

# **STUDIO MODELLISTICO DI DISPERSIONE DI TORBIDA IN AMBIENTE PORTUALE A SEGUITO DI DRAGAGGIO**

Prof. Ing. Giovanni Besio  
Ing. Francesco De Leo

Agosto 2024



## Sommario

PREMESSA.....	4
1. INTRODUZIONE.....	5
2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO .....	7
3. ANALISI MODELLISTICA DI DISPERSIONE DEL PENNACCHIO DI TORBIDA.....	9
4. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI .....	19
5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	26



Figura 1. Layout di progetto del terminale FSRU. ....	6
Figura 2. Pannello (A): inquadramento generale dell'area di studio nel Nord-Ovest della Sardegna; pannello (B): inciso sul porto di Porto Torres; pannello (C): ubicazione della FSRU (tratto da disegno tecnico fornito dalla Committenza). ....	7
Figura 3. Vista planimetrica dello scavo previsto in prossimità della FSRU. ....	8
Figura 4. Vista planimetrica dello scavo previsto in prossimità della FSRU – ingrandimento sull'area interessata da dragaggio meccanico tramite benna ambientale. ....	8
Figura 5. Griglia computazionale implementata a servizio di Delf3D nell'area di studio. L'addensamento delle celle in blu indica una maggior risoluzione spaziale all'interno del dominio di calcolo. ....	11
Figura 6. Batimetria interpolata all'interno dell'area di studio. ....	12
Figura 7. Serie mensile di Hs estratta in corrispondenza del nodo hindcast 003170. ....	13
Figura 8. Escursione mareale attorno al livello del medio mare lungo la finestra temporale considerata. ....	14
Figura 9. Cella computazionale interessata dall'input di torbida all'interno del porto di Porto Torres. ....	15
Figura 10. Schema del flusso temporale di materiale solido all'interno del modello. ....	17
Figura 11. Schema del flusso di materiale solido lungo la colonna d'acqua all'interno del modello. La profondità locale è indicata con h; $\Delta s$ indica la risoluzione spaziale della cella in corrispondenza della sezione di scavo. ....	18
Figura 12. Concentrazione di sedimento sospeso in prossimità del fondale dopo ca. 1 giorno dall'inizio della simulazione. ....	20
Figura 13. Concentrazione di sedimento sospeso in prossimità del fondale dopo ca. 10 giorni dall'inizio della simulazione. ....	21
Figura 14. Concentrazione di sedimento sospeso in prossimità del fondale dopo ca. 20 giorni dall'inizio della simulazione. ....	22
Figura 15. Concentrazione di sedimento sospeso in prossimità del fondale dopo ca. 30 giorni dall'inizio della simulazione. ....	23
Figura 16. Concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua per due diversi punti di controllo e dopo ca. 30 giorni dall'inizio della simulazione. ....	24
Tabella 1. Parametri utilizzati per il calcolo del termine sorgente di torbida. ....	15
Tabella 2. Sintesi delle mappe riportate nella presente relazione. ....	19



## PREMESSA

Il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università di Genova (nel seguito indicato come DICCA; <https://dicca.unige.it/>) è stato incaricato da SHELTER S.r.l (nel seguito anche indicato come Committenza) di valutare i potenziali impatti generati sull'ambiente marino a seguito di operazioni di escavo, propedeutiche all'installazione di un impianto di stoccaggio e rigassificazione di Gas Naturale Liquefatto (GNL) all'interno del porto industriale di Porto Torres (SS; Sardegna).

Il presente documento riporta le analisi svolte e sintetizza i principali risultati ottenuti; gli stessi sono altresì forniti alla Committenza tramite apposito formato digitale.





## 1. INTRODUZIONE

La Società Snam Rete Gas ("SRG"), soggetta all'attività di direzione e coordinamento di Snam S.p.A. ("Snam"), una delle principali società di infrastrutture energetiche e principale TSO (Transport System Operator - gestore del sistema di trasporto gas) in ambito europeo, intende allestire nel porto industriale di Porto Torres (SS) un terminale di rigassificazione su un mezzo navale permanentemente ormeggiato ("Terminale") per consentire lo stoccaggio e la vaporizzazione di gas naturale liquefatto (GNL) per il suo trasferimento nella rete di trasporto di gas naturale a terra che sarà realizzata da Enura S.p.A., società soggetta anch'essa all'attività di direzione e coordinamento di Snam. Il Terminale è anche predisposto per svolgere servizi di Small Scale LNG attraverso il rifornimento di apposite navi metaniere "bunkering vessels".

Il Terminale sarà costituito da una unità navale di stoccaggio e rigassificazione flottante (Floating Storage Regasification Unit o "FSRU") con una capacità indicativa di stoccaggio di circa 140.000 m<sup>3</sup> di GNL e una capacità di rigassificazione nominale di circa 330.000 Sm<sup>3</sup>/h. La FSRU sarà ormeggiata a lungo termine (25 anni).

Il Progetto, inizialmente presentato da Snam (Rif. Prot. No. 245 del 29 Novembre 2022), prevedeva l'accosto della FSRU in corrispondenza della banchina carbonile in stretta adiacenza al molo di ormeggio in concessione a EP FiumeSanto. Le numerose interlocuzioni intercorse con le Autorità tecniche portuali nonché con gli organi del Comitato Tecnico Regionale (CTR), hanno fatto emergere l'opportunità di spostare la posizione del Terminale lungo la parte terminale del molo foraneo settentrionale realizzando una nuova struttura d'accosto permanente in cassoni che resterà a servizio del Porto come mostrato in Figura 1.

Tra gli interventi propedeutici all'installazione dell'impianto, si rendono necessarie delle operazioni di escavo del fondale per la realizzazione dell'exit point del microtunnel di collegamento delle condotte di distribuzione del prodotto rigassificato, tramite draga munita di benna ambientale, tale da minimizzare le perdite di carico. A tal proposito, in fase di predisposizione degli studi ambientali per l'istanza di Valutazione di Impatto Ambientale, il DICCA è stato incaricato di implementare un modello matematico per la simulazione della dispersione di sedimento sospeso a valle delle attività di scavo, con l'obiettivo di comprendere e valutare i processi di trasporto e dispersione del materiale movimentato.

Nel presente report tecnico vengono riportate tutte le informazioni utilizzate per la costruzione del modello e per la definizione delle condizioni iniziali ed al contorno impiegate, unitamente ai risultati ottenuti; gli stessi sono forniti alla Committenza tramite apposito formato elettronico.



Figura 1. Layout di progetto del terminale FSRU.

## 2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

L'impianto a servizio della FSRU opererà all'interno del porto industriale di Porto Torres, sito nel Golfo dell'Asinara nella parte Nord-Ovest della Sardegna, così come mostrato nel pannello (A) in Figura 2. Nel pannello (B) in figura, si può osservare il porto commerciale nell'area ad Est del porto, protetto da una diga di forma circolare posta a servizio dell'attracco di navi da crociera. Nell'area Ovest sono invece ubicate banchine e pontili posti al servizio del porto industriale, all'interno del quale attraccano navi petroliere, gasiere, carboniere e navi utilizzate per il trasporto di prodotti chimici utilizzati nella vicina area industriale e nel polo petrolchimico. Il porto industriale è protetto da una diga foranea a parete verticale, ben visibile in figura; nella parte sottoflutto attigua al gomito della diga è previsto l'ormeggio della FSRU, così come evidenziato infine nel pannello (C).

