



Università
di Genova

DICCA DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA
E AMBIENTALE

STUDIO MODELLISTICO DI DISPERSIONE TERMICA/CHIMICA IN FASE DI ESERCIZIO AL LARGO DEL TERMINAL PORTUALE DI RAVENNA

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

Genova, 6 luglio 2022

REL-AMB-E-09010

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale

dicca.unige.it

P. IVA 00754150100

+39 010 3352491

Via Montallegro 1, 16145 Genova

direttore@dicca.unige.it



**Università
di Genova**

DICCA DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA
E AMBIENTALE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale

dicca.unige.it

P. IVA 00754150100

+39 010 3352491

Via Montallegro 1, 16145 Genova

direttore@dicca.unige.it



SOMMARIO

1. INTRODUZIONE.....	5
2. CARATTERIZZAZIONE DELLE FORZANTI AMBIENTALI NELL'AREA DI STUDIO	6
3. MODELLAZIONE NUMERICA DELL'IDRODINAMICA E DELLA DISPERSIONE	14
4. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	18
5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI - CMS	28
6. CONCLUSIONI	40

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Localizzazione del punto hindcast DICCA utilizzato per la definizione delle forzanti ambientali in prossimità del porto di Ravenna.	7
Figura 2. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 04.....	10
Figura 3. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 43.....	11
Figura 4. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 82.....	12
Figura 5. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 93.....	13
Figura 6 Limiti della maglia computazionale del modello Delft3D.....	15
Figura 7. Maglia computazionale del modello Delft3D in prossimità del porto di Ravenna.....	16
Figura 8. Quote del fondale (batimetria) interpolate sul dominio computazionale del modello Delft3D. In figura sono anche mostrate le posizioni di presa (intake) e scarico (outfall) per la configurazione progettuale considerata (vedi più avanti nel report).....	17
Figura 9. Scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 4. Le coordinate sono mostrate nel sistema UTM, e sono da moltiplicarsi per 10^5 (ugualmente nelle figure successive)..	20
Figura 10. Scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 4.....	21
Figura 11. Scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 43.....	22
Figura 12. Scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 43.	23
Figura 13. Scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 82.....	24
Figura 14. Scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 82.	25
Figura 15. Scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 93.....	26
Figura 16. Scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 93.	27

Figura 17. Corrente regionale ai bordi del dominio di calcolo, scenario 04. Pannello A: angolo no. 1; pannello B): angolo no. 2; pannello C): angolo no. 3; pannello D): angolo no. 4 (la numerazione degli angoli è visibile in Figura 6). Valori positivi di v_y indicano correnti orientate verso Nord (viceversa, le correnti sono orientate in direzione Sud).

..... 28

Figura 18. Corrente regionale ai bordi del dominio di calcolo, scenario 43. Pannello A: angolo no. 1; pannello B): angolo no. 2; pannello C): angolo no. 3; pannello D): angolo no. 4 (numerazione in Figura 6)..... 29

Figura 19. Corrente regionale ai bordi del dominio di calcolo, scenario 82. Pannello A: angolo no. 1; pannello B): angolo no. 2; pannello C): angolo no. 3; pannello D): angolo no. 4 (la numerazione degli angoli è visibile in Figura 6)..... 30

Figura 20. Corrente regionale ai bordi del dominio di calcolo, scenario 93. Pannello A: angolo no. 1; pannello B): angolo no. 2; pannello C): angolo no. 3; pannello D): angolo no. 4 (la numerazione degli angoli è visibile in Figura 6)..... 31

Figura 21. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro sul fondo. Scenario 4..... 32

Figura 22. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura sul fondo. Scenario 4. 33

Figura 23. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro sul fondo. Scenario 43..... 34

Figura 24. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura sul fondo. Scenario 43. 35

Figura 25. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro sul fondo. Scenario 82..... 36

Figura 26. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura sul fondo. Scenario 82. 37

Figura 27. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro sul fondo. Scenario 93..... 38

Figura 28. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura sul fondo. Scenario 93. 39

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Coordinate del nodo hindcast utilizzato nel prosieguo del report (SR: WGS84). 8

Tabella 2. Settori direzionali degli scenari utilizzati – nodo 000185. 9

Tabella 3. Parametri utilizzati per il modello numerico..... 18

Tabella 4. Condizioni di operatività considerate nel modello numerico. 18



1. INTRODUZIONE

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, la Società Snam FSRU Italia, controllata al 100% da Snam S.p.A ("Snam"), intende sottoporre l'istanza autorizzativa per l'ormeggio di un mezzo navale tipo FSRU (Floating Storage and Regasification Unit) da ormeggiarsi in corrispondenza della piattaforma offshore esistente di Petra (Gruppo PIR) posta a circa 8.5 km a largo di Punta Marina (c.d. Progetto FSRU Ravenna) e delle connesse infrastrutture per l'allacciamento alla rete di trasporto esistente.

L'FSRU sarà in grado di stoccare fino a 170 mila metri cubi di Gas Naturale Liquefatto (GNL), rigassificarlo e trasferirlo in una nuova condotta che lo convoglierà nel punto di connessione alla Rete Gasdotti posto a circa 42 km dal punto di ormeggio presso la piattaforma esistente offshore Petra.

L'FSRU 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 equivalente a circa un sesto della quantità di gas naturale oggi importata dalla Russia.

Il sistema di rigassificazione installato a bordo della FSRU utilizzerà l'acqua di mare come fonte di calore per la vaporizzazione del GNL (direct sea water). Nella condizione di esercizio è previsto, da parte della FSRU, il prelievo e la restituzione dell'acqua di mare. La portata massima di acqua di mare necessaria ai vaporizzatori risulta di circa 18'000 m³/h. La temperatura dell'acqua in uscita dai vaporizzatori è stata impostata considerando un ΔT pari a - 7°C rispetto alla temperatura dell'acqua in entrata.

Per prevenire la crescita di organismi marini nel sistema di acqua di mare della FSRU, è previsto un sistema di iniezione di ipoclorito. L'acqua rilasciata dalla FSRU avrà un contenuto di Cloro compatibile con il limite indicato dalla normativa, pari a 0.2 mg/l (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.).

In fase di predisposizione degli studi ambientali, l'Università degli Studi di Genova è stata incaricata di implementare un modello matematico per la simulazione del contenuto termico e chimico delle acque scaricate 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 portuale, per fornire elementi di valutazione dei potenziali impatti sulla componente.

La simulazione modellistica è stata effettuata in fase di progettazione, considerando la configurazione di progetto in termini di punto di presa e scarico in mare aperto e per diverse condizioni ambientali, al fine di evidenziare eventuali elementi di sensibilità legati alle differenti scelte e consentire di selezionare la configurazione di progetto ottimale anche sulla base di tali elementi.

Il lavoro è stato svolto in collaborazione con il Prof. Giovanni Besio del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università degli Studi di Genova.

Il presente elaborato riporta le informazioni relative all'implementazione del modello, la definizione delle condizioni al contorno ed i risultati per le diverse simulazioni effettuate. Si riportano infine i risultati che permettono di descrivere la dispersione termica e chimica nell'area di ormeggio della FSRU presso la piattaforma Petra, a seconda dei diversi scenari meteo-marini considerati.

2. 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, nelle ultime decadi, soprattutto grazie alla crescita esponenziale della potenza di calcolo dei moderni computer, è stato fatto sempre maggiore affidamento all'utilizzo di programmi di calcolo in grado di realizzare simulazioni numeriche dell'idrodinamica marina e costiera e dei processi di dispersione, sia da un punto di vista euleriano che da un punto di vista lagrangiano.

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 algoritmi di clusterizzazione ("*clustering*"); 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), mantenendo le sue proprietà principali.

Nel presente studio si adotta una metodologia che permette di caratterizzare il clima meteo-marino considerando la velocità del vento, il campo di pressione, la forzante di marea e le condizioni del moto ondoso. Per la costruzione del dataset iniziale viene quindi scelta una



finestra temporale adeguata in funzione del tipo di processo che si vuole studiare, 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.

Le variabili meteo-marine impiegate nel presente studio sono state elaborate dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica ed Ambientale dell'Università di Genova (DICCA; 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 Mediterraneo¹. 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 Ravenna è lo 000185, mostrato in Figura 1 (le coordinate sono riportate in Tabella 1).

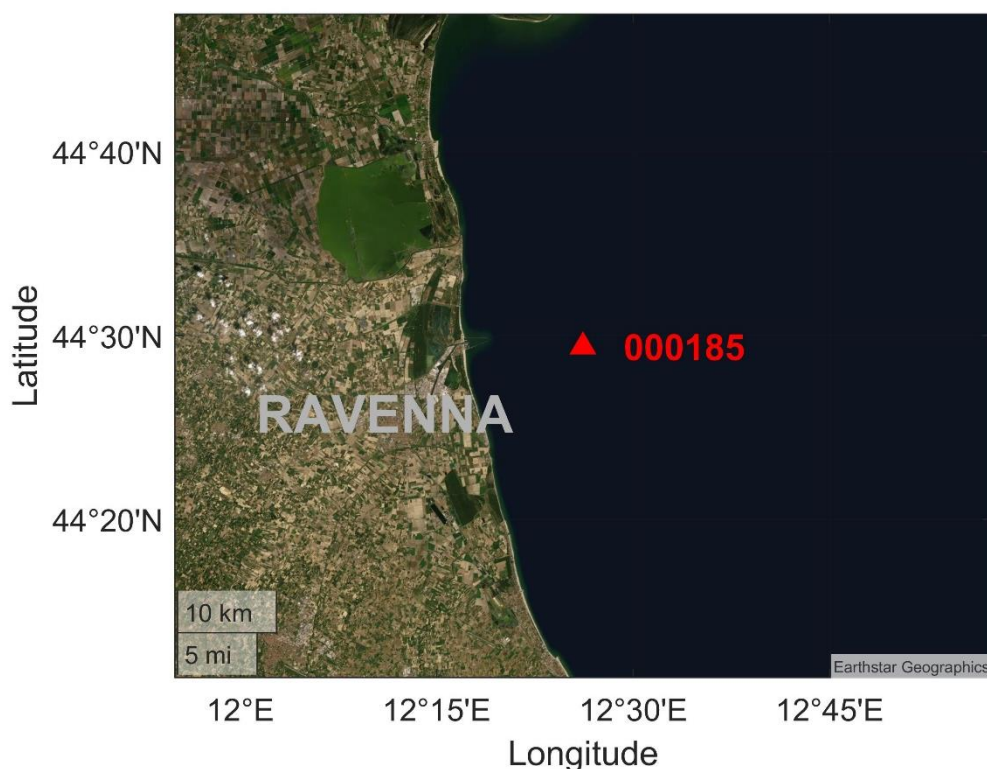


Figura 1. Localizzazione del punto hindcast DICCA utilizzato per la definizione delle forzanti ambientali in prossimità del porto di Ravenna.

¹ 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.

Tabella 1. Coordinate del nodo hindcast utilizzato nel prosieguo del report (SR: WGS84).

Nodo	Lon	Lat
000185	12.436	44.490

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 di picco (T_p e θ_p , rispettivamente) delle componenti di velocità longitudinale/latitudinale del vento (w_x/w_y) e della pressione media sul livello del mare ($mslp$), e sono state selezionate serie temporali di una settimana tramite il *Maximum Dissimilarity Algorithm* (MDA)². 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 seguito, sono state ricavate le forzanti di marea (di seguito $\Delta\eta$) nella posizione selezionata grazie al Software di Previsione di Marea (TPXO.3) fornito dall'Università dello Stato dell'Oregon³. L'escursione di marea è stata estratta nello stesso intervallo di tempo e con la stessa frequenza dei dati meteomarini di *hindcast*.

Infine, sono stati estratti i dati di corrente a scala di bacino dal repository del Copernicus Marine Service (di seguito abbreviato in CMS; <https://marine.copernicus.eu/it>). Anche in questo caso, le serie temporali sono state selezionate in concomitanza agli scenari meteomarini precedentemente identificati. Tuttavia, questi dati sono stati inclusi nel processo di modellazione solo in un secondo momento, al fine di confrontare i risultati ottenuti tramite i due diversi approcci (ovvero, con o senza i dati di corrente a scala regionale), e ottenere una stima di attendibilità dei risultati ottenuti dal modello numerico utilizzato (Paragrafo 3).

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 Ravenna. L'estensione temporale degli scenari è fissata a 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.

I 4 scenari specifici considerati sono lo 04, 43, 82, 93 derivanti dall'analisi cluster; tali scenari differiscono per le condizioni di intensità e direzione di provenienza di vento e onde, così come mostrato nelle figure successive. Una sintesi delle forzanti ambientali associate a ciascun cluster è di seguito riportata (la velocità e la direzione del vento, espressa secondo la convenzione nautica, sono definite come U_w e θ_w).

² 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.

³ Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 19(2), 183-204.



Lo **scenario 04** (Figura 2) descrive un evento meteo-marino di intensità medio-alta, caratterizzato da due picchi all'inizio e alla fine della mareggiata in riferimento a vento ed onde, le cui direzioni sono stabilmente associate ai settori di Grecale e Levante.

Lo **scenario 43** (Figura 3) mostra uno stato di bonaccia, associato a stati di mare e vento di scarsa intensità, e con direzioni di propagazione variabili in tutto lo spazio trigonometrico (i.e., $0-2\pi$). Tale scenario rappresenta uno stato critico, poiché non favorisce la dispersione ed il rimescolamento dei reflui.

Lo **scenario 82** (Figura 4) è associato ad una mareggiata di intensità medio/alta, il cui picco è centrato rispetto alla settimana considerata. Le direzioni delle onde sono tipiche del settore di Scirocco, mentre i venti spirano in prevalenza da Nord, sebbene i dati presentino una marcata variabilità.

Lo **scenario 93** (Figura 5) si presenta con caratteristiche direzionali simili a quelle dello scenario 82, con intensità di vento e onda tuttavia inferiori a quest'ultimo e caratterizzate da profili più irregolari.

In Tabella 2 si mostra una sintesi delle caratteristiche di onda e vento associate agli scenari selezionati.

Tabella 2. Settori direzionali degli scenari utilizzati – nodo 000185.

