



REGIONE ABRUZZO COMUNE DI ORTONA



APQ-14 INTERVENTO DT03
Finanziamento con delibera C.I.P.E n° 84-2000

PIANO REGOLATORE PORTUALE 2010



CAPITANERIA DI PORTO DI ORTONA

Titolo elaborato :

STUDIO DELLA QUALITA' DELLE ACQUE

Responsabile del Procedimento e Coordinatore Generale del P.R.P.:

Dott. Ing. Nicola PASQUINI

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E TRASPORTI

PROVVEDITORATO INTERREGIONALE ALLE OPERE PUBBLICHE PER IL LAZIO, ABRUZZO E SARDEGNA

UFFICIO 7 - OPERE MARITTIME

Progettisti:

Dott. Ing. Fabio RIVA
Dott. Ing. Luigi MINENZA

Collaboratori alla progettazione:

Geom. Massimiliano RICCI
Geom. Dario COMPAGNONE
Geom. Pietro PRATICO'

Gruppo specialistico di supporto alla progettazione:

Coordinamento tecnico-scientifico:	Prof. Ing. Alberto NOLI
Aspetti marittimi e modellistica idraulica:	Prof. Ing. Paolo DE GIROLAMO
Aspetti urbanistici:	Urb. Ivana PEDERIVA
Aspetti ambientali:	Dott. Ing. Paolo CONTINI
Aspetti socio economici, trasportistici e finanziari:	TRT- Trasporti e Territorio - Dott. Ing. Fabio TORTA

Elaborato:

S7

	Set. 2010	0	Emissione
--	-----------	---	-----------

Rif. Dis.	Data	Rev.	DESCRIZIONE
-----------	------	------	-------------

Sommario

1	Premessa, obiettivi, metodologia di lavoro e sintesi dei risultati.....	3
2	Circolazione idrica portuale.....	5
2.1	Applicazione del pacchetto applicativo SMS.....	5
2.2	Discretizzazione dello specchio liquido	6
2.3	Definizione delle condizioni al contorno.....	7
2.4	Risultati delle simulazioni idrodinamiche	8
3	Studio della qualità delle acque.....	13
3.1	Qualità delle acque ottenuta con la circolazione idrica naturale	15
3.2	Qualità delle acque ottenuta con circolazione idrica forzata.....	20
3.3	Conclusioni	21
4	Studio della diffusione di inquinanti immessi a mare incidentalmente all'interno della darsena petroli.....	27
4.1	Condizioni di calcolo.....	27
4.2	Risultati ottenuti.....	27
4.3	Conclusioni	37
Appendice A	Descrizione del pacchetto applicativo SMS.....	38

1 Premessa, obiettivi, metodologia di lavoro e sintesi dei risultati

L'Ufficio Opere Marittime del Provveditorato Interregionale alle OO.PP. per il Lazio, l'Abruzzo e la Sardegna ha conferito in data 01/02/2010 Prot. N. 3610 allo scrivente Prof. Ing. Paolo De Girolamo l'incarico di consulenza inerente gli aspetti marittimi per la redazione del Piano Regolatore Portuale del Porto di Ortona. Con riferimento al Disciplinare d'Incarico Professionale del 21/12/2009 rep.n. 26, uno degli aspetti oggetto della consulenza ha riguardato lo "Studio della circolazione idrica e qualità delle acque portuali". Il presente documento costituisce il rapporto finale inerente tale argomento.

Per la redazione del presente studio il Prof. Paolo De Girolamo si è avvalso della collaborazione dell'Ing. Marco Del Bianco.

Lo studio ha avuto come oggetto l'analisi della qualità delle acque portuali che può offrire la nuova configurazione portuale prevista dal Piano Regolatore Portuale (PRP) del 2010 per il porto di Ortona. A tale scopo sono stati investigati i seguenti aspetti:

- Analisi della circolazione idrica all'interno del bacino portuale dovuta alle variazioni di livello marino indotte dalla marea astronomica.
- Analisi dell'evoluzione della concentrazione e diffusione dell'ossigeno disciolto per verificare la qualità delle acque all'interno del porto dopo 5 giorni in condizioni di scarsa ri-ossigenazione naturale.
- Analisi della diffusione di inquinante che accidentalmente sia riversato all'interno della darsena petroli, per verificare il tempo a disposizione per conterminare mediante appositi dispositivi (panne galleggianti) un eventuale versamento indesiderato di prodotti petroliferi.

Lo studio è stato condotto applicando il modello matematico agli elementi finiti denominato SMS (Surfacewater Modeling System), che ha consentito in una prima fase, tramite l'applicazione del modulo RMA2, di risolvere il campo di velocità idrodinamico, variabile nel tempo e nello spazio, all'interno del bacino portuale associato alle variazioni di livello marino dovute alla sola marea astronomica.

Si evidenzia che prendendo in esame la sola marea astronomica come forzante della circolazione idrica (si è assunto nullo il campo di vento e quindi la circolazione da esso indotta) se è operato a favore di sicurezza ai fini della valutazione della capacità di ricambio idrico del bacino portuale.

Successivamente, sulla base di tali risultati, è stata analizzata l'evoluzione nel tempo della concentrazione di ossigeno per valutare l'andamento nel tempo della qualità delle acque portuali.

L'applicazione del modello RMA4 ha inoltre consentito di analizzare la diffusione di fuoriuscite accidentali di inquinanti ipotizzando un sorgente puntuale all'interno della darsena petroli.

I risultati ottenuti mostrano che:

1. In assenza di vento, e quindi utilizzando come forzante la sola marea astronomica (situazione rara anche con tempo stabile nel periodo estivo in quanto la zona in esame è contraddistinta da brezze termiche), si ha un decadimento rapido nel tempo della concentrazione dell'ossigeno disciolto all'interno del bacino portuale;
2. L'introduzione di un sistema di ricambio idrico forzato che preleva l'acqua dall'esterno del porto e la immette all'interno del bacino turistico/peschierecci con un portata complessiva di circa $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ durante la sola fase della corrente di marea (per 6 ore a ciclo di marea e quindi per 12 ore al giorno) garantisce nel bacino turistico peschierecci, che soffrono maggiormente del resto del porto di problemi di ristagno dell'acqua, un accettabile ricambio idrico ai fini ambientali.
3. Nel caso di un versamento accidentale di prodotti petroliferi che avvenga nella darsena petrololi, si hanno circa 2÷3 ore di tempo per con terminare il materiale versato nella darsena mediante l'utilizzo di panne. Lo scenario di simulazione di incidente ha previsto in modo estremamente cautelativo l'immissione di circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ di inquinante per un ora.

2 Circolazione idrica portuale

Per poter verificare in modo oggettivo l'influenza delle nuove opere marittime, proposte dalla presente proposta di Piano Regolatore Portuale, sul campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica, è stato utilizzato il modello numerico SMS, in grado di fornire al variare del tempo le necessarie indicazioni sulle grandezze fisiche che caratterizzano la circolazione idrica portuale.

Nel caso specifico è stato studiato all'interno del bacino portuale di Ortona, nella configurazione di PRP, il campo idrodinamico generato da una prefissata variazione nel tempo del livello idrico in mare aperto che rappresenta le oscillazioni dovute alla marea astronomica.

Nei paragrafi successivi vengono descritte le simulazioni condotte ponendo particolare attenzione alle ipotesi di base nonché alle condizioni al contorno cui si è fatto riferimento.

Si evidenzia che ai fini della valutazione del ricambio idrico portuale, prendendo in esame come forzante idrica la sola marea astronomica si operato a favore di sicurezza. Situazioni meteorologiche caratterizzate da assenza di vento possono accadere nel periodo estivo in presenza di alta pressione e quindi tempo stabile.

2.1 Applicazione del pacchetto applicativo SMS

Il pacchetto Surface Water Modeling System (SMS) è un ambiente di modellazione per simulazioni di idrodinamica. SMS consente analisi agli elementi finiti e alle differenze finite in due e tre dimensioni. Tra i vari moduli di SMS è presente il software RMA-2, dedicato alla simulazione di fenomeni idrodinamici che si verificano nel flusso di masse d'acqua superficiali.

Il programma SMS, operativo in ambiente Windows, è stato utilizzato anche per le procedure di post-processor relative alle analisi ed alle realizzazione dei grafici bidimensionali riproducenti i risultati delle elaborazioni.

Nella fase preliminare dello studio (procedura di pre-processor), è stato utilizzato il codice GFGEN per la costruzione del reticolo geometrico di calcolo, agli elementi finiti, con cui è stato discretizzato lo specchio liquido da simulare. Successivamente, all'interno del modello di calcolo sono state definite le condizioni idrodinamiche al contorno, considerando le oscillazioni del livello marino imposte lungo i contorni che rappresentano il mare aperto.

Per la configurazione presa in esame è stato possibile, attraverso l'applicazione del modello SMS studiare il campo idrodinamico indotto dall'azione della sola marea all'interno dei bacini portuali di Ortona, con un passo temporale di 30 minuti.

2.2 Discretizzazione dello specchio liquido

Il modulo di circolazione RMA-2 del pacchetto SMS è un modello di circolazione idrodinamica bidimensionale agli elementi finiti che fornisce risultati mediati sulla verticale.

Per l'applicazione del modulo RMA-2 è necessario discretizzare il dominio di calcolo attraverso la creazione di una griglia (*mesh*) composta da forme primitive (elementi finiti) di forma codificata (triangoli e quadrilateri). Per la definizione del dominio di calcolo si è fatto riferimento alle planimetrie di progetto, rispettando sia le variazioni planimetriche relative allo schema portuale che le aree e le quote dei dragaggi dei fondali (Figura 1).

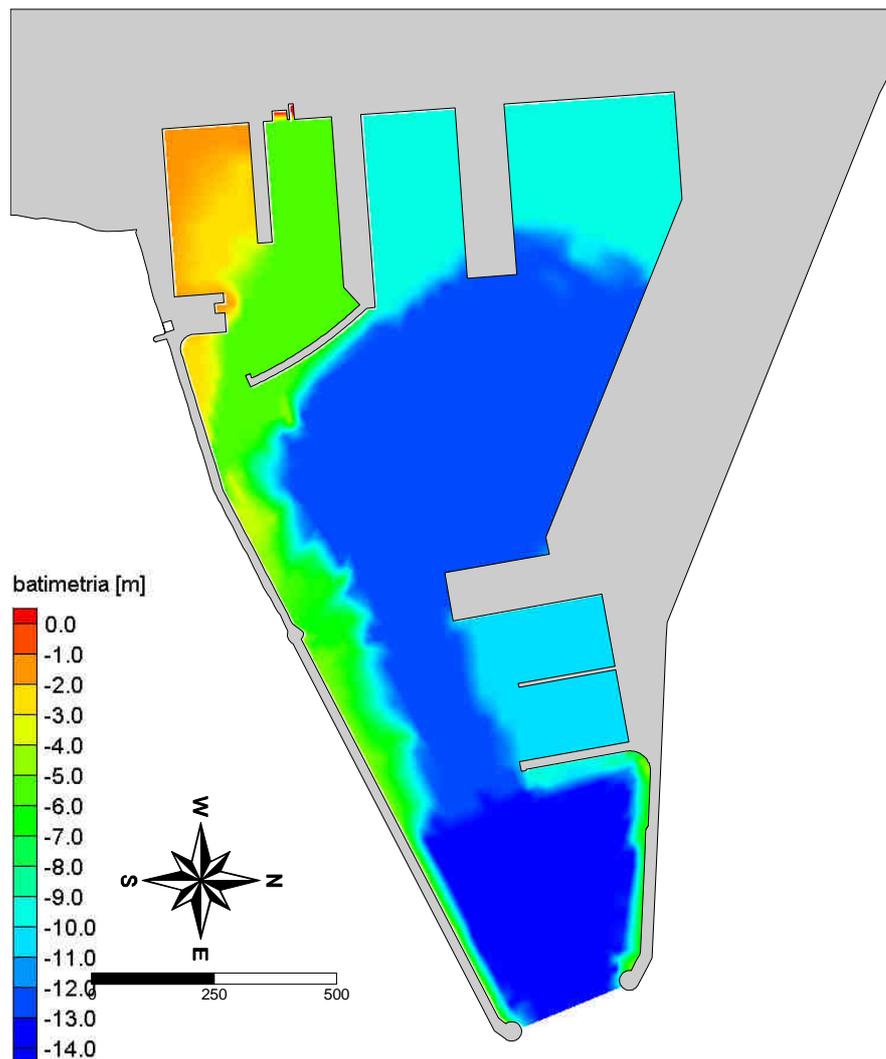


Figura 1. Batimetria del dominio di calcolo: configurazione di PRP 2010.

A partire dalla configurazione planimetrica del PRP 2010 è stata generata, utilizzando la procedura di SMS per la creazione automatica della mesh di calcolo, la griglia di calcolo riportata in Figura 2, costituita da 1503 elementi (di cui 1200 quadrilateri e 303 triangolari) per un totale di 4498 nodi di calcolo.

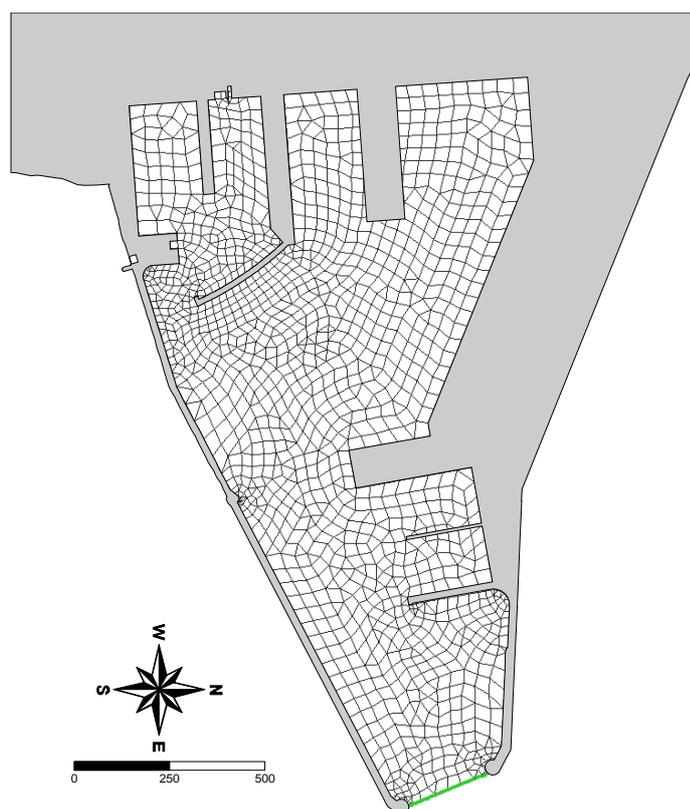


Figura 2. Griglia di calcolo: configurazione di PRP 2010.

2.3 Definizione delle condizioni al contorno

Per la risoluzione del campo idrodinamico all'interno del dominio di calcolo, generato dalla variazione di livello marino, è necessario definire lungo il contorno aperto del dominio un condizione variabile nel tempo rappresentativa delle oscillazioni di marea astronomica.

Il regime di marea lungo le coste abruzzesi è del tipo misto a dominante semidiurna con una ampiezza di oscillazione variabile tra un massimo pari a circa 40 cm e un minimo pari a circa 20 cm (semiampiezze pari a 22 cm e 10 cm rispettivamente).

Questa legge di variazione nel tempo del livello idrico è stata imposta, con una discretizzazione temporale di mezz'ora, lungo il contorno lato mare del dominio di calcolo, per una durata complessiva di 120 ore comprendente 10 cicli di marea 5 gg) (Figura 3).

