

# **Progetto FSRU Alto Tirreno e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti**

## **STUDIO MODELLISTICO DI DISPERSIONE TERMICA/CHIMICA AL LARGO DEL TERMINAL PORTUALE DI VADO LIGURE (SV)**

Prof. Ing. Giovanni Besio  
Dr. Ing. Francesco De Leo  
Dr. Ing. Mohammad Daliri

Genova, 6 giugno 2023



## SOMMARIO

<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	5
<b>1.1. PREMESSA</b> .....	5
<b>1.2. SOLUZIONE PROPOSTA</b> .....	5
<b>1.3. STRUTTURA DEL DOCUMENTO</b> .....	6
<b>2. INQUADRAMENTO GENERALE DELLO STUDIO</b> .....	7
<b>3. MODELLAZIONE NUMERICA DELL'IDRODINAMICA E DELLA DISPERSIONE</b> .....	9
<b>4. CARATTERIZZAZIONE DELLE FORZANTI AMBIENTALI NELL'AREA DI STUDIO</b> .....	12
<b>5. CONFIGURAZIONE PROGETTUALE CONSIDERATA</b> .....	18
<b>6. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI</b> .....	19

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Punto di ormeggio lungo la costa ligure a diversi gradi di ingrandimento. ....	7
Figura 2. Griglia computazionale implementata per il caso studio. ....	10
Figura 3. Inciso della griglia computazionale in corrispondenza della FSRU. In figura sono mostrati i punti di presa (intake) e scarico (outfall) considerati. ....	10
Figura 4. Batimetria (ovvero, quota del fondale) nell'area di studio. ....	11
Figura 5. Punto hindcast utilizzato per la definizione delle forzanti meteo-marine. ....	13
Figura 6. Condizioni d'onda associate allo scenario 2. ....	15
Figura 7. Condizioni d'onda associate allo scenario 8. ....	15
Figura 8. Condizioni d'onda associate allo scenario 33. ....	16
Figura 9. Condizioni d'onda associate allo scenario 58. ....	16
Figura 10. Condizioni d'onda associate allo scenario 68. ....	17
Figura 11. Punti di controllo selezionati per l'estrazione delle curve di temperatura e concentrazione di cloro. ....	19
Figura 12. Concentrazione di cloro nello strato superficiale. Scenario 2. Le frecce nere indicano la direzione delle correnti indotte (lo stesso nelle figure da Figura 13 a Figura 31). ....	21
Figura 13. Temperatura dell'acqua nello strato superficiale. Scenario 2. ....	21
Figura 14. Concentrazione di cloro nello strato superficiale. Scenario 8. ....	22
Figura 15. Temperatura dell'acqua nello strato superficiale. Scenario 8. ....	22
Figura 16. Concentrazione di cloro nello strato superficiale. Scenario 33. ....	23
Figura 17. Temperatura dell'acqua nello strato superficiale. Scenario 33. ....	23
Figura 18. Concentrazione di cloro nello strato superficiale. Scenario 58. ....	24
Figura 19. Temperatura dell'acqua nello strato superficiale. Scenario 58. ....	24
Figura 20. Concentrazione di cloro nello strato superficiale. Scenario 68. ....	25

Figura 21. Temperatura dell'acqua nello strato superficiale. Scenario 68.....	25
Figura 22. Concentrazione di cloro al fondo. Scenario 2. In figura è mostrata l'area di coralligeno (lo stesso nelle figure da Figura 23 a Figura 31). .....	26
Figura 23. Temperatura dell'acqua al fondo. Scenario 2. ....	26
Figura 24. Concentrazione di cloro al fondo. Scenario 8. ....	27
Figura 25. Temperatura dell'acqua al fondo. Scenario 8. ....	27
Figura 26. Concentrazione di cloro al fondo. Scenario 33. ....	28
Figura 27. Temperatura dell'acqua al fondo. Scenario 33. ....	28
Figura 28. Concentrazione di cloro al fondo. Scenario 58. ....	29
Figura 29. Temperatura dell'acqua al fondo. Scenario 58. ....	29
Figura 30. Concentrazione di cloro al fondo. Scenario 68. ....	30
Figura 31. Temperatura dell'acqua al fondo. Scenario 68. ....	30
Figura 32. Concentrazione di cloro nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 2. Risultati al fondo (lo stesso vale per le figure successive). ..	31
Figura 33. Temperatura dell'acqua nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 2. ....	31
Figura 34. Concentrazione di cloro nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 8. ....	32
Figura 35. Temperatura dell'acqua nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 8. ....	32
Figura 36. Concentrazione di cloro nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 33. ....	33
Figura 37. Temperatura dell'acqua nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 33. ....	33
Figura 38. Concentrazione di cloro nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 58. ....	34
Figura 39. Temperatura dell'acqua nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 58. ....	34
Figura 40. Concentrazione di cloro nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 68. ....	35
Figura 41. Temperatura dell'acqua nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 68. ....	35
Figura 42. Concentrazione di cloro nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 2. ....	36
Figura 43. Temperatura dell'acqua nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 2. ....	36
Figura 44. Concentrazione di cloro nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 8. ....	37
Figura 45. Temperatura dell'acqua nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 8. ....	37



Figura 46. Concentrazione di cloro nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 33.....	38
Figura 47. Temperatura dell'acqua nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 33.....	38
Figura 48. Concentrazione di cloro nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 58.....	39
Figura 49. Temperatura dell'acqua nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 58.....	39
Figura 50. Concentrazione di cloro nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 68.....	40
Figura 51. Temperatura dell'acqua nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 68.....	40



### INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Coordinate del punto di ormeggio della FSRU espresse in due diversi sistemi di riferimento (SR).....	7
Tabella 2. Coordinate del nodo hindcast utilizzato nel prosieguo del report (SR: WGS84).....	13
Tabella 3. Condizioni di operatività considerate nel modello numerico.....	18



## 1. INTRODUZIONE

### 1.1. PREMESSA

Nell'ambito delle iniziative legate alla realizzazione di nuove capacità di rigassificazione regolate dall'art. 5 del DL n.50 del 17/5/2022 e mirate a diversificare le fonti di approvvigionamento di gas ai fini della sicurezza energetica nazionale, Snam FSRU Italia, società controllata al 100% da Snam S.p.A ("Snam"), ha ottenuto in data 25/10/2022 l'autorizzazione unica per la realizzazione di un Terminale di Rigassificazione nel porto di Piombino, tramite l'ormeggio di un mezzo navale tipo FSRU (Floating Storage and Regasification Unit) e la realizzazione delle connesse infrastrutture per l'allacciamento alla rete di trasporto esistente (di seguito l'"Autorizzazione Unica").

L'Autorizzazione Unica, al punto 10, ha prescritto di presentare, entro 45 giorni dalla pubblicazione della Ordinanza medesima sul Bollettino Regionale della Toscana, il progetto integrativo di ricollocazione della FSRU in sito off-shore, nonché il progetto relativo agli interventi necessari per la dismissione della FSRU stessa dal porto di Piombino decorso il suddetto termine di tre anni. Con successive Ordinanze di proroga, il predetto termine è stato fissato al 26 giugno 2023.

Il Progetto FSRU Alto Tirreno, di cui il presente documento è parte integrante insieme ai suoi allegati, illustra la soluzione sviluppata dagli ingegneri e specialisti incaricati da Snam per il ricollocazione della FSRU TUNDRA per i successivi 22 anni una volta lasciato il porto di Piombino. In particolare, gli allegati tecnici riportano le principali caratteristiche del Progetto, analizzano gli aspetti ambientali, paesaggistici ed urbanistici e riportano le valutazioni relative ai temi Seveso ed antincendio.

### 1.2. SOLUZIONE PROPOSTA

L'analisi ha escluso la possibilità di trovare un ormeggio a lungo termine della FSRU all'interno di un porto diverso da quello di Piombino, non rinvenendosi in nessun altro porto le seguenti caratteristiche peculiari di Piombino, quali: (i) una banchina idonea per geometria e capacità strutturali, (ii) un pescaggio del porto ovunque maggiore di 15 m, (iii) un punto di ingresso nella Rete nazionale Gasdotti ad una distanza ragionevole ed in grado di ricevere l'incremento di portata previsto (i.e., 5 miliardi di metri cubi/anno).

La ricerca della soluzione si è indirizzata verso possibili siti offshore verificando la sussistenza di tre requisiti essenziali: (i) il collegamento in un punto della Rete Nazionale in grado di ricevere la portata prevista, (ii) la fattibilità tecnica, urbanistica ed ambientale del tracciato della condotta a mare ed a terra, (iii) la capacità della FSRU di svolgere con continuità il servizio di rigassificazione rispetto alle condizioni meteomarine attese nel sito prescelto.

I requisiti sopra richiamati hanno portato a selezionare un sito offshore a circa 2 miglia nautiche (circa 4 km) dalla costa ligure di ponente di fronte a Vado Ligure (SV)



potendo evitare sia le rotte di ingresso/uscita del traffico navale che sfruttare l'approdo a terra in corrispondenza dell'area industriale di Tirreno Power.

### 1.3. STRUTTURA DEL DOCUMENTO

6

In fase di predisposizione degli studi ambientali, il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università degli Studi di Genova è stato incaricato di implementare un modello matematico per valutare la dispersione del contenuto termico e chimico delle acque di scarico dell'impianto a servizio della FSRU in ambiente marino. Tale studio si rende necessario al fine di valutare i possibili effetti dovuti al rilascio di acqua di mare con differenti caratteristiche in termini di temperatura e contenuto di cloro rispetto a quella prelevata nella zona di ormeggio, per fornire elementi di valutazione dei potenziali impatti sull'ambiente circostante.

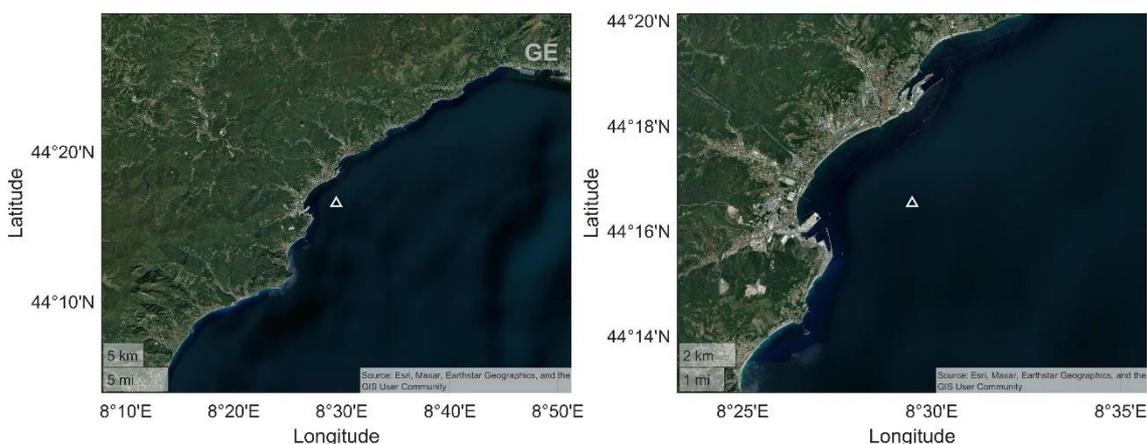
Il presente documento illustra le analisi effettuate e ne riporta i principali risultati, essendo strutturato come segue:

- il Paragrafo 2 presenta l'area di studio;
- il Paragrafo 3 introduce il modello numerico utilizzato per il calcolo dell'idrodinamica e della conseguente dispersione dei residui (cloro e temperatura);
- i dati meteo-marini utilizzati per forzare il modello sono mostrati nel Paragrafo 4;
- il Paragrafo 5 riassume i settaggi principali del modello numerico idrodinamico;
- il Paragrafo 6 mostra infine le risultanze dello studio.

## 2. INQUADRAMENTO GENERALE DELLO STUDIO

L'ubicazione ipotizzata per il ricollocamento a lungo termine della FSRU interessa un sito al largo della costa ligure di ponente, al largo del porto di Vado Ligure (SV). Il punto di ormeggio, sito nella cosiddetta "zona Charlie", è mostrato nella figura sottostante; Tabella 1 ne riporta le relative coordinate.

7



*Figura 1. Punto di ormeggio lungo la costa ligure a diversi gradi di ingrandimento.*

*Tabella 1. Coordinate del punto di ormeggio della FSRU espresse in due diversi sistemi di riferimento (SR).*

	<b>LON</b>	<b>LAT</b>
<b>WGS 84</b>	8,4933	44,2751
<b>UTM 32</b>	459563	4902551

Nel suddetto punto di ormeggio verrà collocata la FSRU Golar TUNDRA, che sarà rifornita ad intervalli regolari (5/7 giorni) da metaniere di taglia variabile e sarà anche in grado di rifornire a sua volta metaniere di piccola/media taglia (metaniere Small Scale LNG). L'FSRU assicurerà un flusso annuo di almeno 5 miliardi di standard metri cubi di gas naturale.

Il sistema di rigassificazione installato a bordo della FSRU utilizzerà l'acqua di mare come fonte di calore per la vaporizzazione del gas naturale liquido (GNL), scaricando l'acqua utilizzata ad una temperatura inferiore rispetto a quella di prelievo. Inoltre, per prevenire la crescita di organismi marini nel sistema, è prevista l'iniezione di ipoclorito. La presente relazione quantifica come si disperdano il gradiente di



**Università  
di Genova**

**DICCA** DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA  
E AMBIENTALE

temperatura e la concentrazione di cloro nell'ambiente circostante in funzione di diverse condizioni ambientali.