N° Scenario	Direzione del moto ondoso	Direzione del vento
4	Levante	Grecale/Levante
43	Variabile su tutta la rosa	Variabile su tutta la rosa
82	Levante/Scirocco	Variabile (prevalente da Nord)
93	Levante	Variabile (prevalente da Nord)



SCENARIO 4

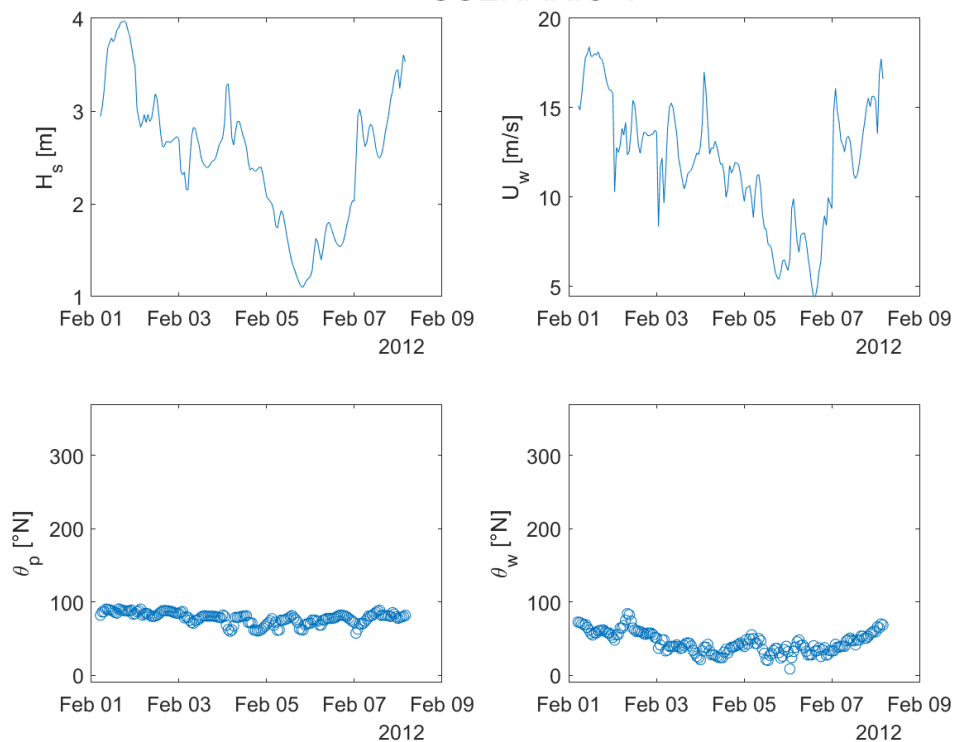


Figura 2. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 04.



SCENARIO 43

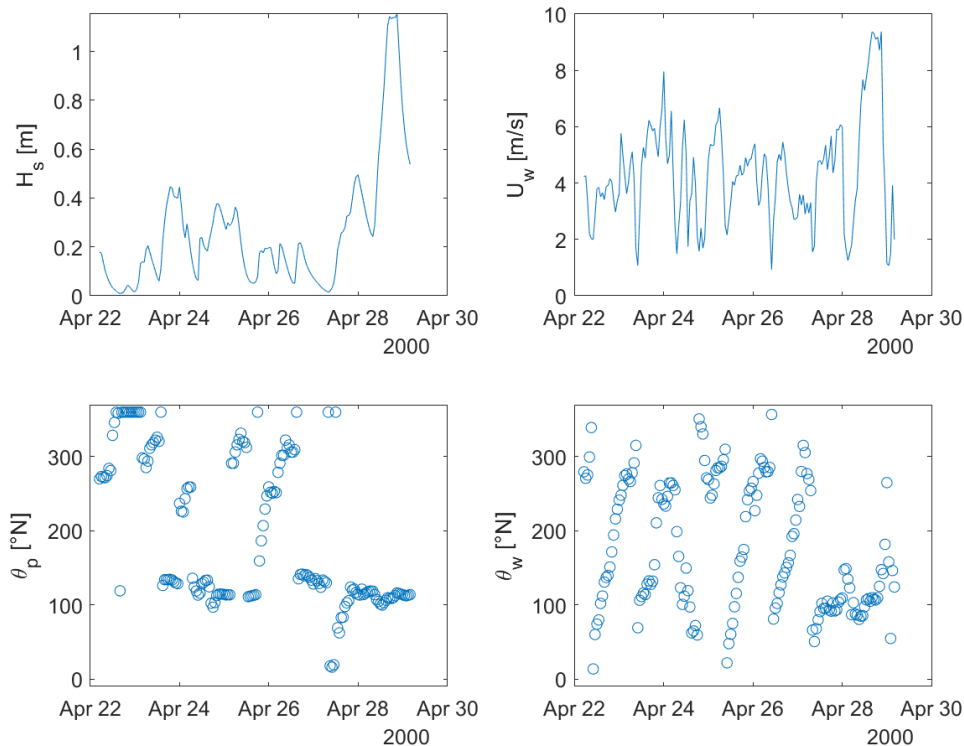


Figura 3. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 43.



SCENARIO 82

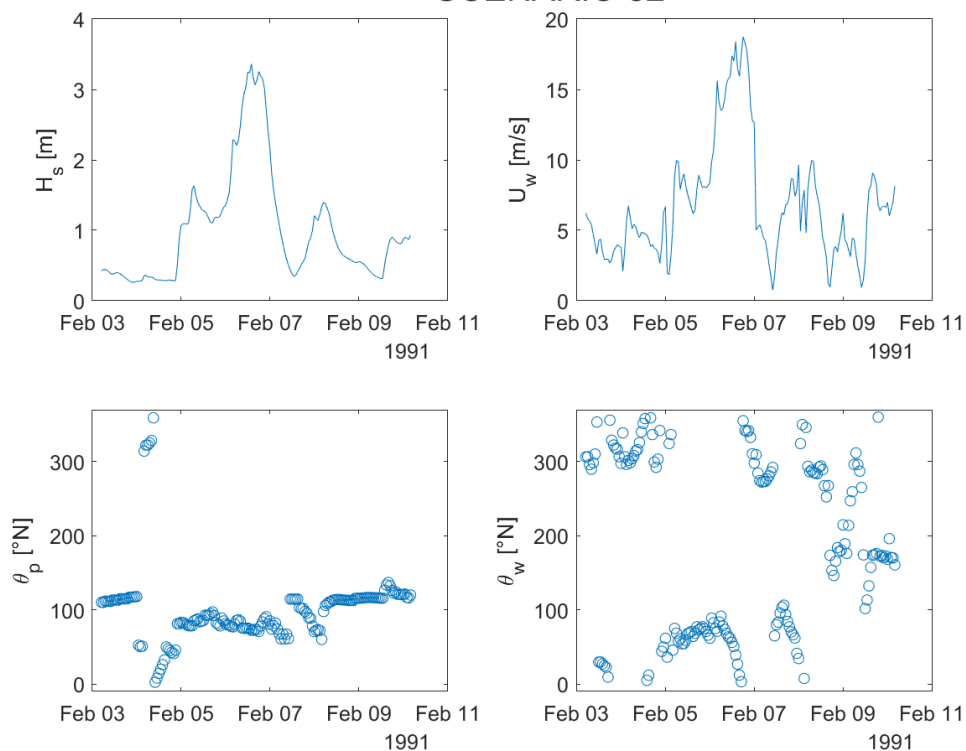


Figura 4. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 82.



SCENARIO 93

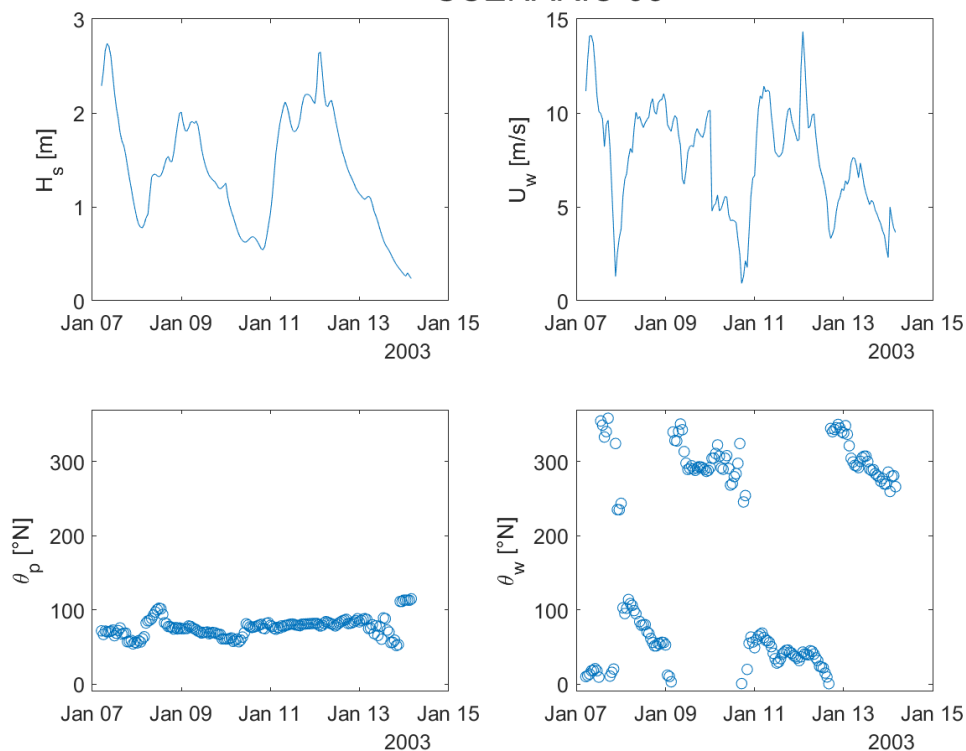


Figura 5. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 93.



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 è stato impiegato il modello numerico Delft3D, sviluppato e mantenuto da Deltares (precedentemente Delft Hydraulics). 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 e interagiscono tra loro, scambiandosi le opportune informazioni. Delft3D-FLOW è uno di questi moduli. Esso è un codice che simula l'idrodinamica e il trasporto, prendendo in considerazione una vasta gamma di forzanti, quali eventi meteorologici, maree, scarichi antropici, eccetera.

Le equazioni di governo sono costituite dalla equazione di continuità e dall'equazione della quantità di moto lungo le due direzioni orizzontali. Il modello risolve le equazioni RANS con approssimazione idrostatica. La velocità verticale è ottenuta dall'equazione di continuità. Il modello impostato in questa maniera è un modello così detto Quasi-3D, ovvero si riesce a risolvere anche la componente verticale del moto ma non tramite la soluzione dell'equazione della quantità di moto lungo l'asse verticale, ma tramite l'impiego dell'equazione di continuità una volta risolte le equazioni della quantità di moto lungo le direzioni orizzontali.

Per poter provvedere alla soluzione numerica del problema bisogna quindi definire alcune condizioni di chiusura e al contorno in modo che il modello abbia tutte le informazioni necessarie per poter evolvere nel tempo e nello spazio per ricavare la soluzione del campo di moto. In particolare, è necessario fornire un modello di turbolenza e adeguate condizioni al contorno. Per quanto riguarda la chiusura della turbolenza è stato impiegato un classico modello $k - \varepsilon$, reso disponibile nella stessa *suite* di Delft3D. Per quanto riguarda le condizioni al contorno il modello può essere forzato sulla superficie libera da un vento e una pressione atmosferica variabile nel tempo e nello spazio. 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.

La griglia computazionale può essere cartesiana rettangolare oppure curvilinea. L'utente può decidere se realizzare una griglia rettangolare (anche a passo variabile) o creare una griglia curvilinea a partire da una serie di *splines*. La schematizzazione per la soluzione numerica è impostata su una maglia del tipo "Arakawa-C". Nel presente studio è stata impiegata una maglia cartesiana a risoluzione variabile, con infittimento progressivo in prossimità della FSRU (si vedano a tal proposito Figura 6 e Figura 7).

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>). Le quote del fondale interpolate sulla maglia del modello possono essere apprezzate in Figura 8.

Il modello è stato forzato in un primo momento con i soli scenari meteo-marini di cui al Paragrafo 2, imponendo le serie di onda e marea sul lato Est della maglia, mentre i dati di vento interessavano l'intero dominio di calcolo. Successivamente, sono state replicate le simulazioni imponendo le serie del CMS sui lati Nord e Sud del dominio computazionale (cfr. Figura 7).

Da un punto di vista numerico le equazioni che governano il problema sono risolte tramite il metodo ADI (Alternating Direction Implicit method). Il metodo ADI suddivide l'avanzamento nel tempo in due fasi successive. Ogni fase è composta da un intervallo di tempo intermedio. In entrambe le fasi, tutti i termini delle equazioni del modello sono risolti con almeno un'accuratezza al secondo ordine di precisione nello spazio. Per la discretizzazione spaziale dei termini di avvezione orizzontale sono disponibili tre diverse opzioni. I primi due metodi sono chiamati WAQUA e Cyclic e non impongono alcuna restrizione sull'intervallo temporale di integrazione. Il terzo metodo è chiamato *flooding* e viene utilizzato in particolare per simulare zone soggette a cicli di asciutto/bagnato, ovvero per zone che non presentano costantemente la presenza di acqua.

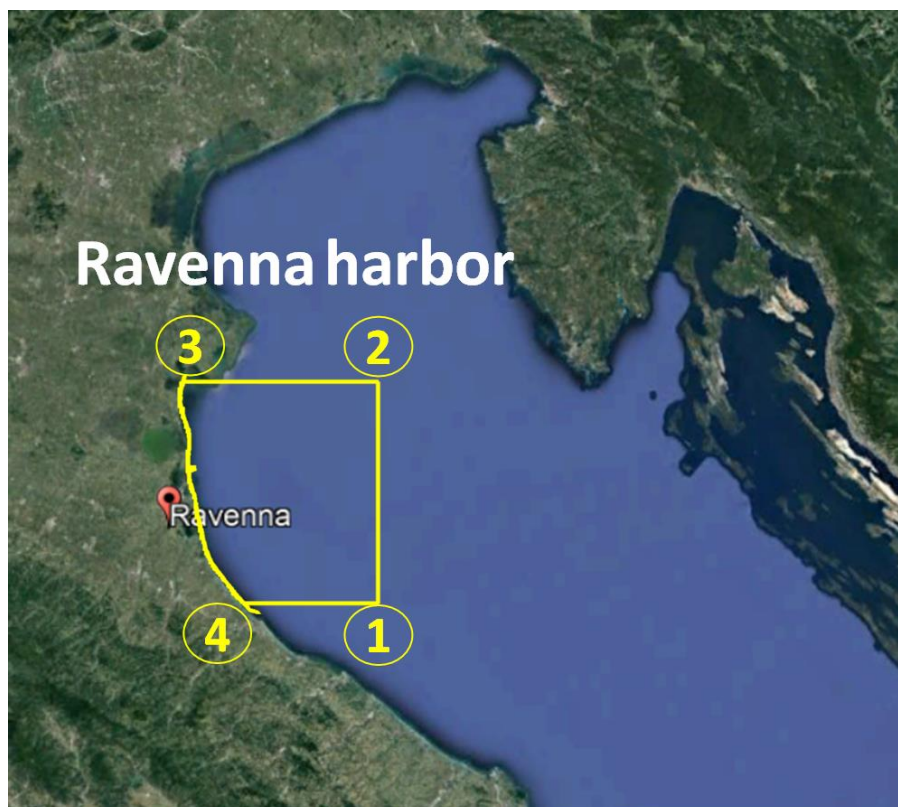


Figura 6 Limiti della maglia computazionale del modello Delft3D.

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. In particolare, nel caso della temperatura, della concentrazione di cloro e dei sedimenti, è necessario fornire le caratteristiche delle diverse quantità (condizioni iniziali e condizioni al contorno) e le caratteristiche di diffusività turbolenta.

Nel seguito, si riportano tutte le informazioni specifiche relative all'implementazione del modello numerico per il presente studio.