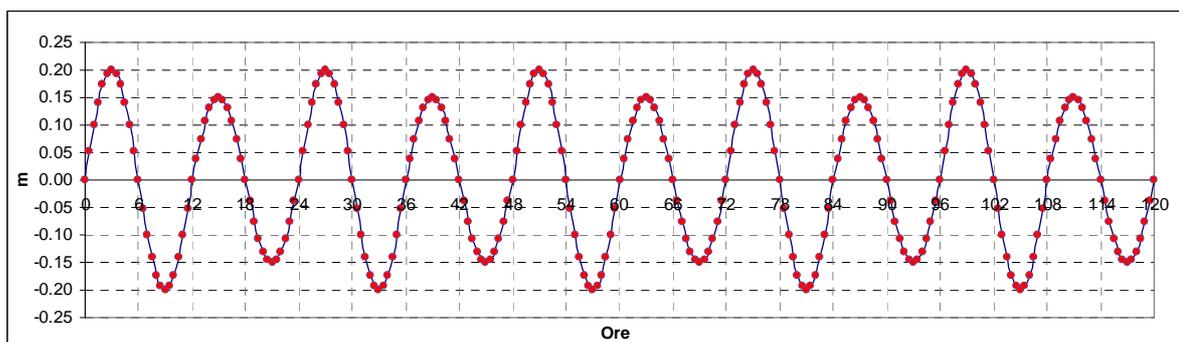


Figura 3. Variazioni di livello imposte come condizioni al contorno per il modello RMA-2.

Per simulare correttamente l'intero campo idrodinamico anche in acque basse, tenendo conto delle oscillazioni del livello liquido indotte dalla marea, si è fatto ricorso alla funzione opzionale di "wet-dry" contemplata dal programma RMA-2, che consente di simulare le condizioni transitorie di asciutto-bagnato che nel corso del ciclo di marea può caratterizzare elementi contraddistinti da un basso tirante idrico.

2.4 Risultati delle simulazioni idrodinamiche

Completata la fase di definizione del dominio di calcolo è stato applicato il programma GFGEN per la predisposizione dei file di input (griglia di calcolo e condizioni al contorno, in codice binario) utilizzati successivamente dal programma di idrodinamica RMA-2 agli elementi finiti.

La successiva applicazione del software RMA-2 ha permesso di risolvere il campo idrodinamico nel tempo dovuto alle variazioni della marea astronomica all'interno dei bacini portuali del porto di Ortona.

I risultati ottenuti sono riportati da Figura 4 a Figura 11 in corrispondenza degli istanti 03.00, 06.00, 09.00, 12.00, 15.00, 18.00, 21.00 e 24.00, in modo da rappresentare un intero ciclo di marea. I risultati mostrano l'intensità del campo di velocità e la direzione dei vettori velocità espressi in m/s.

Seguendo l'evoluzione di un ciclo di marea alle ore 03.00 si ha la condizione di massimo livello astronomico assoluto, cui corrisponde un'inversione di flusso. Durante la fase discendente della marea si ha una corrente di riflusso che assume valore massimo alle ore 06.00 (livello=0) per poi diminuire fino ad arrivare all'inversione di flusso alle ore 09.00 in corrispondenza del minimo livello astronomico assoluto.

Successivamente, durante la fase di risalita del livello marino, si ha la fase di flusso che raggiunge il massimo alle ore 12.00. Dopo l'inversione di flusso alle ore 15.00, associata al massimo livello relativo, si hanno ancora una fase di riflusso, alle ore 18.00, corrispondente alla fase discendente della marea, una nuova inversione alle 21.00 in occasione del massimo livello relativo, e un'ultima fase di riflusso.

Il campo di velocità ottenuto in occasione delle fasi di flusso e di riflusso risulta mediamente più intenso lungo il canale di accesso, dove si riscontrano valori di velocità dell'ordine di 0.01 m/s (1 cm/s), all'imboccatura portuale, dove il flusso arriva sino a 14 cm/s, e in corrispondenza dell'imboccatura della darsena turistico-pescherecci dove si hanno valori di flusso dell'ordine di 0.9 – 1.0 cm/s. Altrove il campo di velocità risulta molto contenuto.

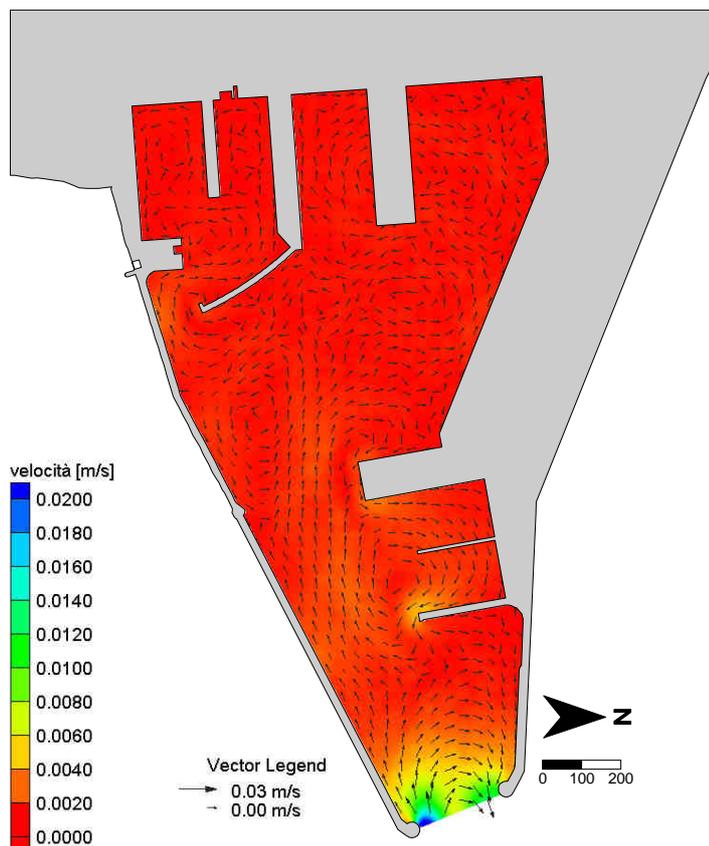


Figura 4. Configurazione PRP 2010: campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 3.00 (massimo livello assoluto - inversione del flusso).

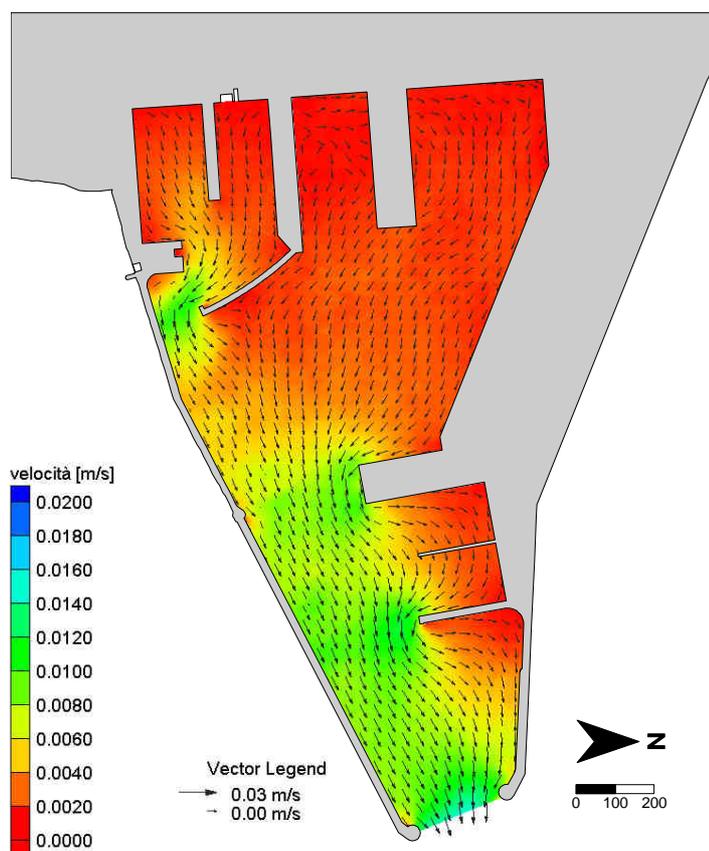


Figura 5. Configurazione PRP 2010: campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 6.00 (fase di riflusso).



Figura 6. Configurazione PRP 2010: campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 9.00 (minimo livello assoluto - inversione del flusso).

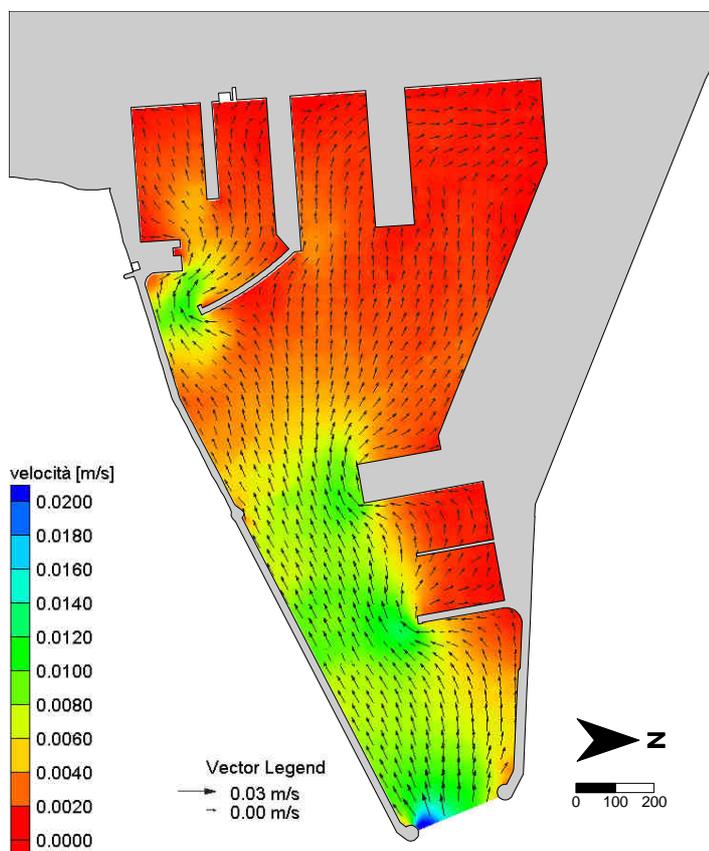


Figura 7. Configurazione PRP 2010: campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 12.00 (fase di flusso).

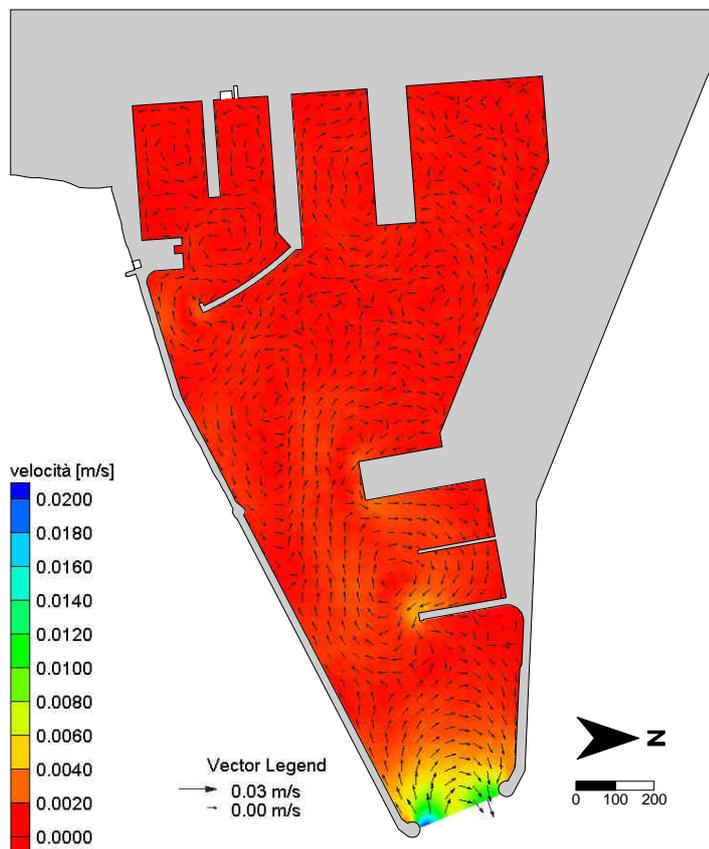


Figura 8. Configurazione PRP 2010: campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 15.00 (massimo livello relativo - inversione del flusso).

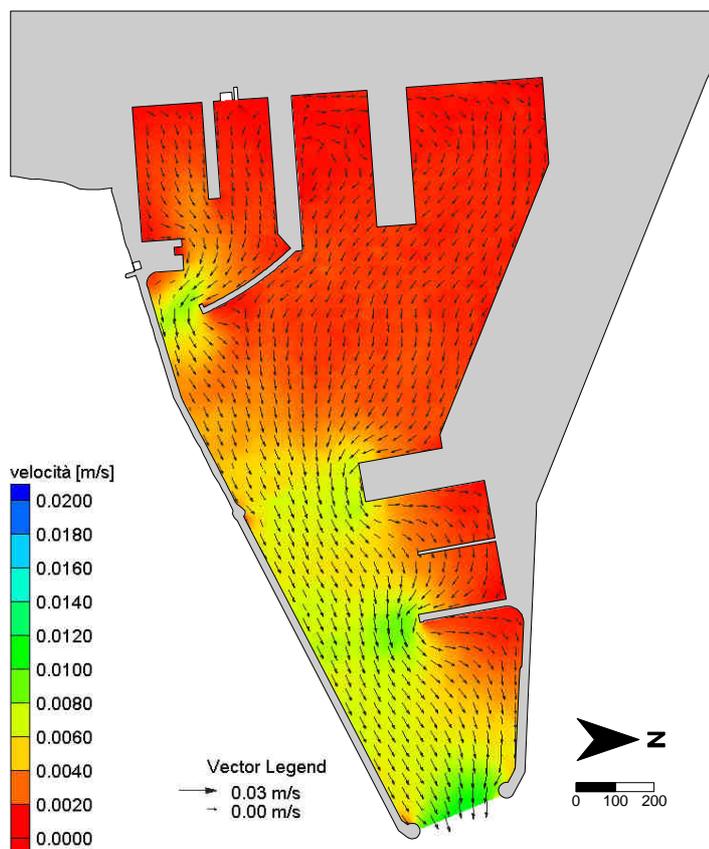


Figura 9. Configurazione PRP 2010: campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 18.00 (fase di riflusso).



Figura 10. Configurazione PRP 2010: campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 21.00 (minimo livello relativo - inversione del flusso).

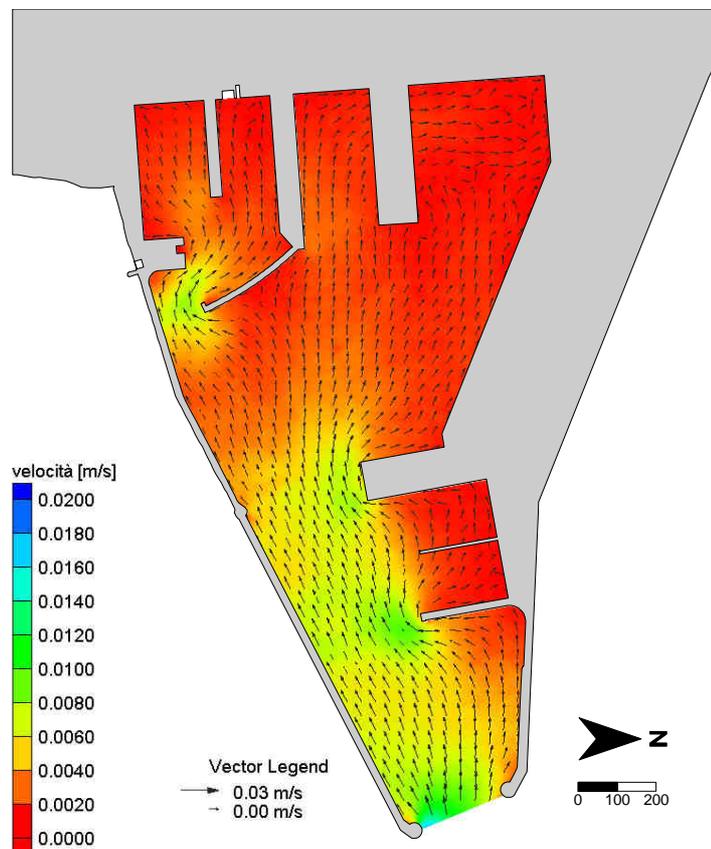


Figura 11. Configurazione PRP 2010: campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 24.00 (fase di flusso).