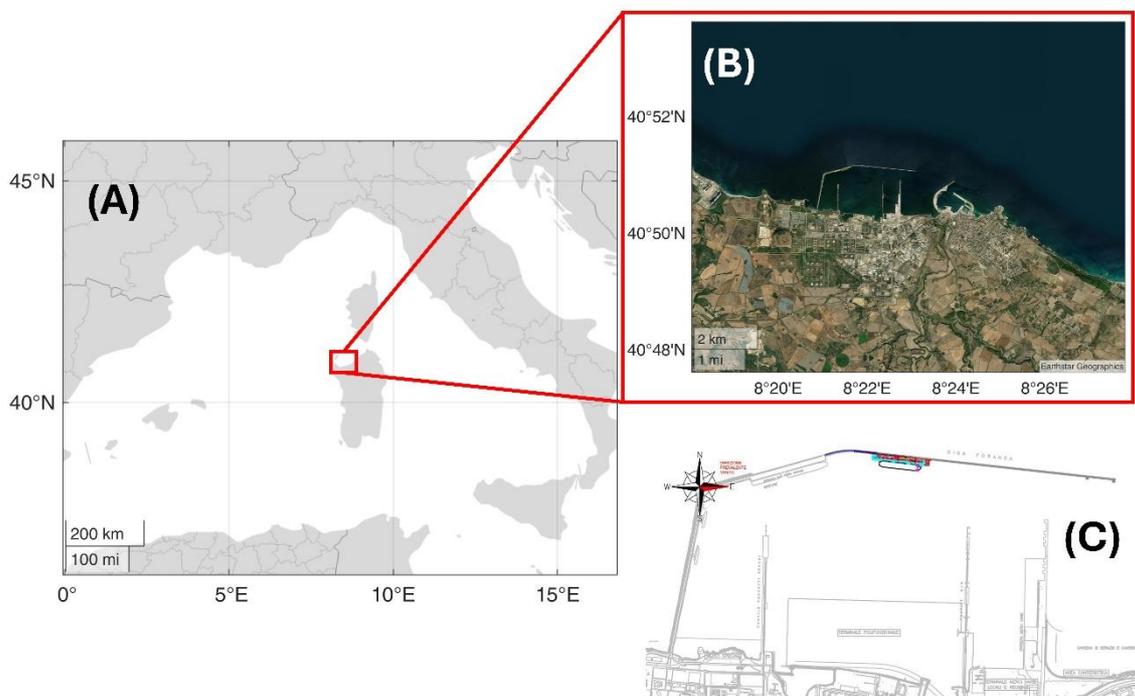


Figura 2. Pannello (A): inquadratura generale dell'area di studio nel Nord-Ovest della Sardegna; pannello (B): inciso sul porto di Porto Torres; pannello (C): ubicazione della FSRU (tratto da disegno tecnico fornito dalla Committenza).

Lo scavo previsto è concentrato in particolar modo nell'area a ridosso dell'impianto, così come mostrato negli allegati tecnici forniti dalla Committenza e di cui si riporta un estratto in Figura 3 e Figura 4.



Figura 3. Vista planimetrica dello scavo previsto in prossimità della FSRU.



Figura 4. Vista planimetrica dello scavo temporaneo previsto in prossimità della FSRU mediante benna ambientale.

In Figura 4, è possibile apprezzare l'area interessata dall'escavo temporaneo tramite benna ambientale, in corrispondenza dell'uscita dell'opera trenchless mediante tecnologia microtunneling, prevista per attraversare il bacino portuale ed evidenziata tramite il rettangolo rosso. La metodologia di scavo in sotterraneo mediante microtunnelling è una tecnologia ambientalmente non invasiva che prevede la realizzazione di un escavo sotterraneo a sezione circolare mediante dei conci in cemento armato precompresso che costituiscono il mantello esterno del tunnel. Poiché tale tecnologia prevede un intervento al di sotto del fondale marino, è ragionevole assumere che non induca torbidità nella colonna d'acqua, pertanto tale operazione non viene considerata nel prosieguo del lavoro.

### 3. ANALISI MODELLISTICA DI DISPERSIONE DEL PENNACCHIO DI TORBIDA

Per valutare la dispersione di sedimenti innescata dalle attività di escavo, è dapprima necessario risolvere i campi di corrente responsabili del trasporto del tracciante oggetto di studio. A tal fine, devono essere considerati tutte le forzanti ambientali in grado di innescare le correnti litoranee, quali onde, vento, escursioni mareali, etc.

La mutua interazione di tali componenti ed il loro effetto sull'idrodinamica locale sono fenomeni complessi, la cui descrizione deve necessariamente avvalersi di modelli numerici, non potendosi espletare tramite formule parametriche semplificate. Il presente Capitolo introduce il modello numerico utilizzato a tal fine (Paragrafo 3.1), i dati ambientali utilizzati per forzarlo (Paragrafo 3.2), e le condizioni iniziali legate all'operatività della FSRU (Paragrafo 3.3).

#### 3.1 IL MODELLO NUMERICO UTILIZZATO

La scelta del modello numerico è ricaduta su Delft3D, sviluppato e mantenuto da Deltares (precedentemente Delft Hydraulics; <https://www.deltares.nl/en>). Questi è uno dei più robusti e affidabili strumenti per lo studio della dinamica delle correnti, del trasporto di sedimenti, delle onde e della qualità delle acque, sia da un punto di vista applicativo che da un punto di vista di sviluppo e ricerca. Delft3D è composto da diversi moduli che possono essere eseguiti indipendentemente o possono essere accoppiati e interagiscono tra loro, scambiandosi le opportune informazioni. Tra questi, Delft3D-FLOW permette di simulare l'idrodinamica e il trasporto, prendendo in considerazione una vasta gamma di forzanti quali eventi meteorologici, maree, scarichi antropici, etc<sup>1</sup>.

Le equazioni di governo sono costituite dalla equazione di continuità e dall'equazione della quantità di moto lungo le due direzioni orizzontali, mediate su opportuni intervalli temporali atti a filtrare gli effetti legati alla turbolenza (cosiddette equazioni RANS, o *Reynolds Average Navier Stokes equations*).

Le equazioni della quantità di moto si esplicitano come segue ( $U$  e  $V$  indicano le velocità lungo le direzioni  $x$  e  $y$  del piano, rispettivamente):

<sup>1</sup> Delft Hydraulics, "Delft3D-FLOW User Manual Version 3.14," Delft, 2007.



$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial U}{\partial \xi} + \frac{V}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial U}{\partial \eta} + \frac{\omega}{h+\zeta} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - \frac{V^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \eta} + \frac{UV}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \dots$$

$$-fV = -\frac{1}{\rho_0 G_{\xi\xi}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(h+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \nu_V \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) + M_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial V}{\partial \xi} + \frac{V}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{\omega}{h+\zeta} \frac{\partial V}{\partial \sigma} - \frac{U^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{UV}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \dots$$

$$+fU = -\frac{1}{\rho_0 G_{\eta\eta}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(h+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \nu_V \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) + M_e \quad (2)$$

dove  $\nu_V$  rappresenta la viscosità verticale,  $P_\xi$  e  $P_\eta$  sono i gradienti di pressione. Le forze  $F_\xi$  e  $F_\eta$  rappresentano le tensioni di Reynolds.  $M_x$  e  $M_e$  sono i contributi di quantità di moto dovuti a sorgenti esterne (input o output nel caso di sorgenti positive o negative).  $\sqrt{G_{\xi\xi}}$  e  $\sqrt{G_{\eta\eta}}$  sono coefficienti usati per trasformare coordinate curvilinee in coordinate rettangolari. Infatti, Delft3D consente la soluzione di tali equazioni su una griglia sferica nel caso in cui il dominio di interesse sia sufficientemente esteso.