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. Ciò corrisponde a **velocità di flusso** pari a 3.25 m/s, data la portata dell'impianto (18'000 m³/ora equivalgono a 5 m³/s). Il valore in uscita della **concentrazione di cloro** è stato imposto pari a 0.0002 kg/m³ secondo quanto indicato negli input di progetto e in accordo con i limiti indicati nell'Allegato V alla parte III del D.lgs. 152/2006. Infine, per quanto riguarda le **temperature**, è stato fatto riferimento a una condizione invernale "normale" in cui la temperatura dell'acqua del mare è stata presa pari a 13°C. Per quanto riguarda la temperatura dello scarico della FSRU è stato sempre imposto un ΔT pari a -7°C tra la presa e lo scarico. 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. Una sintesi dei settaggi del modello è visibile in Tabella 3 e Tabella 4.

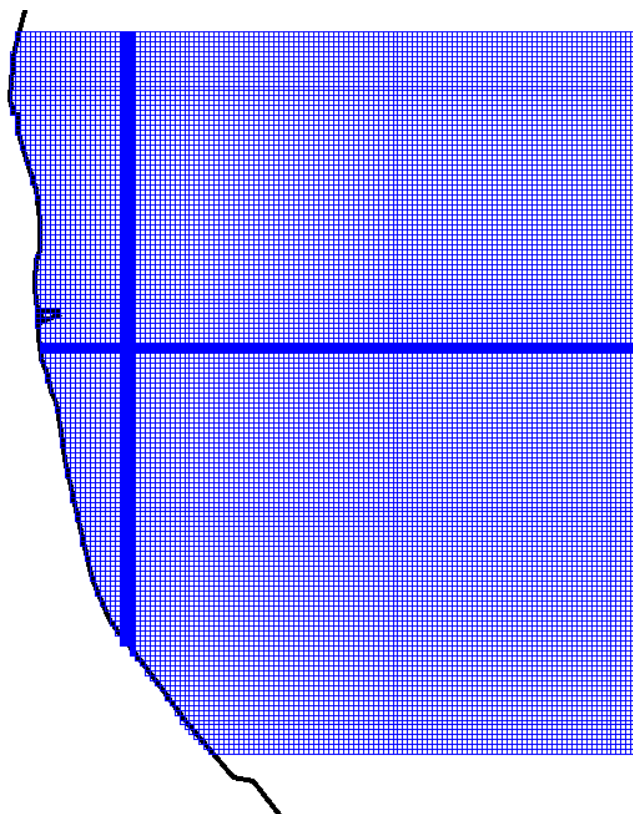


Figura 7. Maglia computazionale del modello Delft3D in prossimità del porto di Ravenna.

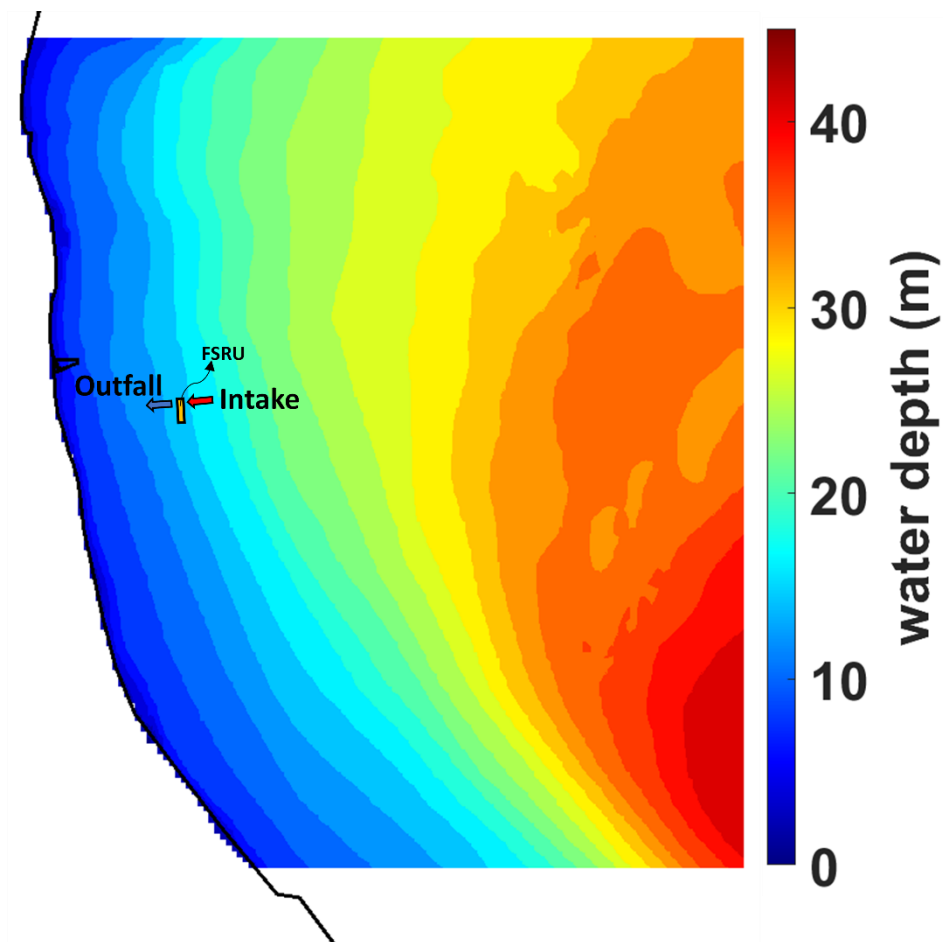


Figura 8. Quote del fondale (batimetria) interpolate sul dominio computazionale del modello Delft3D. In figura sono anche mostrate le posizioni di presa (intake) e scarico (outfall) per la configurazione progettuale considerata (vedi più avanti nel report)



Tabella 3. Parametri utilizzati per il modello numerico.

Parametri fisici			
Viscosità		Vento	
Modello di turbolenza	$k - \varepsilon$	Interpolazione	lineare
Viscosità turbolenta orizzontale [m ² /s]	0.1	Coefficiente di attrito	0,0063
Viscosità turbolenta verticale [m ² /s]	1 E-06		
Diffusività turbolenta orizzontale [m ² /s]	1		
Diffusività turbolenta verticale [m ² /s]	1 E-06		

Tabella 4. Condizioni di operatività considerate nel modello numerico.

PRESA				
Portata [m ³ /s]	Velocità [m/s]	Salinità [ppt]	Temperatura [°C]	Cloro [kg/m ³]
5	3.25	37	13	0
SCARICO				
Portata [m ³ /s]	Velocità [m/s]	Salinità [ppt]	Temperatura [°C]	Cloro [kg/m ³]
5	3.25	36	T presa -7°C	0.0002

4. 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, e fornire il tempo necessario affinché i fenomeni dispersivi si sviluppino completamente, sia nel campo vicino sia in quello intermedio e in quello lontano (un recente studio ha dimostrato come l'intervallo di correlazione di una tempesta all'interno del Mediterraneo è di circa tre giorni⁴). Tuttavia, per facilitare la lettura del presente report, vengono presentate le distribuzioni dei processi fisici di interesse per un numero ridotto di istanti temporali nell'arco della durata degli scenari selezionati (ovvero una settimana): in particolare, in riferimento alle mappe di dispersione della temperatura e del cloro, si riportano i risultati relativi ad una serie di intervalli temporali pari a 1 ora, 12 ore, 24 ore, 48 ore, 96 ore e 166 ore dall'inizio della simulazione, in riferimento alla quota del fondale. Questa scelta si rivela cautelativa poiché l'acqua più fredda, essendo più pesante, tende a defluire verso il

⁴ Cremonini, G., De Leo, F., Stocchino, A., Besio, G. 2021. On the selection of timarying scenarios of wind and ocean waves: Methodologies and applications in the North Tyrrhenian Sea. *Ocean Modelling*, 163.



basso, dove si riscontrano di conseguenza le temperature minori e le maggiori concentrazioni di soluti (in questo caso il cloro). In Appendice sono comunque allegati i risultati relativi alla superficie libera e ad uno strato intermedio (posto a profondità pari a ≈ -5 m).

I risultati di seguito mostrati fanno riferimento alle simulazioni condotte senza i dati del CMS, ovvero associate alle sole forzanti di vento, onda, ed escursione mareale.

Dall'analisi delle Figure sottostanti (Figura 9-Figura 16), si osserva come le concentrazioni di cloro e il gradiente di temperatura diffondano in modo rapido in corrispondenza degli scenari meteomarini 4, 82 e 93. Sia la concentrazione di cloro che il gradiente termico indotto sono immediatamente diluiti in prossimità dello scarico della FSRU, pertanto, lungo tutta la durata delle simulazioni, i valori di temperatura e concentrazione di cloro nel dominio di calcolo si mantengono abbondantemente al di sopra (nel caso della temperatura) ed al di sotto (nel caso del cloro) rispetto ai valori imposti allo scarico. Per tutti e tre gli scenari di cui sopra, la concentrazione di cloro e il gradiente termico sono dispersi in direzione Nord-Sud in virtù delle correnti indotte da vento e onde. Fa eccezione lo scenario 82 (Figura 13 e Figura 14), le cui direzioni negli istanti finali sono infatti ascrivibili al settore di Mezzogiorno (cfr. Figura 4). Lo scenario meteomarino 43 merita un'analisi separata dalle precedenti. Essendo lo stesso associato a condizioni di bonaccia, non si riscontra una diffusione altrettanto immediata di cloro e gradiente termico, le cui distribuzioni permangono in prossimità dello scarico della FSRU (Figura 11 e Figura 12). Tuttavia, giova osservare come, anche in questo caso, la concentrazione di cloro si mantenga abbondantemente al di sotto del limite imposto da normativa, e il gradiente termico non sia significativamente marcato (le differenze massime rispetto alla temperatura ambiente si assestano sugli 0.5° ; si notino nelle figure i limiti delle scale di valori impiegate per la restituzione dei risultati).

Infine, si rileva come i risultati su dispersione di cloro e temperatura sostanzialmente non differiscano per gli altri strati verticali considerati, sebbene si riscontrino delle differenze nelle direzioni delle correnti marine indotte, le quali sono assimilabili per gli strati intermedio e al fondo, mentre sono fortemente influenzate dalla velocità del vento per quanto riguarda lo strato superficiale. Ad ogni modo, poiché lo scarico avviene ben al di sotto della superficie libera, tali differenze non si riverberano sulle distribuzioni areali di cloro e temperatura, potendosi estendere a queste ultime le considerazioni poc'anzi avanzate; si vedano a tal proposito le mappe in Appendice. Sempre in Appendice, si mostrano inoltre degli ingrandimenti sull'area prospiciente il rilascio della FSRU per facilitare la comprensione dei risultati.

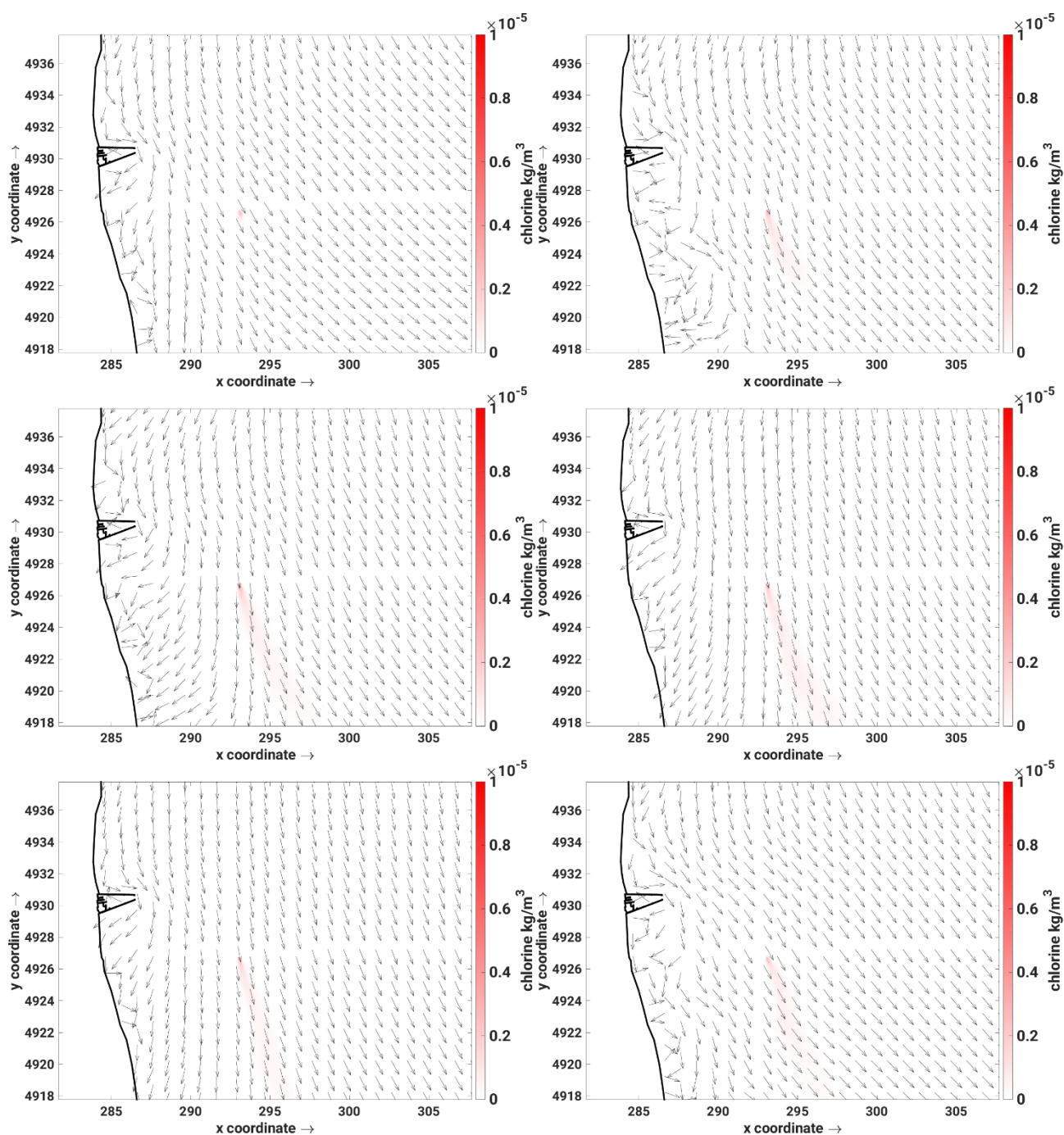


Figura 9. Scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 4. Le coordinate sono mostrate nel sistema UTM, e sono da moltiplicarsi per 10^5 (ugualmente nelle figure successive)