3 Studio della qualità delle acque

Per verificare la qualità delle acque offerta dalla configurazione portuale prevista dal PRP 2010 per il porto di Ortona è stata valutata la capacità di ricambio idrico, con riferimento al decadimento dell'ossigeno disciolto, che si verifica in 5 giorni di cicli di marea in condizioni di elevata temperatura, assenza di moto ondoso e di vento. Tali condizioni rappresentano una condizione limite che si può verificare poche volte l'anno, prevalentemente nel periodo estivo. L'assenza di moto ondoso e di vento infatti non favoriscono la naturale riossigenazione delle acque del bacino.

Si è verificato che una riduzione della concentrazione di ossigeno sotto valori di 3 mg/l già è causa della morte e del decadimento delle specie di macro invertebrati e fitoplankton più sensibili.

In generale infatti si osserva che il corpo d'acqua permane in uno stato di "salute", fintanto che in esso si mantiene una concentrazione di ossigeno tale da assicurare la vita e lo sviluppo degli organismi più elevati e più sensibili a carenze di ossigeno. La concentrazione di ossigeno disciolto in acqua di mare in condizioni di saturazione varia tra 6,4 e 11,9 mg/l con temperatura variabile tra 30° C e 0° C.

Lo studio della concentrazione di ossigeno disciolto che si viene a realizzare in condizioni di scarsa ossigenazione consente una valida caratterizzazione qualitativa dello "stato di salute" delle acque, anche se non è certo in grado di esprimere i complessi rapporti biologici, chimici e fisici che si instaurano all'interno del corpo d'acqua, per l'analisi dei quali si renderebbe necessario definire altri parametri quali la temperatura, il pH, il BOD, la carica batterica, le sostanze disciolte e quelle in sospensione.

I risultati relativi ai campi idrodinamici definiti con la serie di simulazioni condotte in precedenza tramite con il modello RMA-2 sono stati utilizzati per simulare la variazione della concentrazione di ossigeno disciolto utilizzando il modulo di calcolo RMA-4 (dalla suite degli applicativi del modello SMS) in grado di risolvere l'equazione di dispersione/diffusione.

Le simulazioni sono state effettuate considerando una concentrazione iniziale per tutto il dominio di calcolo pari a 5.0 mg/l ed una legge di decadimento per la concentrazione di tipo esponenziale $C(t)=C(t_0)e^{-kt}$, assumendo come coefficiente di decadimento un valore pari a $k = 0.4$. Si vuole evidenziare che scegliendo tale legge di decadimento, che comporta dopo 5 giorni un abbattimento del ossigeno disciolto con valori inferiori a 1 mg/l, si è operato a favore di sicurezza. Come condizioni al contorno è stata assegnata lungo il dominio di frontiera che delimita lo specchio portuale con il mare esterno s una concentrazione di ossigeno disciolto pari a 7.0 mg/l. Tale scelta è sicuramente conservativa. Nella realtà lungo le imboccature portuali si potranno riscontrare valori della concentrazione di ossigeno disciolto

superiori a quelli assunti in ragione della marcata miscelazione operata dalle onde e dalle correnti marine.

Come verrà mostrato in seguito la circolazione idrica portuale “naturale”, dovuta ai soli cicli di marea, non è sufficiente a garantire un adeguato ricambio idrico all’interno del bacino portuale. Pertanto è stata verificata la qualità delle acque in presenza di una circolazione idrica “forzata” da un sistema di pompe, installate nelle zone dove si verificano le condizioni di maggior ristagno, per l’immissione di acqua più ricca di ossigeno prelevata all’esterno del porto.

Per la rappresentazione dei risultati, come rappresentato in Figura 12, è stata effettuata una suddivisione del dominio di calcolo in più aree di interesse. I valori di concentrazione rappresentativi di ogni area sono stati calcolati in corrispondenza dei punti indicati in figura assumendo il valore misurato nei punti come concentrazione media all’interno della’rea in esame.

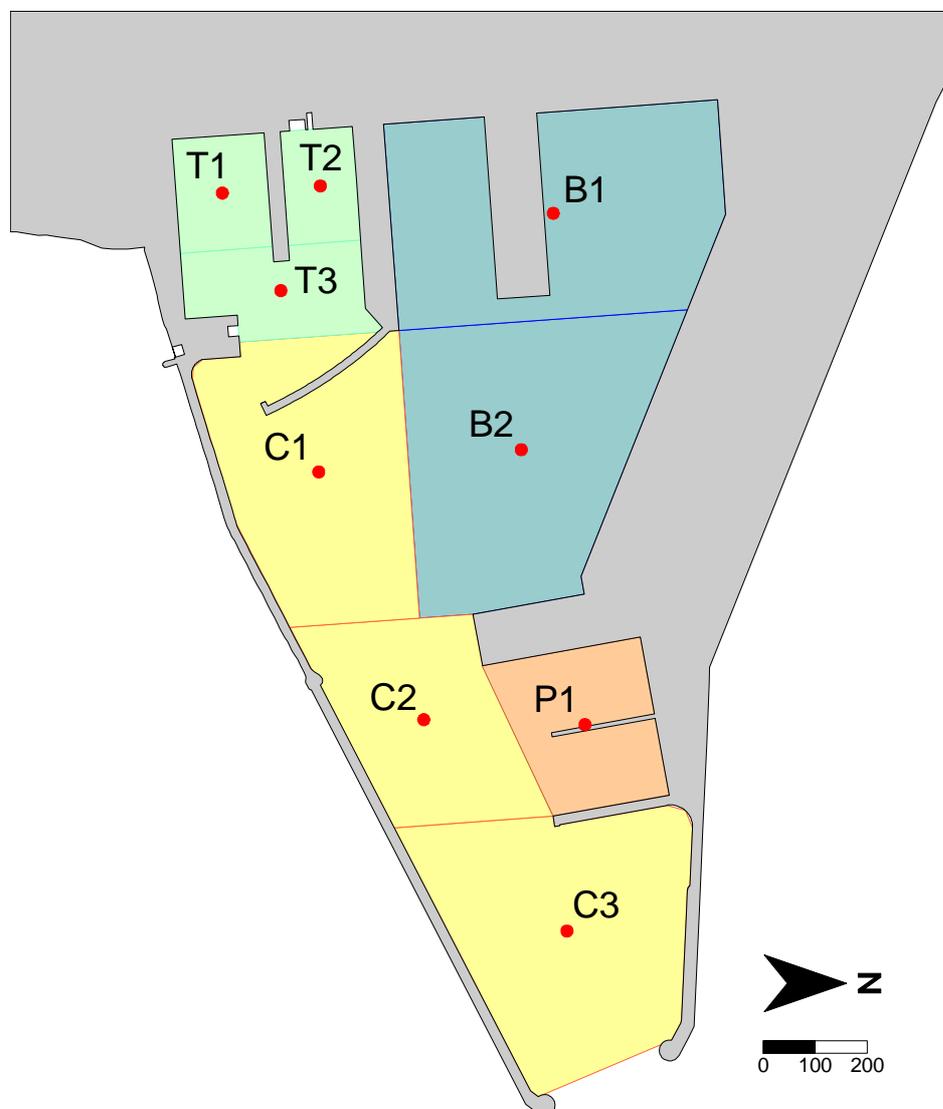


Figura 12. Suddivisione in aree di interesse del dominio di calcolo e localizzazione dei punti di registrazione per l’extrapolazione dei risultati.

3.1 Qualità delle acque ottenuta con la circolazione idrica naturale

Il modulo RMA-4 è stato inizialmente applicato per studiare l'evoluzione spaziale e temporale della concentrazione dell'ossigeno disciolto all'interno del bacino portuale in presenza delle correnti indotte dalla marea precedentemente ottenute con il modulo RMA-2. Le simulazioni sono state condotte con un passo di discretizzazione di 0.5 h con una finestra temporale complessiva di 5 giorni.

Dalla Figura 13 alla Figura 18 sono riportati i risultati ottenuti al termine della simulazione. Le immagini riportano, ad intervalli di 24 ore, la distribuzione della concentrazione di ossigeno disciolto, espresso in milligrammi/litro, all'interno del bacino portuale. Le curve di livello sono state tracciate ad intervalli di 0.25 mg/l.

Come è possibile osservare il ricambio idrico dovuto alle correnti di marea non è sufficiente a contrastare da solo il decadimento dell'ossigeno disciolto. Così al termine dei cinque giorni simulati la concentrazione di ossigeno all'interno del bacino si è ridotta da valori di 5 mg/l a valori compresi tra 0.5 e 0.75 mg/l. Nell'avamposto si riscontrano condizioni migliori di ossigenazione con valori compresi tra 4 mg/l e 1 mg/l.

In Figura 19 sono riportati i risultati ottenuti nei punti di registrazione indicati in Figura 12. Come è possibile osservare, in tutto lo specchio liquido, ad eccezione dell'avamposto (C3) dove le fasi di flusso e riflusso consentono una parziale ri-ossigenazione dell'acqua, la concentrazione di ossigeno disciolto decade molto rapidamente; la concentrazione limite di 3.0 mg/l viene raggiunta praticamente in tutto il bacino dopo circa 30 ore dall'inizio della simulazione. Al termine dei 5 giorni il valore di concentrazione ottenuto nei diversi punti di registrazione risulta inferiore a 1.0 mg/l.

Si evidenzia che, sebbene dalla lettura dei diagrammi di Figura 19 si evince che all'interno del porto non si raggiunga una condizione stazionaria, si è deciso di non proseguire le simulazioni nel tempo oltre i 5 giorni a causa dell'evidente tendenza al decadimento della concentrazione di ossigeno disciolto.

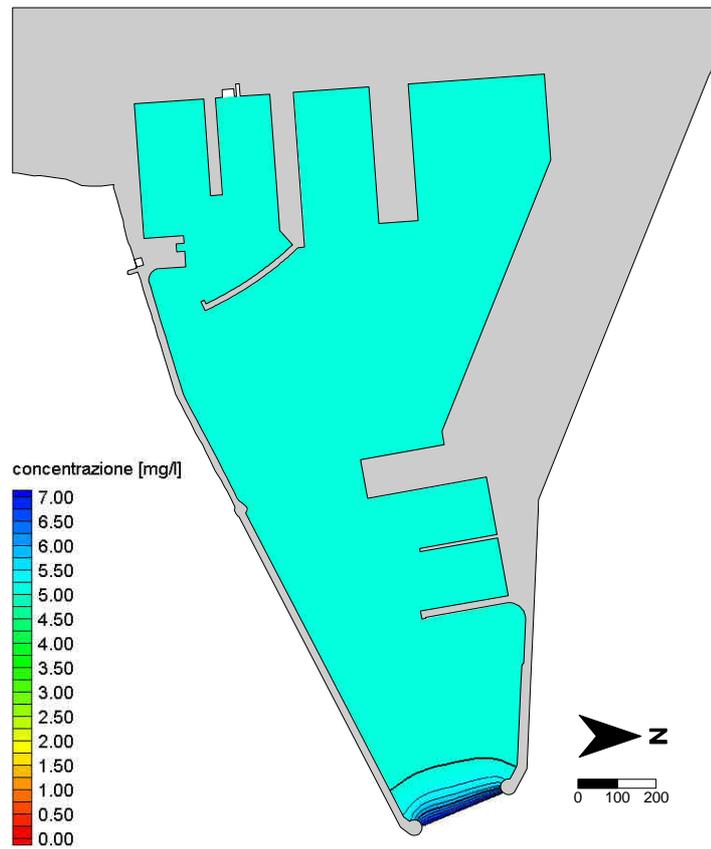


Figura 13. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua all'istante iniziale con circolazione naturale.

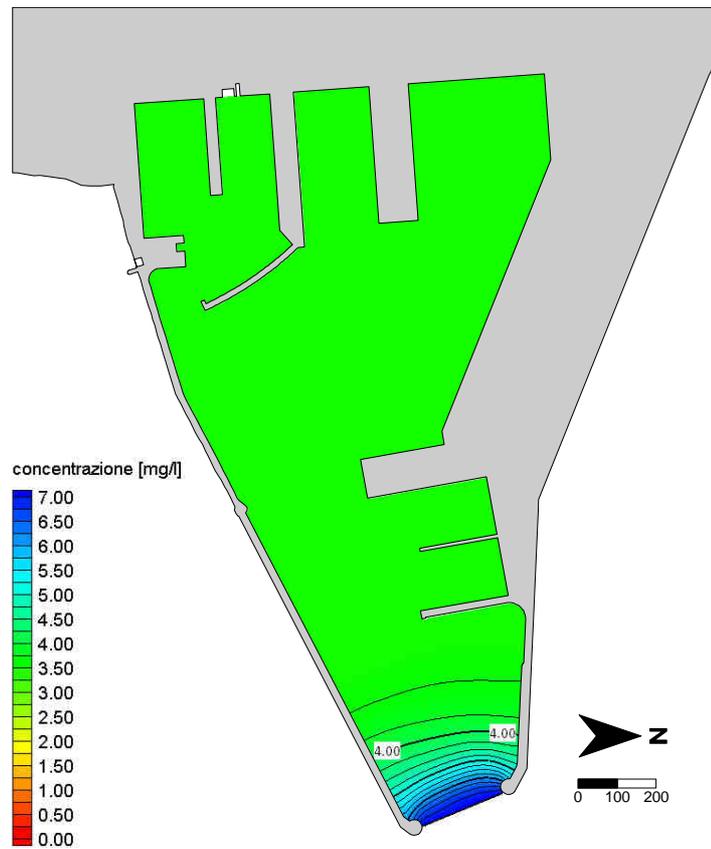


Figura 14. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua dopo 24 ore con circolazione naturale.

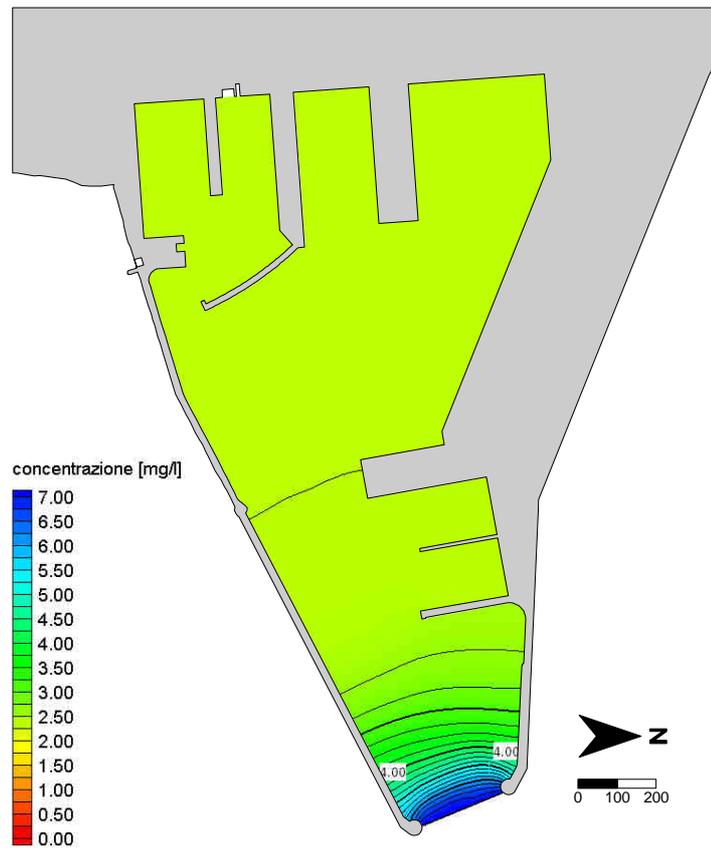


Figura 15. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua dopo 48 ore con circolazione naturale.