---

**Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale**

[dicca.unige.it](http://dicca.unige.it)

P. IVA 00754150100

+39 010 3352491

Via Montallegro 1, 16145 Genova

[direttore@dicca.unige.it](mailto:direttore@dicca.unige.it)

### 3. MODELLAZIONE NUMERICA DELL'IDRODINAMICA E DELLA DISPERSIONE

Per la simulazione dell'idrodinamica e per lo studio dell'evoluzione spazio/temporale della temperatura e della concentrazione di cloro nell'area di studio è stato impiegato il modello numerico Delft3D, sviluppato e mantenuto da Deltares (precedentemente Delft Hydraulics; <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>)<sup>1</sup>. Tale modello numerico 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 per risolvere mutuamente le rispettive dinamiche.

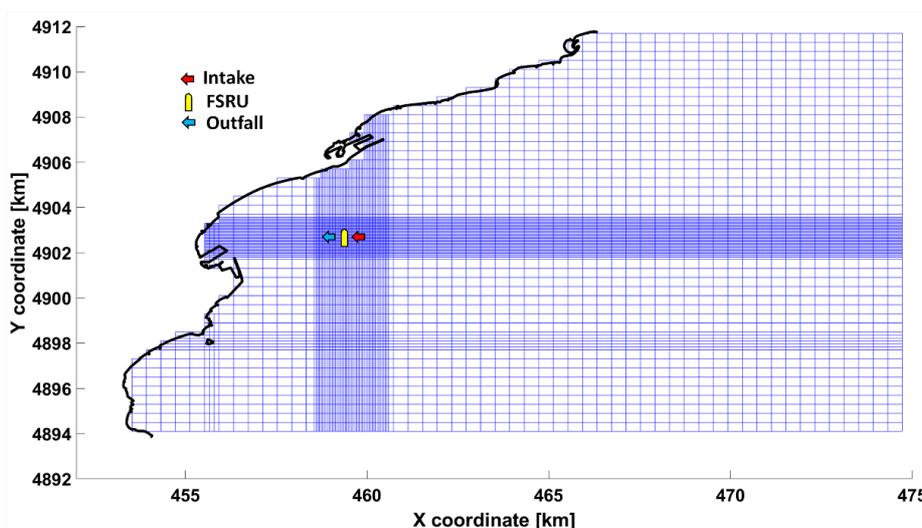
Delft3D-FLOW è un modulo che risolve l'idrodinamica ed il trasporto, prendendo in considerazione una vasta gamma di forzanti quali eventi meteorologici, maree, scarichi antropici, etc. Le equazioni di governo del modulo sono quelle, ben note, di continuità e di conservazione della quantità di moto lungo le due direzioni orizzontali (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations* o RANS). Le suddette equazioni sono risolte dal modello con approssimazione idrostatica tramite schemi numerici alle differenze finite, i quali richiedono la definizione di una griglia computazionale che può essere cartesiana rettangolare oppure curvilinea. Nel presente studio è stata impiegata una maglia cartesiana a risoluzione variabile, con infittimento progressivo in prossimità della FSRU per permettere un maggior grado di dettaglio in prossimità dello scarico.

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://emodnet.ec.europa.eu/en/bathymetry>), combinati con i dati dell'Istituto Idrografico della Marina Militare. Figura 2 mostra l'estensione dell'intero dominio computazionale del modello, mentre un inciso sulla maglia di calcolo in prossimità della FSRU (risoluzione 40 m) è mostrato in Figura 3. È bene precisare come, sebbene la nave possa ruotare, le dimensioni della stessa non sono tali da comportare differenze tangibili nei pattern di dispersione; pertanto, si è considerata un'unica configurazione dei punti di carico e scarico della FSRU (ovvero, quella mostrata in Figura 3). Infine, la batimetria interpolata sul dominio computazionale è mostrata in Figura 4.

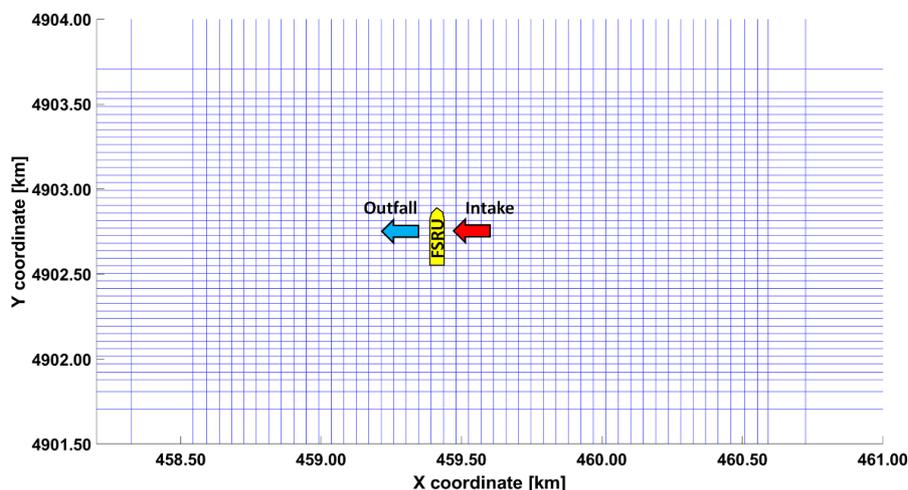
Per poter provvedere alla soluzione numerica del problema è inoltre necessario definire alcune condizioni di chiusura e al contorno, di modo che il modello abbia tutte le informazioni necessarie per poter evolvere nel tempo e nello spazio e per ricavare la soluzione del campo di moto. In particolare,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

<sup>1</sup> Deltares, D. (2013). Delft3D-FLOW user manual. Deltares Delft, The Netherlands, 330.

contorno, il modello può essere forzato sulla superficie libera da un vento e una pressione atmosferica variabili nel tempo e nello spazio, e sui bordi da forzanti d'onda o variazioni di livello legate alle escursioni mareali. La condizione al contorno al fondo viene fornita in funzione della tensione che dipende da un parametro di scabrezza tipico, impostato dall'utente. Le relazioni che legano le tensioni al fondo e sulla superficie libera con le derivate della velocità sono quelle classiche relative all'imposizione di una velocità di attrito a un determinato livello di riferimento.



*Figura 2. Griglia computazionale implementata per il caso studio.*



*Figura 3. Inciso della griglia computazionale in corrispondenza della FSRU. In figura sono mostrati i punti di presa (intake) e scarico (outfall) considerati.*

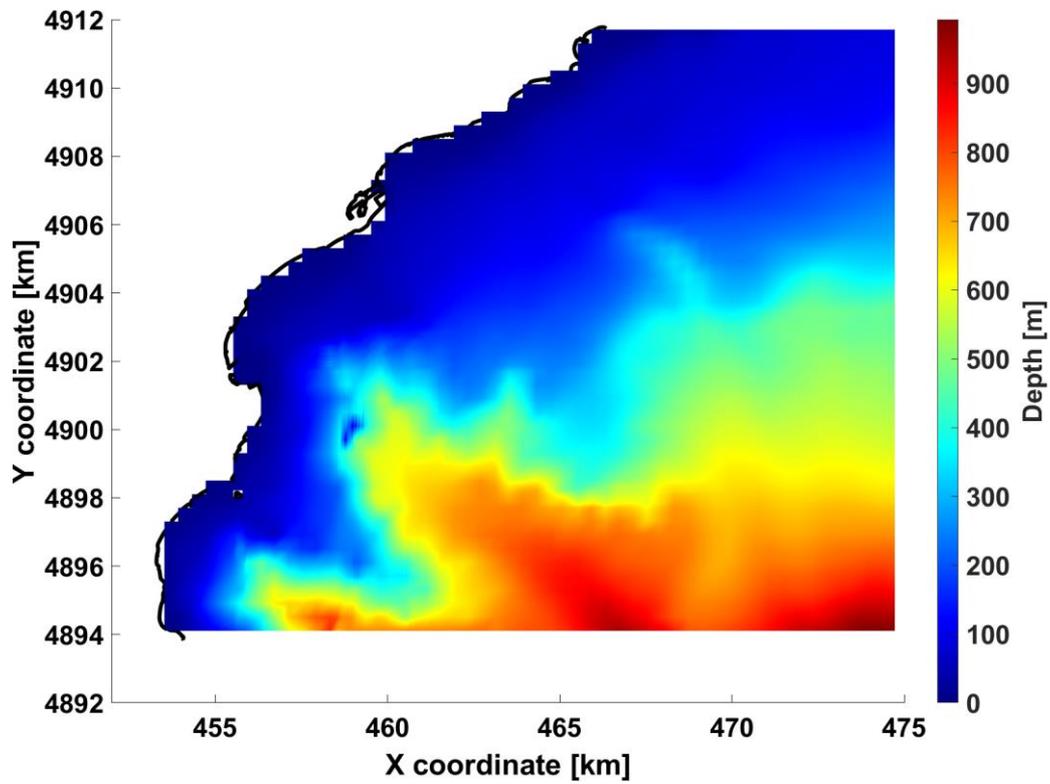


Figura 4. Batimetria (ovvero, quota del fondale) nell'area di studio.



#### 4. CARATTERIZZAZIONE DELLE FORZANTI AMBIENTALI NELL'AREA DI STUDIO

L'analisi dei processi fisici relativi alla circolazione costiera e ai processi di dispersione in nell'area litoranea assume particolare rilievo da un punto di vista applicativo. La necessità di avere a disposizione degli strumenti di analisi e predizione di tale tipo di processi è sentita non solo in ambito di pianificazione e programmazione delle attività umane nella fascia costiera (i.e. controllo della dispersione dei dragaggi, progettazione degli emissari degli impianti di depurazione) ma anche in ambito di gestione delle emergenze e della qualità delle acque (i.e. sversamenti e dispersione di inquinanti sia lato terra che lato mare, incidenti in mare ed operazioni di *search&rescue*).

In quest'ottica, negli ultimi anni, soprattutto grazie alla crescita esponenziale della potenza di calcolo dei moderni computer, è stato fatto affidamento all'utilizzo di programmi di calcolo in grado di realizzare simulazioni numeriche dell'idrodinamica marina e costiera e dei processi di dispersione. Lo studio di tali fenomeni generalmente si basa su un'enorme quantità di informazioni che richiedono elevati tempi di computazione e grandi potenze di calcolo non sempre disponibili: questo, in particolare, può succedere quando ad esempio il dataset in esame proviene da un servizio di re-analisi climatologica, caratterizzato da alta risoluzione temporale e spaziale. In questo caso, può essere conveniente ridurre il numero di condizioni ambientali da tenere in considerazione per le simulazioni numeriche in modo da individuare e conservare i modi più significativi della variabilità del fenomeno.

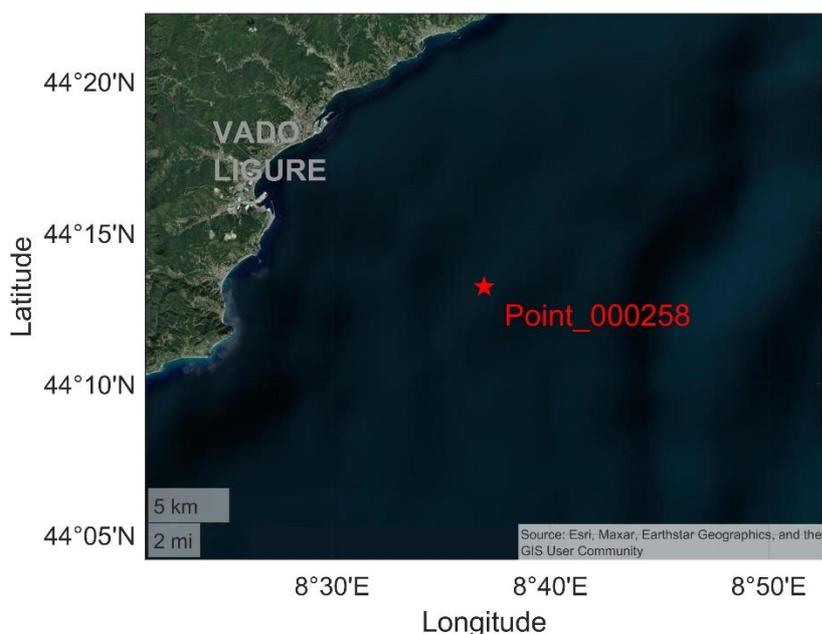
Risolvere un numero limitato di condizioni ambientali, altresì dette "scenari", è vantaggioso perché non solo permette di selezionare le condizioni più importanti per il processo investigato, bensì riduce significativamente il carico computazionale necessario per risolvere l'intera catena modellistica. A tale fine, è possibile impiegare delle tecniche di *Data mining*, ovvero di analisi massiva dei dati a disposizione, tramite appositi algoritmi di raggruppamento; tale approccio si rivela particolarmente efficace poiché permette di raggruppare un insieme di dati in classi di oggetti (cluster) sulla base della loro similarità/dissimilarità. Un cluster rappresenta un raggruppamento di elementi che sono simili tra loro e sono dissimili dagli elementi di un altro cluster. Il risultato che si ottiene è un sottoinsieme di cluster rappresentati da elementi in grado di riassumere il dataset iniziale (gli scenari di cui sopra), descrivendone le proprietà principali.

Nel presente studio si è adottata una metodologia che permettesse di selezionare alcuni scenari meteo-marini significativi per l'area di studio, a partire dai dati anemometrici ed ondometrici elaborati dal DICCA ([www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html](http://www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html)). Tramite una re-analisi delle condizioni atmosferiche, il DICCA ha ricostruito un database, detto *hindcast*, contenente dati orari di onda, vento e campo barico 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 Vado Ligure è lo 000258 mostrato in Figura 5 (le coordinate sono riportate nella tabella sottostante).

*Tabella 2. Coordinate del nodo hindcast utilizzato nel prosieguo del report (SR: WGS84).*

Nodo	Lon	Lat
000258	8,616	44,22



*Figura 5. Punto hindcast utilizzato per la definizione delle forzanti meteo-marine.*

<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.