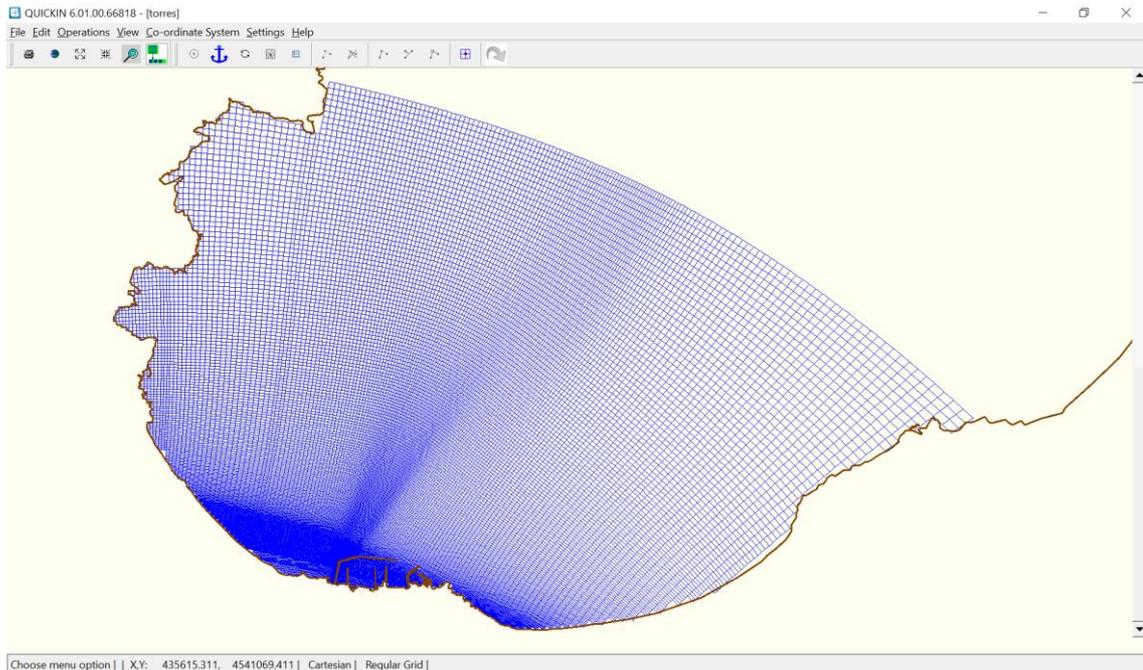
Tali equazioni sono risolte dal modello con approssimazione idrostatica, calcolando la velocità verticale attraverso l'equazione di continuità una volta risolte le equazioni della quantità di moto lungo le direzioni orizzontali (un modello siffatto viene detto "Quasi-3D"). A tal proposito, è utilizzato il metodo ADI (Alternating Direction Implicit method). Il metodo ADI suddivide una fase temporale in due fasi. Ogni fase è composta da un intervallo di tempo intermedio. In entrambe le fasi, tutti i termini delle equazioni del modello sono risolti con almeno un'accuratezza al secondo ordine di precisione nello spazio.

Poiché il modello risolve le equazioni di governo attraverso schemi numerici, è necessario definire una griglia computazionale (o maglia computazionale), utilizzata per discretizzare l'area di studi; il dominio temporale è a sua volta discretizzato in un numero finito di istanti su cui evolvono gli stati per ciascun nodo della maglia. Questa può essere cartesiana rettangolare oppure curvilinea, ottenuta a partire da una serie di splines. Nel presente studio è stata impiegata una maglia del secondo tipo, a risoluzione variabile con infittimento progressivo in prossimità della FSRU (vedasi Figura 5). La risoluzione spaziale ottenuta varia tra  $\approx 500$  m e  $\approx 20$  m.

In un secondo momento, a ciascun nodo della maglia è stata associata un valore di profondità a partire dai dati batimetrici derivati dai dati del repository EMODNET (<https://www.emodnet-bathymetry.eu/>), combinati con i più recenti



dati batimetrici forniti dalla Committenza. La batimetria risultante nell'area di studio è mostrata in Figura 6.



*Figura 5. Griglia computazionale implementata a servizio di Delf3D nell'area di studio. L'addensamento delle celle in blu indica una maggior risoluzione spaziale all'interno del dominio di calcolo.*

### 3.2 DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO

Per poter provvedere alla soluzione numerica del problema bisogna definire alcune condizioni di chiusura della turbolenza e adeguate condizioni al contorno, in modo che il modello abbia tutte le informazioni necessarie per poter evolvere nel tempo e nello spazio per ricavare la soluzione del campo di moto. In questo caso, per quanto riguarda la chiusura della turbolenza è stato impiegato un classico modello  $k - \varepsilon$ , reso disponibile nella stessa suite di Delft3D.

Per quanto attiene alle condizioni al contorno, sono stati impiegati diversi tipi di dato. Per le variabili meteo-marine, si è fatto affidamento ai dati ricostruiti dal DICCA (<https://forecast.meteocean.science/hindcast/>).

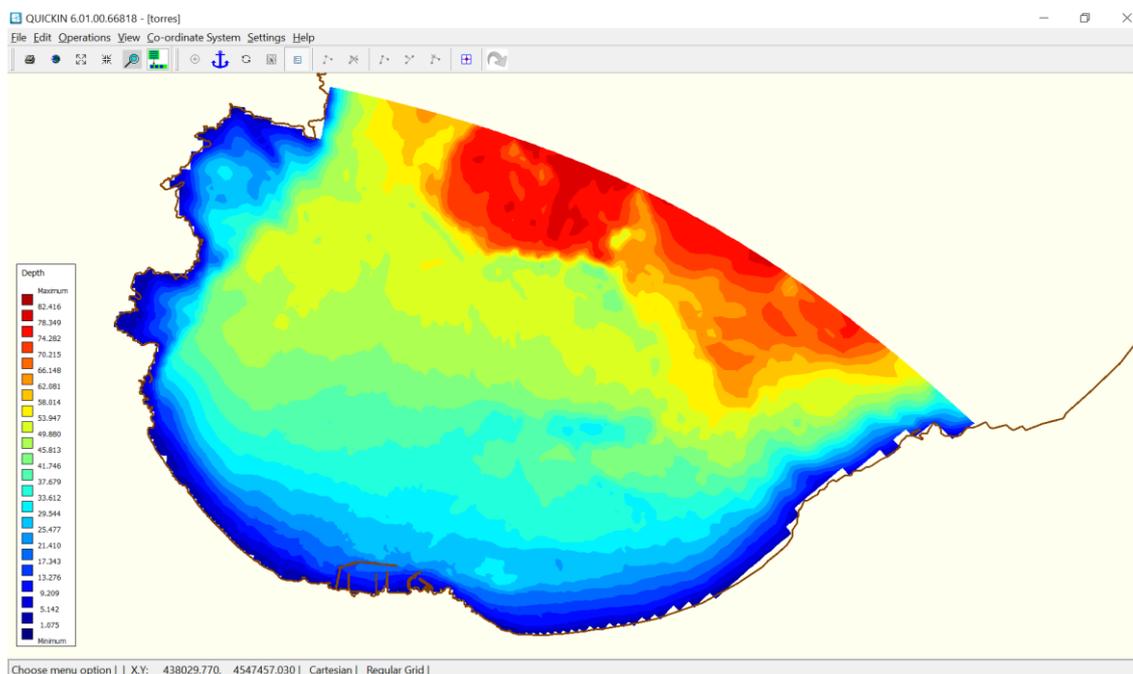


Figura 6. Batimetria interpolata all'interno dell'area di studio.

Tramite una re-analisi delle condizioni atmosferiche, il DICCA ha sviluppato un database, detto hindcast, contenente dati orari di onda, vento e campo barico nel periodo 1979-2023 e definiti su una griglia con risoluzione approssimativamente di 10 km lon/lat, estesa a tutto il bacino del Mar Mediterraneo<sup>2</sup>. L'implementazione dell'hindcast è avvenuta in seguito alla validazione e alla ottimizzazione della catena di modelli numerici impiegata (WRF per la parte meteo e WaveWatchIII per la parte onde) e, ad oggi, questi dati sono stati utilizzati in numerose ricerche e applicazioni. Il nodo utilizzato per la definizione delle variabili meteo-marine al largo di Porto Torres è lo 003170, avente coordinate lon/lat pari a 8.4887/40.98 (SR: WGS84; il nodo è sito in prossimità del bordo della griglia computazionale).

A partire dalle serie orarie di altezza d'onda significativa (nel seguito indicata con  $H_s$ ), è stata estratta una finestra temporale pari ad un mese, selezionata in modo tale da descrivere una condizione meteo-climatica mediamente attesa nell'area, i.e., che non fosse associata a condizioni di calma (o "bonaccia"), né a condizioni meteo-marine di tempesta. In tal modo, è possibile ottenere una descrizione significativa dei processi di dispersione della torbidità, ovvero associata alle

<sup>2</sup> Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2013). Developing and validating a forecast/hindcast system for the Mediterranean Sea. *Journal of Coastal Research*, (65 (10065)), 1551-1556.

Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2015). Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea. *Ocean Modelling*, 90, 82-94.

condizioni più frequentemente riscontrabili all'interno dell'area di studio. A tal fine, si è dapprima discretizzata l'intera serie di dati con finestre mobili di estensione pari ad un mese; successivamente, né è stato calcolato il contenuto energetico rispetto quale sommatoria del quadrato dei valori di  $H_s^2 \times c_g$  (detta  $c_g$  la celerità di gruppo delle onde parte di uno stato di mare)<sup>3</sup>; infine, si è estratta la finestra associata al valor medio dell'energia calcolata. La serie di  $H_s$  risultante è mostrata in Figura 7; gli altri parametri sono quali periodi d'onda, direzioni, intensità e velocità del vento sono stati estratti conseguentemente e non sono mostrati in favor di chiarezza dell'elaborato. Le serie meteo-marine sono state dunque utilizzate come forzante lungo il bordo aperto della maglia computazionale (cfr. Figura 5).

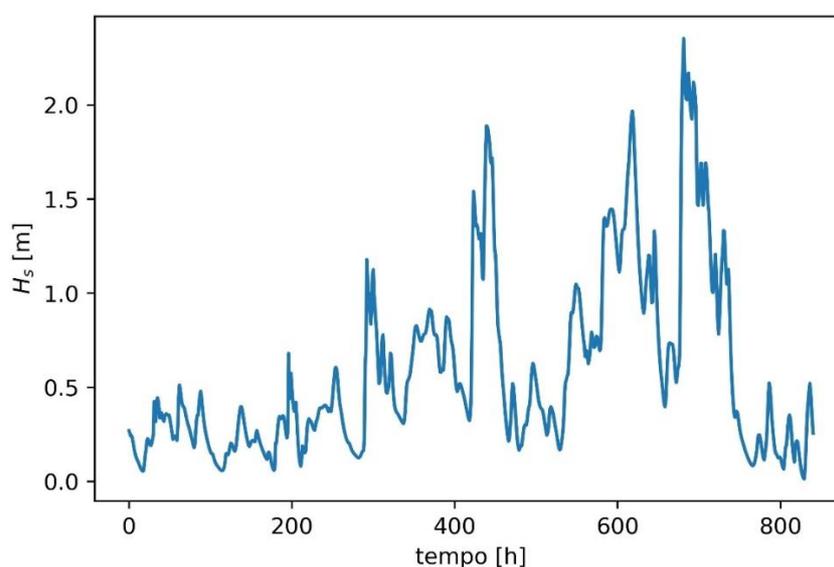


Figura 7. Serie mensile di  $H_s$  estratta in corrispondenza del nodo hindcast 003170.

In seguito, sono state ricavate le forzanti di marea (di seguito  $\Delta\eta$ ) in corrispondenza del nodo selezionato, grazie al Software di Previsione di Marea (TPXO.3) fornito dall'Università dello Stato dell'Oregon<sup>4</sup>. L'escursione di marea è stata estratta nello stesso intervallo di tempo e con la stessa frequenza dei dati meteomarinari di hindcast, ed è mostrata in Figura 8. In figura, è chiaramente apprezzabile il regime semi-diurno e micro-tidale dell'area, ovvero un'escursione

<sup>3</sup> Bosboom, J., & Stive, M. J. (2021). Coastal dynamics.

<sup>4</sup> Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 19(2), 183-204.



che presenta picchi separati da ca. 12,42 ore e con oscillazione complessiva inferiore a 2 m.

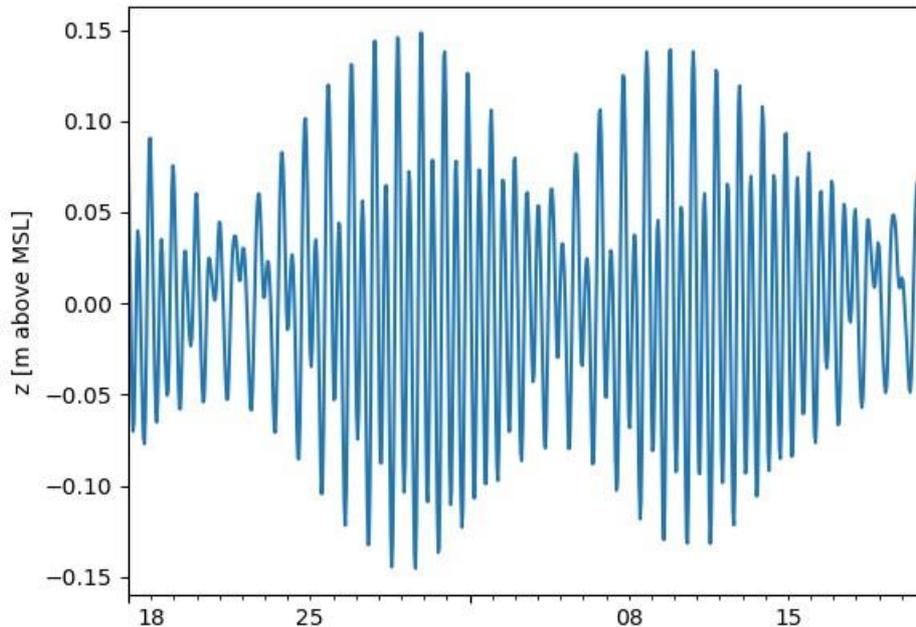


Figura 8. Escursione mareale attorno al livello del medio mare lungo la finestra temporale considerata.

Infine, sono stati estratti i dati di corrente a scala di bacino dal repository del Copernicus Marine Service (di seguito abbreviato in CMS; <https://marine.copernicus.eu/it>). Anche in questo caso, le serie temporali sono state selezionate in concomitanza dello scenario meteomarinò precedentemente identificato e lungo tutto il bordo esterno della maglia, discretizzato a tal proposito in 10 transetti di eguale lunghezza, ciascuno dei quali forzato con valori omogenei di correnti regionali.

### 3.3 DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI INIZIALI LEGATE ALLE ATTIVITÀ DI SCAVO

Al fine di riprodurre il rilascio di sedimenti lungo la colonna d'acqua a seguito della attività di scavo, si è imposto un input periodico di materiale solido per tutta la durata prevista della simulazione. Al fine di semplificare l'analisi modellistica, l'input è stato imposto in un'unica cella computazionale: tale ipotesi è del tutto

ragionevole in virtù della risoluzione spaziale della griglia, che permette il decorrere dei processi di trasporto e diffusione della torbida in tutto l'areale prospiciente lo scavo su scale temporali inferiori rispetto a quelle interessate dallo spostamento della draga.

La cella interessata dall'immissione di sedimenti lungo la colonna d'acqua è mostrata in Figura 9; Tabella 1 riporta i parametri utilizzati per il calcolo dei termini sorgenti.