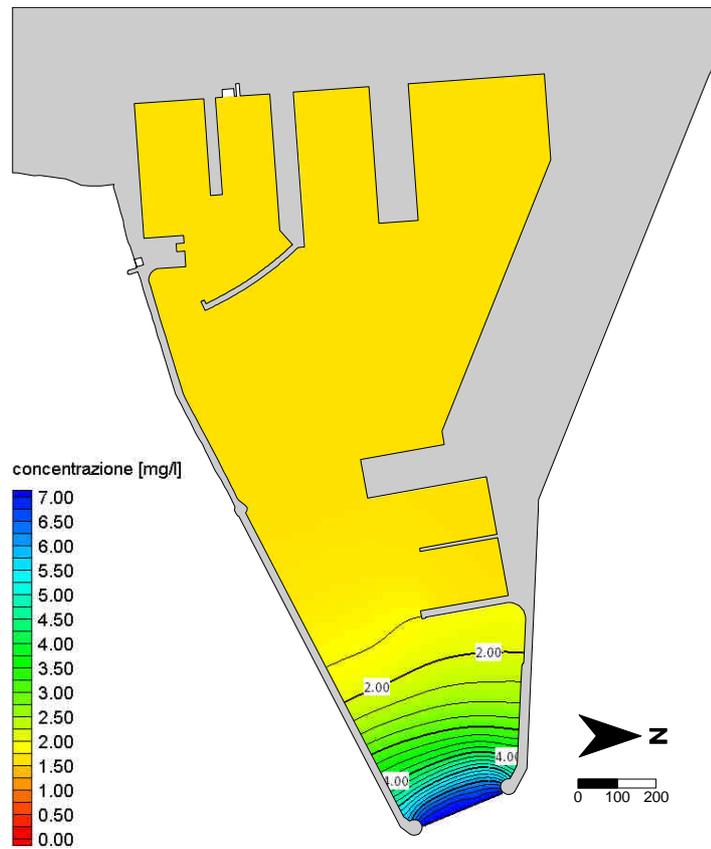


Figura 16. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua dopo 72 ore con circolazione naturale.

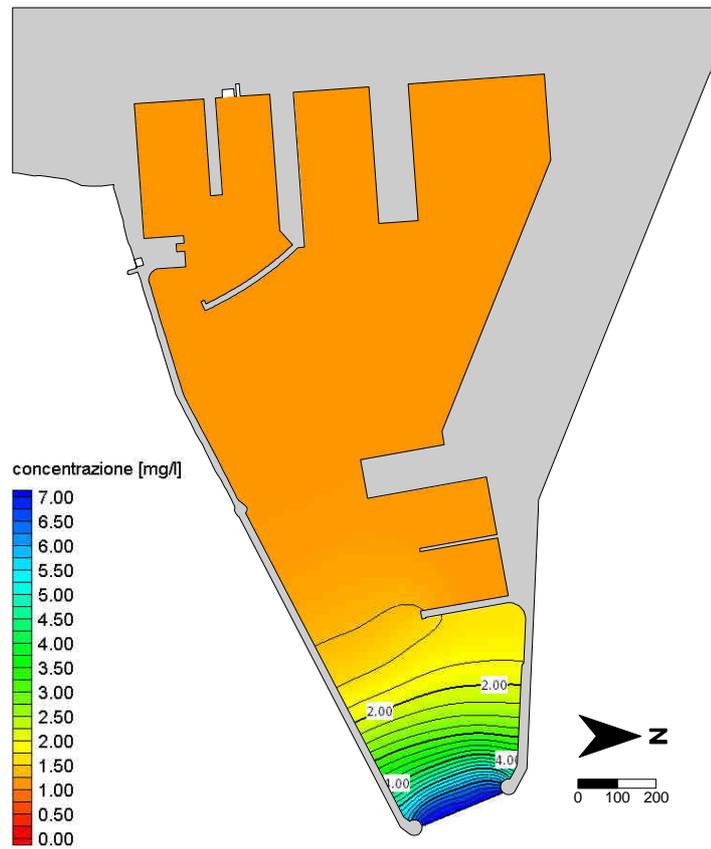


Figura 17. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua dopo 96 ore con circolazione naturale.

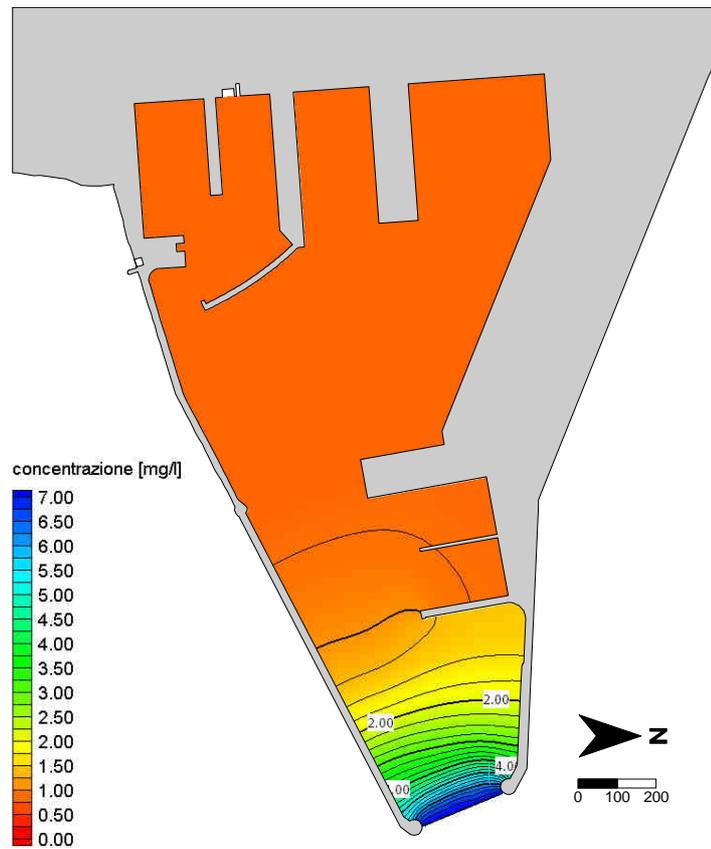


Figura 18. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua dopo 120 ore con circolazione naturale.

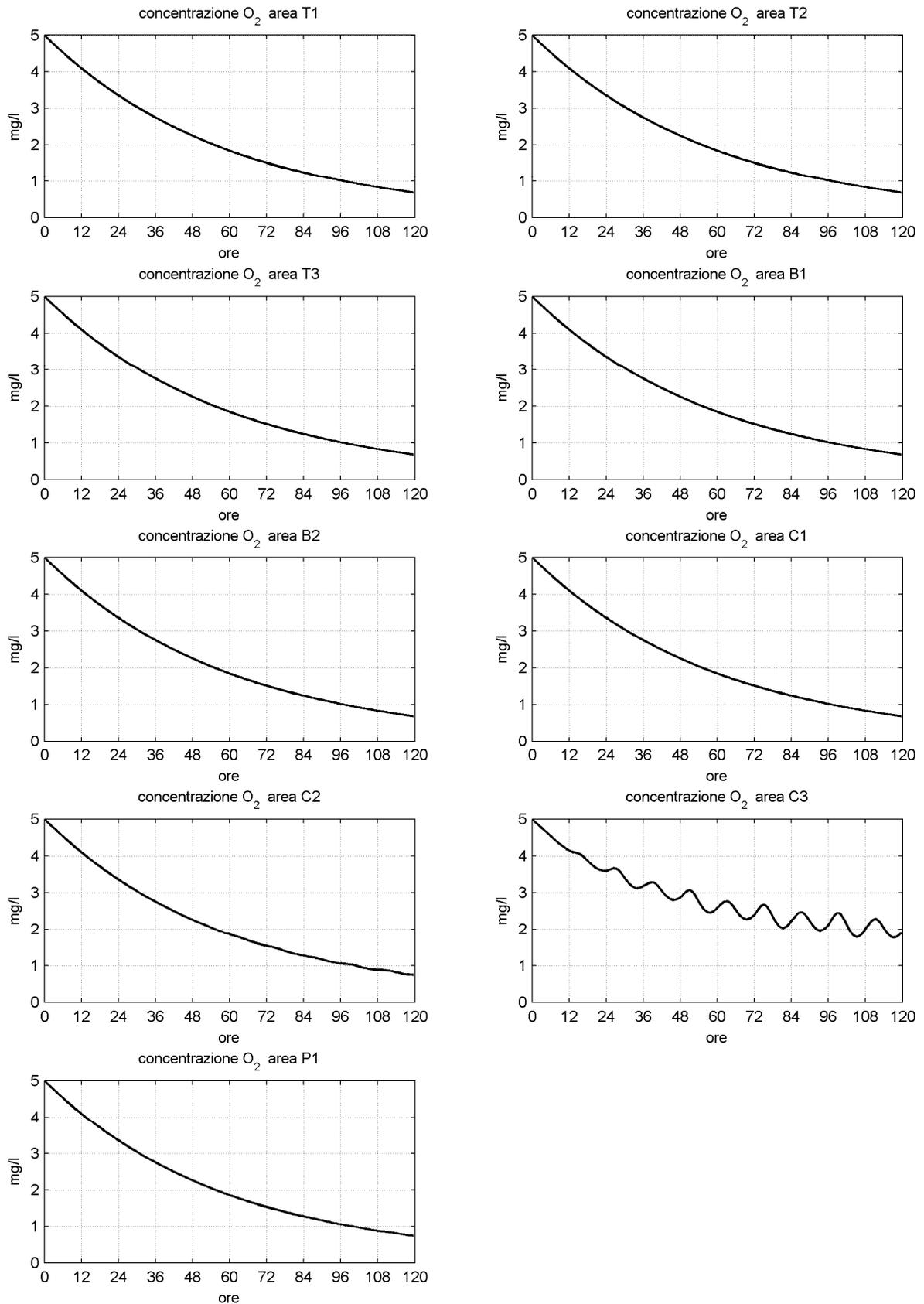


Figura 19. Evoluzione della concentrazione di O_2 disciolto ottenuta nei punti di registrazione con circolazione naturale.

3.2 Qualità delle acque ottenuta con circolazione idrica forzata

Sulla base di quanto emerso dall'analisi riportate nel paragrafo precedente, si è deciso di prendere in esame la possibilità di garantire un adeguato ricambio idrico mediante in sistema di pompaggio che prelevi acqua dall'esterno del porto e la immetta all'interno di esso.

Tuttavia, a ragione degli elevati volumi complessivamente in gioco, l'adozione di questa tipologia di intervento, che prevede costi di gestione non trascurabili, si è deciso di limitare l'intervento al solo specchio liquido del bacino turistico-peschierecci. Infatti esso soffre maggiormente del resto del porto dei problemi di ricambio idrico essendo parzialmente con terminato dal molo nord la cui funzione è quella di limitare l'agitazione ondosa del bacino proveniente dall'imboccatura del porto.

Ciò premesso, il modello RMA-4 è stato applicato per verificare l'efficacia di un sistema di circolazione in grado di garantire, al termini di una finestra temporale di 5 giorni, una concentrazione di ossigeno disciolto non inferiore a 3 mg/l all'interno della darsena turistico/peschierecci.

In particolare la soluzione proposta prevede l'installazione di due pompe sommerse, una da 500 l/s per la darsena turistica ed una da 750 l/s per la darsena peschierecci, che prelevano acqua all'esterno del porto, dove sono state assunte condizioni di ossigenazione pari a 7 mg/l, e la immettono all'interno delle darsene nei punti indicati in Figura 20. Si è ipotizzato che le pompe entrino in funzione ad ogni fase di riflusso per un tempo di 6 ore.

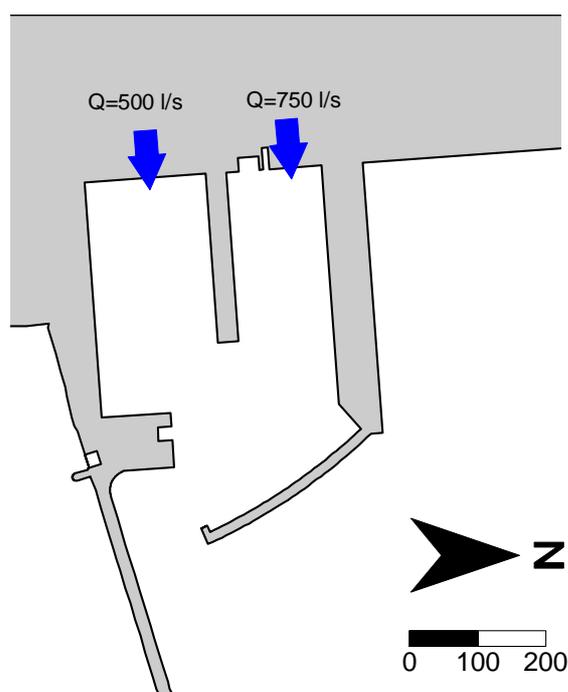


Figura 20. Localizzazione delle pompe installate nella darsena turistico/peschierecci per realizzare la circolazione idrica forzata.

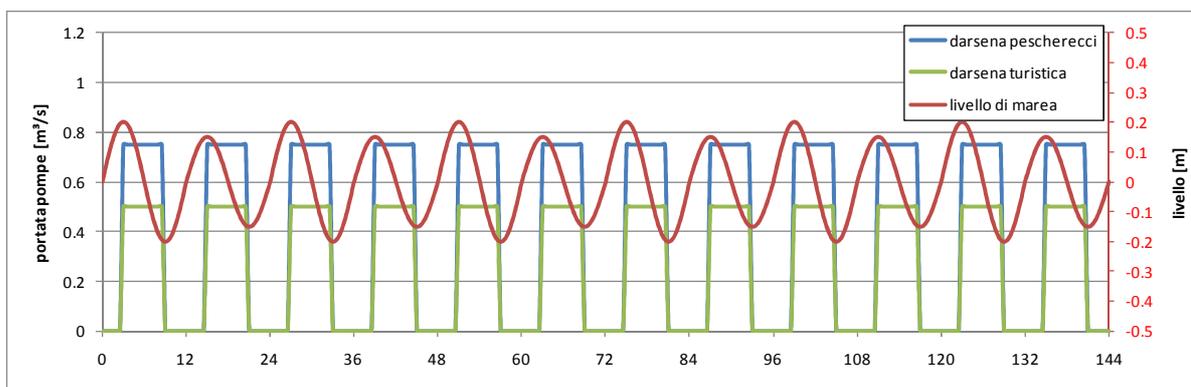


Figura 21. Andamento temporale della marea e delle portate delle pompe per la circolazione idrica forzata.

Dalla Figura 22 alla Figura 27 sono riportati i risultati ottenuti al termine della simulazione condotta in presenza di circolazione idrica forzata dal sistema di pompe. Le immagini riportano, ad intervalli di 24 ore, la distribuzione della concentrazione di ossigeno disciolto, espresso in milligrammi/litro, all'interno del bacino portuale. Le curve di livello sono state tracciate ad intervalli di 0.25 mg/l.

In Figura 28 sono riportati i risultati ottenuti nei punti di registrazione localizzati come indicato in precedenza in Figura 12. Osservando i risultati relativi alla darsena pescherecci (aree T1, T2 e T3), è possibile verificare l'efficacia del ricambio idrico forzato dalle pompe.

In particolare nell'area T1, corrispondente alla darsena turistica, il livello di concentrazione si mantiene sempre superiore a 3.0 mg/l anche al termine dei 5 giorni simulati. Nella area T2, corrispondente alla darsena pescherecci, la concentrazione decresce fino a raggiungere valori di 2.5 mg/l.

In conclusione il ricambio idrico ottenuto nella darsena turistico/pescherecci con l'azionamento delle pompe è tale da assicurare una concentrazione di ossigeno disciolto che si mantiene nel tempo tra 2.0 e 3.0 mg/l. Ovviamente tale beneficio rimane confinato alla darsena turistico/pescherecci, pertanto nel bacino commerciale al termine della simulazione si ottengono i valori di concentrazione già ottenuti in precedenza.

Si osserva infine che i diagrammi di Figura 28 relativi alle aree T1 e T2 mostrano che all'interno delle darsene l'effetto delle pompe è tale da garantire condizioni pressoché stazionarie alla fine dei 5 gg di simulazione.

3.3 Conclusioni

A partire dai risultati ottenuti dallo studio della circolazione idrica, è stato possibile ricavare l'andamento temporale della concentrazione di ossigeno disciolto all'interno dei bacini portuali previsti dal nuovo Piano Regolatore Portuale.

È importante sottolineare che i risultati ottenuti dalle diverse simulazioni fanno riferimento alle condizioni più gravose ai fini della qualità delle acque, caratterizzate dalla prolungata assenza di vento e moto ondoso. Tali condizioni sono da considerare certamente rare in quanto nel periodo estivo la presenza delle brezze termiche garantisce comunque un ricambio superiore a quello qui esaminato.