Per l'estrazione degli scenari è stata scelta una finestra temporale adeguata in funzione del tipo di processo studiato, ovvero la descrizione della dispersione di inquinanti/sedimenti/particelle in acque costiere in seguito all'immissione in mare di una portata definita in un certo intervallo di tempo. Per lo sviluppo degli algoritmi di identificazione di scenari climatici caratteristici sono state considerate le serie temporali dal 1979 al 2020, su base oraria, di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ), di periodo e direzione medie ( $T_m$  e  $\theta_m$ , rispettivamente) delle componenti di velocità longitudinale/latitudinale del vento ( $w_x/w_y$ ), e sono state selezionate serie temporali di una settimana tramite il Maximum Dissimilarity Algorithm (MDA)<sup>3</sup>. In prima analisi, sono stati estratti 100 scenari climatici, in modo tale da coprire l'intera varianza dei dati in input. A partire da questi, la selezione è stata rifinita per considerare solamente gli scenari meteo-marini significativi ai fini della modellazione numerica dei fenomeni di dispersione (in numero pari a 5).

In seguito, sono state ricavate: i) le forzanti di marea (di seguito indicate come  $\Delta\eta$ ) in corrispondenza del nodo hindcast grazie al Software di Previsione di Marea (TPXO.3) fornito dall'Università dello Stato dell'Oregon<sup>4</sup>, sullo stesso intervallo di tempo e con la stessa frequenza dei dati meteomarini di hindcast; ii) 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 agli scenari meteomarini precedentemente identificati, in corrispondenza dei bordi della griglia computazionale.

L'obiettivo della selezione di diversi scenari per la realizzazione del presente studio ha lo scopo di estrarre un gruppo di diverse serie temporali diverse tra loro, al fine di caratterizzare in modo esaustivo la variabilità climatica nei paraggi di Vado Ligure. L'estensione temporale degli scenari è stata impostata pari ad una settimana, in quanto i processi di dispersione dello scarico della FSRU, soprattutto per quanto riguarda l'evoluzione della temperatura e della concentrazione di cloro, possono avere un tempo scala di qualche giorno. Gli scenari considerati a valle del processo di selezione sono il 2, 8, 33, 58, 68; le condizioni d'onda a questi associate sono mostrate nelle figure da Figura 6 a Figura 10.

Le figure mostrano condizioni d'onda molto diverse tra loro. Lo scenario 2 (Figura 6) è infatti associato a condizioni di bonaccia, presentando altezze d'onda inferiori al metro e dunque trascurabili (lo stesso per i dati di vento, qui non mostrati in favor di sintesi). Al contrario, gli altri scenari presentano stati di mare più intensi, con onde provenienti da Libeccio (scenario 8; Figura 7), da Scirocco (scenario 33; Figura 8), da Tramontana (scenario 58; Figura 9), ed infine onde associate a settori di traversia variabili (scenario 68; Figura 10).

<sup>3</sup> Camus, P., Mendez, F. J., Medina, R., & Cofiño, A. S. (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6), 453-462.

<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.

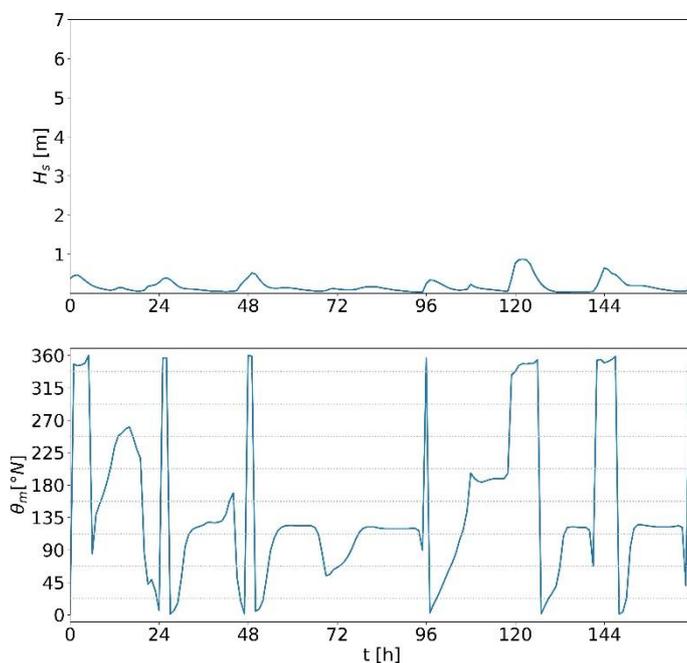


Figura 6. Condizioni d'onda associate allo scenario 2.

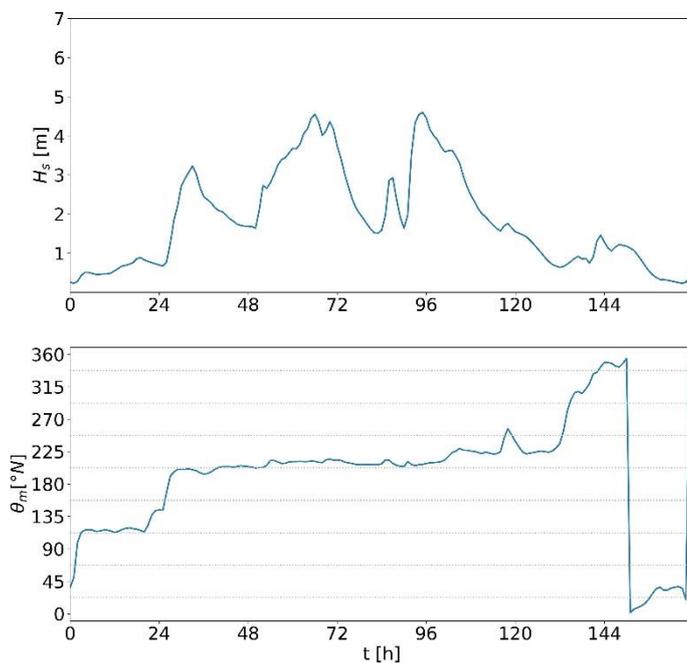


Figura 7. Condizioni d'onda associate allo scenario 8.

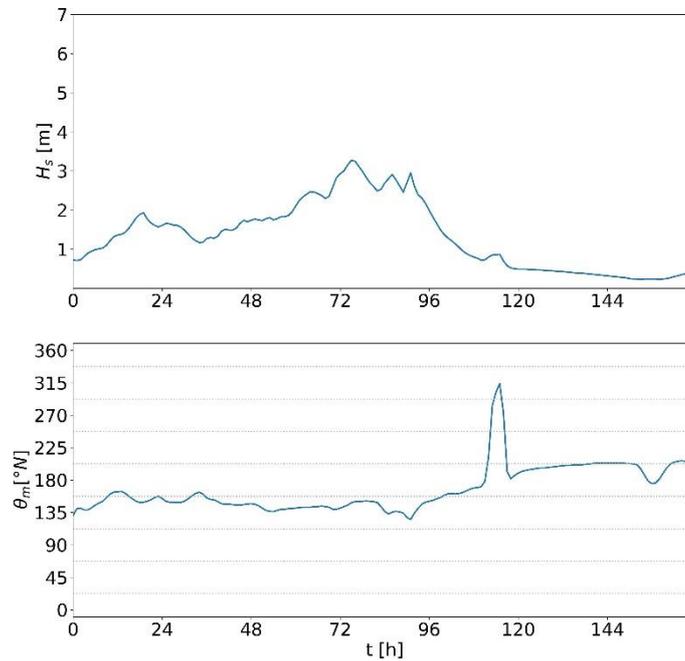


Figura 8. Condizioni d'onda associate allo scenario 33.

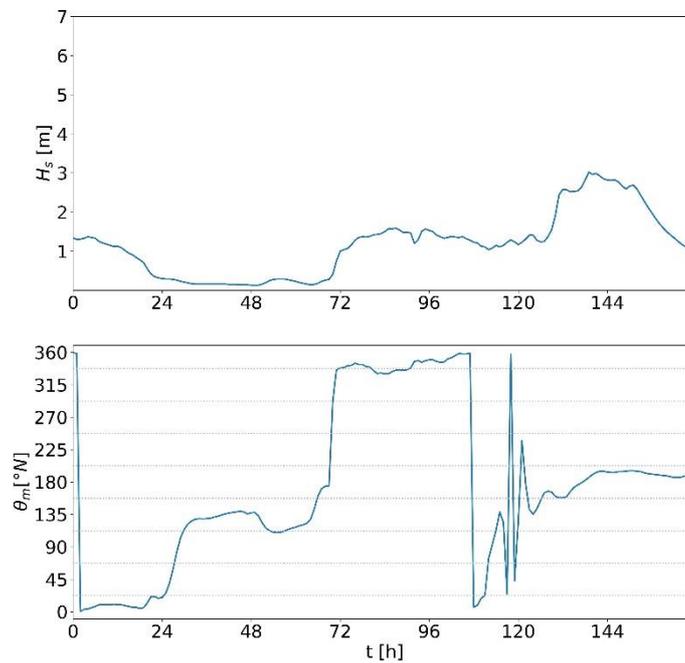


Figura 9. Condizioni d'onda associate allo scenario 58.

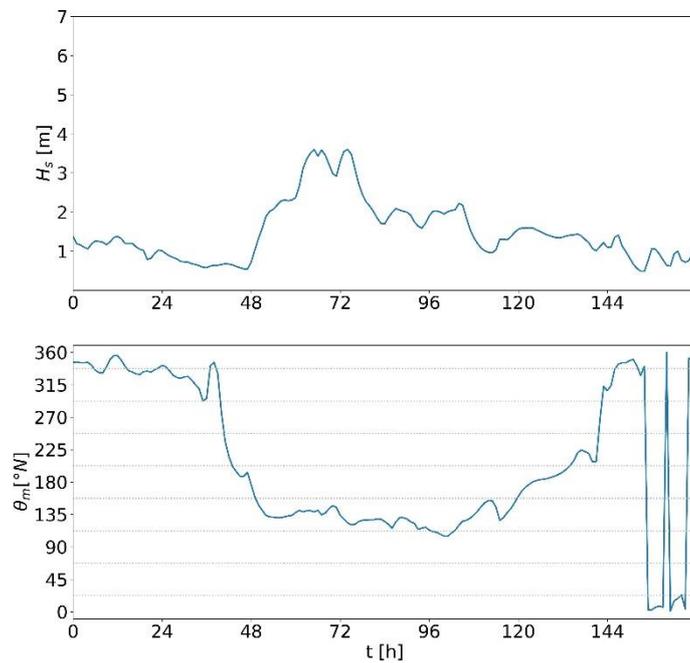


Figura 10. Condizioni d'onda associate allo scenario 68.

## 5. CONFIGURAZIONE PROGETTUALE CONSIDERATA

Nella condizione di esercizio è previsto, da parte della FSRU, il prelievo e la restituzione dell'acqua di mare con portata massima prevista pari a circa 18.000 m<sup>3</sup>/h. La temperatura dell'acqua in uscita dai vaporizzatori è stata impostata considerando un  $\Delta T$  pari a - 7°C rispetto alla temperatura dell'acqua in entrata, ipotizzando una temperatura ambientale pari a 13°C per simulare condizioni invernali, adottando pertanto un approccio conservativo (tali condizioni sono più gravose dal punto di vista dell'abbassamento di temperatura).

In riferimento al contenuto di cloro dell'acqua di scarico, si è assunto un valore compatibile con il limite indicato dalla normativa pari a 0,2 mg/l, o, equivalentemente,  $2 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup> (valore massimo di cloro attivo libero per sistema di elettro-clorinazione come definito nell'Allegato 5 alla parte III del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i.).

Per quanto concerne le caratteristiche di presa e scarico della FSRU, sono state ipotizzate delle sezioni di carico e scarico aventi diametro pari a 1.4 m. Questo corrisponde a velocità di flusso pari a 3,25 m/s, data la portata dell'impianto (18'000 m<sup>3</sup>/ora equivalgono a 5 m<sup>3</sup>/s). Tutte le condizioni sui parametri di presa e scarico (temperatura, velocità del flusso, concentrazione di cloro), si intendono riferite a profondità pari a -8 m e -3,3 m, rispettivamente

Il modello è stato dunque forzato con gli scenari meteo-marini di cui al precedente paragrafo, imponendo le serie di onda e marea sul lato Est della maglia (Figura 2), mentre i dati di vento interessano l'intero dominio di calcolo, unitamente alle serie del CMS sui lati Nord e Sud del dominio computazionale.

La risoluzione della dinamica di eventuali concentrazioni di temperatura e inquinanti è stata realizzata tramite l'impiego dell'equazione di convezione-diffusione di uno scalare che deve essere caratterizzato opportunamente a seconda del fenomeno che si vuole analizzare.

Una sintesi dei settaggi imposti in corrispondenza di carico e scarico dell'impianto è visibile in Tabella 3.

Tabella 3. Condizioni di operatività considerate nel modello numerico.

<b>PRESA (profondità -8,0 m)</b>				
Portata [m <sup>3</sup> /s]	Velocità [m/s]	Salinità [ppt]	Temperatura [°C]	Cloro [kg/m <sup>3</sup> ]
5	3.25	37	13	0
<b>SCARICO (profondità -3,3 m)</b>				
Portata [m <sup>3</sup> /s]	Velocità [m/s]	Salinità [ppt]	Temperatura [°C]	Cloro [kg/m <sup>3</sup> ]
5	3.25	36	T presa -7°C	0.0002

## 6. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Nel seguito vengono presentati i risultati ottenuti dalla modellazione numerica per la configurazione progettuale descritta in precedenza. L'estensione temporale delle simulazioni è stata presa sufficientemente lunga in modo da simulare in maniera esaustiva l'evento meteorologico di riferimento, fornendo il tempo necessario affinché i fenomeni dispersivi si sviluppino completamente e si stabilizzino, sia nel campo vicino sia in quello intermedio e in quello lontano (un recente studio ha infatti dimostrato come l'intervallo di correlazione di una tempesta all'interno del Mediterraneo sia pari a circa tre giorni<sup>5</sup>).