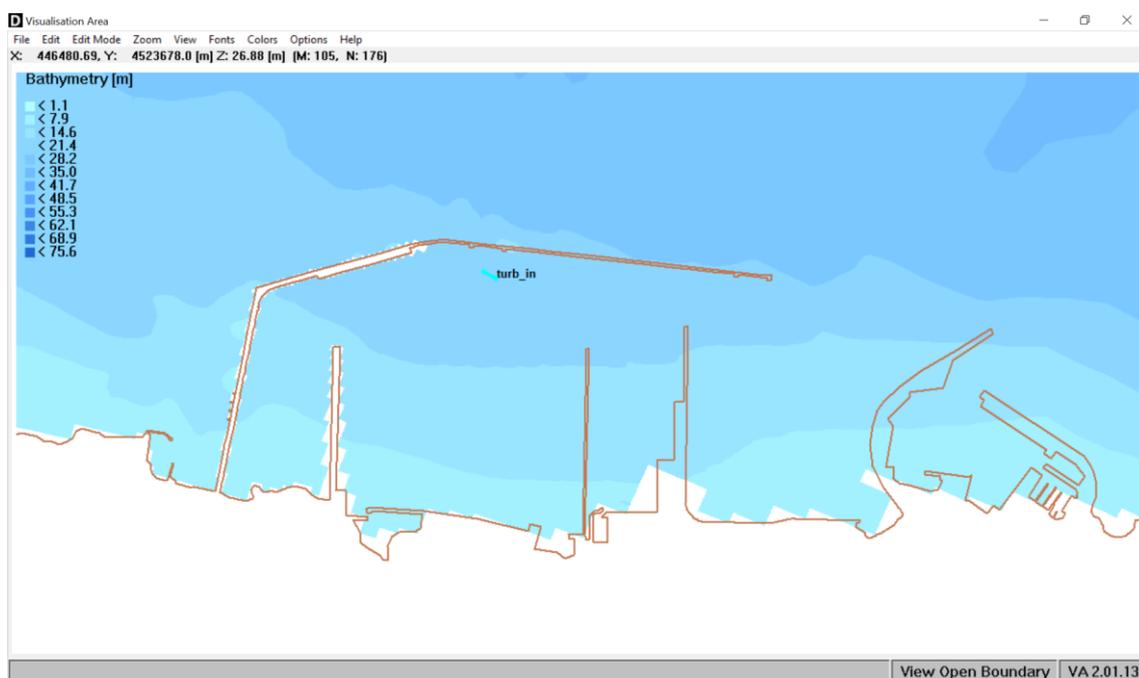


Figura 9. Cella computazionale interessata dall'input di torbida all'interno del porto di Porto Torres.

Tabella 1. Parametri utilizzati per il calcolo del termine sorgente di torbida.

$V_{tot}$ [m <sup>3</sup> ]	23'000
$V_a$ [m <sup>3</sup> ]	5
$\Delta t$ [giorni]	30
$\Delta t_{cmp}$ [s]	300
$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2100
$P$	0,6
$\sigma_d$	3%



dove  $V_{tot}$  indica il volume totale di materiale scavato,  $V_d$  il volume della benna utilizzata per le operazioni di scavo,  $\Delta t$  e  $\Delta t_{cmp}$  sono il tempo totale della simulazione e l'intervallo computazionale su cui gira il modello numerico,  $\rho_s$  è la densità del materiale presente sul fondale,  $P$  la porosità e  $\sigma_d$  la frazione di sedimento persa dalla benna durante la fase di risalita a valle dello scavo. Al fine di operare in favor di sicurezza, nel prosieguo del lavoro è stato considerato un volume maggiorato del 25% rispetto a quanto indicato dalla Committenza, in modo da accorpate all'interno delle analisi le possibili fonti di incertezza legate alla eterogeneità del sedimento, la cui granulometria è pur tuttavia sintetizzata da un unico parametro. Infatti, per poter calcolare la velocità di sedimentazione del materiale solido sospeso, è stato imposto all'interno del modello il valore del diametro mediano della distribuzione granulometrica presente in loco, usualmente definito come  $d_{50}$ . Ipotizzando che i grani siano caratterizzati da forma sferica, tale valore corrisponde al diametro che separa in due parti equivalenti la distribuzione attesa delle dimensioni dei sedimenti in loco, ed è usualmente impiegato per descrivere le caratteristiche granulometriche di un'area. Nel presente lavoro, è stato assunto un  $d_{50}$  pari a 0,2 mm, caratteristico di sabbia fine secondo la ben nota classificazione di Wentworth<sup>5</sup>, dunque compatibile con le analisi di cui agli Allegati A1-A8. Il volume complessivo considerato è dunque pari a ca. 29'000 m<sup>3</sup>.

I valori di densità e porosità del materiale presente in loco sono stati selezionati coerentemente alle risultanze delle analisi granulometriche condotte su campioni di sedimento prelevati in loco, i quali indicano materiale composto in prevalenza da sabbia e limo (si vedano a tal proposito gli Allegati da A1 a A8). La frazione di materiale perso dalla benna durante la risalita, pari a 0,03, è stata invece selezionata sulla base di indicazioni reperite all'interno della bibliografia di settore<sup>6</sup>.

Sulla base dei parametri riportati in Tabella 1, è possibile calcolare i flussi di massa di sedimento da imporre al sistema:

$$N_{op} = V_{tot}/V_d \quad (3)$$

$$N_{op}^h = N_{op}/(\Delta t \times 24) \quad (4)$$

<sup>5</sup> Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. The journal of geology, 30(5), 377-392.

<sup>6</sup> Becker, J., van Eekelen, E., van Wiechen, J., de Lange, W., Damsma, T., Smolders, T., & van Koningsveld, M. (2015). Estimating source terms for far field dredge plume modelling. Journal of environmental management, 149, 282-293.



$$\Delta t^{op} = 3600 / (N_{op}^h \times 2) \quad (5)$$

$$m_d = V_d \times \rho_s \times P \times \sigma_d \quad (6)$$

Avendo definito come  $N_{op}$  e  $N_{op}^h$  il numero di bennate complessivo ed il numero di bennate per ora;  $\Delta t^{op}$  è l'intervallo temporale per ciascuna bennata: in questo caso, si assume che il tempo necessario a scavare il materiale e depositarlo sulla draga sia pari al tempo necessario a riportare la benna sul fondo (i.e., l'intervallo totale è diviso per 2). Infine,  $m_d$  è la massa persa per ogni ciclo di scavo, che risulta essere pari a ca. 190 kg.

Il flusso complessivo di massa imposto in ingresso al modello risulta dunque pari a  $\approx 0,85$  kg/s (è sufficiente a tal proposito dividere la risultanza di eq. 6 con la risultanza di eq. 5), omogeneamente distribuito lungo l'intera colonna d'acqua.

Figura 10 e Figura 11 e schematizzano il rilascio di materiale solido così come impostato all'interno del modello.

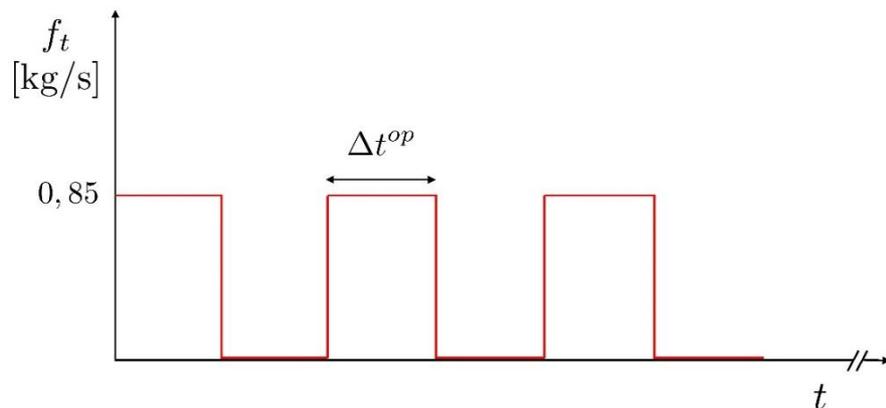


Figura 10. Schema del flusso temporale di materiale solido all'interno del modello.

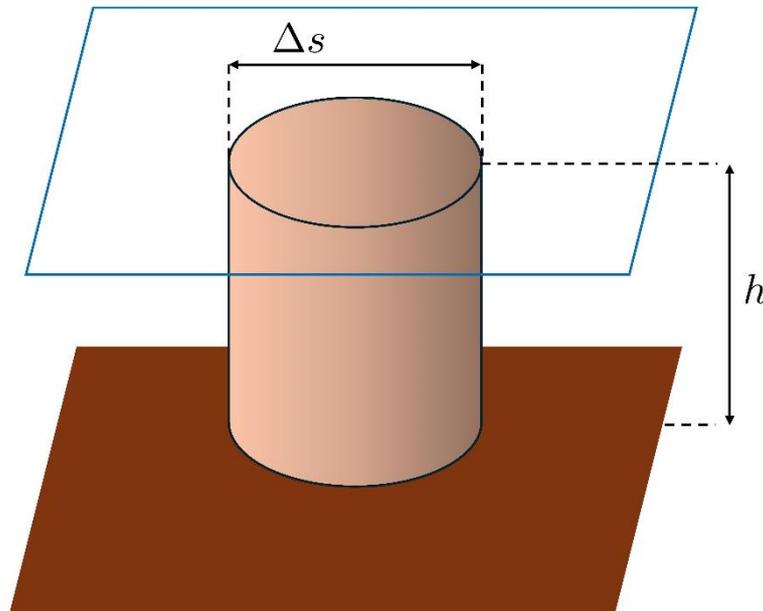


Figura 11. Schema del flusso di materiale solido lungo la colonna d'acqua all'interno del modello. La profondità locale è indicata con  $h$ ;  $\Delta s$  indica la risoluzione spaziale della cella in corrispondenza della sezione di scavo.