Dalle analisi dei risultati ottenuti si evince che il ricambio idrico naturale indotto dalla sola forzante di marea non è sufficiente a garantire un'adeguata concentrazione di ossigeno disciolto all'interno della darsena turistico/pescherecci.

I risultati ottenuti hanno permesso di verificare che un sistema costituito da 2 pompe azionate per una durata di circa 6 ore durante la fase di riflusso della marea, di cui una da 500 l/s ed una da 750 l/s entrambe che adescanti all'esterno del porto, sono sufficienti a garantire un'adeguata concentrazione di ossigeno disciolto nella darsena turistico/pescherecci.

Si evidenzia infine che qualora in fase di gestione si rendesse necessario garantire una migliore qualità delle acque, sarà sempre possibile ricorrere ad agitatori.

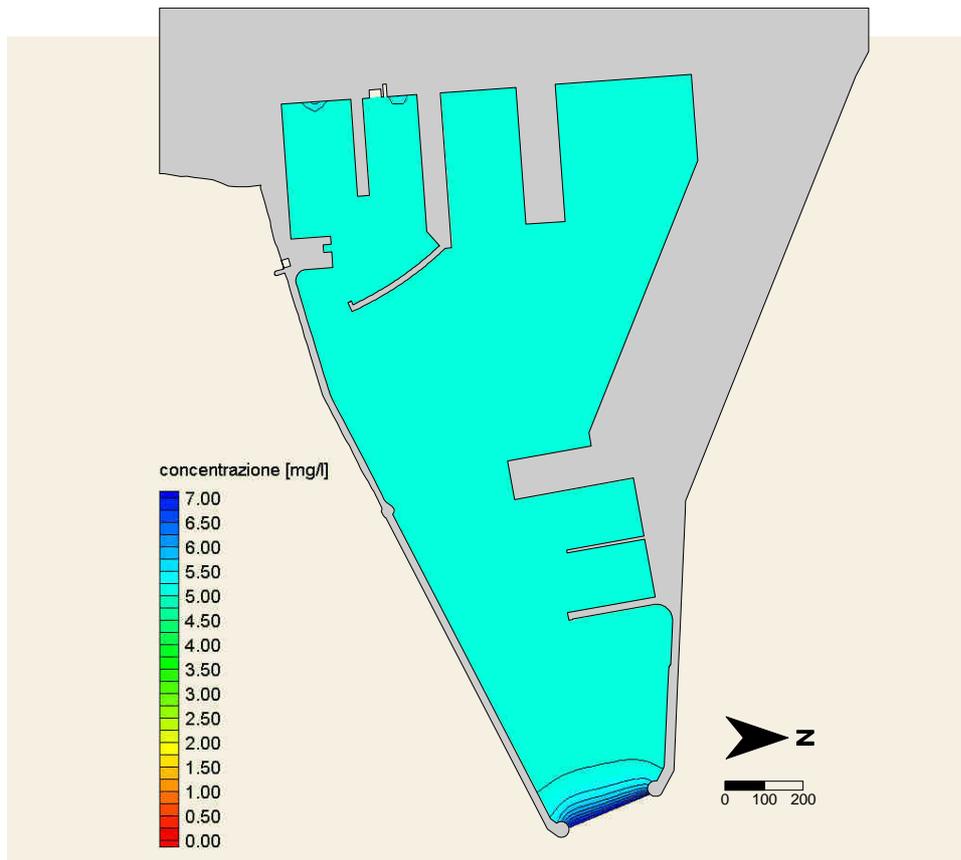


Figura 22. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua all'istante iniziale.

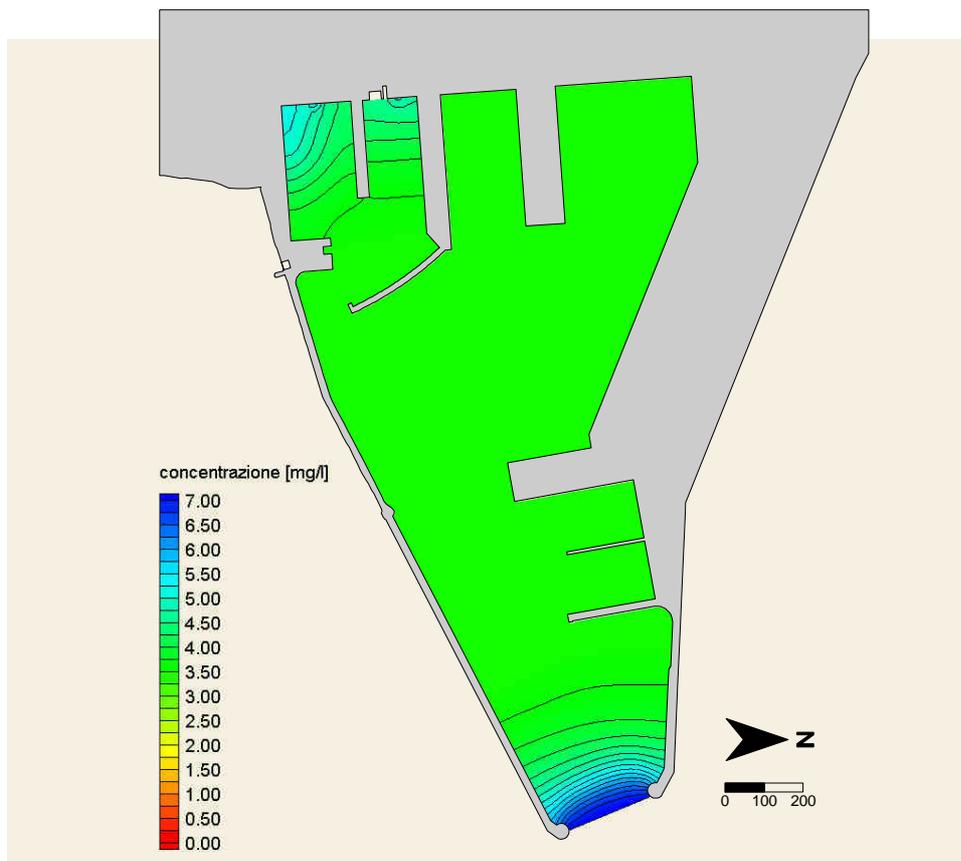


Figura 23. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua dopo 24 ore con circolazione forzata.

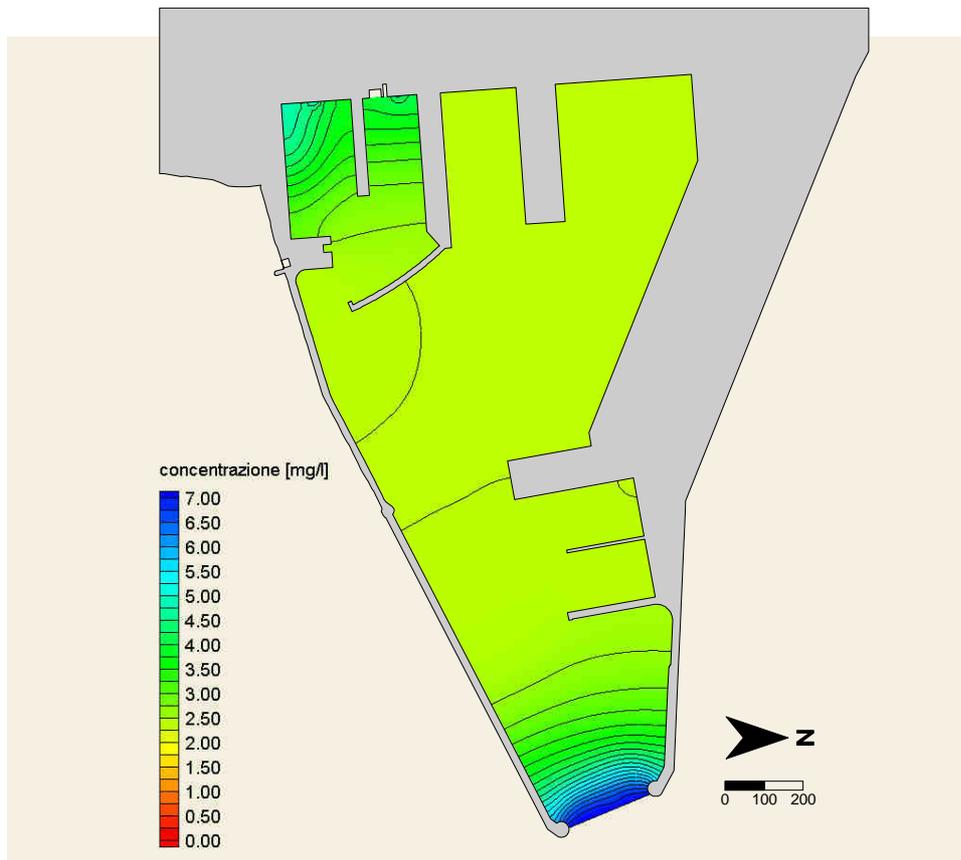


Figura 24. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua dopo 48 ore con circolazione forzata.

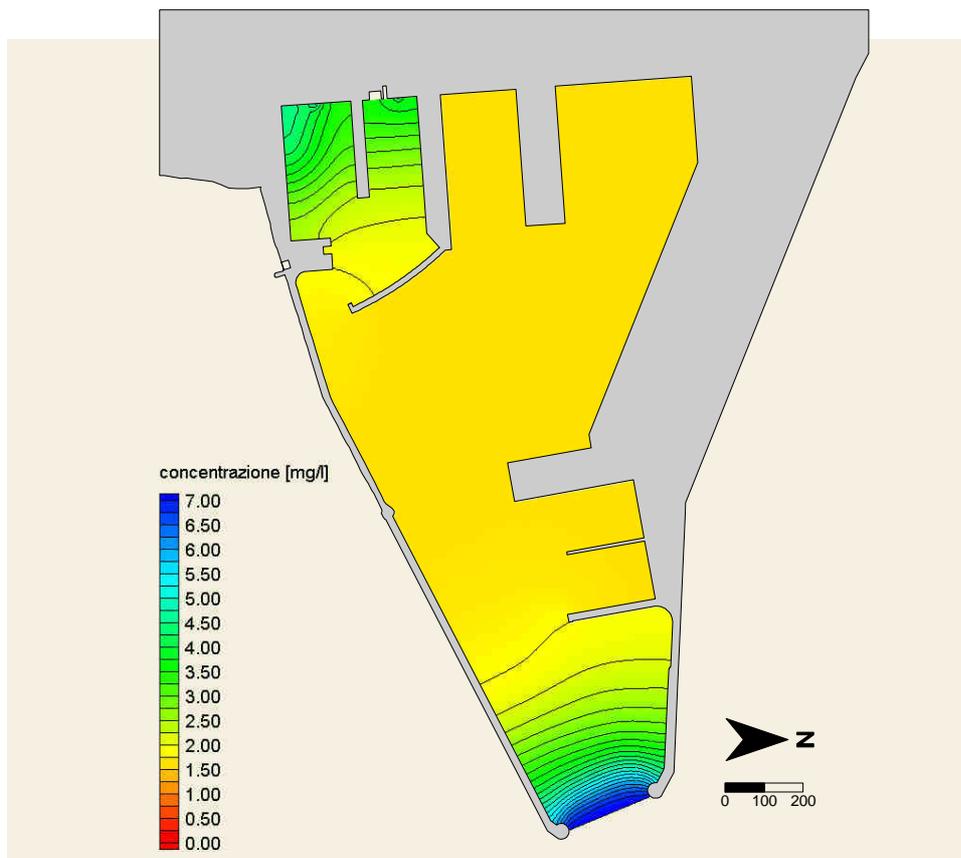


Figura 25. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua dopo 72 ore con circolazione forzata.

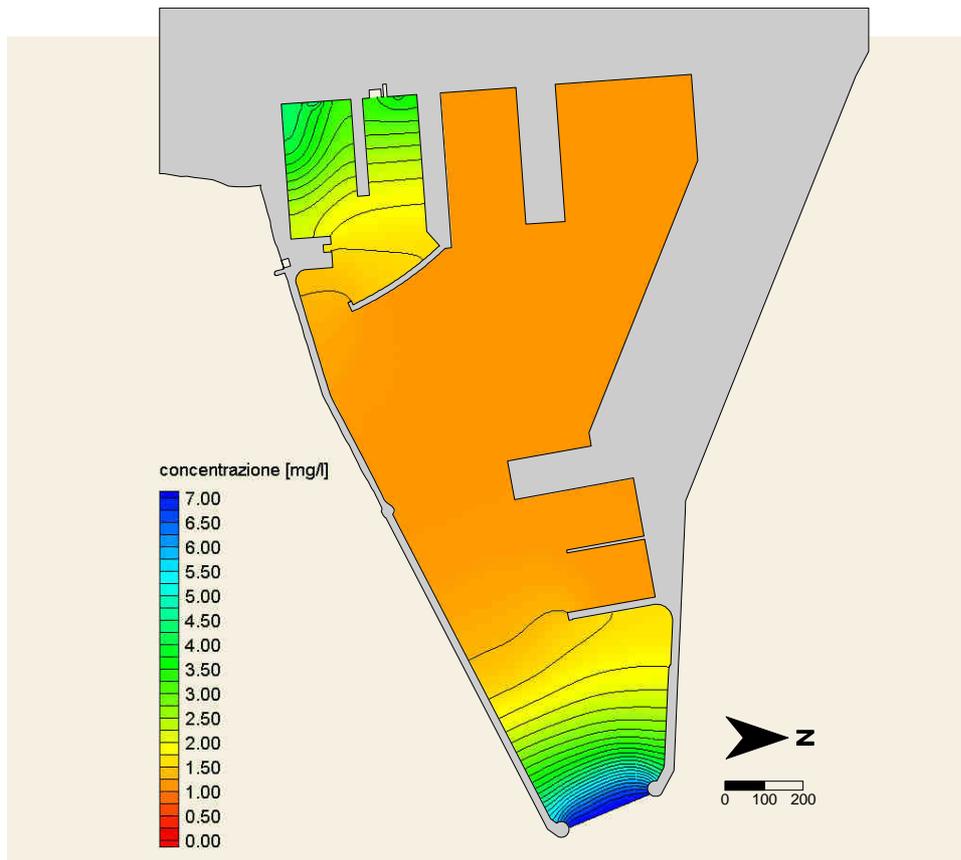


Figura 26. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua dopo 96 ore con circolazione forzata.



Figura 27. Concentrazione di O₂ disciolto in acqua dopo 120 ore con circolazione forzata.