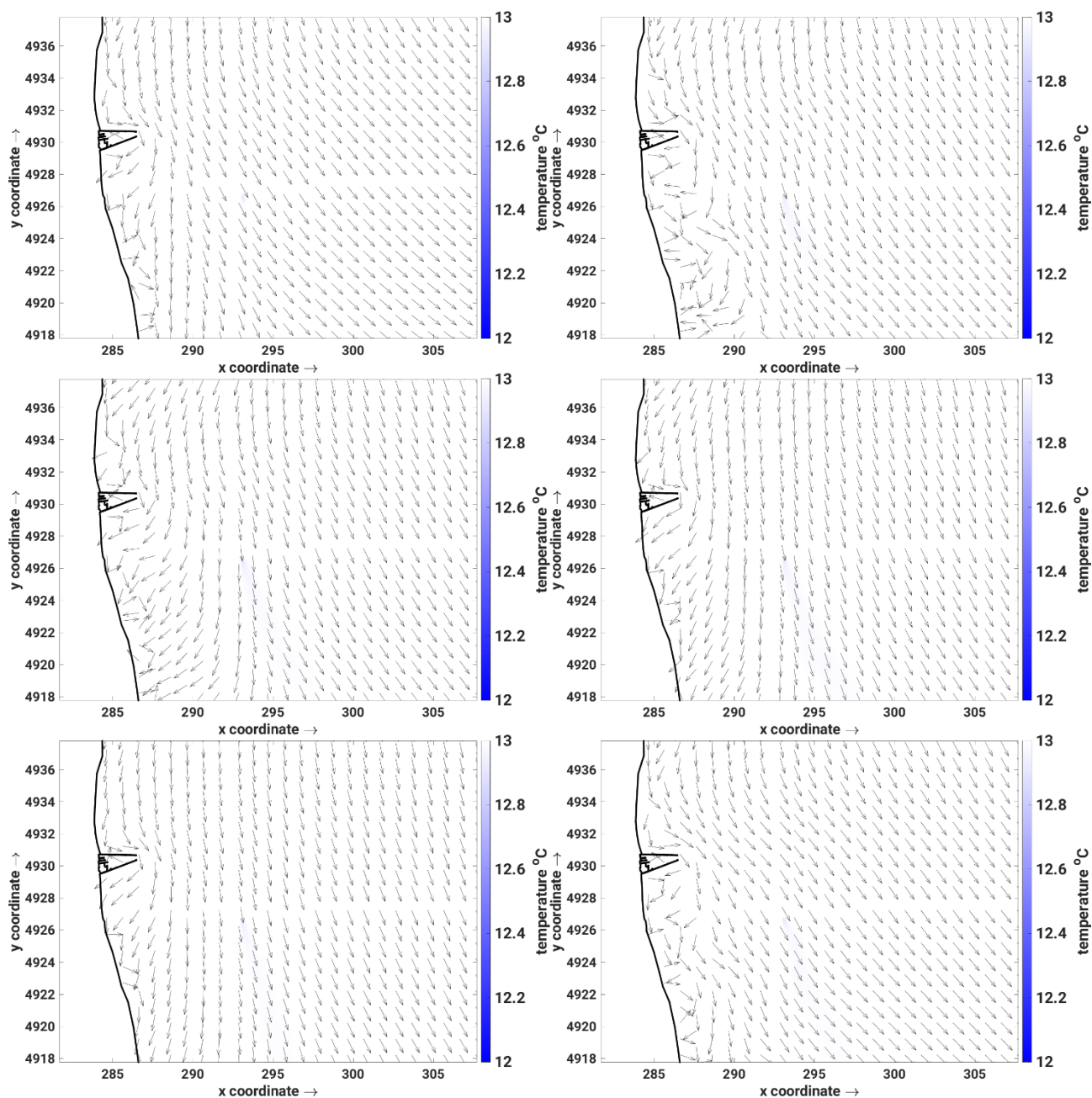


Figura 10. Scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 4.

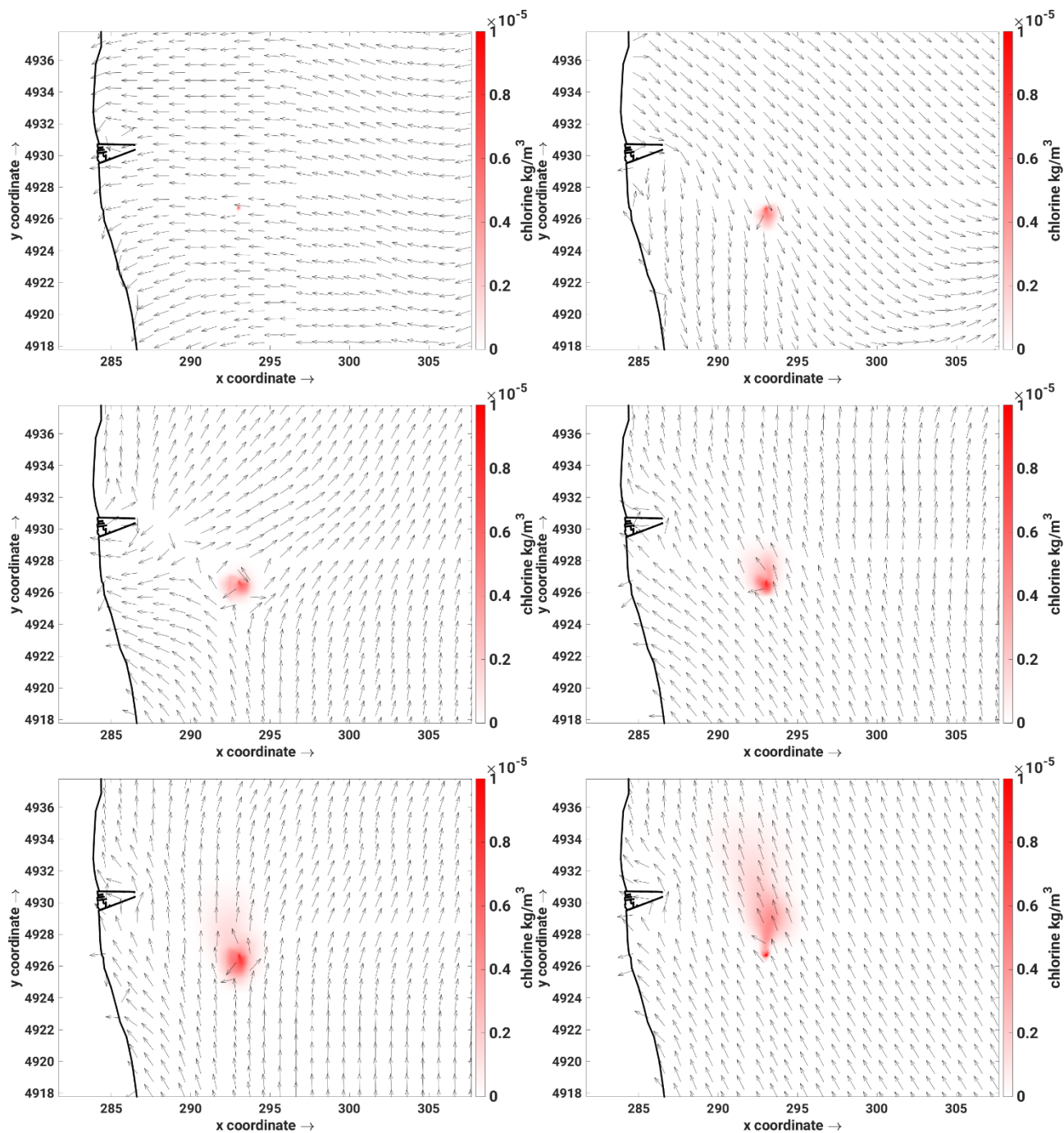


Figura 11. Scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 43.

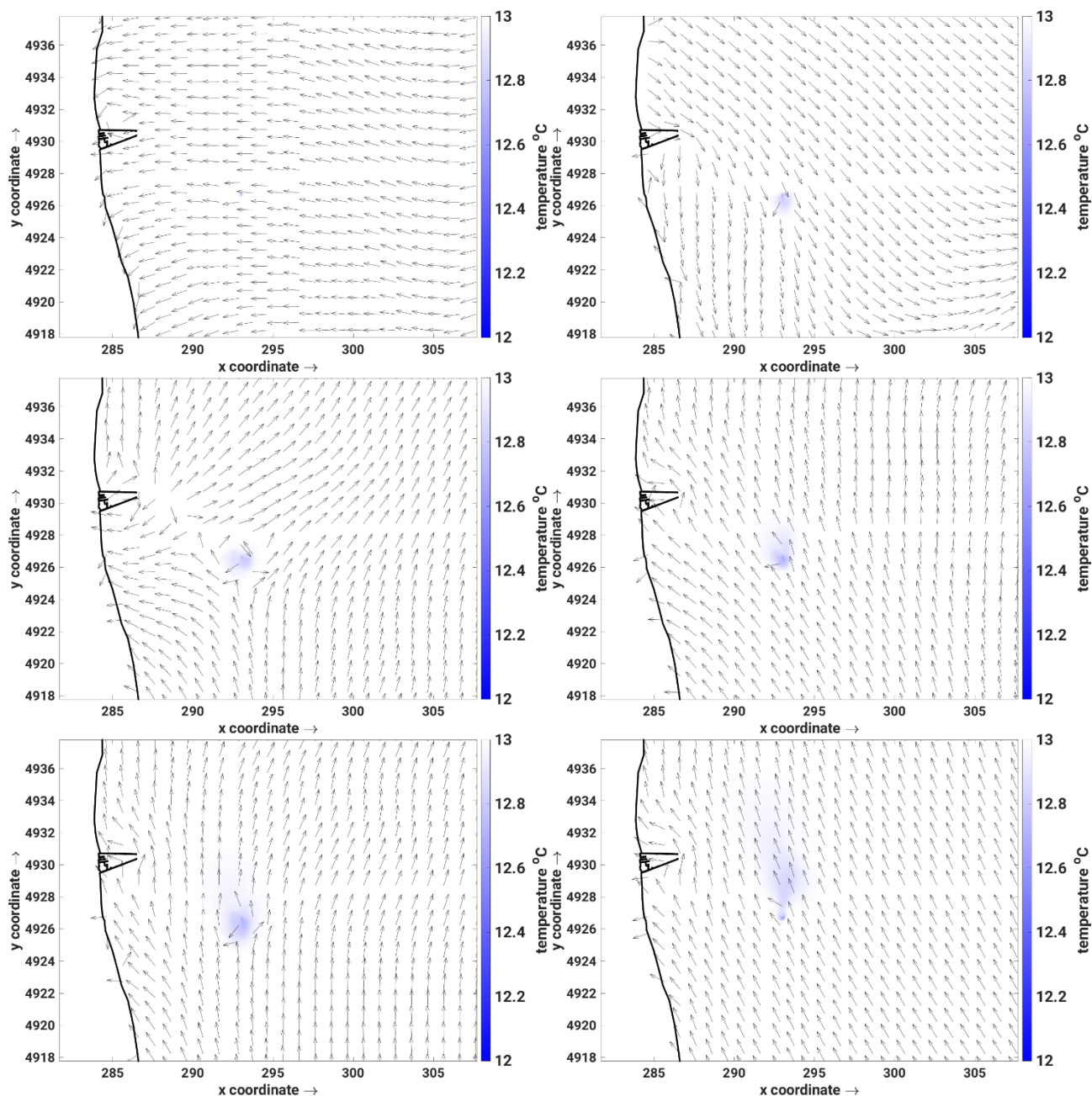


Figura 12. Scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 43.

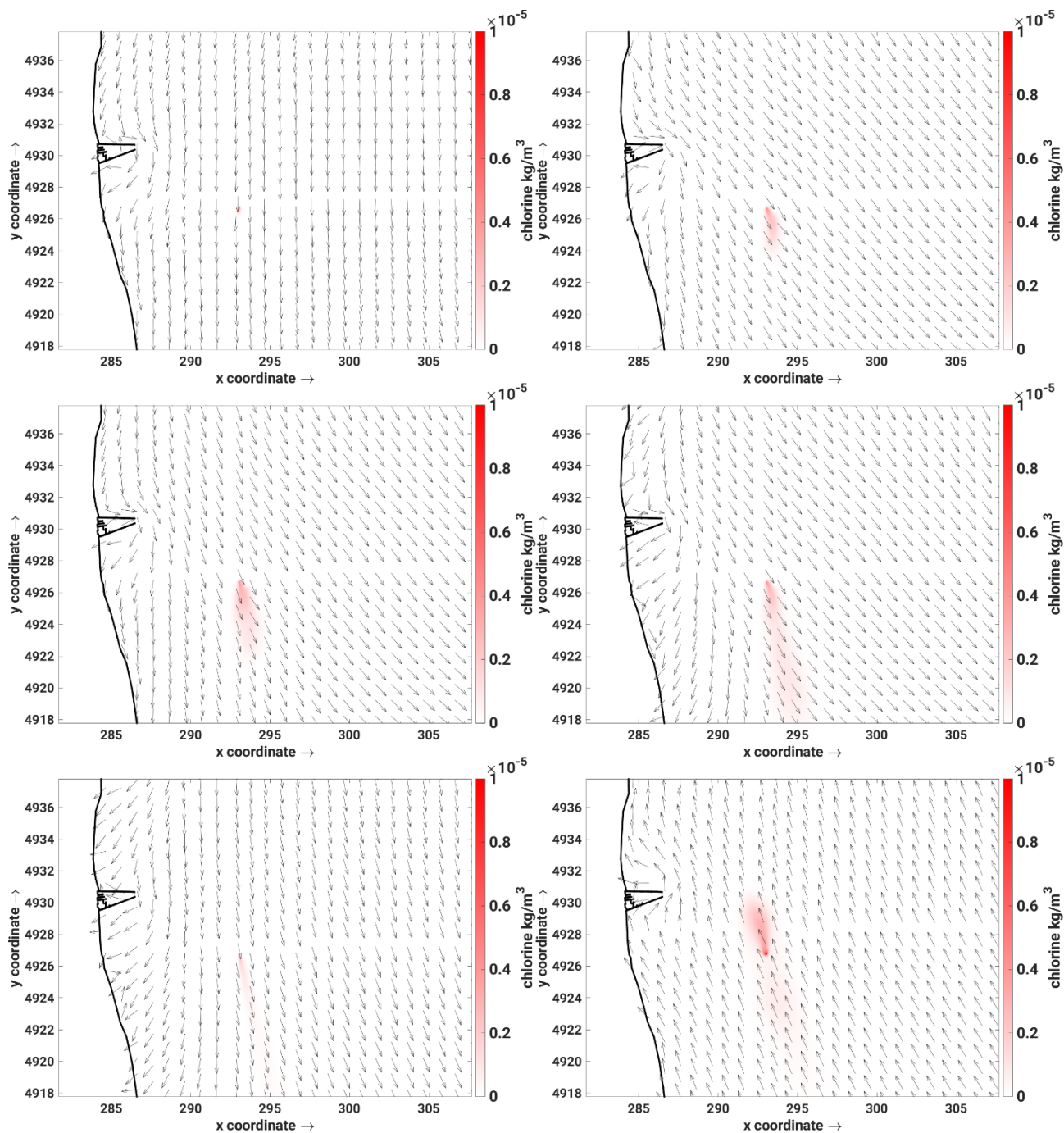


Figura 13. Scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 82.