La colonna d'acqua è discretizzata in 11 intervalli (*layers*) a spessore variabile; la minima ampiezza si riscontra in corrispondenza della superficie e del fondo, ossia dove gli effetti locali si manifestano su scale spaziali ridotte ed è dunque necessario un maggior grado di dettaglio (si pensi ad esempio agli strati limite della turbolenza e dell'attrito esercitato del vento sul pelo libero dell'acqua). Approssimando la profondità di progetto a 20 m, e considerato che la risoluzione spaziale della griglia di calcolo è anch'essa pari a 20 m in corrispondenza dello scavo, ne consegue che la massa di sedimento sia rilasciata su un volume pari a ca.  $8 \times 10^3 \text{ m}^3$ , ossia, approssimativamente,  $25 \text{ g/m}^3$ . Poiché il rilascio è distribuito in modo omogeneo lungo la colonna d'acqua, ciò comporta 2.5 g per layer verticale.

#### 4. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Nel seguito del capitolo sono mostrate le mappe di torbidità per quattro diversi istanti temporali, selezionati al fine di mostrare la variabilità del pennacchio di torbida lungo tutto l'arco della simulazione. Gli istanti selezionati a tal proposito sono riassunti nella tabella sottostante, mentre le rispettive mappe, estratte in corrispondenza del fondale, sono riportate da Figura 12 a Figura 15.

*Tabella 2. Sintesi delle mappe riportate nella presente relazione.*

<b>t da inizio simulazione</b>	<b>Mappa</b>
+ 23,75 ore [≈1 giorno]	Figura 12
+ 227,75 ore [≈10 giorni]	Figura 13
+455,75 ore [≈20 giorni]	Figura 14
+695,75 ore [≈1 mese]	Figura 15

Nelle mappe, i colori indicano i diversi valori di concentrazione rispetto ad una condizione ambientale inalterata, ossia caratterizzata da concentrazioni di materiale sospeso inferiori a  $0,1 \text{ g/m}^3$ . Tale condizione è rappresentata dal colore azzurro, il quale indica pertanto la assenza di solidi sospesi. Tale ipotesi è evidentemente non veritiera, poiché l'acqua di mare presenta un certo grado di torbidità ambientale, funzione del contenuto trofico e delle forzanti ambientali; tuttavia, permette di isolare il contributo esclusivo delle operazioni di scavo e, di conseguenza, l'impatto ambientale delle stesse.

Dall'analisi dei risultati è possibile apprezzare come il pennacchio di torbida, rappresentato dai colori sui toni del marrone, rimanga circoscritto all'area di scavo, esaurendosi infatti nelle sue immediate vicinanze. Questo comportamento è evidentemente imputabile alle caratteristiche del sedimento, che, una volta rilasciato lungo la colonna d'acqua, è soggetto a limitati processi di trasporto: infatti, il meccanismo di affondamento della sabbia prevale rispetto al rimescolamento delle acque portuali, condizionato evidentemente dalla presenza della diga foranea posta a protezione del porto. Tale considerazione è corroborata dall'analisi dei risultati estratti lungo la colonna d'acqua in prossimità della sezione di scavo (vedi Figura 9) per un assegnato istante temporale, così come mostrato in Figura 16.

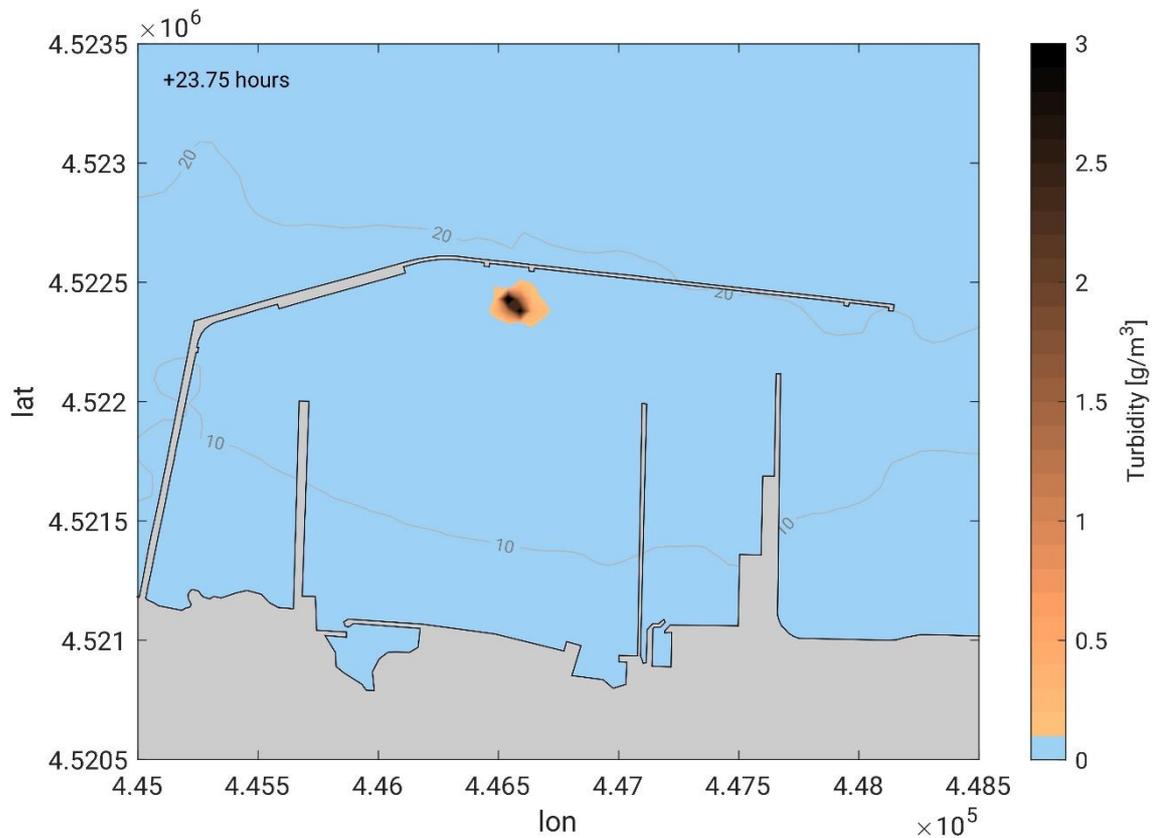


Figura 12. Concentrazione di sedimento sospeso in prossimità del fondale dopo ca. 1 giorno dall'inizio della simulazione.