Per facilitare la lettura del documento, vengono presentate le distribuzioni dei processi fisici di interesse per due istanti temporali nell'arco della durata degli scenari selezionati (i.e., una settimana), ovvero 3 giorni e 7 giorni dall'inizio della simulazione, sia alla quota superficiale che in corrispondenza del fondale. Infine, si riportano le curve di temperatura e concentrazione di cloro lungo tutto l'arco della simulazione in corrispondenza dei due punti di controllo mostrati in Figura 11, selezionati nelle vicinanze dell'isola di Bergeggi (punto P1) e all'interno dell'area di coralligeno (punto P2) presente in loco.

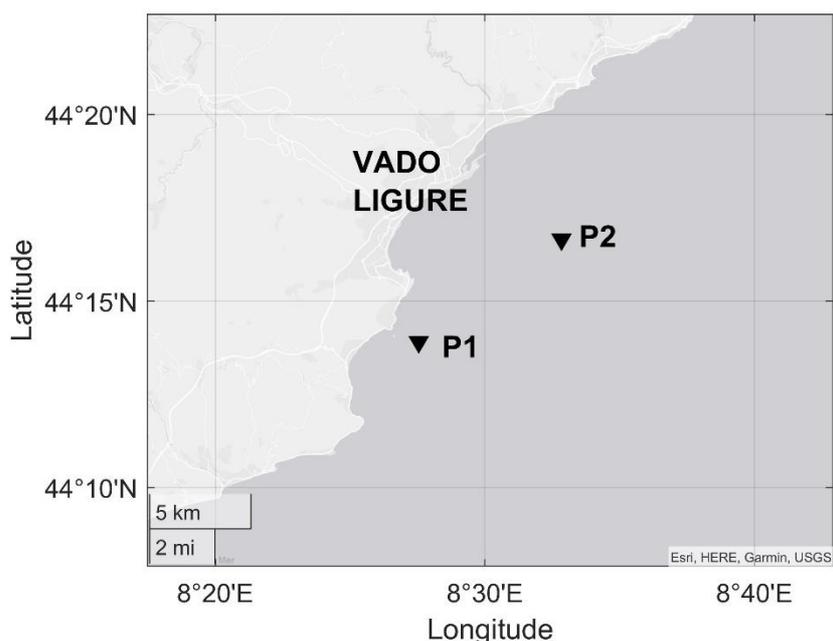


Figura 11. Punti di controllo selezionati per l'estrazione delle curve di temperatura e concentrazione di cloro.

<sup>5</sup> Cremonini, G., De Leo, F., Stocchino, A., Besio, G. 2021. On the selection of timing scenarios of wind and ocean waves: Methodologies and applications in the North Tyrrhenian Sea. *Ocean Modelling*, 163.



Nelle figure sottostanti, le condizioni ambientali sono mostrate in bianco. Dall'analisi delle figure, si osserva come le concentrazioni di cloro e il gradiente di temperatura diffondano in modo rapido in corrispondenza degli scenari meteomarini considerati. La concentrazione di cloro viene infatti immediatamente ridimensionata in prossimità dello scarico della FSRU, e lungo tutto l'arco delle simulazioni i rispettivi valori nel dominio di calcolo si mantengono abbondantemente al di sotto delle condizioni imposte allo scarico (ordini di grandezza inferiori rispetto ai  $2 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup> immessi in ambiente); al contrario, la temperatura nell'area è significativamente più alta rispetto a quella rilasciata dalla FSRU ( $\Delta T$  areale massimo nell'ordine di frazioni di grado).

La massima estensione della *plume* (ovvero, l'area colorata che rappresenta una condizione diversa rispetto a quella ambientale) si riscontra in corrispondenza dello scenario 2. Questo è dovuto al fatto che, essendo lo scenario suddetto associato a condizioni di bonaccia (vedi Figura 6), i fenomeni di dispersione risultano ridimensionati; dunque, le concentrazioni di cloro e gradiente termico permangono maggiormente a ridosso dell'area di rilascio prima di essere diluiti e dispersi nell'ambiente circostante.

Dal confronto tra le mappe superficiali e le mappe al fondo, si evince come i pattern di trasporto, legati alla direzione delle correnti litoranee indotte, siano simili, sebbene i valori di contenuto di cloro e di gradiente termico siano ridimensionati in prossimità del fondale. Di fatto, nonostante l'acqua più fredda tenda a scendere a causa della maggior densità, prevale la convezione dovuta alle correnti marine, che disperde lo scarico della FSRU prima che possano innescarsi i fenomeni di rimescolamento lungo la colonna d'acqua.

Gli ordini di grandezza di gradiente termico e contenuto di cloro sono apprezzabili nei profili riportati nelle figure da Figura 32 a Figura 51. La massima concentrazione di cloro riscontrata sul fondale in corrispondenza dei due punti è pari a ca.  $1 \times 10^{-4}$  mg/l, ovvero 3 ordini di grandezza in meno rispetto al quantitativo presente allo scarico (pari a 0,2 mg/l), mentre non si riscontrano variazioni di temperatura degne di nota, in virtù dei meccanismi poc'anzi evidenziati.

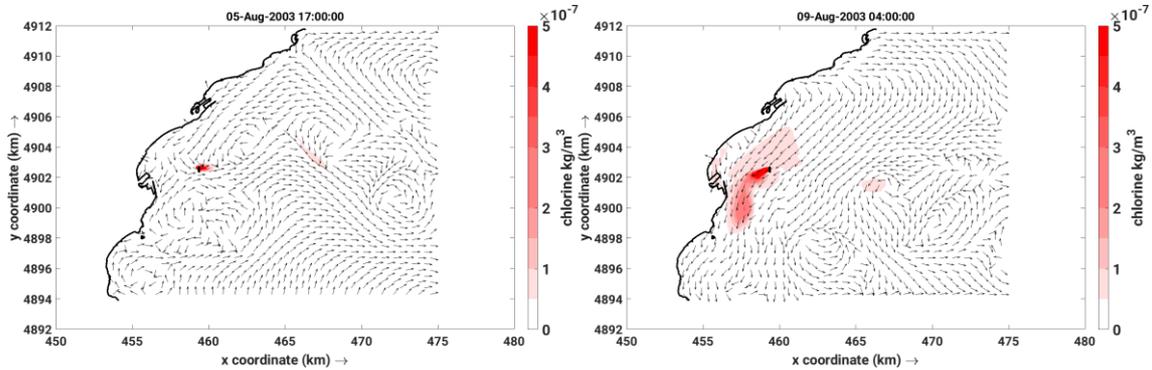


Figura 12. Concentrazione di cloro nello strato superficiale. Scenario 2. Le frecce nere indicano la direzione delle correnti indotte (lo stesso nelle figure da Figura 13 a Figura 31).

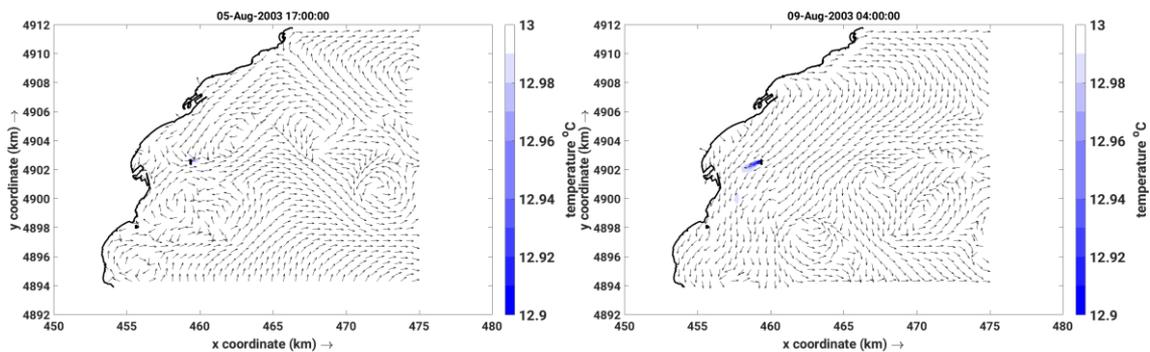


Figura 13. Temperatura dell'acqua nello strato superficiale. Scenario 2.

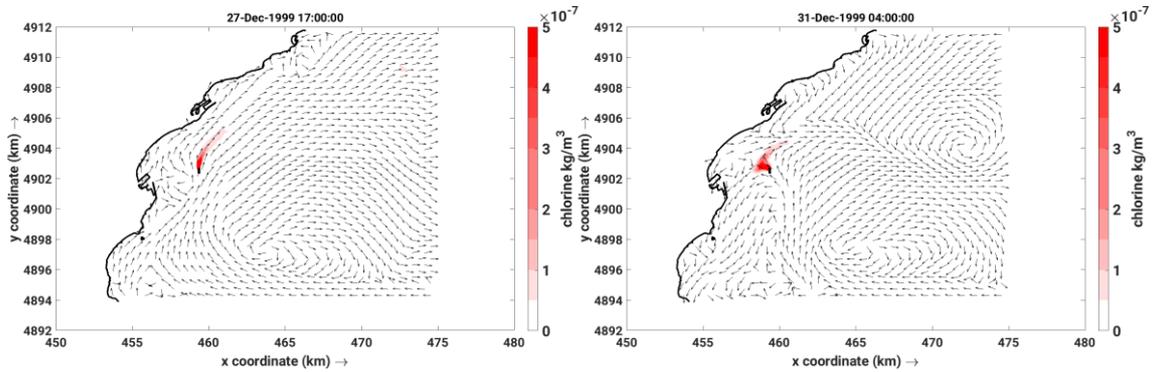


Figura 14. Concentrazione di cloro nello strato superficiale.  
Scenario 8.

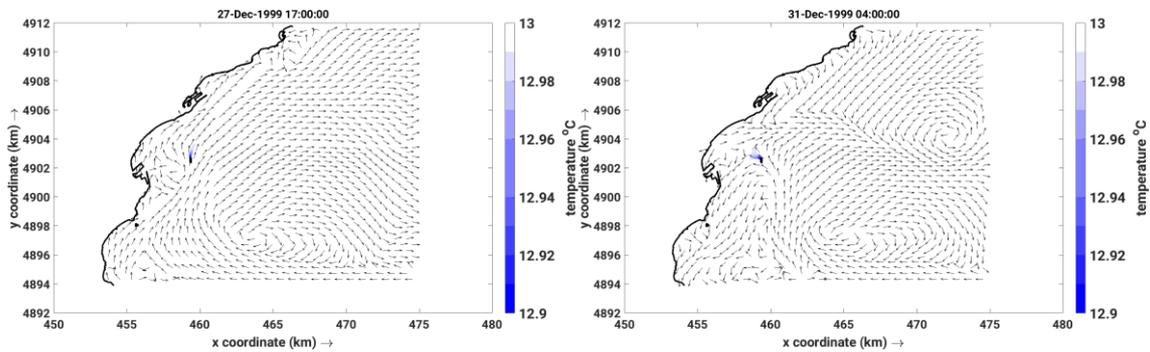


Figura 15. Temperatura dell'acqua nello strato superficiale.  
Scenario 8.

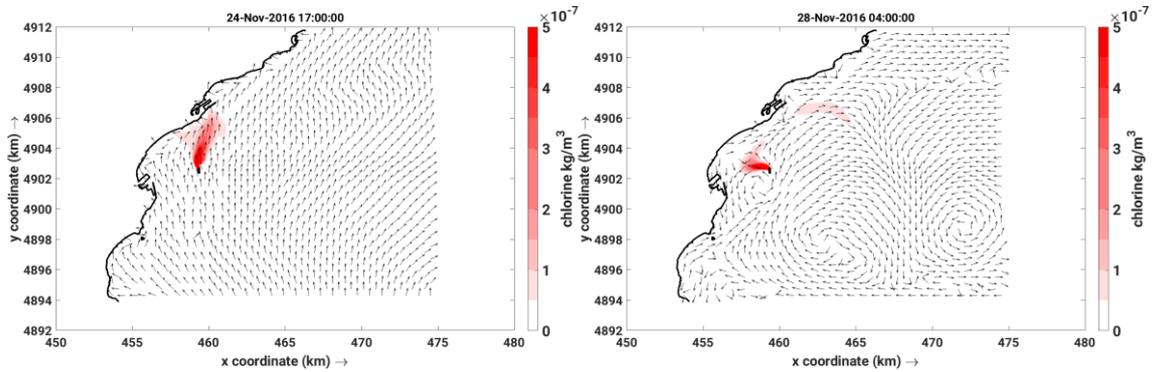


Figura 16. Concentrazione di cloro nello strato superficiale.  
Scenario 33.

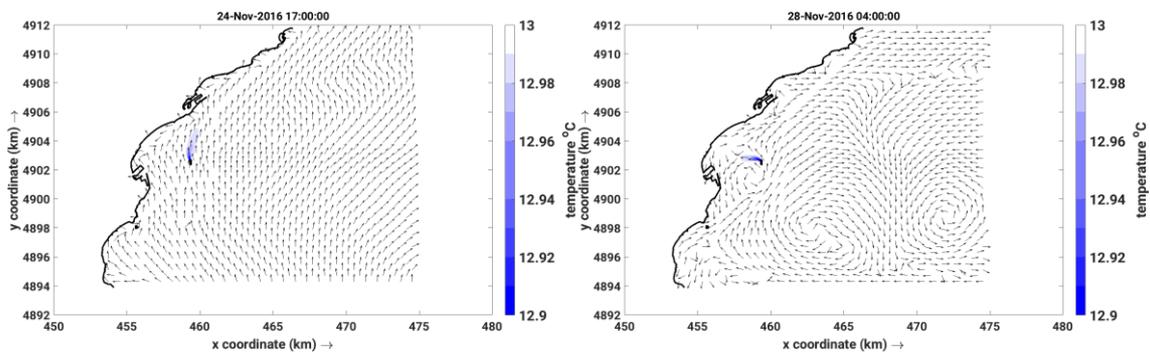


Figura 17. Temperatura dell'acqua nello strato superficiale.  
Scenario 33.