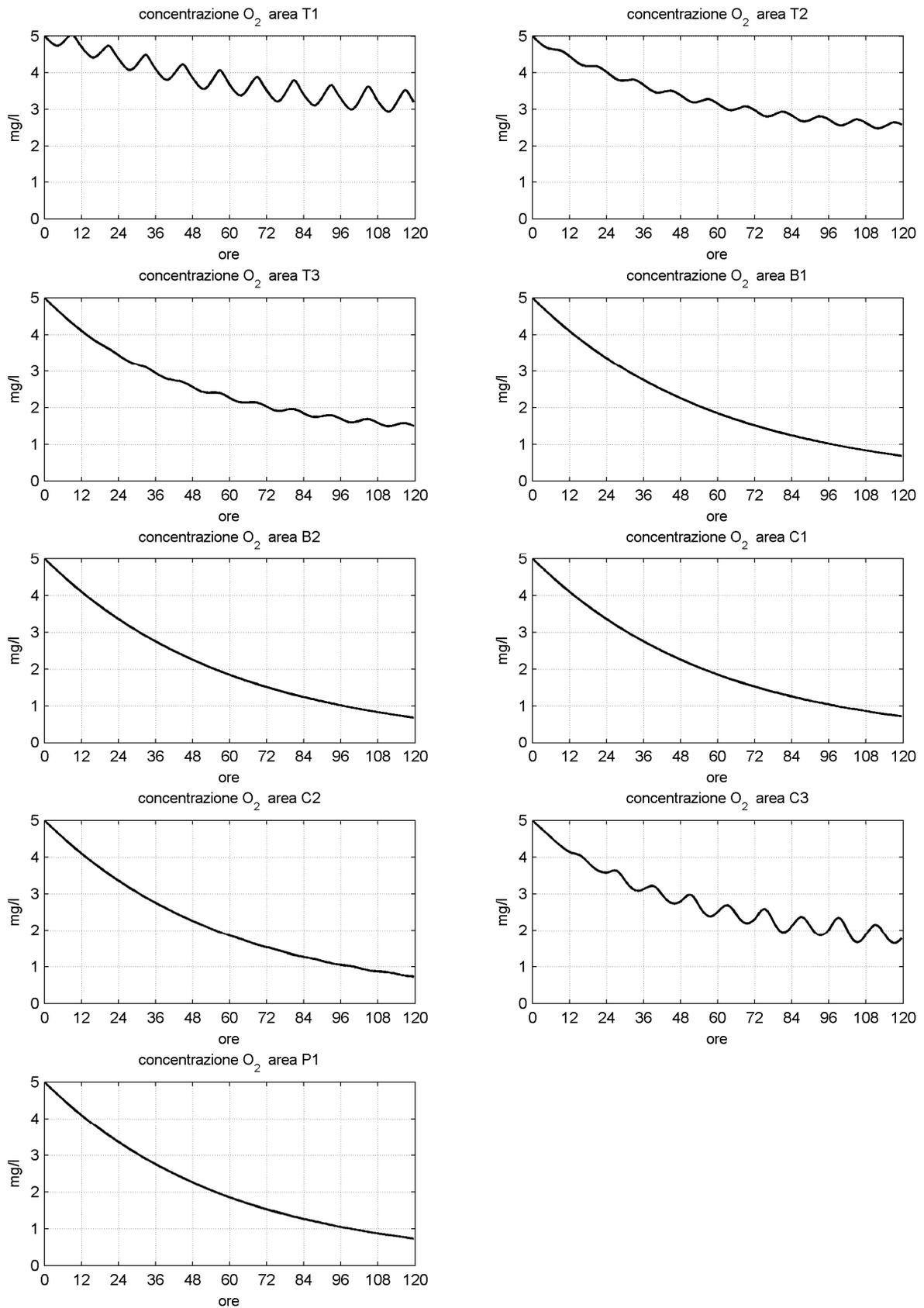


Figura 28. Evoluzione della concentrazione di O₂ disciolto ottenuta nei punti di registrazione in presenza di circolazione forzata nella darsena turistico/pescherecci.

4 Studio della diffusione di inquinanti immessi a mare incidentalmente all'interno della darsena petroli

Il modello di circolazione idrodinamica RMA-2, abbinato al modello di diffusione RMA-4, è stato applicato per valutare la dispersione di un inquinante all'interno della darsena petroli (destinata ad idrocarburi e rinfuse solide) al fine di determinare i tempi disponibili per conterminare con panne le possibili fuoruscite accidentali di prodotti dal terminal petrolifero per limitarne la diffusione all'interno del bacino portuale e verso il mare aperto.

4.1 Condizioni di calcolo

In via estremamente cautelativa è stato simulato lo scenario di un versamento accidentale di 3600 t di un inquinante riversate in un arco temporale di un ora (portata volumetrica 1 m³/s). Si tenga conto a tal riguardo che la portata delle tubazioni di carico/scarico delle navi è solitamente dell'ordine di 100÷150 l/s. Con riferimento allo schema di Figura 29 il versamento è stato localizzato in corrispondenza del punto P1, posto in prossimità del radicamento a terra del pontile di attracco per le navi petrolifere. All'interno del dominio di calcolo sono stati individuati diversi punti di registrazione per monitorare, nel tempo e nello spazio, la diffusione dell'inquinante.

4.2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono riportati, per diversi istanti temporali, dalla Figura 30 alla Figura 42 nelle pagine seguenti. In figura le diverse concentrazioni di inquinante sono indicate dalla scala cromatica rappresentativa di diversi valori di concentrazione; in particolare il limite della "macchia", indicato in rosso, corrisponde al valore di concentrazione di 5 mg/l, valore limite indicato in normativa per lo scarico in corpi idrici superficiali di idrocarburi.

In Figura 43 è riportata, per i punti indicati in Figura 29, l'andamento nel tempo della concentrazione di inquinante derivante dai risultati del modello numerico.

È importante osservare che l'asse delle ordinate è rappresentata in scala logaritmica, e che nei diagrammi è indicata con la linea rossa la concentrazione di riferimento di 5 mg/l.

Con riferimento ai diagrammi relativi ai punti P1, P2 e P3 di Figura 43, posti all'interno della darsena petroli, ed in particolare con riferimento al punto P3, posto in prossimità della sezione di chiusura della darsena stessa, si evidenzia che occorrono 2 ore prima che il fronte della macchia superi la sezione di chiusura.

La "macchia", raggiunto il canale, risente maggiormente della corrente di marea, si può osservare pertanto un avanzamento oscillatorio in cui la si espande verso

l'imboccatura portuale e verso il bacino interno a seconda delle fasi di marea (flusso/riflusso). In questo susseguirsi di correnti dal verso alterno la "macchia" si espande sino a raggiungere sia l'avamposto che il bacino interno. Nel punto C4, posti dinanzi alla darsena petroli, la concentrazione di soglia viene raggiunta dopo 6 ore.

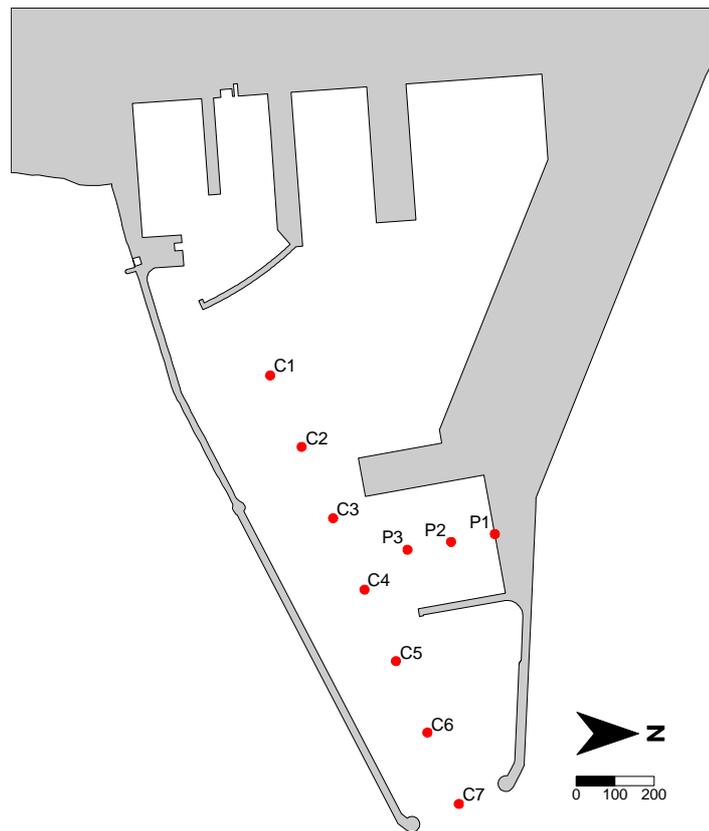


Figura 29. Localizzazione dei punti di registrazione utilizzati per studiare l'evoluzione temporale e spaziale dell'inquinante.

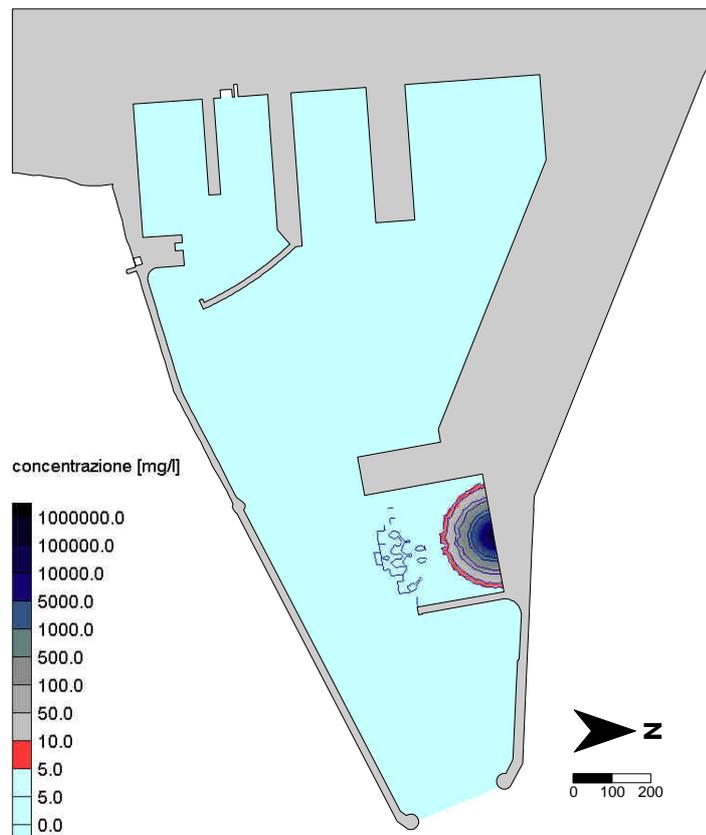
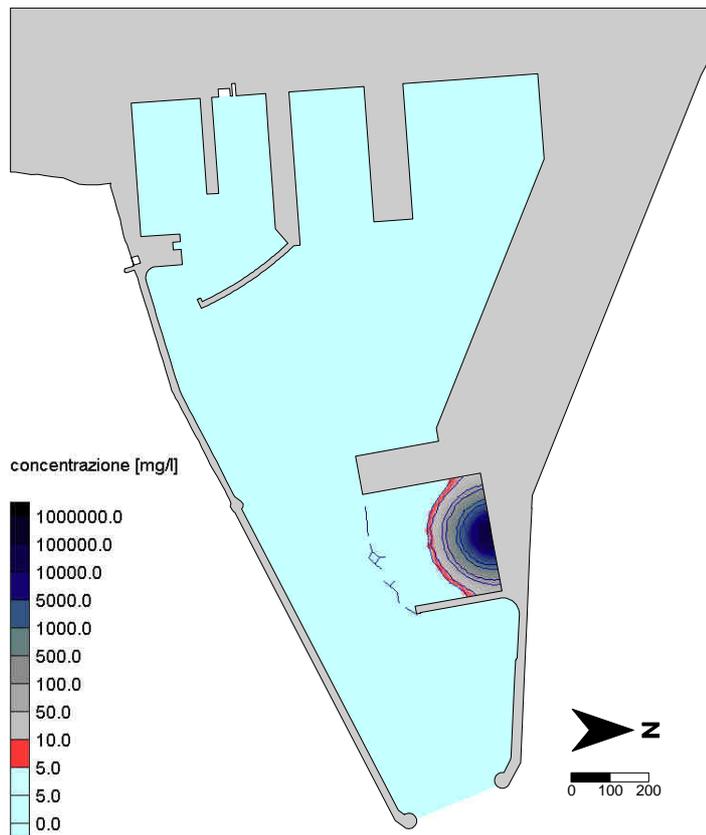
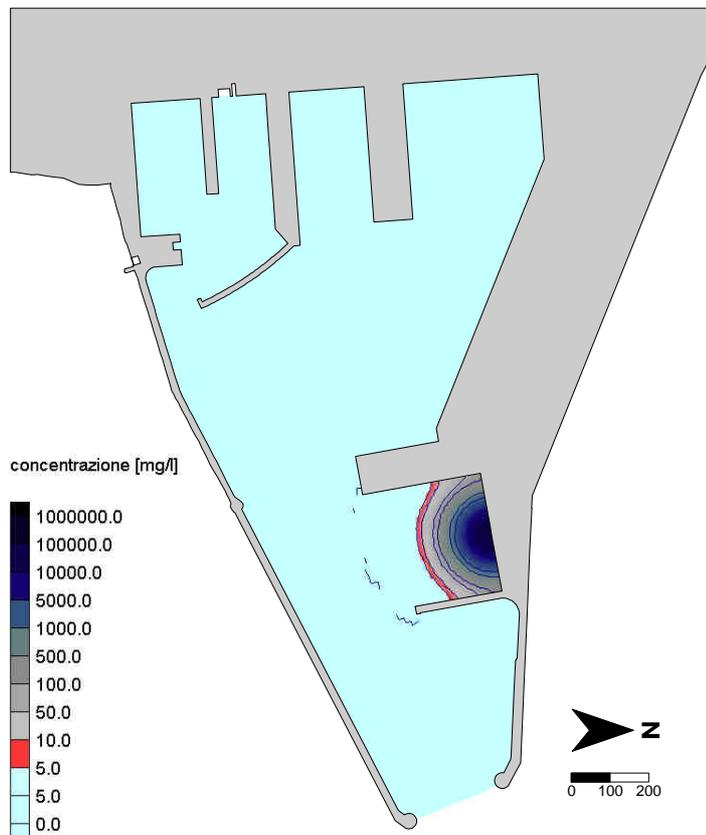


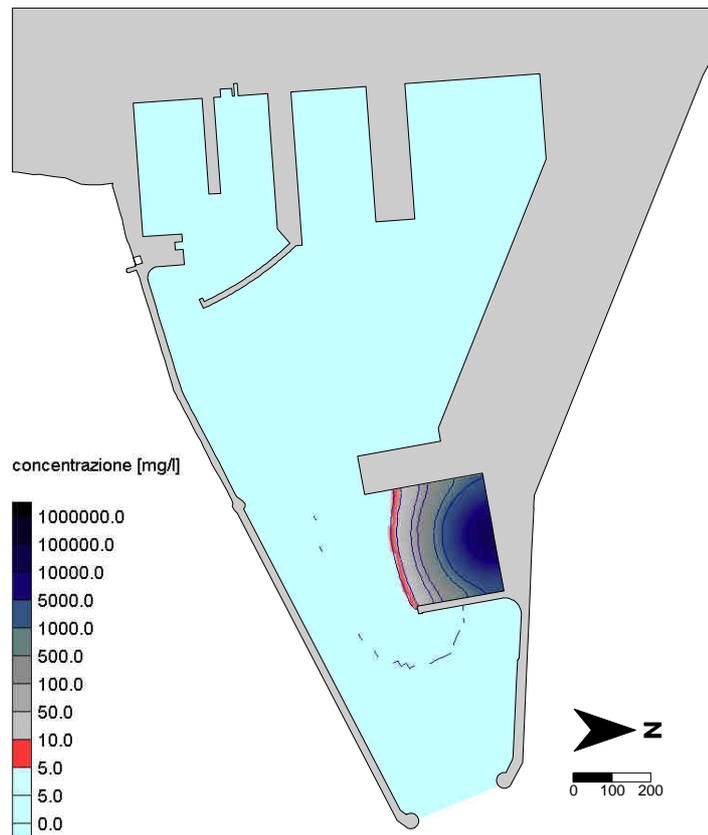
Figura 30. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli. Istante iniziale della simulazione.