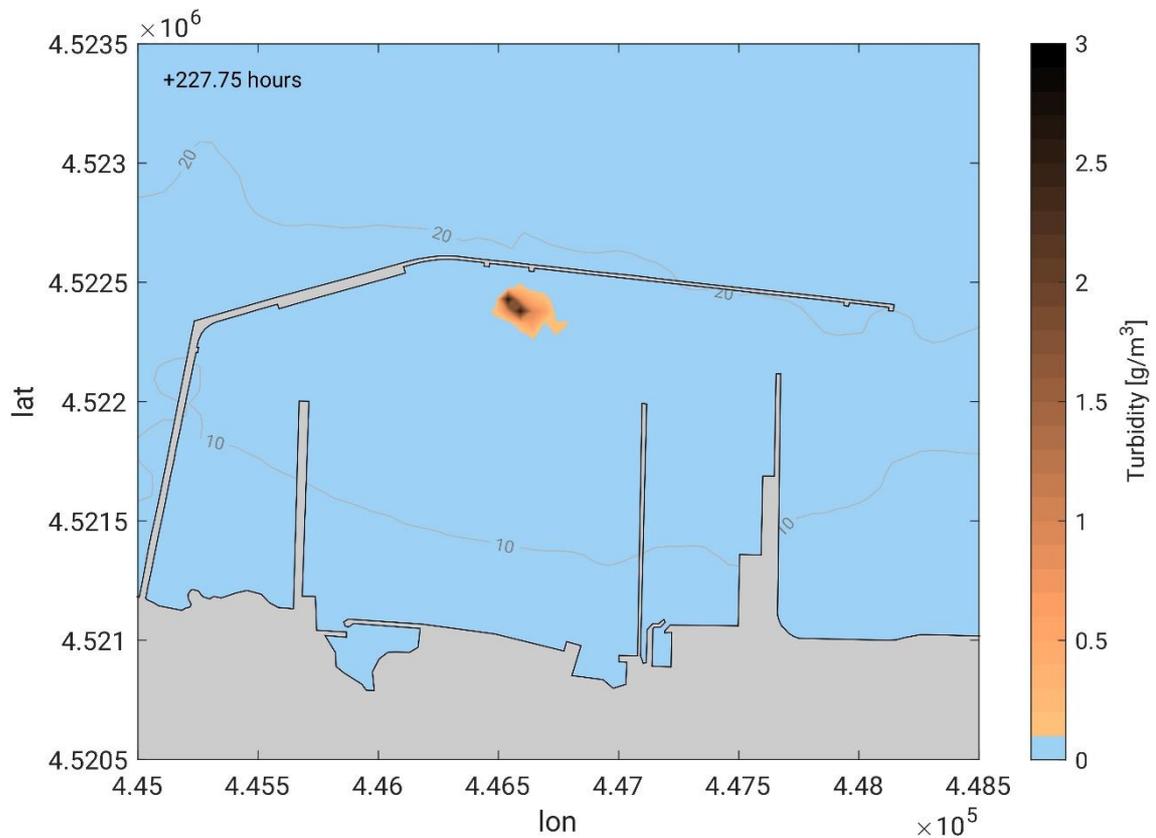


Figura 13. Concentrazione di sedimento sospeso in prossimità del fondale dopo ca. 10 giorni dall'inizio della simulazione.

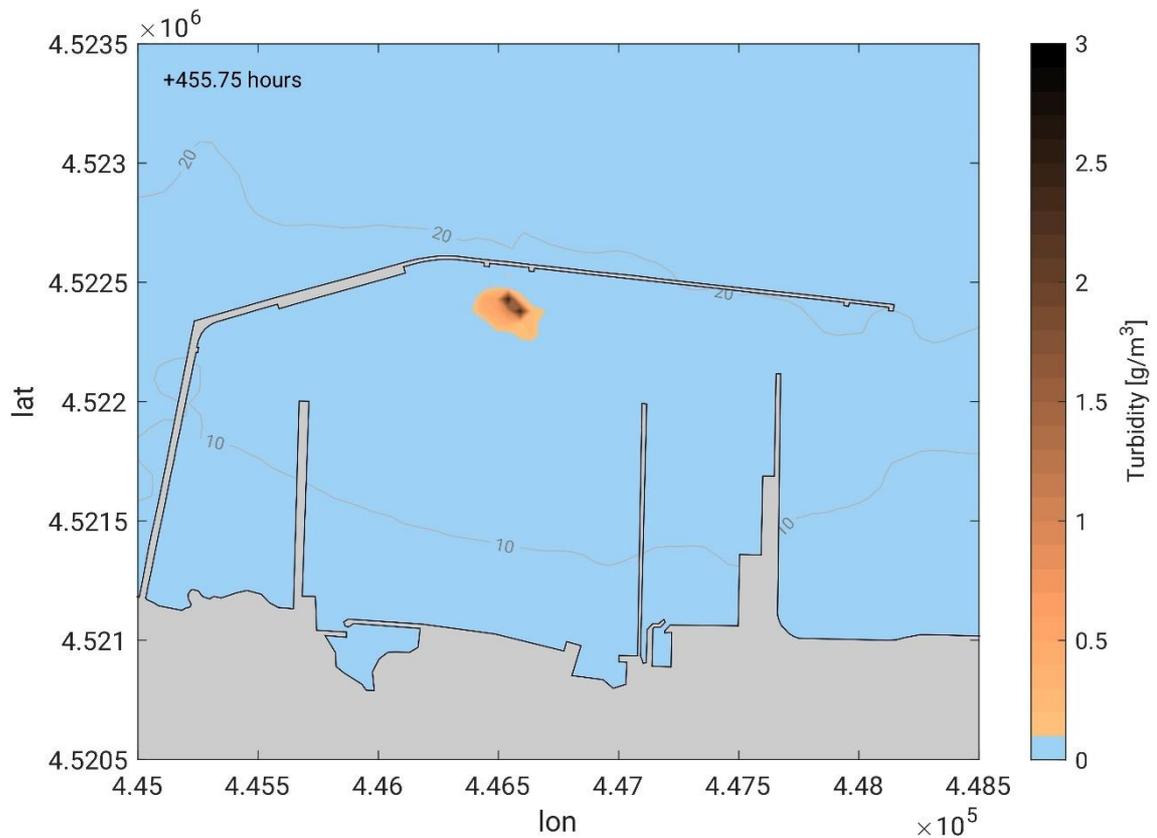


Figura 14. Concentrazione di sedimento sospeso in prossimità del fondale dopo ca. 20 giorni dall'inizio della simulazione.

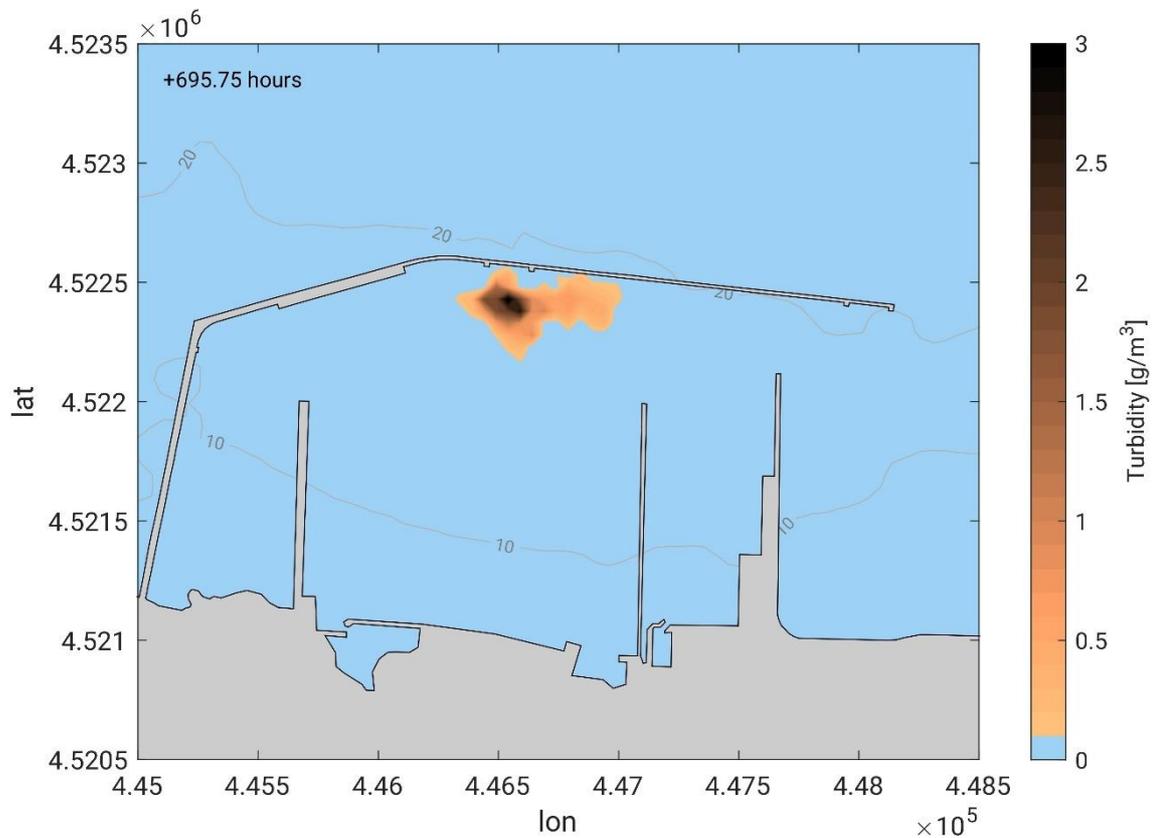


Figura 15. Concentrazione di sedimento sospeso in prossimità del fondale dopo ca. 30 giorni dall'inizio della simulazione.