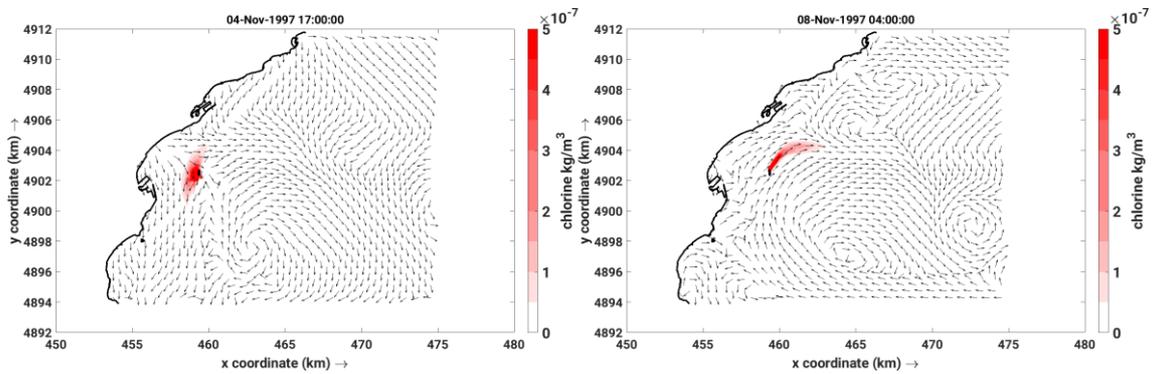


Figura 18. Concentrazione di cloro nello strato superficiale.  
Scenario 58.

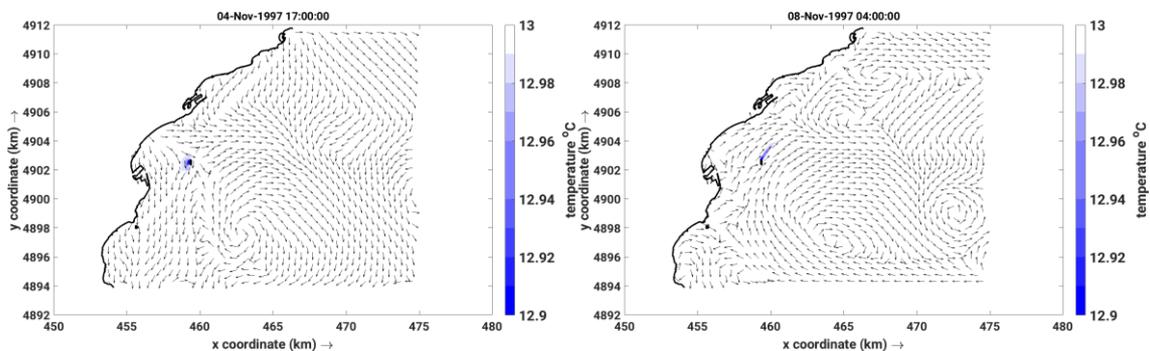


Figura 19. Temperatura dell'acqua nello strato superficiale.  
Scenario 58.

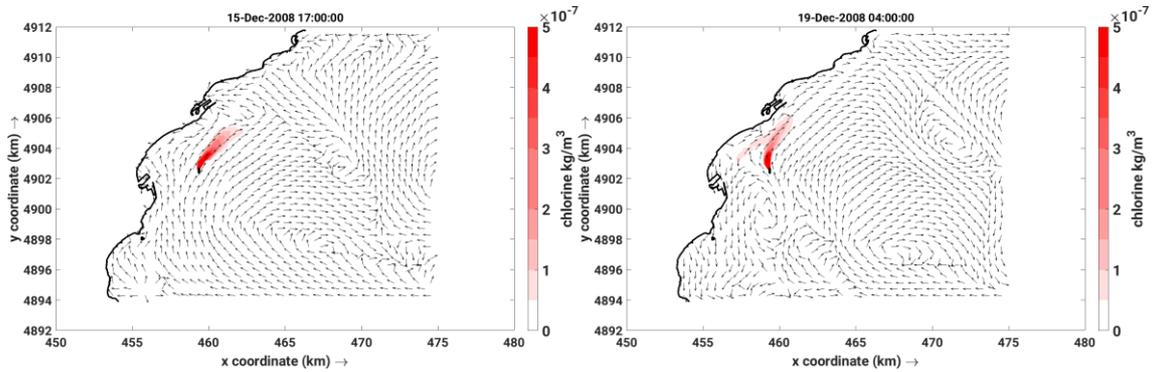


Figura 20. Concentrazione di cloro nello strato superficiale.  
Scenario 68.

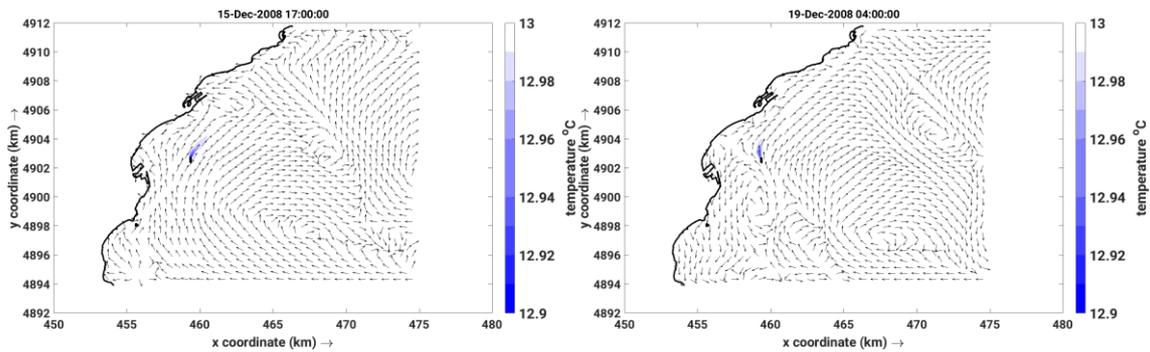


Figura 21. Temperatura dell'acqua nello strato superficiale.  
Scenario 68.

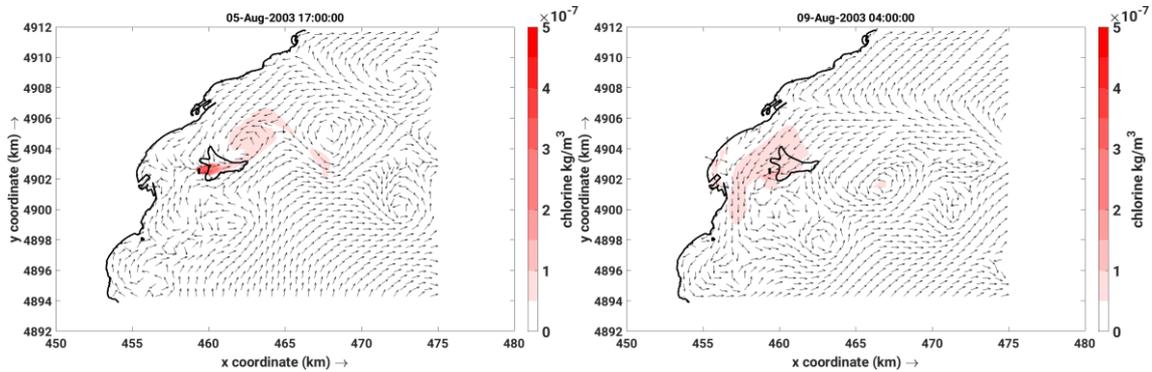


Figura 22. Concentrazione di cloro al fondo. Scenario 2. In figura è mostrata l'area di coralligeno (lo stesso nelle figure da Figura 23 a Figura 31).

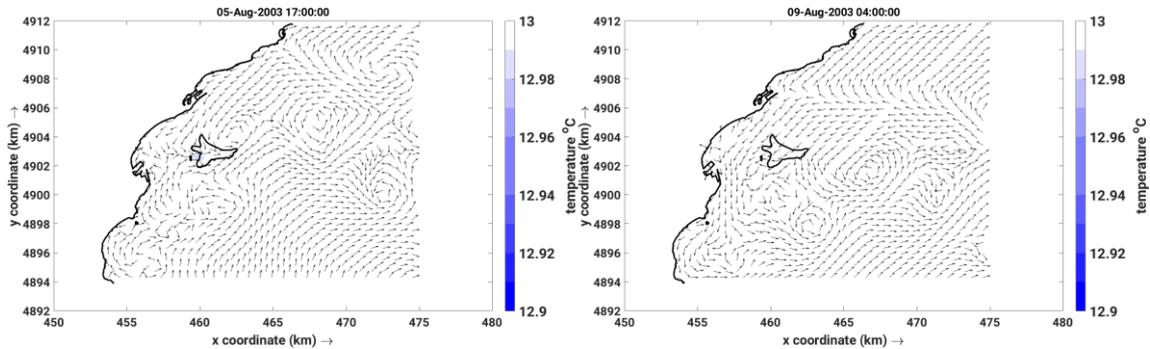


Figura 23. Temperatura dell'acqua al fondo. Scenario 2.

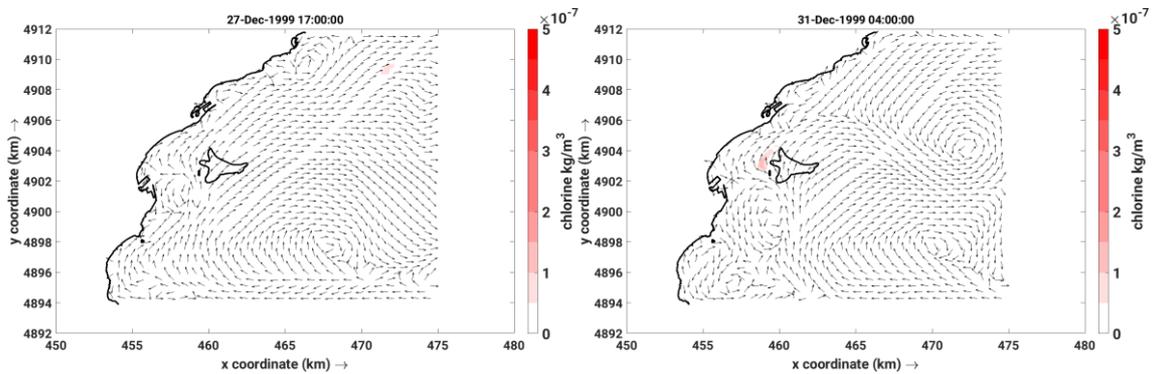


Figura 24. Concentrazione di cloro al fondo. Scenario 8.

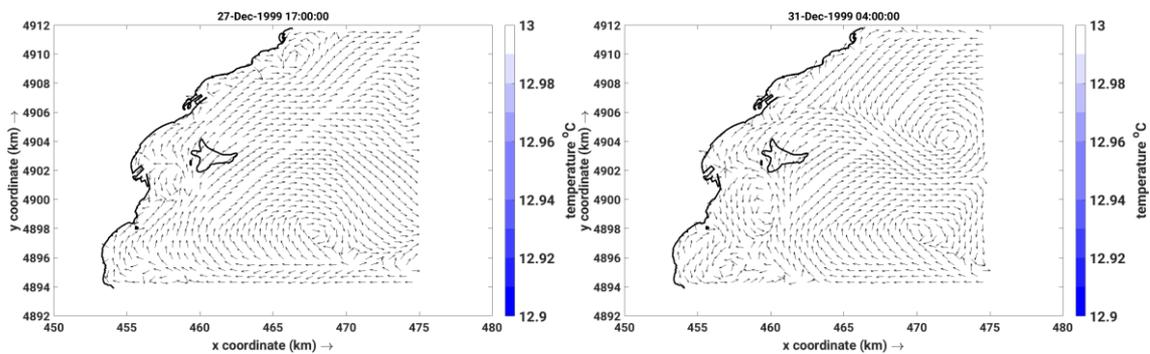


Figura 25. Temperatura dell'acqua al fondo. Scenario 8.

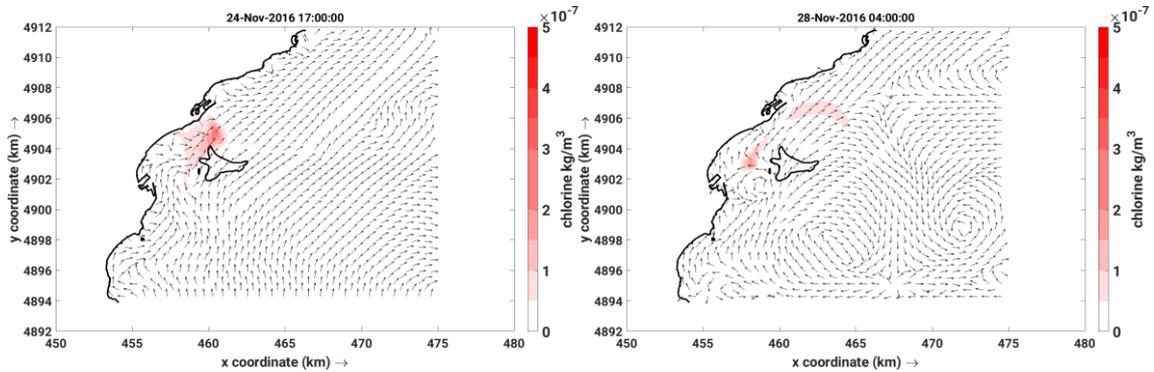


Figura 26. Concentrazione di cloro al fondo. Scenario 33.