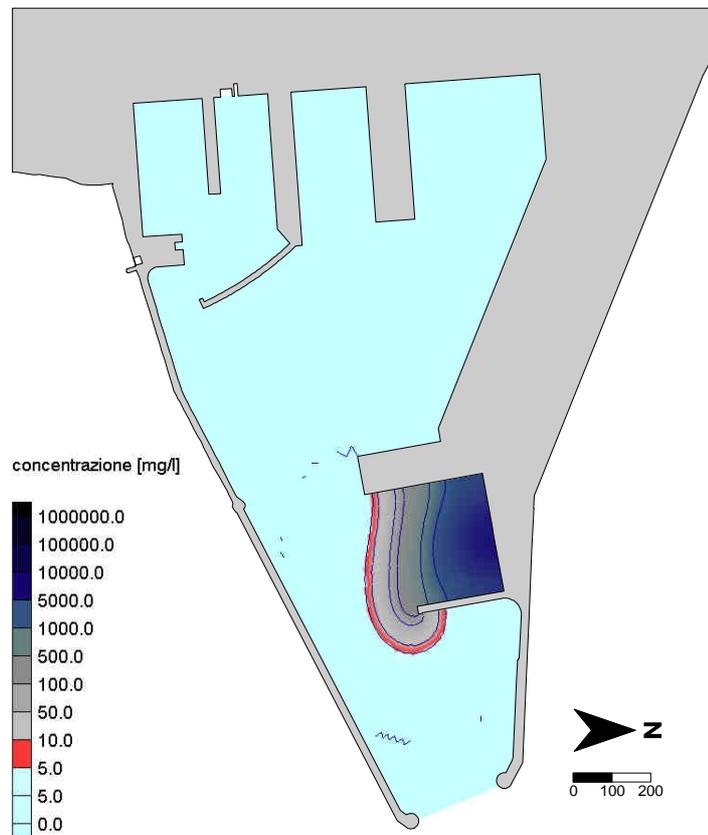
**Figura 31. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 30 minuti.**



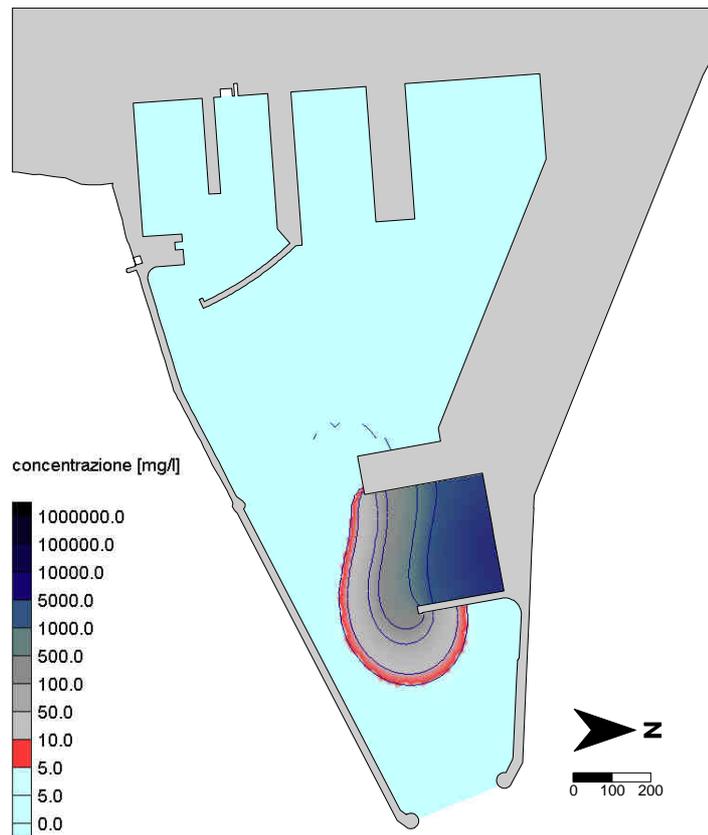
**Figura 32. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 1 ora.**



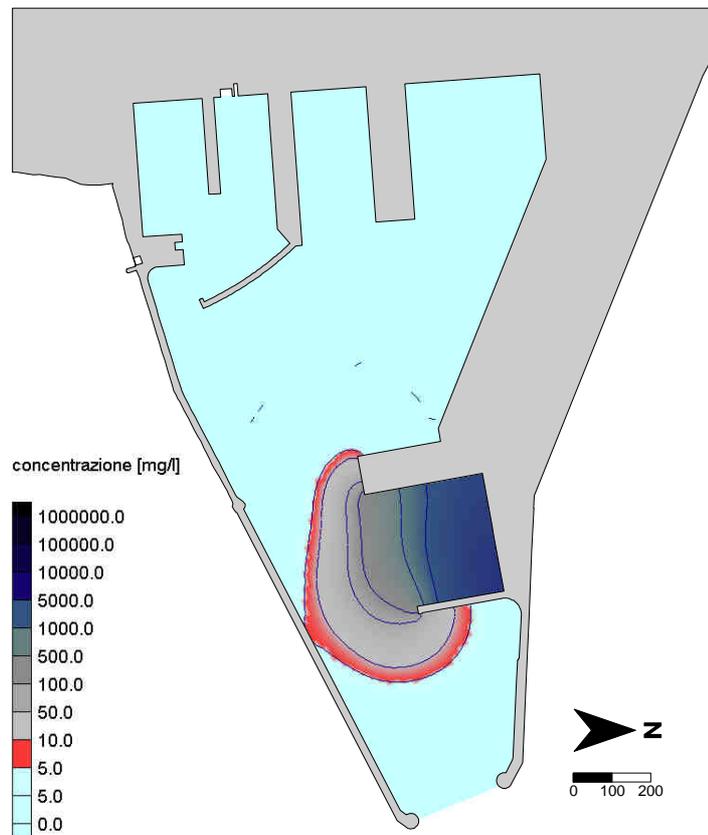
**Figura 33. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 3 ore.**



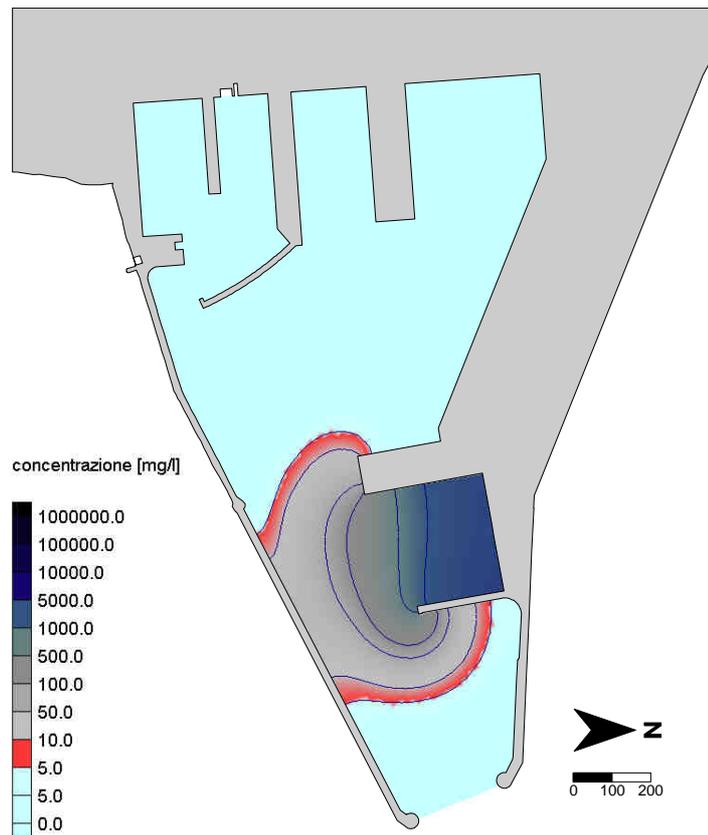
**Figura 34. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 6 ore.**



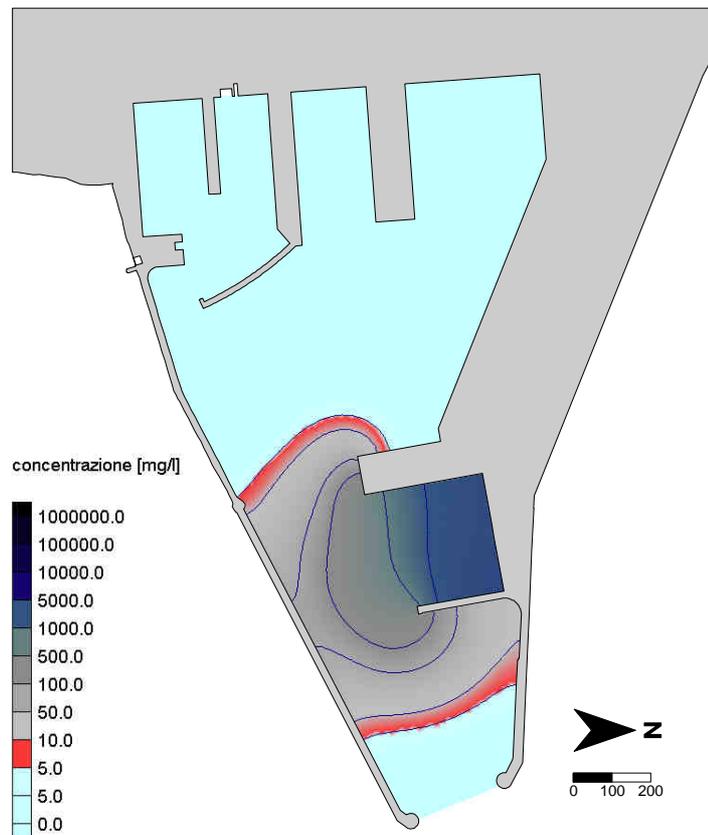
**Figura 35. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 9 ore**



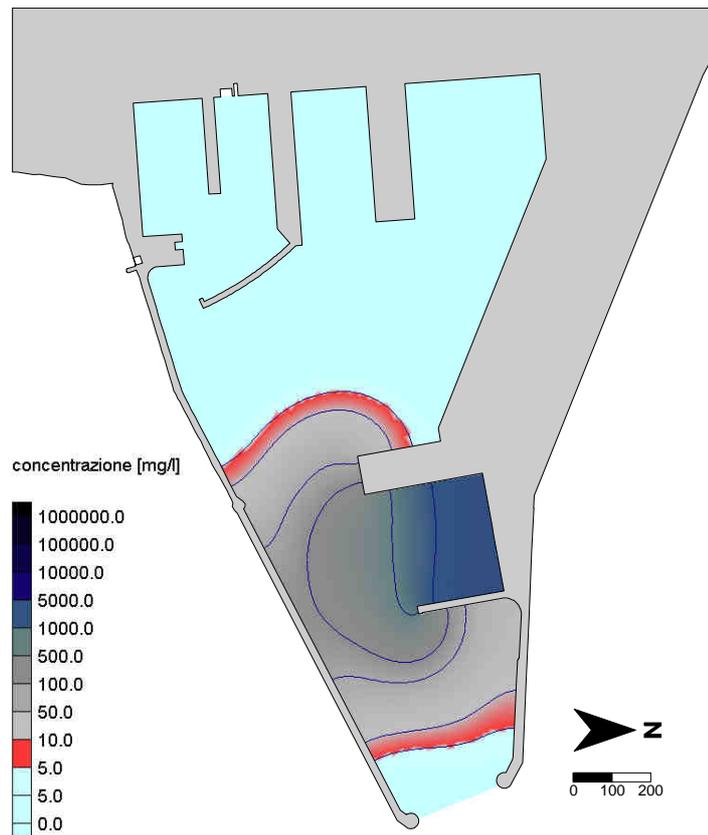
**Figura 36. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 12 ore.**



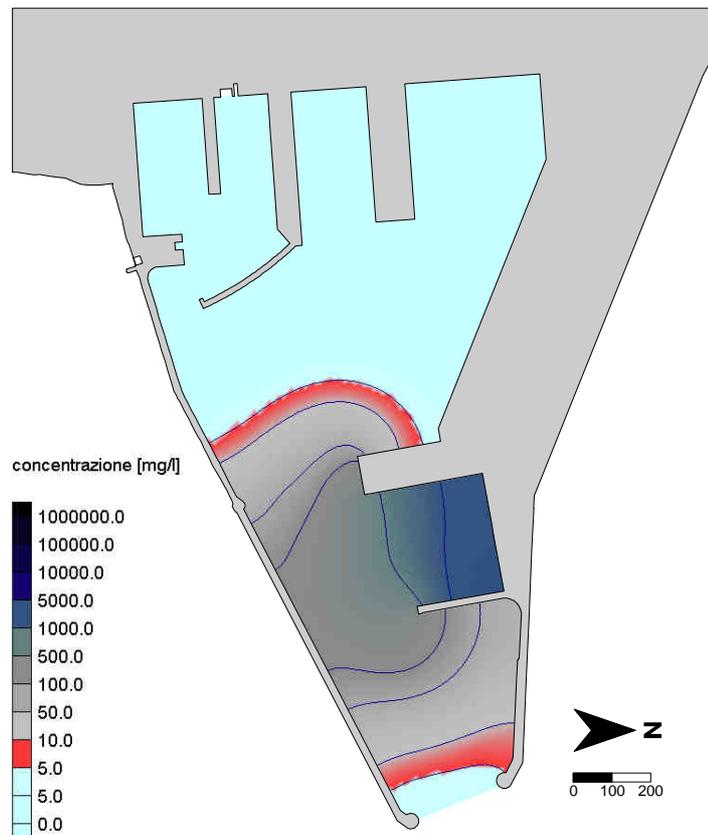
**Figura 37. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 18 ore.**



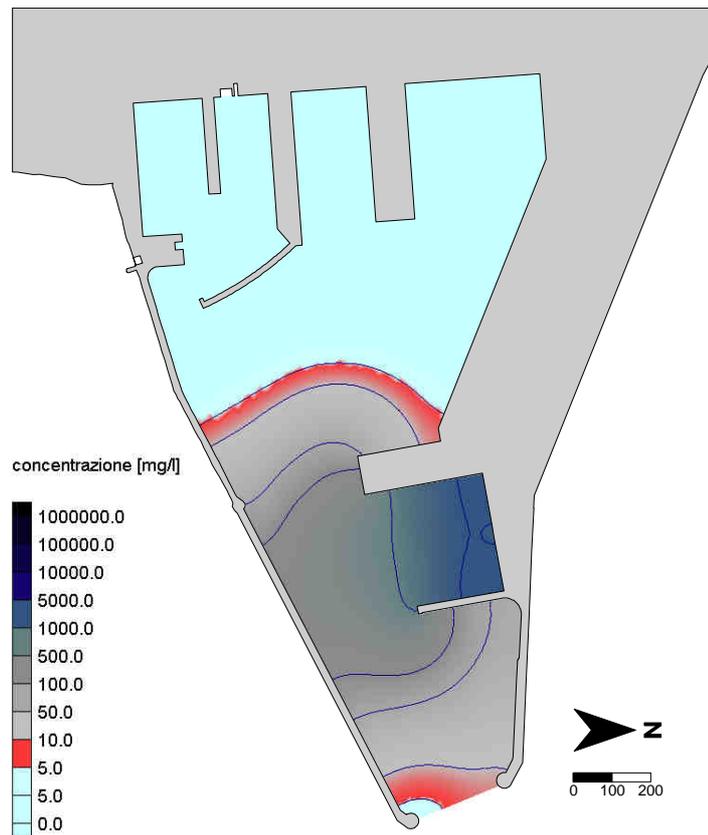
**Figura 38. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 24 ore.**



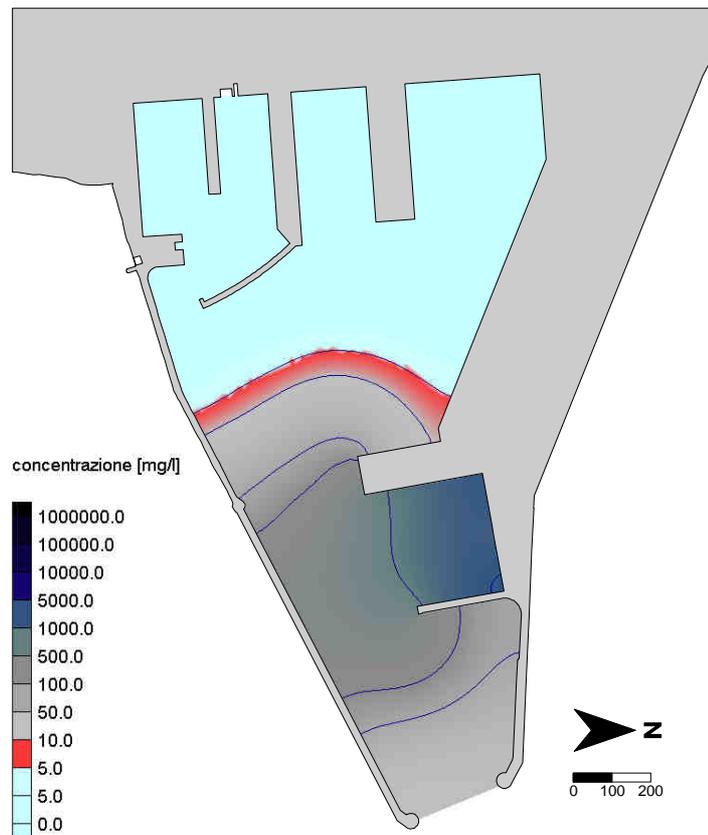
**Figura 39. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 30 ore.**