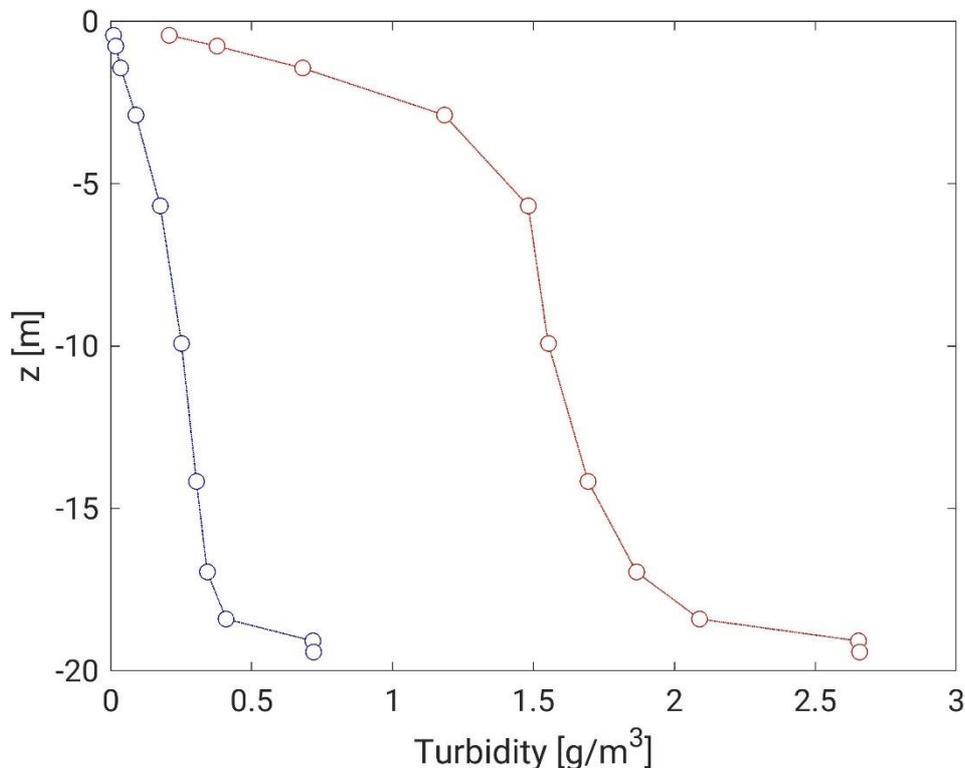


Figura 16. Concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua per due diversi punti di controllo e dopo ca. 30 giorni dall'inizio della simulazione.

In figura sono mostrate due curve, l'una estratta in corrispondenza dello scavo (rappresentata in colore rosso), l'altra a ridosso dello scavo a distanza di una cella computazionale (ossia  $\approx 20$  m, i.e., la curva in blu), dopo ca. 30 giorni dall'inizio della simulazione. Ad ulteriore riprova di come la precipitazione di torbida decorra principalmente a ridosso dello scavo, è possibile apprezzare come la curva blu sia spostata verso valori di torbidità sino a tre volte inferiori di quelli riscontrati allo scavo. Ad ogni modo, in ambedue i casi è palese una maggior concentrazione di sedimento in corrispondenza del fondale, dove si disperde la maggior parte del materiale ipoteticamente perso dalla benna durante le fasi di scavo e risalita. Tale andamento è ben palesato dalla forma del profilo di concentrazione lungo la colonna d'acqua, massima alla profondità di progetto, e prossima allo zero in corrispondenza della superficie (ossia, 0 m).

In prossimità dello scavo, i valori al fondo che raggiungono in media  $\approx 3$  g/m<sup>3</sup>; tale risultato è in linea con le concentrazioni rilasciate (si veda a tal proposito il



Paragrafo 3.3), a riprova del fatto che, soprattutto in prossimità del fondale, il materiale solido tende a depositare nelle immediate vicinanze della zona di scavo.

L'andamento delle concentrazioni riscontrate in superficie, che assumono valori nell'ordine della frazione di grammo, è giustificata dall'areale coperto dal pennacchio, il quale si espande comunque oltre la sezione di scavo (sebbene con concentrazioni ridotte), garantendo dunque la conservazione della massa del materiale solido immesso nel sistema, al netto delle frazioni che si depositano sul fondale.

## 5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente studio è stato redatto al fine di analizzare la dinamica della dispersione di torbidità legata ad operazioni di escavo del fondale, le quali si rendono necessarie ai fini di attività di rigassificazione di GNL previste all'interno dell'area portuale di Porto Torres. Lo studio è stato realizzato tramite l'impiego di un modello numerico ad alta risoluzione in grado di simulare l'evoluzione spazio-temporale della circolazione marina forzata da diverse variabili ambientali, quali vento, onde, escursione mareale e correnti generate a scala di bacino.

L'implementazione di tale modello ha consentito di simulare e quindi di analizzare la dinamica della dispersione planimetrica e lungo la direzione verticale di concentrazione di solidi sospesi (i.e., la torbidità), conseguente alle attività di escavo del fondale espletate tramite benna ambientale, al fine di minimizzare le perdite di carico. Sulla base dei dati forniti dalla Committenza in merito ai volumi di materiale dragato e caratteristiche dello stesso, è stata condotta un'analisi prendendo in considerazione uno scenario climatico meteomarinico di durata pari a ca. un mese, rappresentativo del clima ondometrico e anemometrico caratteristico della variabilità locale, selezionato a partire da un set di dati di hindcast di proprietà del DICCA. Le condizioni meteomarine sono state quindi applicate unitamente ad un flusso di materiale solido imposto come input del modello lungo tutto l'arco della simulazione, e atto a riprodurre la dispersione di sedimento lungo la colonna d'acqua.

Dall'analisi dei risultati, si evince come il pennacchio di torbida si concentri prevalentemente in prossimità della zona di scavo, dove si osservano concentrazioni nell'ordine dei  $3 \text{ g/m}^3$ , esaurendosi nelle immediate vicinanze dello stesso. Peraltro, si rileva una marcata variabilità nelle concentrazioni calcolate lungo la colonna d'acqua, riscontrandosi i valori massimi in prossimità del fondale, dovutamente alla fisiologica sedimentazione del materiale mobilizzato. Ad ogni modo, nelle zone antistanti l'area portuale, le operazioni di escavo previste non generano impatti in termini di torbidità indotta, potendosi affermare con ragionevole certezza che non si verificano alterazioni rispetto alle condizioni ambientali presenti in loco.



## ALLEGATI

Allegato A1.

Vedi documento: 2407778-001\_CSA\_20102932-2410979-001\_signed.pdf



Allegato A2.

Vedi documento: 2407778-007\_CSA\_20102932-2410979-002\_signed.pdf

Allegato A3.

Vedi documento: 2407778-008\_CSA\_20102932-2410979-003\_signed.pdf

Allegato A4.

Vedi documento: 2407778-014\_CSA\_20102932-2410979-004\_signed.pdf

Allegato A5.

Vedi documento: 2407778-015\_CSA\_20102932-2410979-005\_signed.pdf

Allegato A6.

Vedi documento: 2407778-021\_CSA\_20102932-2410979-006\_signed.pdf

Allegato A7.

Vedi documento: 2407778-022\_CSA\_20102932-2410979-007\_signed.pdf

Allegato A8.

Vedi documento: 2407778-028\_CSA\_20102932-2410979-008\_signed.pdf