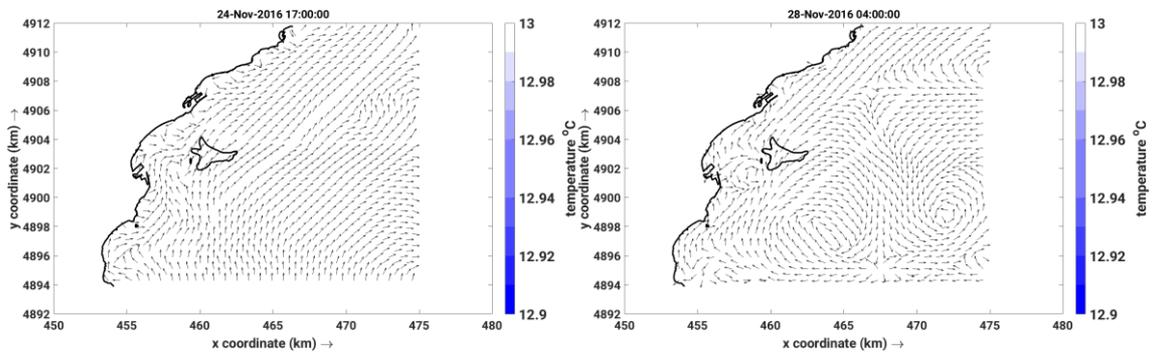


Figura 27. Temperatura dell'acqua al fondo. Scenario 33.

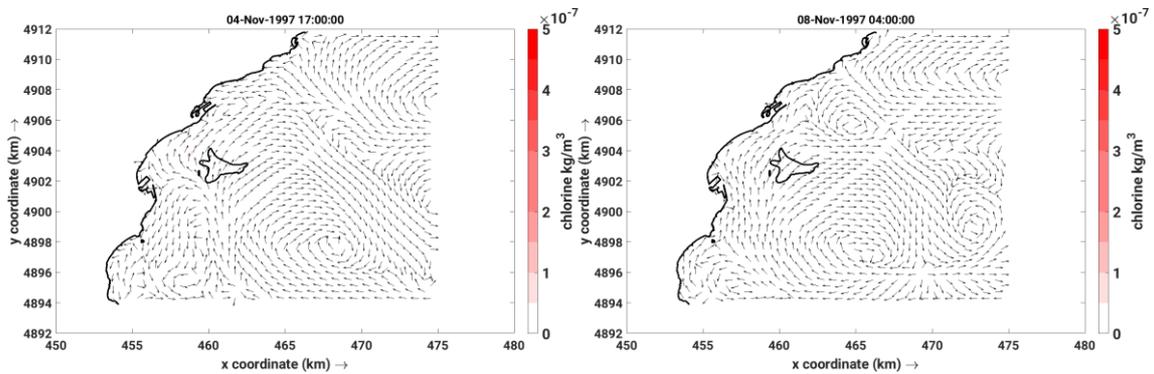


Figura 28. Concentrazione di cloro al fondo. Scenario 58.

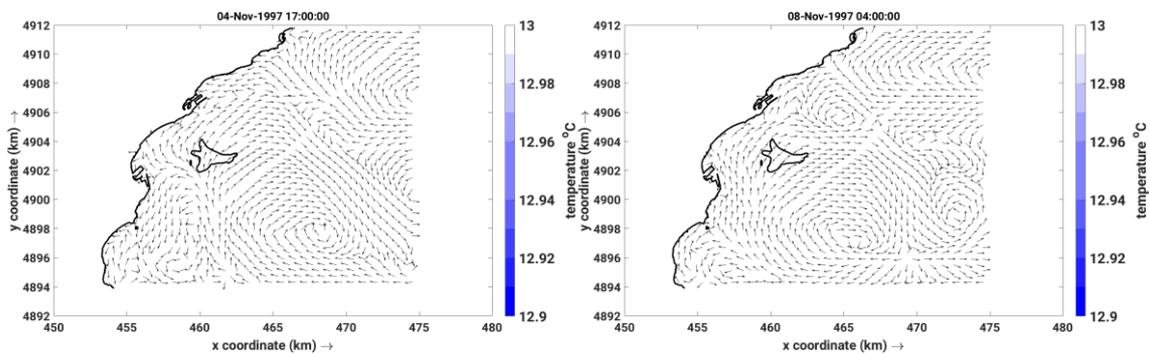


Figura 29. Temperatura dell'acqua al fondo. Scenario 58.

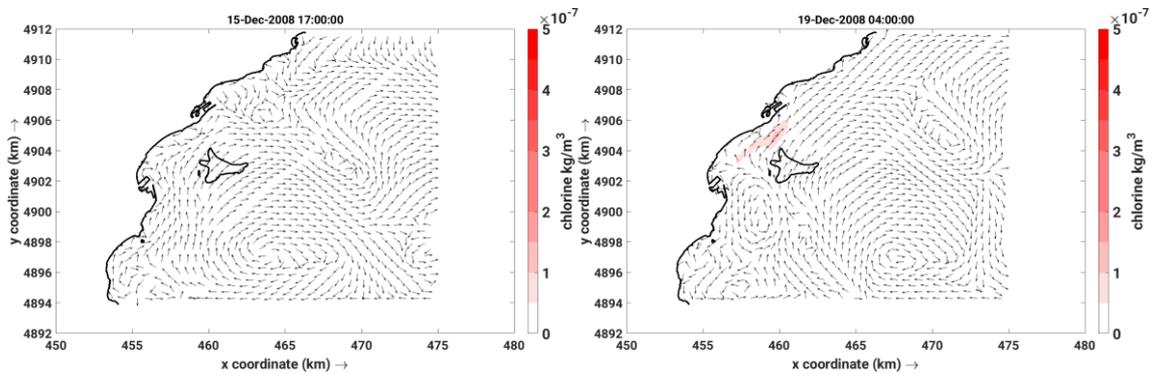


Figura 30. Concentrazione di cloro al fondo. Scenario 68.

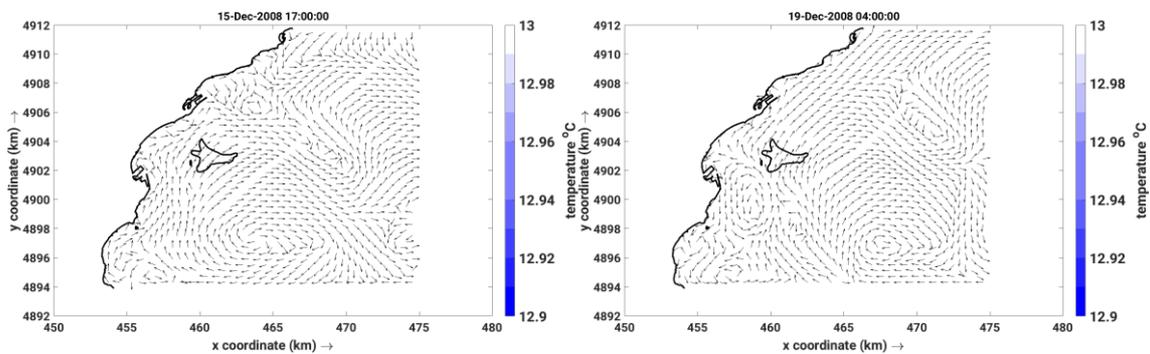


Figura 31. Temperatura dell'acqua al fondo. Scenario 68.

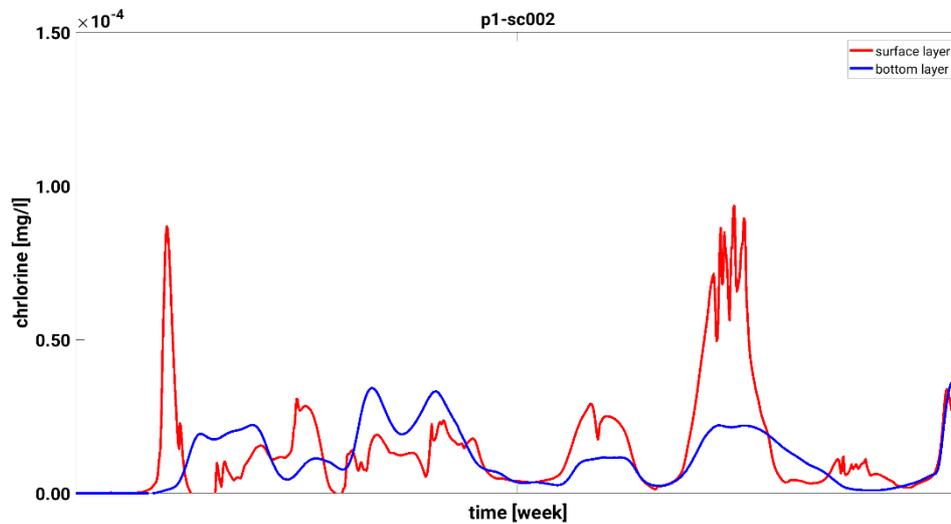


Figura 32. Concentrazione di cloro nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 2. Risultati al fondo (lo stesso vale per le figure successive).

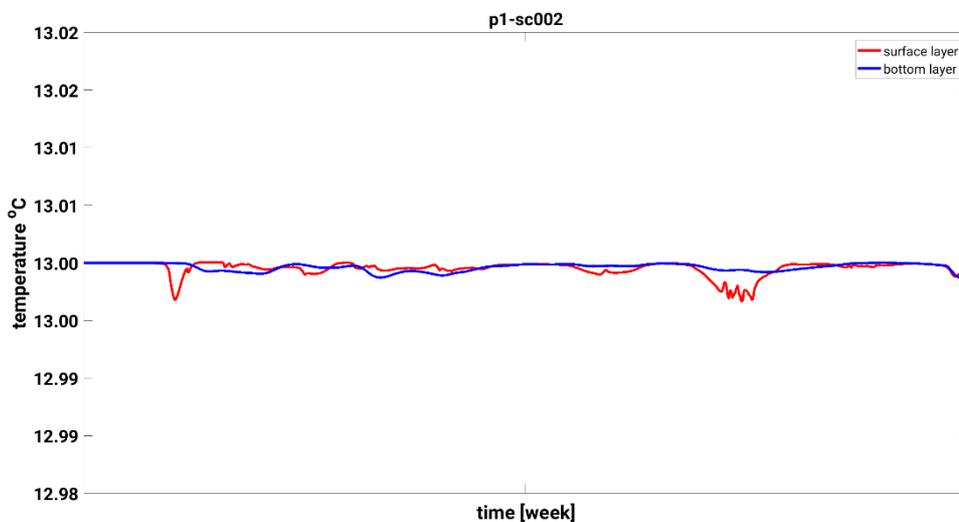


Figura 33. Temperatura dell'acqua nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 2.

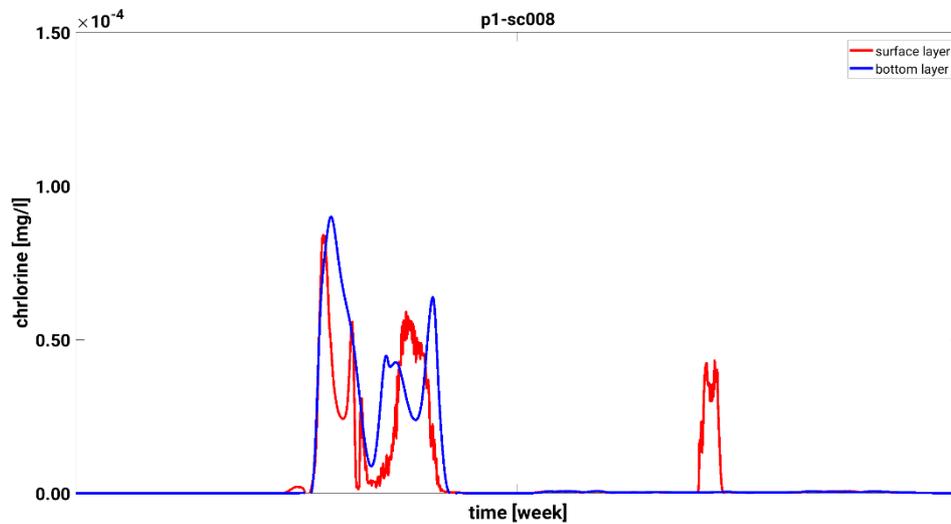


Figura 34. Concentrazione di cloro nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 8.

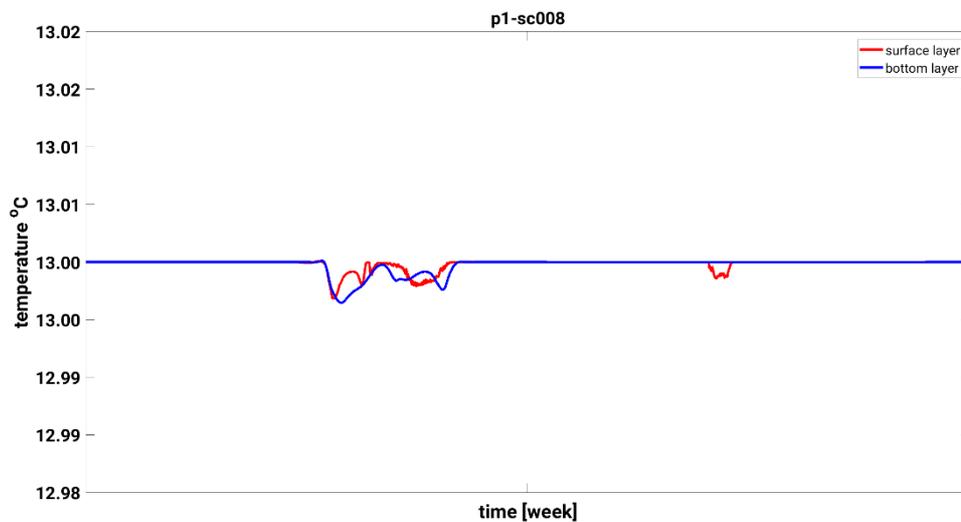


Figura 35. Temperatura dell'acqua nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 8.