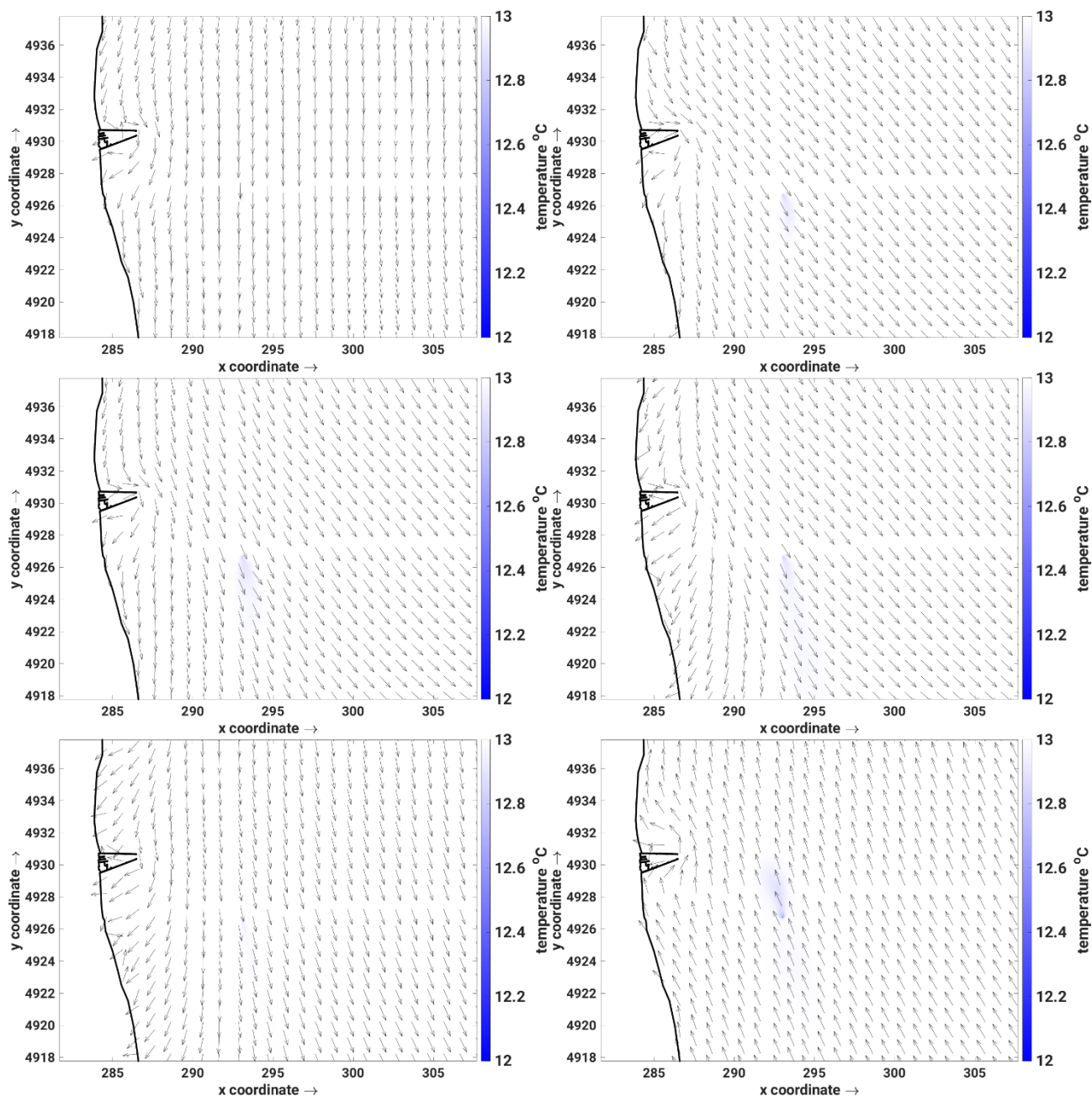


Figura 14. Scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 82.

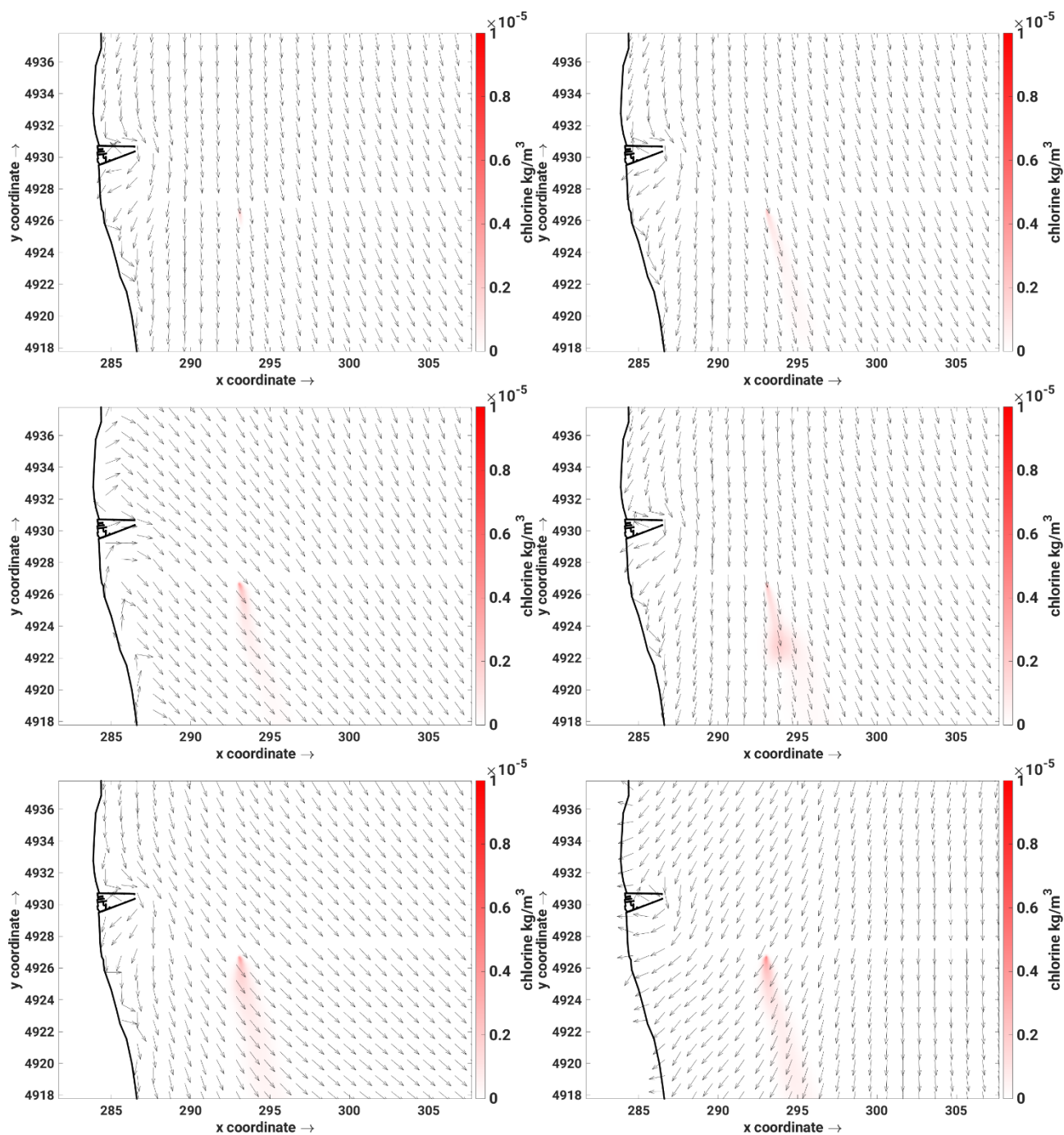


Figura 15. Scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 93.

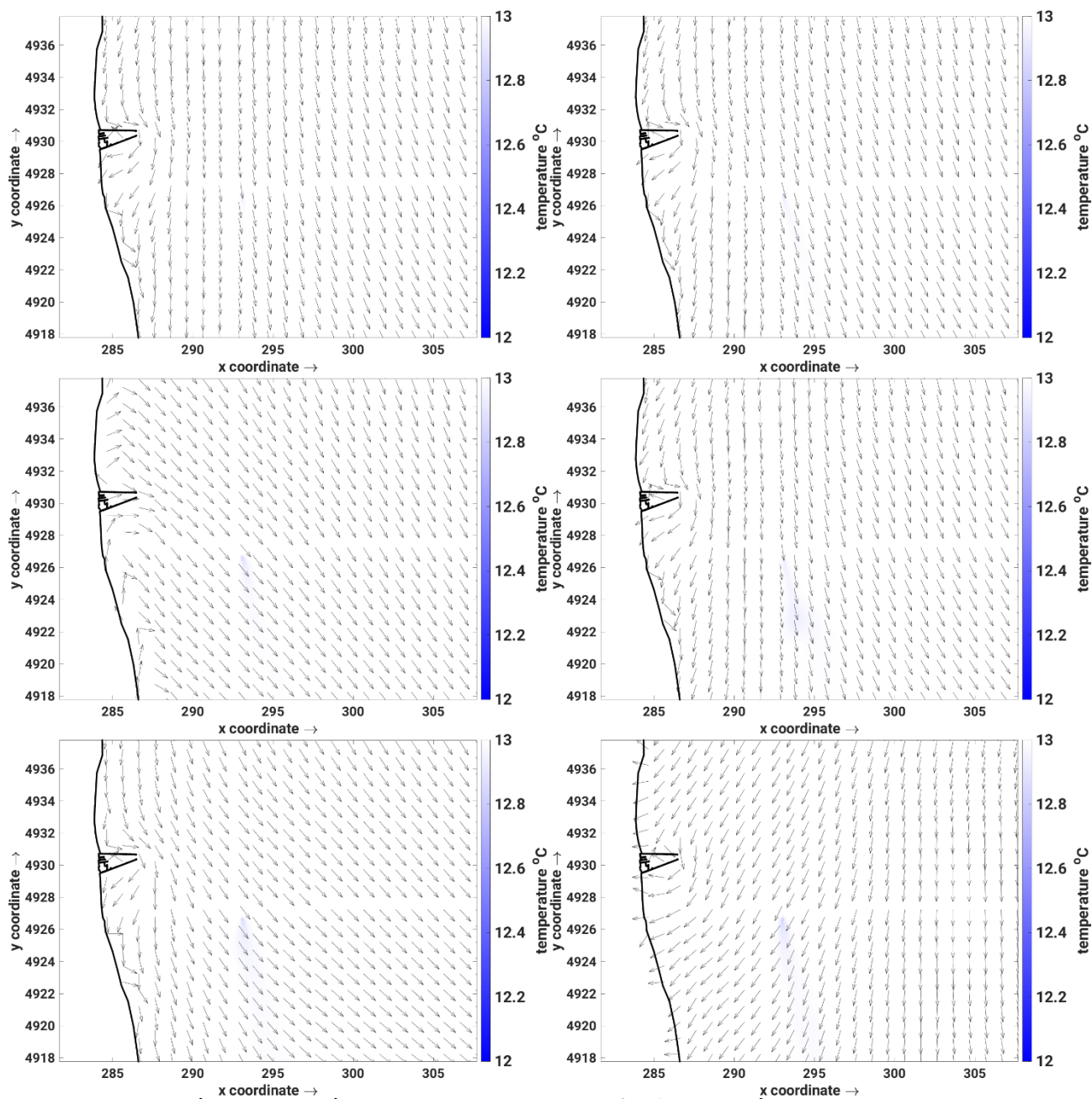


Figura 16. Scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 93.

5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI - CMS

Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle simulazioni effettuate considerando, in aggiunta alle forzanti usate per le analisi mostrate nella precedente sezione, le correnti regionali fornite dal CMS. Le componenti normali di velocità della corrente sui lati Nord e Sud del dominio di calcolo (i.e., l'unica componente risolvibile dal modello) sono mostrate nelle figure da Figura 17 a Figura 20.

I risultati della concentrazione di cloro e del gradiente termico sono visibili nelle figure da Figura 21 a Figura 28, e mostrano andamenti simili a quelli mostrati in assenza dei dati CMS per gli scenari 4, 82 e 92. Le uniche differenze rilevanti si riscontrano nel caso dello scenario meteo-marino 43: in questo caso, le forzanti indotte da onda e vento sono del tutto trascurabili (cfr. Figura 3), dunque le direzioni risultanti delle correnti meteo-marine sono dominate dalle correnti regionali, le quali tuttavia non presentano intensità tale da favorire la dispersione di cloro e gradiente termico nell'arco della settimana (si confermano ad ogni modo valori trascurabili sia per quanto riguarda la concentrazione di cloro che in riferimento al deficit di temperatura).