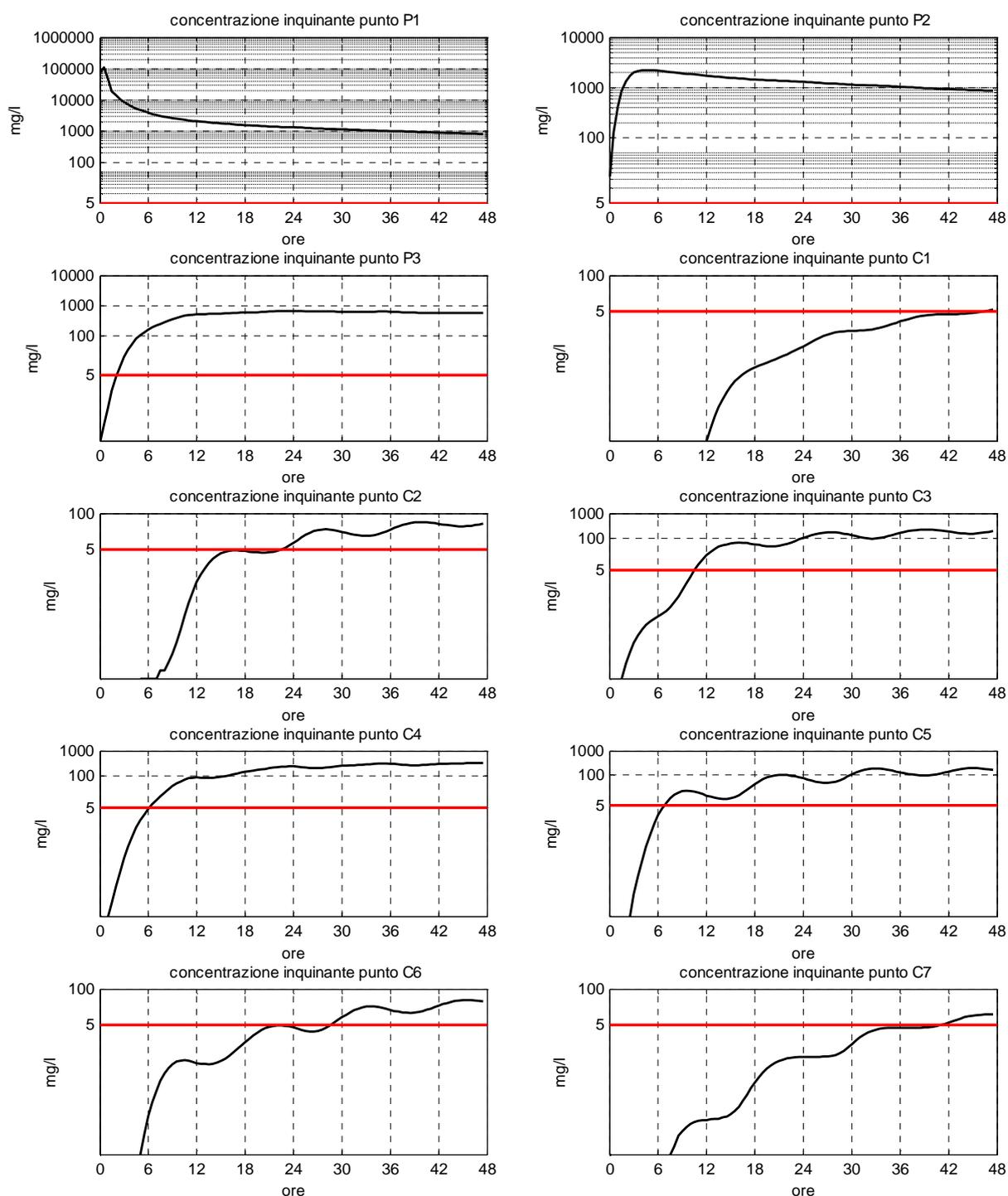
**Figura 40. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 36 ore.**



**Figura 41. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 42 ore.**



**Figura 42. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Situazione dopo 48 ore.**



**Figura 43. Studio della diffusione di un inquinante fuoriuscito nella darsena petroli.
Concentrazione dell'inquinante ottenuta nei punti di registrazione.**

Nell'avamposto (punti C5 e C6) i valori di soglia di riferimento vengono raggiunti rispettivamente dopo 6 e 21 ore. Per seguire l'espansione verso il bacino interno è possibile fare riferimento ai punti di registrazione, nel punto C3 si riscontra la presenza dell'inquinante all'incirca dopo 8 ore, mentre le zone più interne del canale (punti C2 e C1) vengono raggiunte all'incirca dopo 16 e 42 ore.

La "macchia" raggiunge l'imboccatura portuale poco dopo la 36^a ora.

4.3 Conclusioni

L'applicazione dei codici di calcolo RMA-2 e RMA-4 ha consentito di studiare l'evoluzione spazio/temporale all'interno dello specchio acqueo portuale di un versamento accidentale all'interno della darsena petroli con una portata di 1.0 m³/s per la durata di un'ora. Questo scenario simulato è estremamente cautelativo tenendo conto che la portata di scarico di una nave petroli è di circa 100÷-150 l/s e che è al più ipotizzabile che il versamento a mare derivi da una rottura accidentale di una tubazione.

I risultati ottenuti hanno mostrato che i tempi necessari per la conterminazione della "macchia" inquinante, affinché rimanga confinata all'interno della darsena petroli, sono dell'ordine di 2/3 ore.

La condizione più critica, rappresentata dal raggiungimento dell'imboccatura portuale, viene raggiunta all'incirca dopo 36 ore dopo l'avvenuta fuoriuscita dell'inquinante. I tempi ottenuti sono del tutto confrontabili con la possibilità di con terminare il versamento all'interno della stessa darsena.

Appendice A Descrizione del pacchetto applicativo SMS

Il pacchetto applicativo SMS 9.2 è provvisto di pre-post processore grafico per l'applicazione del sistema TABS, sviluppato dalla United States Army Engineering Waterways Experiment Station, per simulare numerosi problemi idrodinamici in acque basse.

I programmi contenuti nel pacchetto TABS possono essere usati per analizzare le variazioni di livello ed il campo di velocità per problemi idrodinamici in acque basse. Il TABS fornisce sia soluzioni in moto permanente che in moto vario, in altre parole la soluzione può trovarsi sia per istanti di tempo che per una serie di passi temporali.

I programmi del pacchetto TABS contengono, inoltre, un codice per la simulazione della diffusione di inquinanti, dell'erosione e del trasporto solido.

In una tipica applicazione, SMS viene utilizzato per costruire un reticolo agli elementi finiti della regione simulata e per applicare condizioni al contorno. Le informazioni che descrivono le griglie vengono quindi salvate in un file geometrico ed in uno o più file in cui sono contenute le condizioni al contorno.

Il software TABS è quindi utilizzato per eseguire analisi idrodinamiche attraverso simulazioni numeriche. Le soluzioni creano uno o più file contenenti, tra le altre cose, i livelli di superficie idrica e il campo di velocità in ciascun nodo della griglia presa in esame. Questi file soluzione possono essere introdotti nel modello SMS che consente una loro visualizzazione sotto forma di grafici vettoriali a colori, corredati se necessario dell'andamento temporale delle differenti grandezze di interesse.

Il modello SMS può essere utilizzato, anche, come un pre e post processore per altri programmi agli elementi finiti, purché questi programmi siano compatibili con i formati utilizzati. Il modello SMS è idoneo per la costruzione di griglie grandi e complesse (potendo raggiungere anche centinaia di elementi) di forma arbitraria.

L'intero pacchetto software è disponibile a livello commerciale ed è provvisto del manuale per l'utente.

I due componenti principali del sistema TABS, il codice RMA-2 per la determinazione del campo idrodinamico ed il codice RMA-4 per l'individuazione della concentrazione dell'ossigeno disciolto, vengono descritte di seguito.

Codice RMA-2

Il cuore del sistema TABS è rappresentato dal programma RMA-2 per la simulazione di moti a superficie libera. L'RMA-2 è un programma bidimensionale agli elementi finiti per la soluzione di problemi idrodinamici, che fornisce risultati mediati sulla verticale.

Originariamente, l'RMA-2 è stato sviluppato da Norton ed altri (1973) della Resource Management Associates, Inc. di Davis, in California. Diverse modifiche al codice originale sono state fatte da alcuni ricercatori della Waterway Experiment Station (Thomas e McAnally, 1991).

L'RMA-2 può essere utilizzato per calcolare i livelli di superficie idrica e il campo di velocità nei punti nodali di una griglia agli elementi finiti che rappresenta un corpo d'acqua come ad esempio un fiume, un porto o un estuario.

L'RMA-2 può fornire soluzioni sia in moto permanente che in moto vario. In altre parole, le condizioni al contorno (portata entrante, livelli di superficie idrica) variano nel tempo e la soluzione si può trovare per un determinato numero di passi temporali. Ciò rende possibile la simulazione di condizioni dinamiche per le correnti causate da portate variabili o cicli mareali. L'RMA-2 non è applicabile a problemi con correnti supercritiche.

L'output dell'RMA-2 viene registrato in un file soluzione binario. Il file può contenere la soluzione di uno o più passi temporali, in funzione del fatto che sia stata eseguita un'analisi stazionaria o transitoria. Il file soluzione può essere introdotto nel processore grafico SMS per una rappresentazione grafica dei risultati.

Le equazioni che governano il moto delle acque poco profonde, risolte dall'RMA-2, sono le seguenti:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_0}{\partial x} \right) - \frac{\varepsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_0}{\partial y} \right) - \frac{\varepsilon_{yx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{gv}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

dove

x = distanza nella direzione x (longitudinale alla direzione della corrente) [L]

u = velocità orizzontale della corrente nella direzione x [LT^{-1}]

y = distanza nella direzione y (laterale alla direzione della corrente) [L]

v = velocità orizzontale della corrente nella direzione y [LT^{-1}]

t = tempo [T]

g = accelerazione dovuta alla gravità [LT^{-2}]

h = profondità dell'acqua [L]

a_0 = quota del fondo [L]

ρ = densità del fluido [ML^{-3}]

ε_{xx} = coefficiente di scambio turbolento normale nella direzione x [$MT^{-1}L^{-1}$]

ε_{xy} = coefficiente di scambio turbolento tangenziale nella direzione x [$MT^{-1}L^{-1}$]

ε_{yx} = coefficiente di scambio turbolento tangenziale nella direzione y [$MT^{-1}L^{-1}$]

ε_{yy} = coefficiente di scambio turbolento normale nella direzione y [$MT^{-1}L^{-1}$]

C = coeff. di scabrezza di Chezy (derivato dal coefficiente di Manning n) [$L^{2/3}T^{-1}$]

Codice RMA-4

L'RMA-4 è la parte del sistema TABS utilizzata per la simulazione della diffusione dell'ossigeno disciolto e per il trasporto di inquinanti. Utilizza la soluzione idrodinamica dell'RMA-2 per definire un campo di velocità per una data griglia. Inoltre legge un insieme di condizioni specificati dall'utente come input. Tali condizioni sono specificati come valori di massa o concentrazione e da tassi di decadimento per ciascun componente. L'RMA-4 quindi simula la diffusione e/o dissipazione del costituente per un dato numero di passi temporali.

L'output dell'RMA-4 è registrato in un file soluzione binario. Il file soluzione può essere introdotto nel SMS per una rappresentazione grafica dei risultati.

L'equazione che governa la convezione-diffusione risolta dall'RMA-4 è la seguente:

$$h \left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - \sigma + kc \right) = 0$$

dove

x = distanza nella direzione x (longitudinale alla direzione della corrente) [L]

u = velocità orizzontale della corrente nella direzione x [LT^{-1}]

y = distanza nella direzione y (laterale alla direzione della corrente) [L]

v = velocità orizzontale della corrente nella direzione y [LT^{-1}]

t = tempo [T]

c = concentrazione del costituente [ML^{-3}]

D_x = coefficiente di diffusione turbolento nella direzione x [L^2T^{-1}]

D_y = coefficiente di diffusione turbolento nella direzione y [L^2T^{-1}]

σ = sorgente o uscita locale del costituente [$MT^{-1}L^{-2}$]

k = tasso di decadimento del costituente [T^{-1}]

Processo di Simulazione

In un tipico problema di simulazione con il software TABS, la sequenza di operazioni per effettuare le simulazioni vengono eseguite secondo una specifica sequenza. Ciascuno di questi passi viene brevemente descritto di seguito.

Costruzione della griglia

Anzitutto deve essere costruita una griglia agli elementi finiti che descriva la batimetria (geometria della superficie del fondo) del corpo d'acqua che deve essere simulato. I dati geometrici nella forma di coordinate xyz vengono inseriti nel SMS ed usati come base per la costruzione di una griglia agli elementi finiti.

Nei casi in cui è disponibile una carta delle isobate, i punti possono essere digitalizzati dalle linee isobate e introdotti nel SMS per la costruzione della griglia. Se non si dispone di una batimetria possono essere utilizzati rilievi o misure di indagini dirette.

Il software SMS è provvisto di numerosi strumenti per la generazione di una griglia e per l'editing interattivo. Questi strumenti sono descritti più dettagliatamente nel tutorial e nel manuale di riferimento. La geometria della griglia viene salvata dal SMS in un file di testo di tipo ASCII.

Condizioni al contorno

Una volta costruita la griglia l'utente assegna le condizioni al contorno alla griglia. Le condizioni al contorno vengono usualmente introdotte come una portata entrante ad una estremità della griglia e come una prevalenza o un livello di superficie idrica all'estremità opposta della griglia. L'utente deve anche introdurre il coefficiente di Manning n ed i coefficienti di scambio turbolento per differenti regioni della griglia. Tutti questi parametri possono essere introdotti interattivamente utilizzando il software SMS. Le condizioni al contorno vengono salvate dal SMS in un file di testo ASCII distinto dal file geometrico, ma comprendente le indicazioni in esso contenute.

GFGEN

Una volta costruita la griglia, viene eseguito il programma GFGEN prima di effettuare le simulazioni con l'RMA-2. Il GFGEN è un pre processore geometrico propedeutico per l'RMA-2. Il GFGEN legge il file di testo ASCII che descrive la geometria e lo valida e quindi lo trasforma in un equivalente file binario.

RMA-2

Il passo successivo nel processo di simulazione è quello di effettuare le simulazioni con il programma RMA-2. L'RMA-2 legge il file di testo ASCII con l'indicazione delle condizioni al contorno e il file geometrico binario preparato precedentemente dal programma GFGEN. A questo punto il programma RMA-2 calcola la soluzione idrodinamica nei differenti punti della griglia considerata e genera un file soluzione binario da introdurre nel processore grafico del SMS.

Post-processing con il SMS

Dopo aver effettuato le simulazioni con il programma RMA-2, i risultati devono essere osservati con il processore grafico SMS. Il software SMS consente di visualizzare i diagrammi vettoriali della velocità e grafici a colori sia della velocità che del livello idrico superficiale. Per le soluzioni transitorie si può generare l'andamento temporale per i nodi selezionati e le sequenze di animazione. Prima di visualizzare la soluzione idrodinamica, l'utente deve verificare che i risultati siano congruenti con la realtà fisica. Se necessario deve essere ridefinita in dettaglio la griglia oppure devono essere modificati i coefficienti di input e successivamente deve essere effettuata una nuova soluzione.

Validazione

In molti casi, l'RMA-2 viene utilizzato per simulare l'effetto di una nuova struttura sull'idrodinamica di un corpo d'acqua. In genere in tali casi si segue l'intero processo sopra descritto con una griglia che rappresenta il corpo d'acqua nello stato attuale. Una volta che il modello è stato tarato (confrontandolo con misure o indagini disponibili), il SMS può essere utilizzato per modificare la griglia in modo tale che

essa rappresenti le condizioni successive alla realizzazione della struttura presa in esame. L'RMA-2 viene quindi utilizzato ancora una volta per simulare l'effetto della nuova struttura sull'idrodinamica, in modo da verificare le modifiche indotte sul campo idrodinamico.

RMA-4

Viene utilizzato quando si esegue uno studio del trasporto di un inquinante o la diffusione dell'ossigeno disciolto con l'RMA-4. E' necessario preliminarmente determinare la soluzione idrodinamica usando l'RMA-2 come sopra descritto. L'insieme delle velocità di corrente che risulta da questa analisi viene utilizzato insieme con quello delle fonti puntuali d'inquinamento per simulare il trasporto di inquinanti con l'RMA-4.