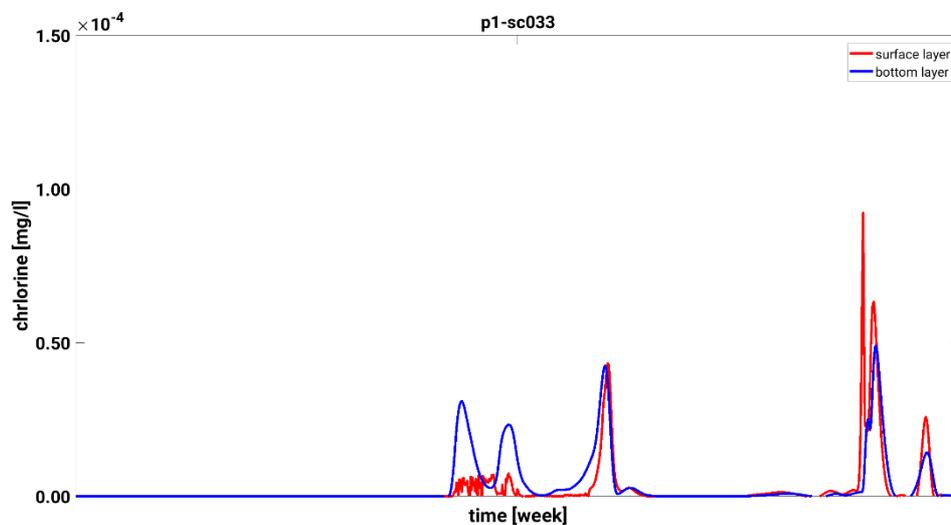


Figura 36. Concentrazione di cloro nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 33.

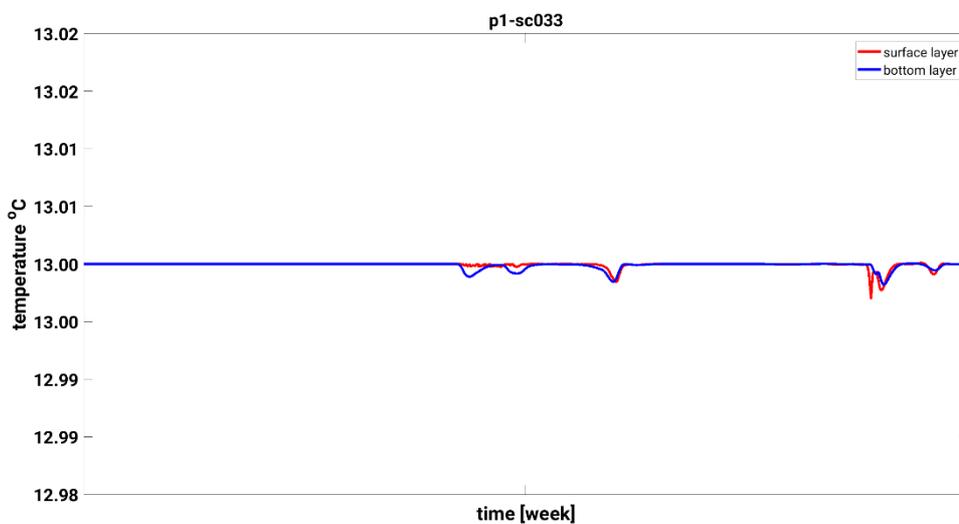


Figura 37. Temperatura dell'acqua nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 33.

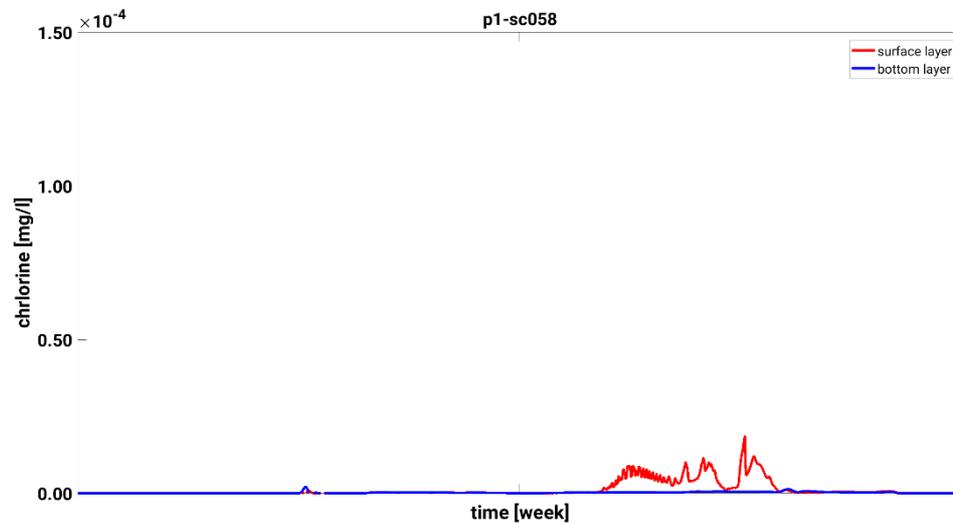


Figura 38. Concentrazione di cloro nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 58.

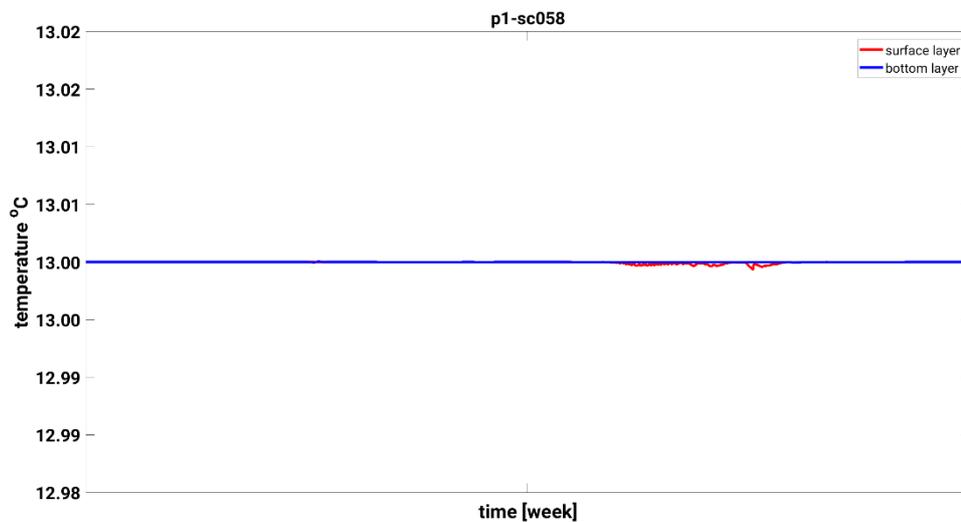


Figura 39. Temperatura dell'acqua nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 58.

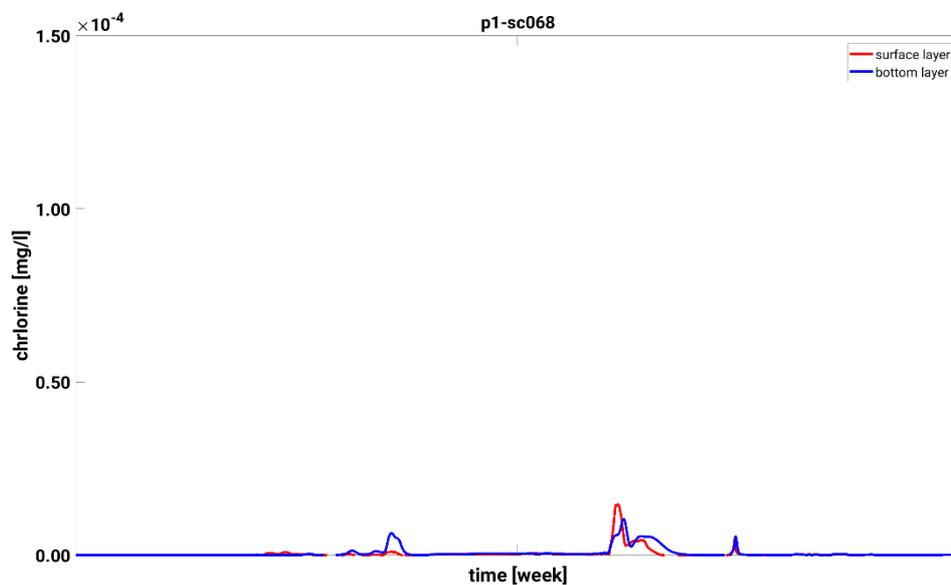


Figura 40. Concentrazione di cloro nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 68.

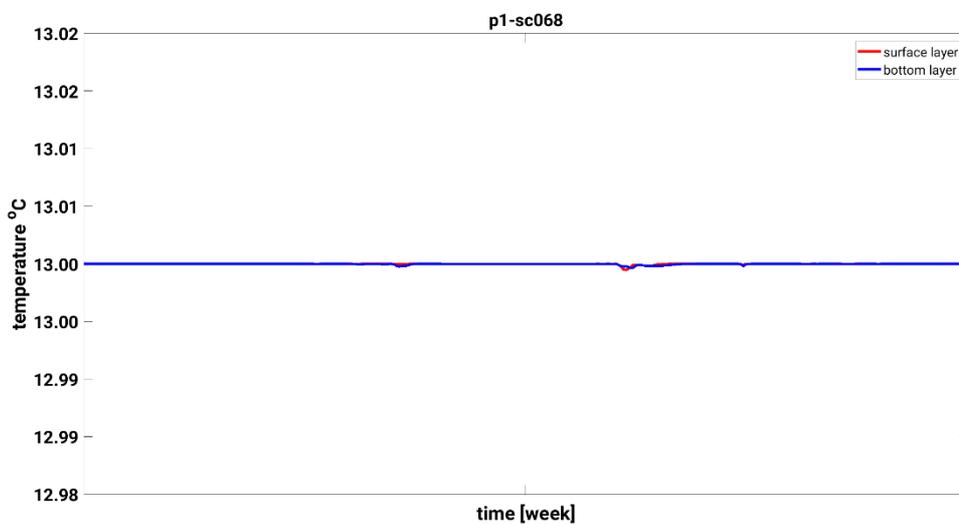


Figura 41. Temperatura dell'acqua nel punto P1 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 68.

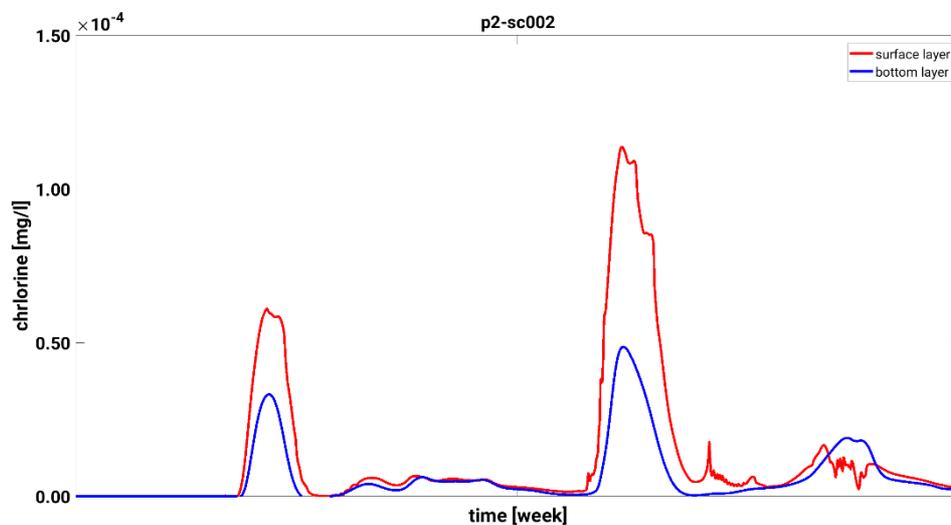


Figura 42. Concentrazione di cloro nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 2.

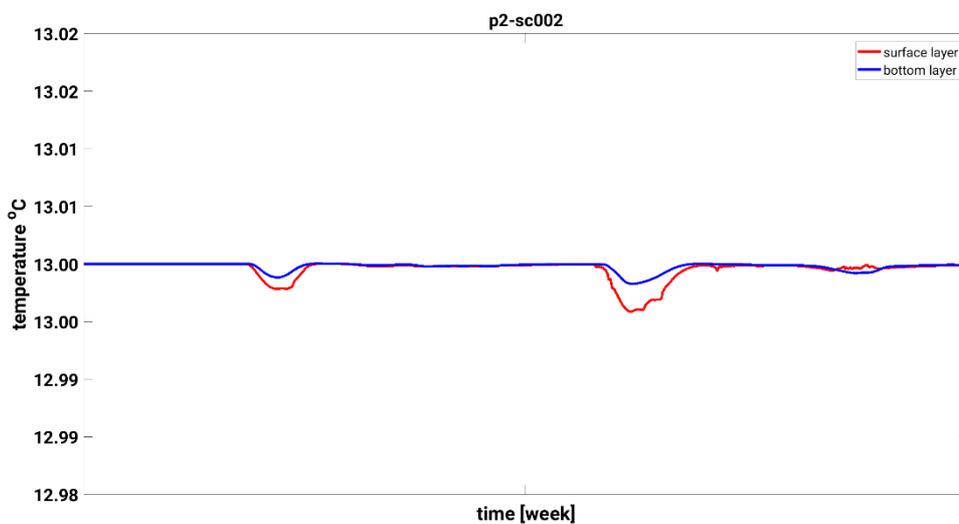


Figura 43. Temperatura dell'acqua nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 2.