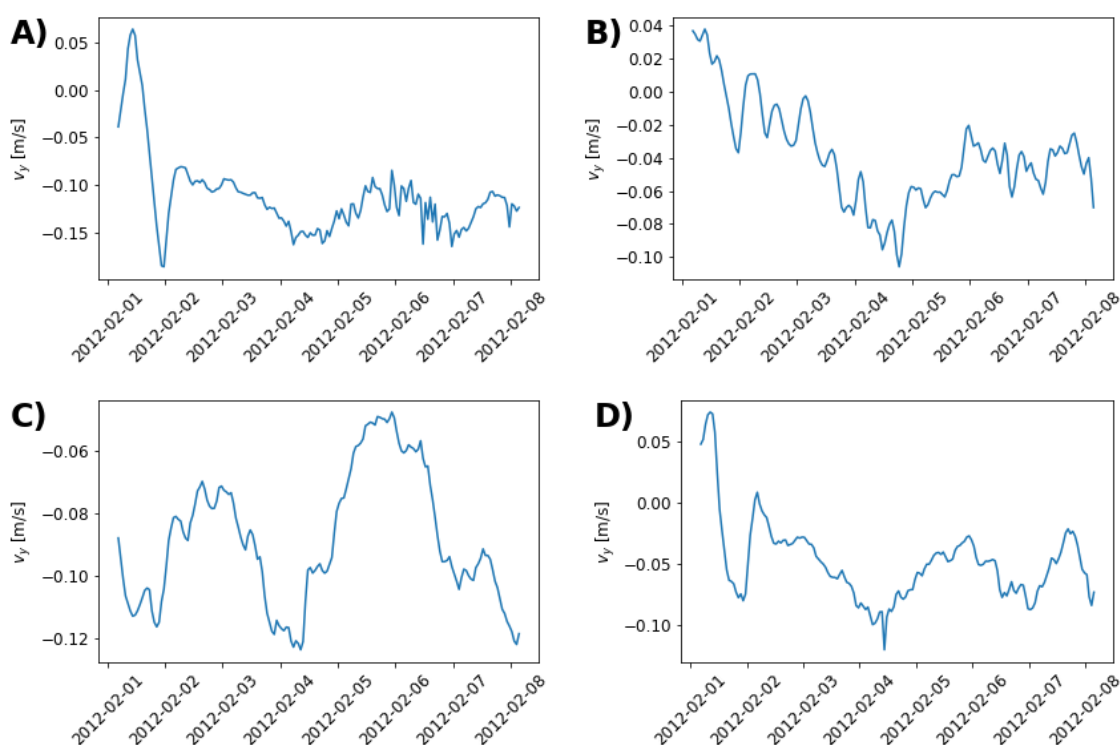
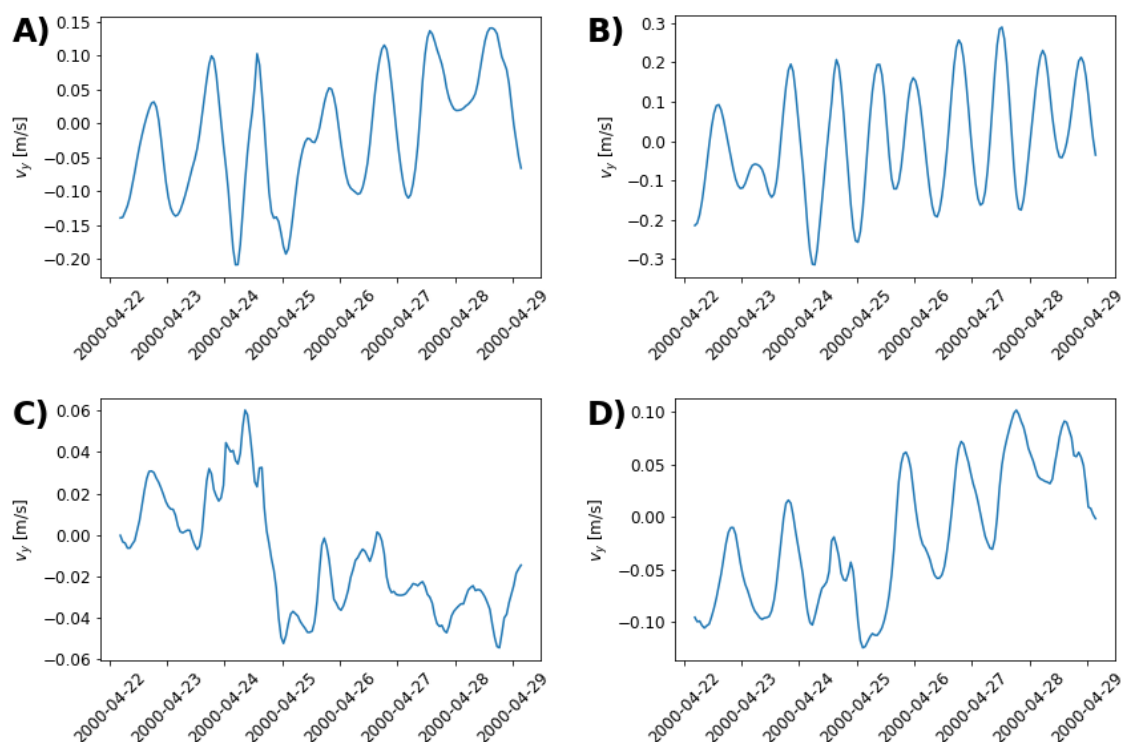
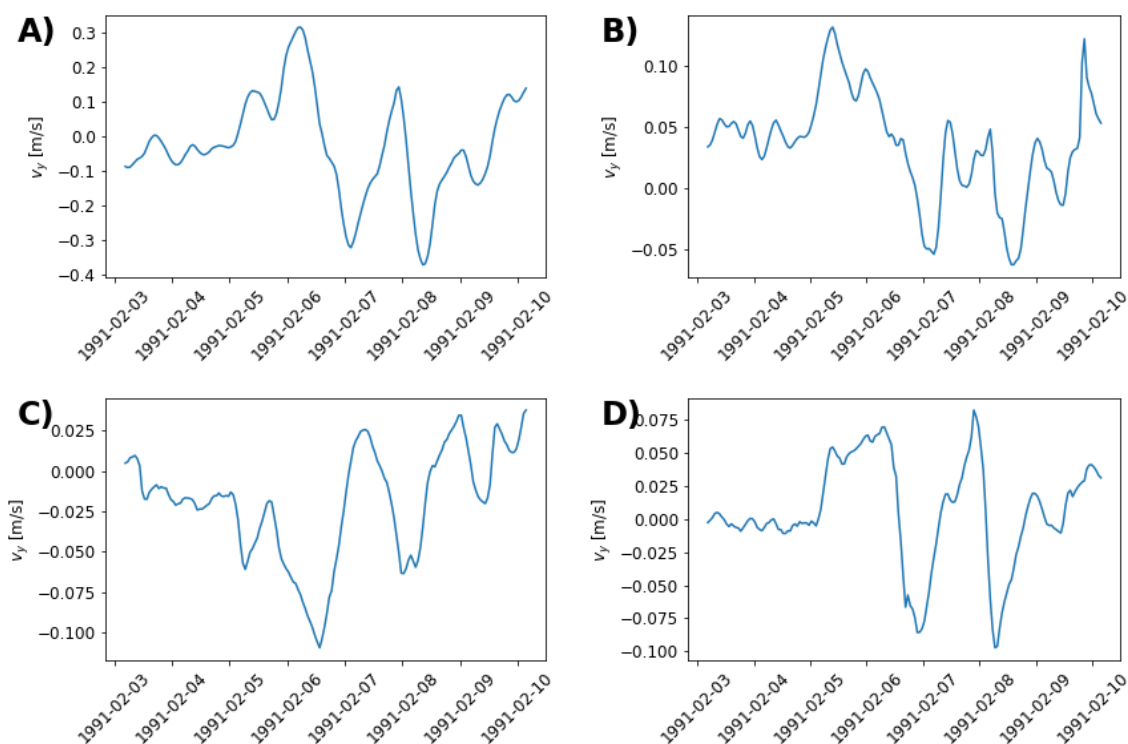


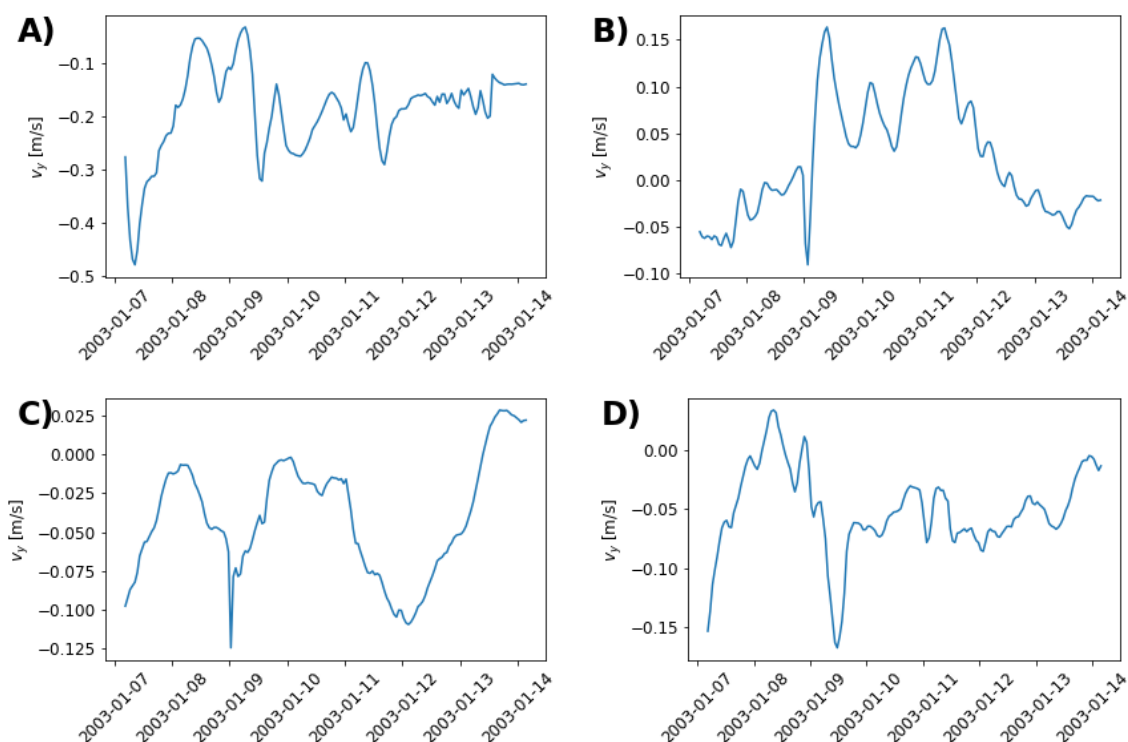
Figura 17. Corrente regionale ai bordi del dominio di calcolo, scenario 04. Pannello A: angolo no. 1; pannello B): angolo no. 2; pannello C): angolo no. 3; pannello D): angolo no. 4 (la numerazione degli angoli è visibile in Figura 6). Valori positivi di v_y indicano correnti orientate verso Nord (viceversa, le correnti sono orientate in direzione Sud).



*Figura 18. Corrente regionale ai bordi del dominio di calcolo, scenario 43.
Pannello A: angolo no. 1; pannello B): angolo no. 2; pannello C): angolo
no. 3; pannello D): angolo no. 4 (numerazione in Figura 6).*



*Figura 19. Corrente regionale ai bordi del dominio di calcolo, scenario 82.
Pannello A: angolo no. 1; pannello B): angolo no. 2; pannello C): angolo
no. 3; pannello D): angolo no. 4 (la numerazione degli angoli è visibile in
Figura 6).*



*Figura 20. Corrente regionale ai bordi del dominio di calcolo, scenario 93.
Pannello A: angolo no. 1; pannello B): angolo no. 2; pannello C): angolo
no. 3; pannello D): angolo no. 4 (la numerazione degli angoli è visibile in
Figura 6).*

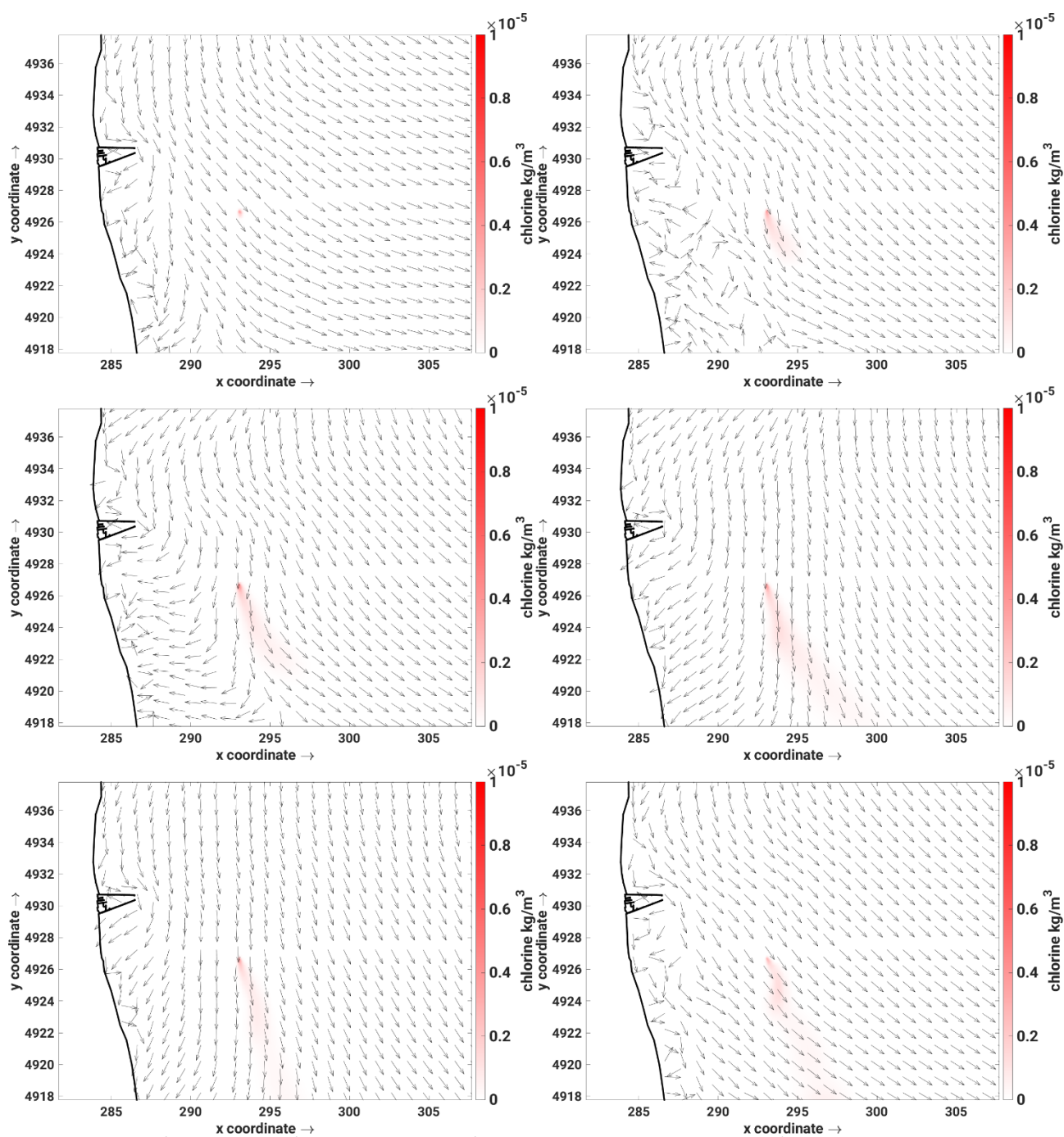


Figura 21. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro sul fondo. Scenario 4.

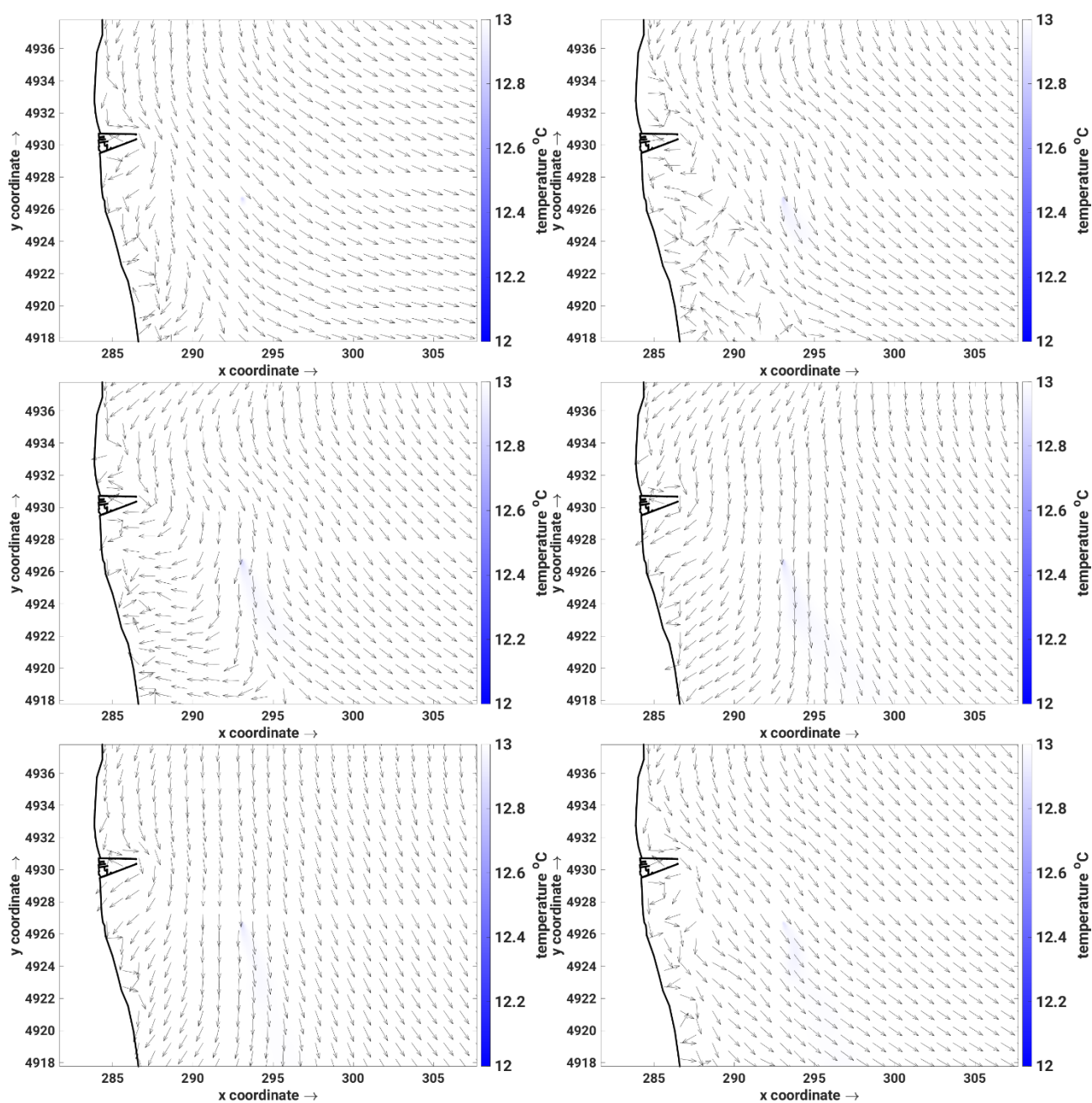


Figura 22. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura sul fondo. Scenario 4.

