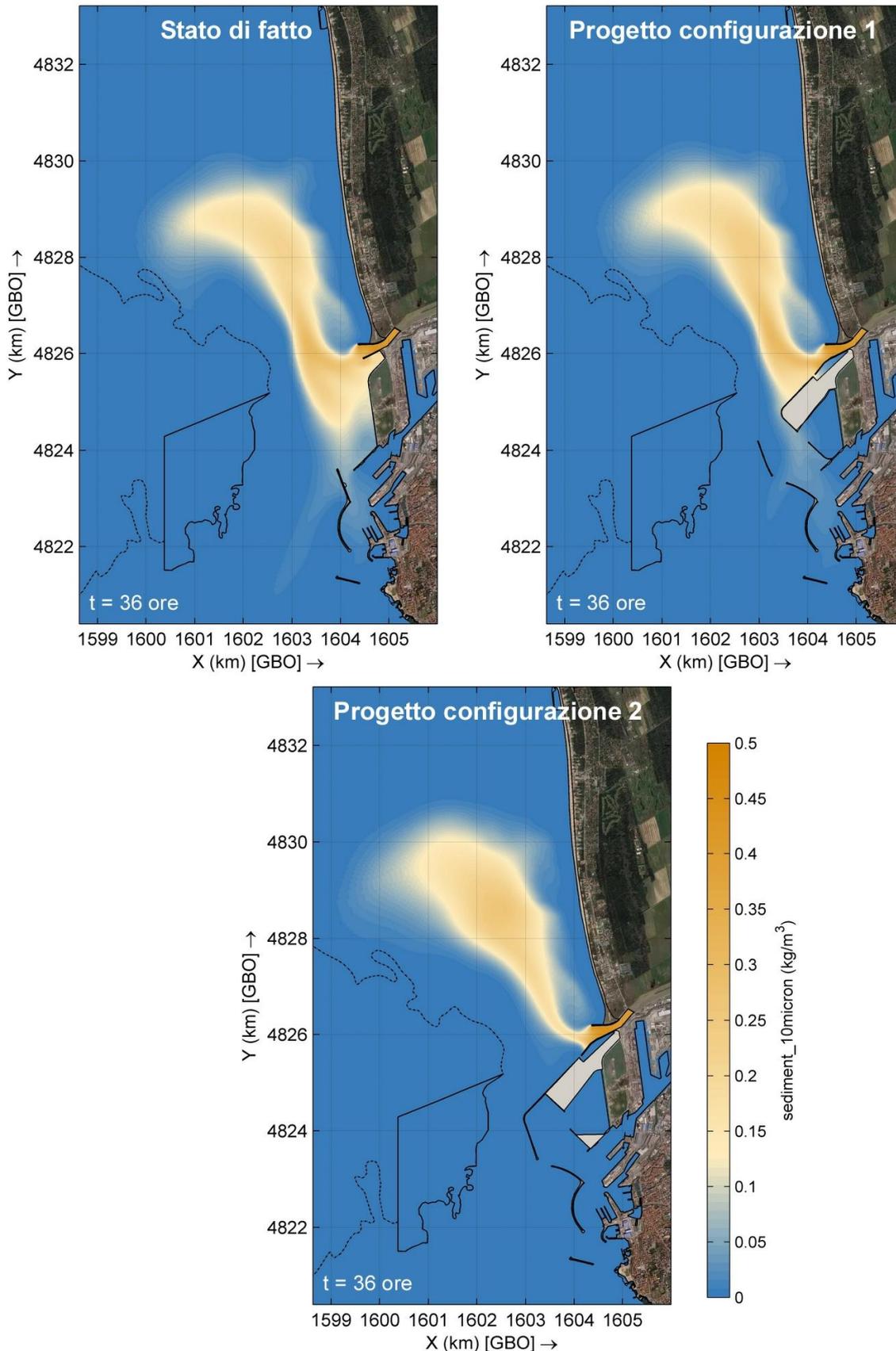


Figura 3.20 – Concentrazione dei sedimenti fluviali coesivi durante la piena dello Scolmatore d'Arno (confronto tra le diverse configurazioni, mareggiata di Maestrale, $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_{sed} = 0.5 \text{ kg/m}^3$)

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

4 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*. HydroSoils.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:	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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

5 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

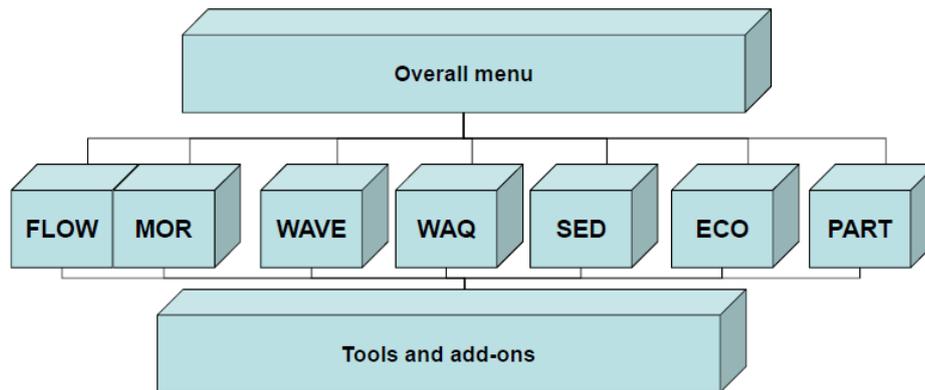
Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233_PP-D-004_0.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 nel 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 (shallowwaters). 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;

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 di fattibilità tecnico economica	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx
---	--	--

- analisi online dei parametri del modello in termini di ampiezza e fase di Fourier, per consentire la generazione di mappe co-tidali;
- 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. Holthuijsenet al. (1993); Ris (1997)). Il modello SWAN è il successore del modello stazionario di seconda generazione HISWA (Holthuijsenet 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

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 di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.docx

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 “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); Riset 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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.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

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 di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA
1233_PP-D-004_0.docx

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 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 di fattibilità tecnico economica	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-004_0.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 shallowwater, 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.

<p>Progetto:</p> <p>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</p>	<p>Livello progettazione:</p> <p>Progetto di fattibilità tecnico economica</p>	<p>Elaborato:</p> <p>IDRAULICA MARITTIMA</p> <p>1233_PP-D-004_0.docx</p>
---	--	--

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.