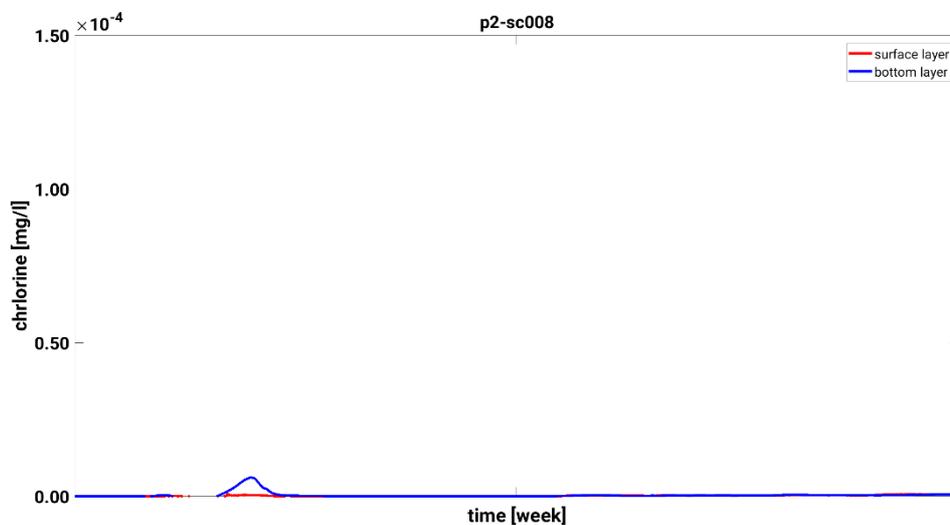


Figura 44. Concentrazione di cloro nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 8.

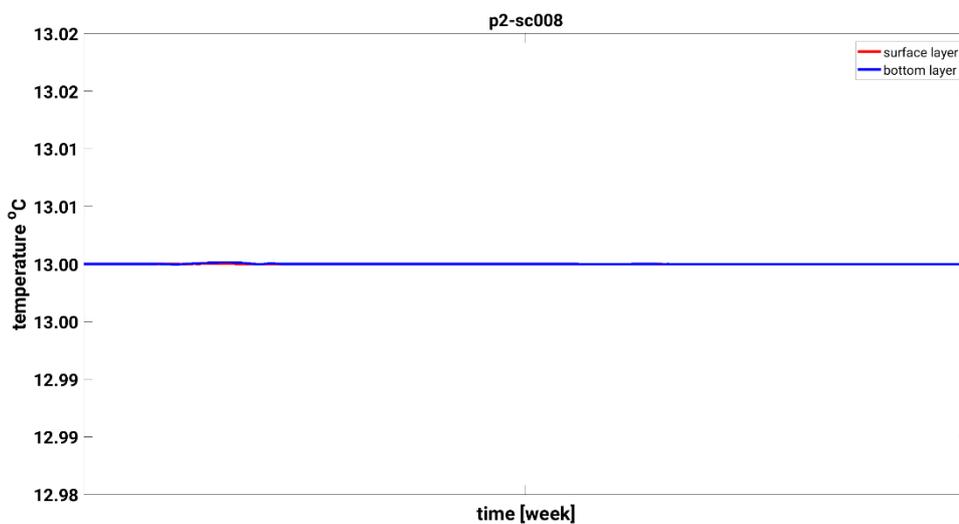


Figura 45. Temperatura dell'acqua nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 8.

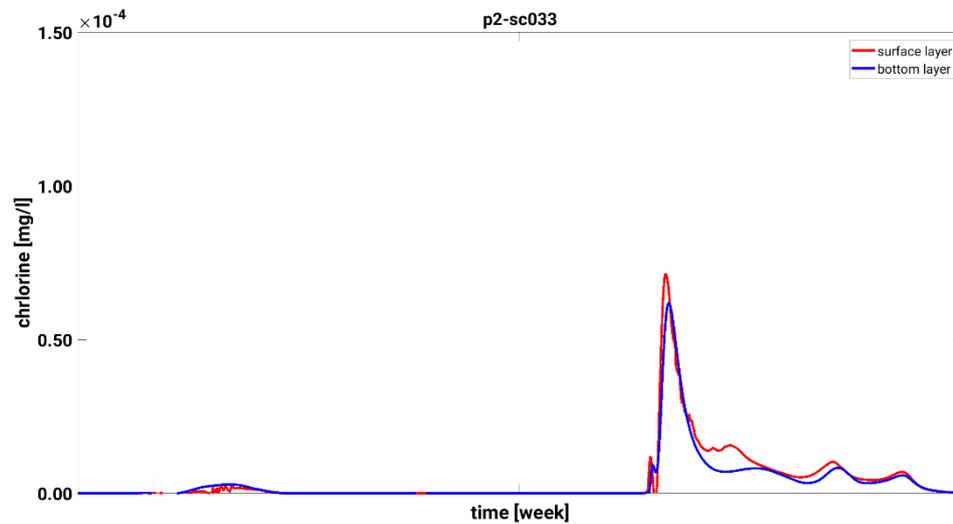


Figura 46. Concentrazione di cloro nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 33.

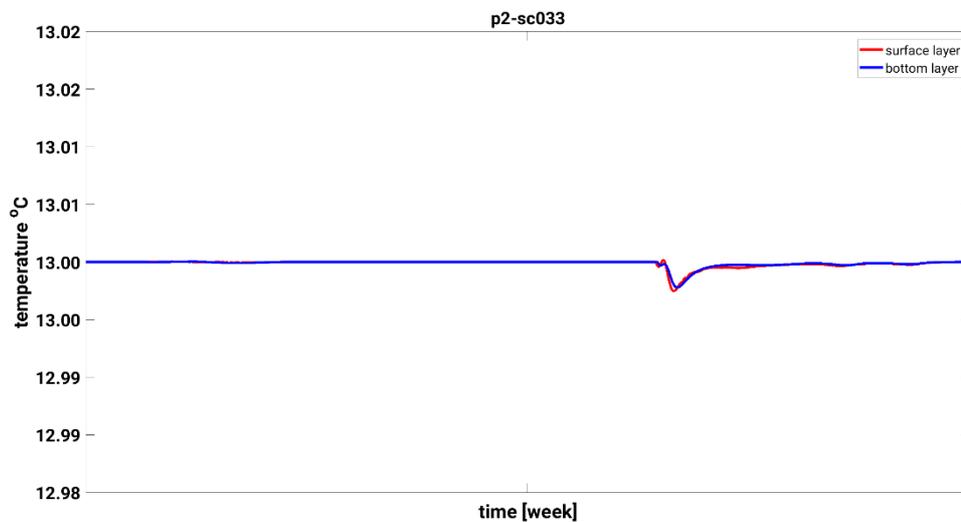


Figura 47. Temperatura dell'acqua nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 33.

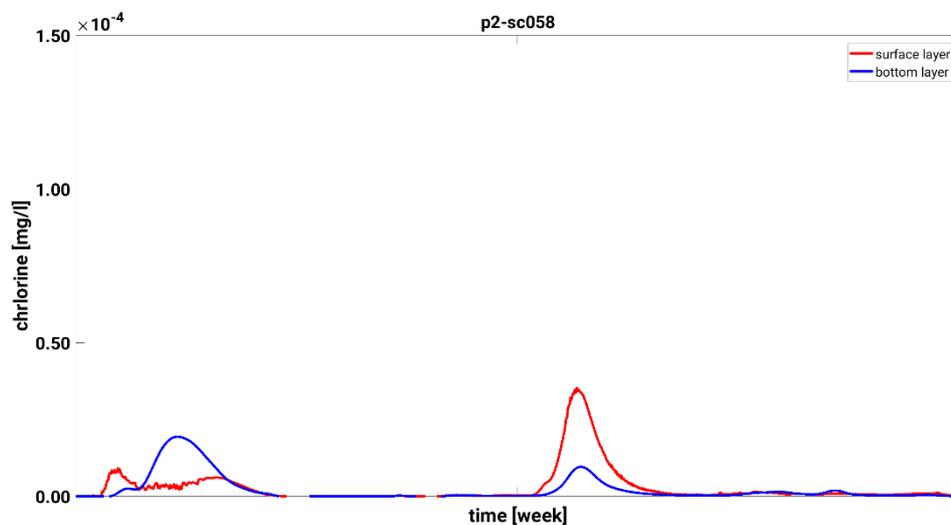


Figura 48. Concentrazione di cloro nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 58.

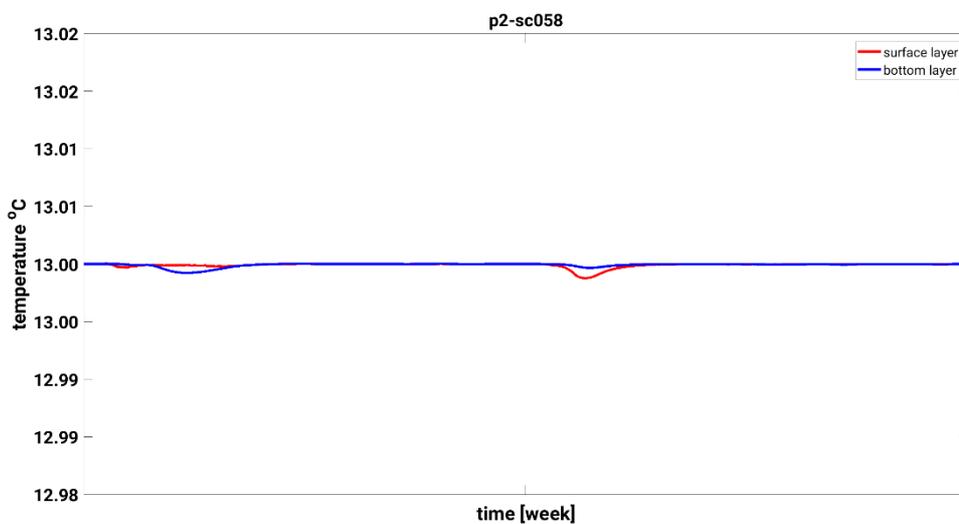


Figura 49. Temperatura dell'acqua nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 58.

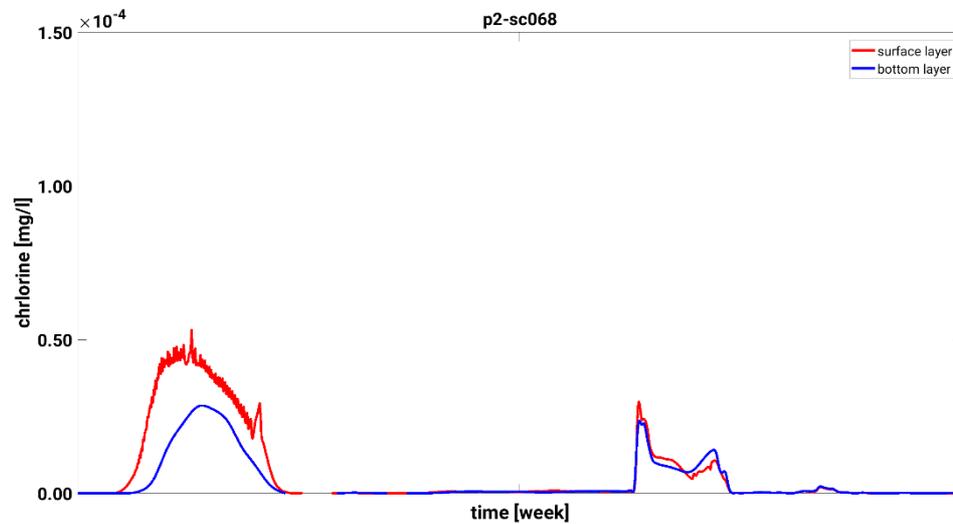


Figura 50. Concentrazione di cloro nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 68.

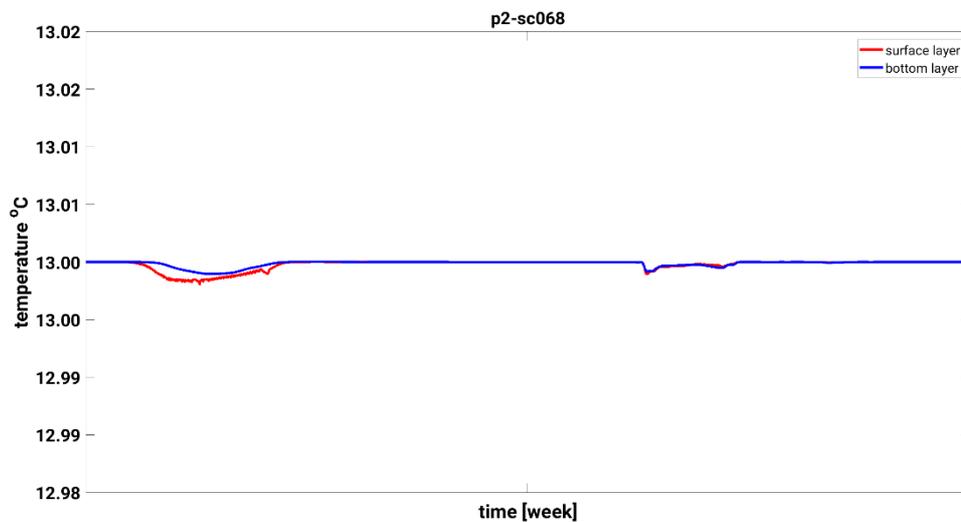


Figura 51. Temperatura dell'acqua nel punto P2 nel corso della settimana di simulazione. Scenario 68.