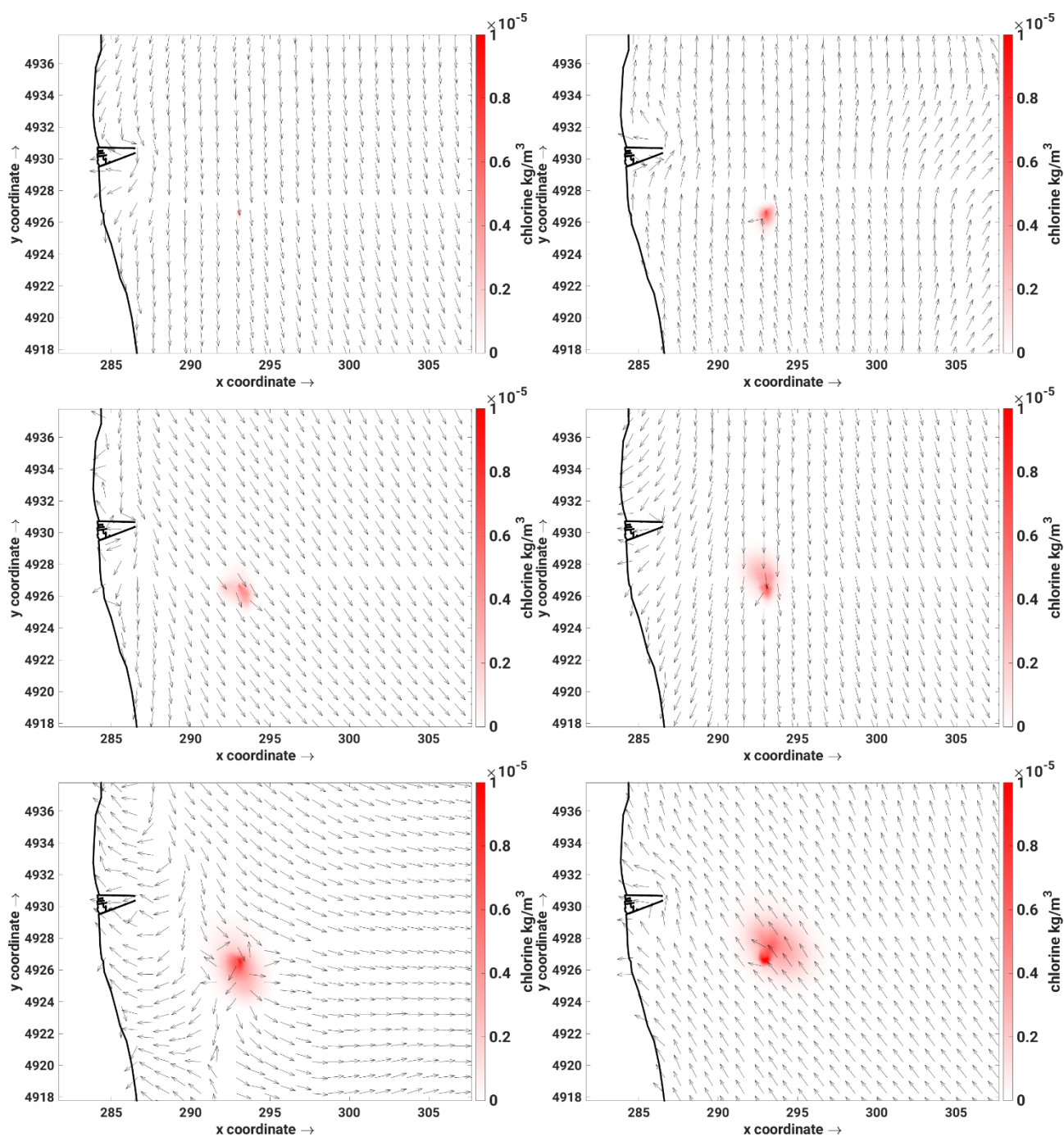


Figura 23. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro sul fondo. Scenario 43.

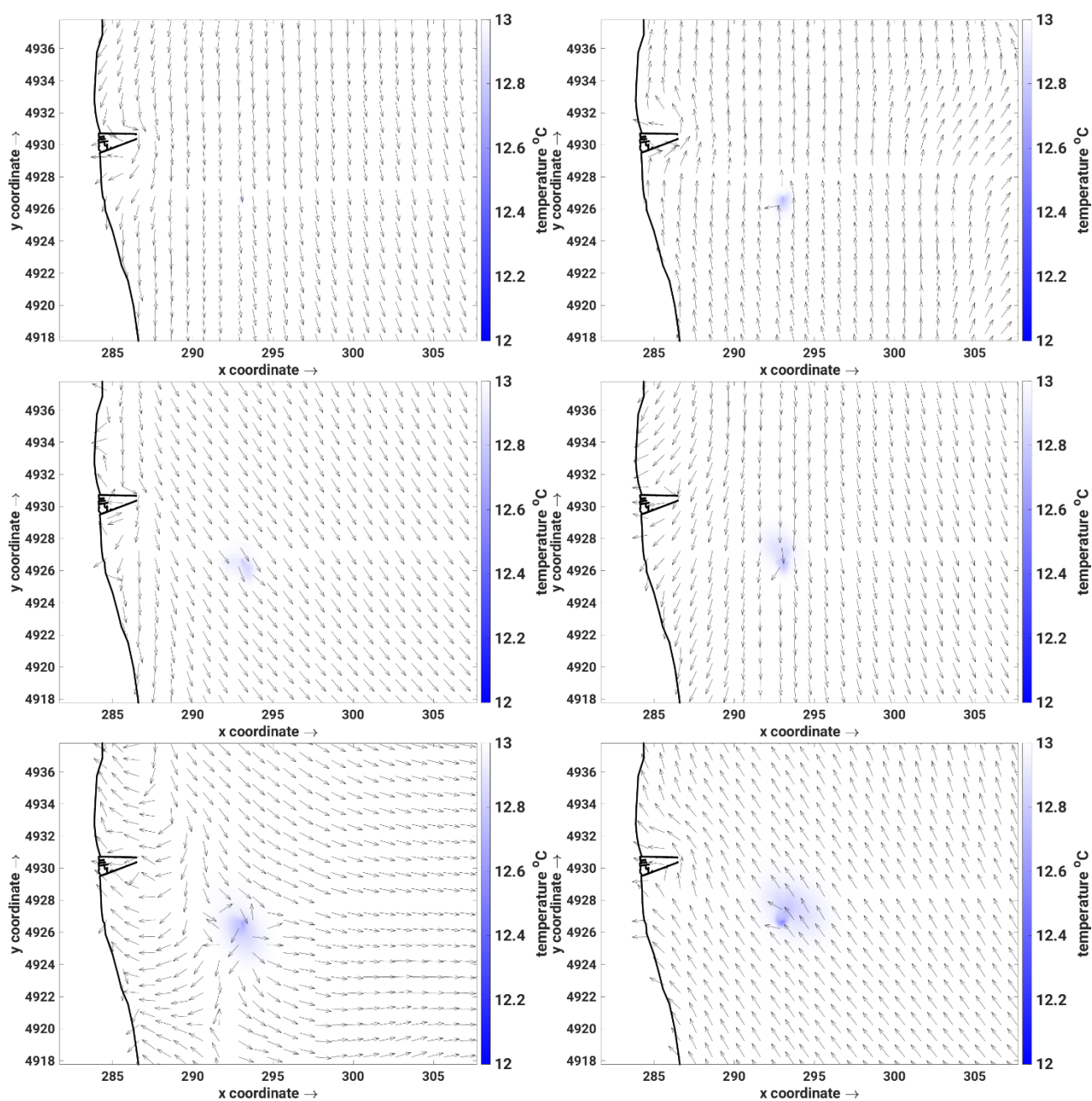


Figura 24. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura sul fondo. Scenario 43.

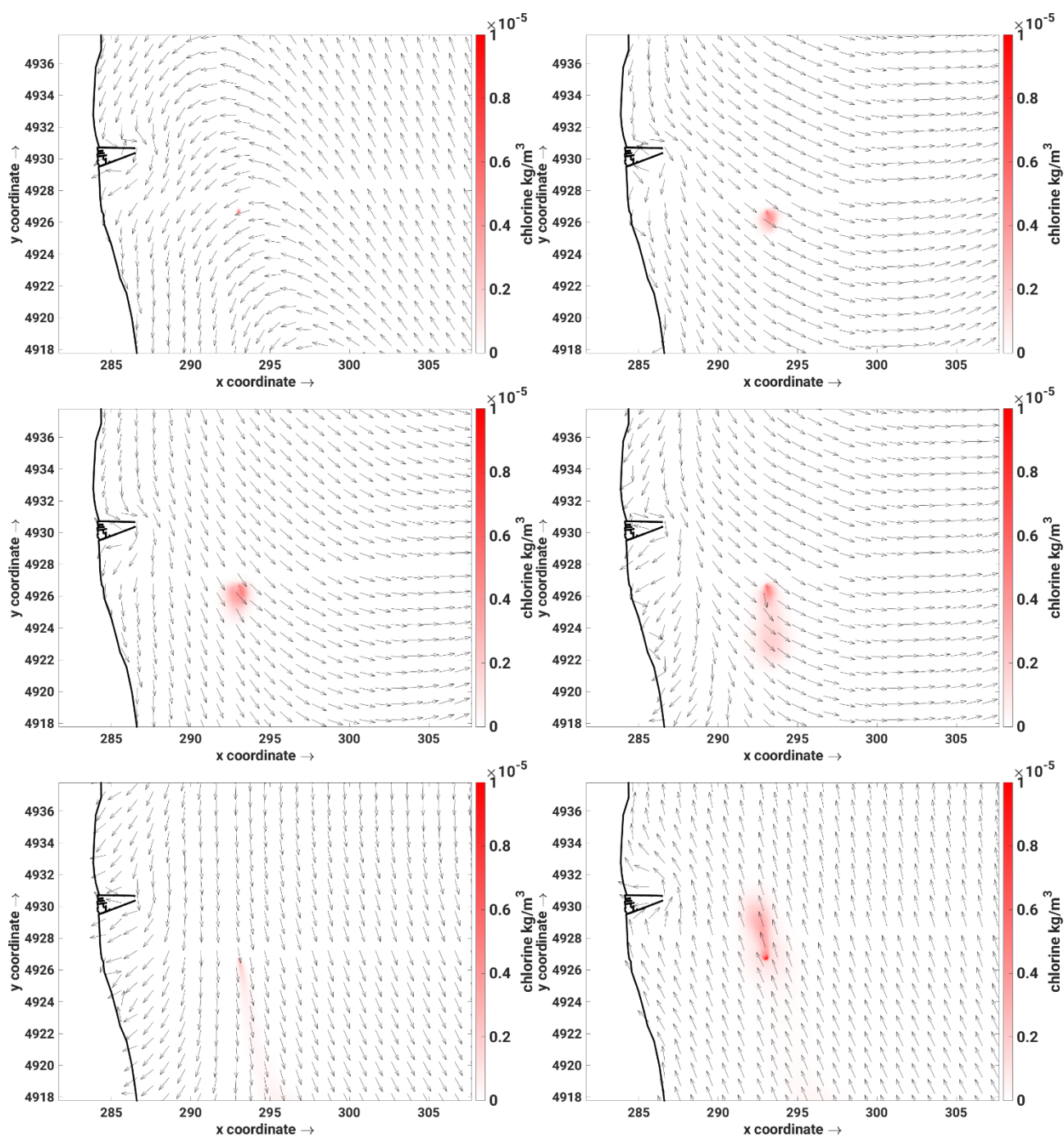


Figura 25. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro sul fondo. Scenario 82.

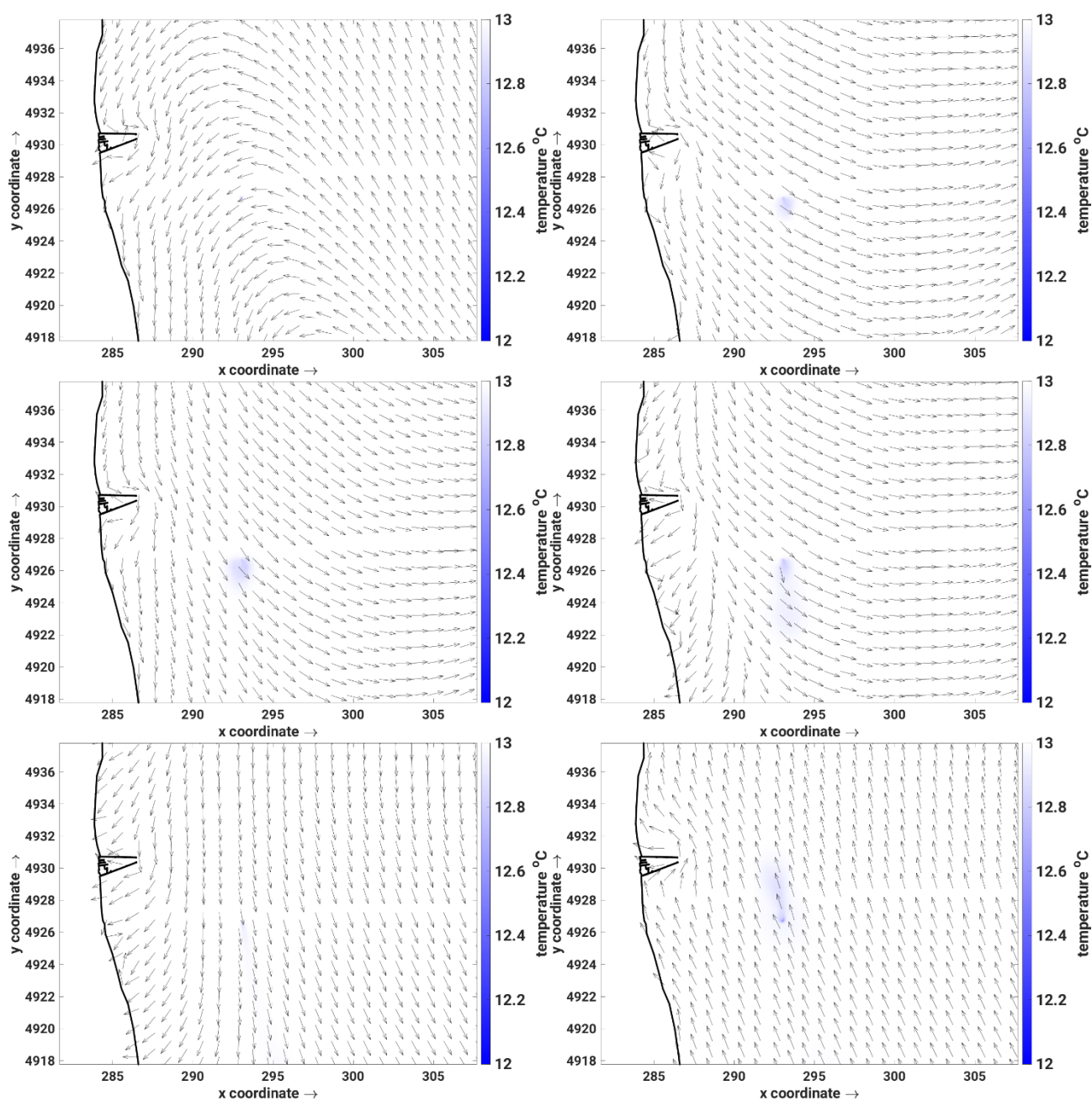


Figura 26. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura sul fondo. Scenario 82.

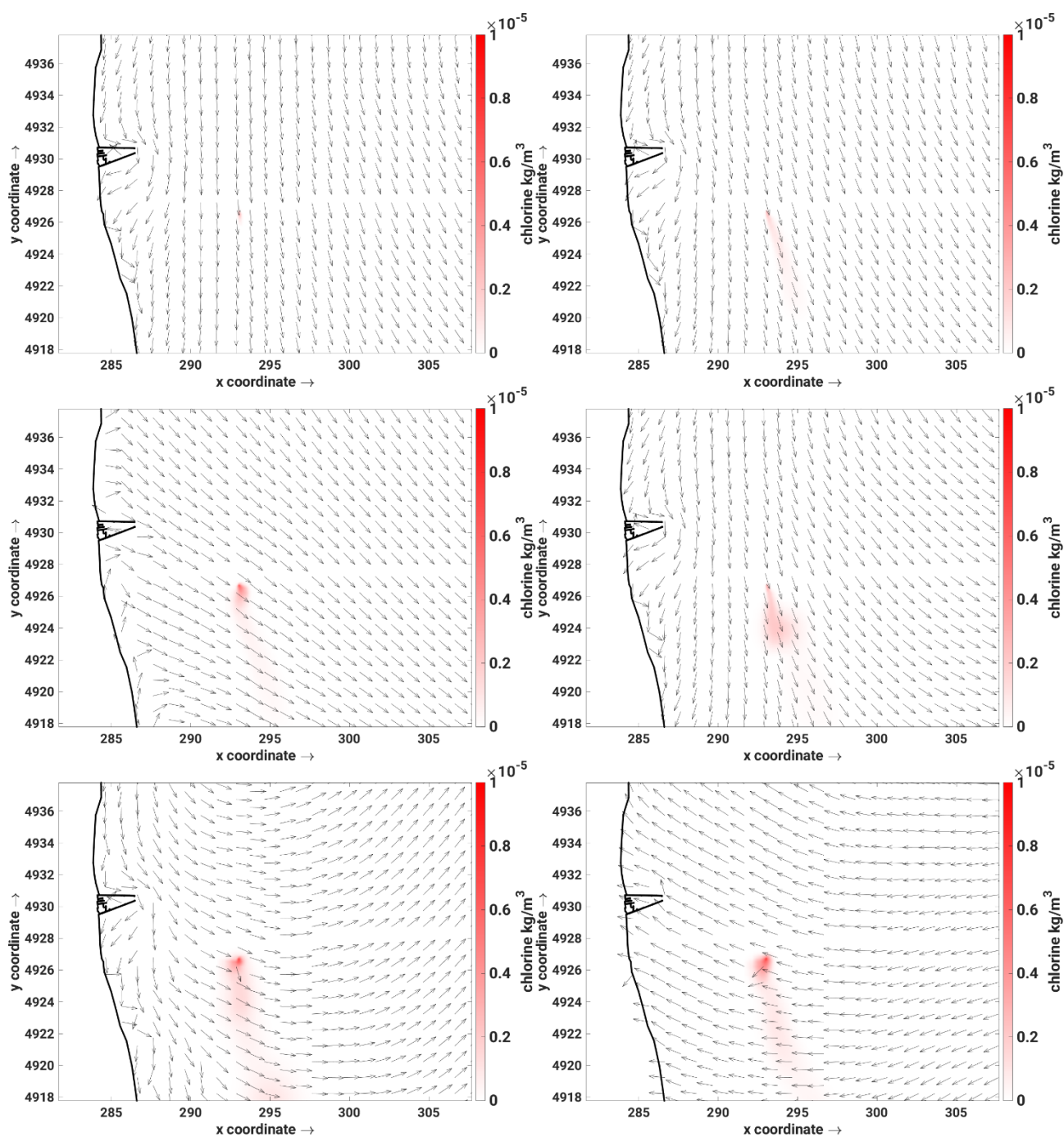


Figura 27. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro sul fondo. Scenario 93.

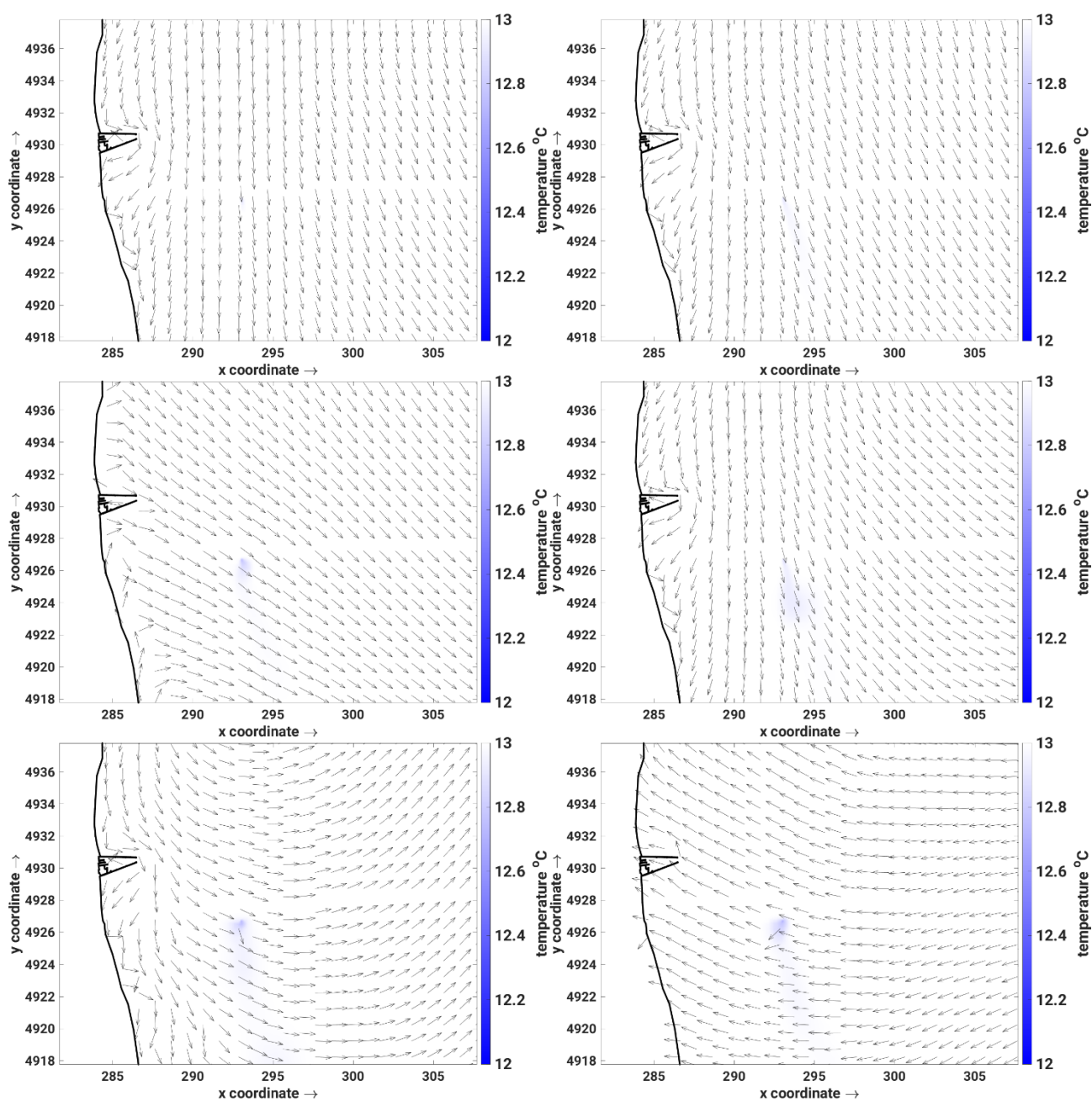


Figura 28. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura sul fondo. Scenario 93.



6. CONCLUSIONI

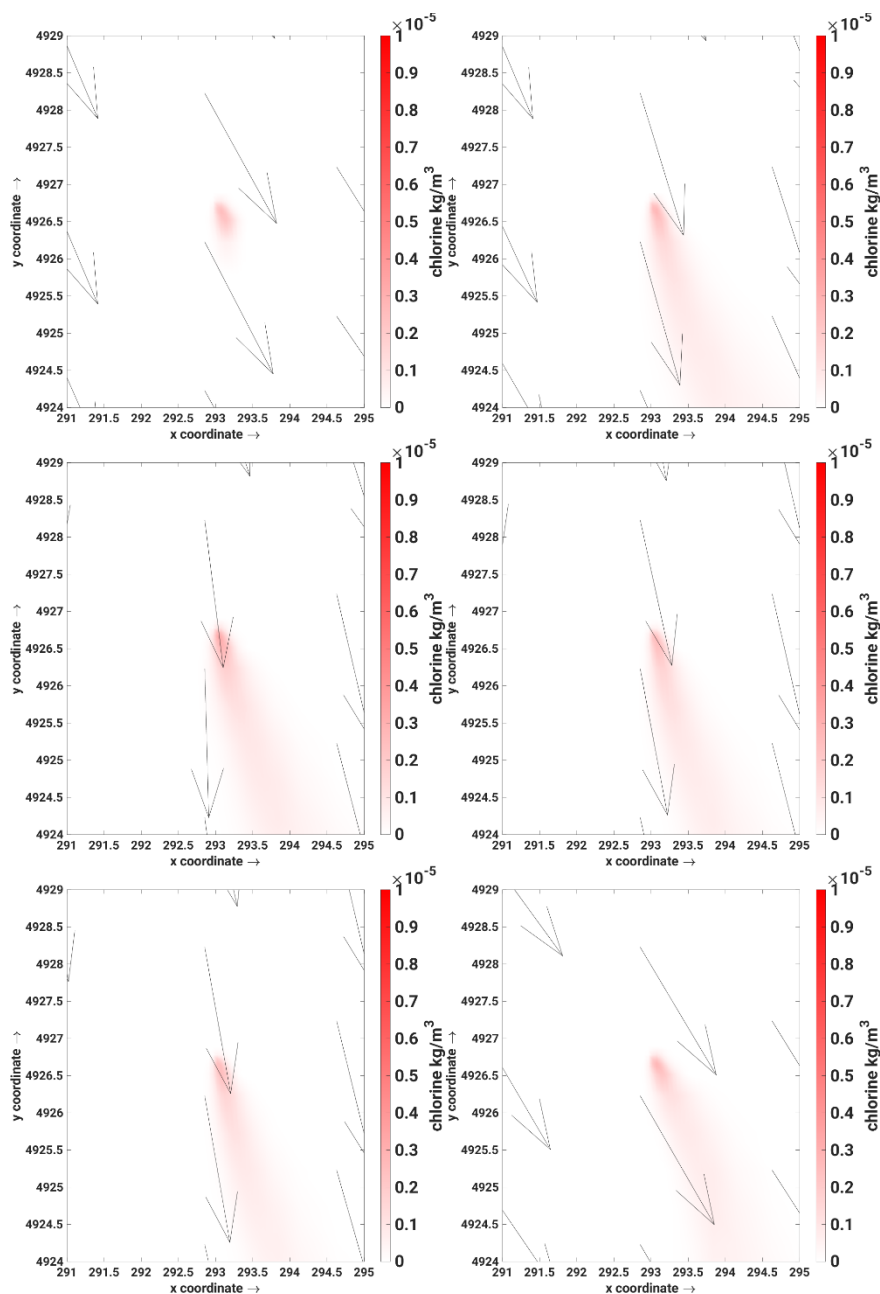
L'analisi dei processi di dispersione della temperatura e dell'ipoclorito in seguito alle attività di produzione dell'unità FSRU ormeggiata al largo di Ravenna è stata realizzata tramite un modello numerico allo stato dell'arte per lo studio dell'idrodinamica marittima. Le condizioni di funzionamento e le caratteristiche dell'impianto di rigassificazione sono state fornite dalla committenza e sono state definite all'interno del modello numerico nella maniera più opportuna in modo da poter riprodurre il più fedelmente possibile le dinamiche e i processi legati all'utilizzo dell'acqua di mare come fonte di calore per la FSRU. Nella definizione delle condizioni al contorno meteo-marine da impiegare nelle simulazioni sono state tenute in conto anche le correnti regionali che nel caso di installazione offshore possono avere una valenza significativa nei processi di dispersione dei così detti campi intermedi e lontani. Per poter tenere in conto di queste informazioni sono stati impiegati i dati forniti da Copernicus Marine Service e in particolare i dati del Mediterranean Sea Reanalysis. Sono state quindi realizzati due set di simulazioni, un primo in cui le forzanti meteomarine erano rappresentate solo da vento, onde, gradiente barico e marea, e un secondo in cui alle forzanti di cui prima è stata aggiunta la corrente regionale estratta opportunamente dal dataset CMS. In questa maniera è stato possibile apprezzare l'effetto delle correnti regionali dell'alto adriatico sulla dispersione di campo lontano.

In via del tutto generale i quattro scenari meteomarini analizzati hanno mostrato come la dispersione della temperatura e dell'ipoclorito avvengono molto rapidamente, abbattendo i valori di immissione in distanze parecchio contenute. I livelli raggiunti in prossimità dell'impianto di FSRU sono infatti molto ridotti e molto prossimi ai livelli del "bianco", ovvero in assenza dello scarico (si noti che il massimo della scala di restituzione dell'ipoclorito è un ordine di grandezza inferiore rispetto ai limiti richiesti dalla legge). Nelle condizioni di bonaccia (scenario 43) la dispersione della temperatura e dell'ipoclorito presenta valori lievemente superiori rispetto agli altri scenari poiché i processi di diluizione risultano meno intensi a causa della ridotta dinamicità delle forzanti meteomarine; i valori delle concentrazioni di ipoclorito e il delta di temperatura presentano comunque valori significativamente al di sotto (più di un ordine di grandezza) dei limiti previsti dalla legge.

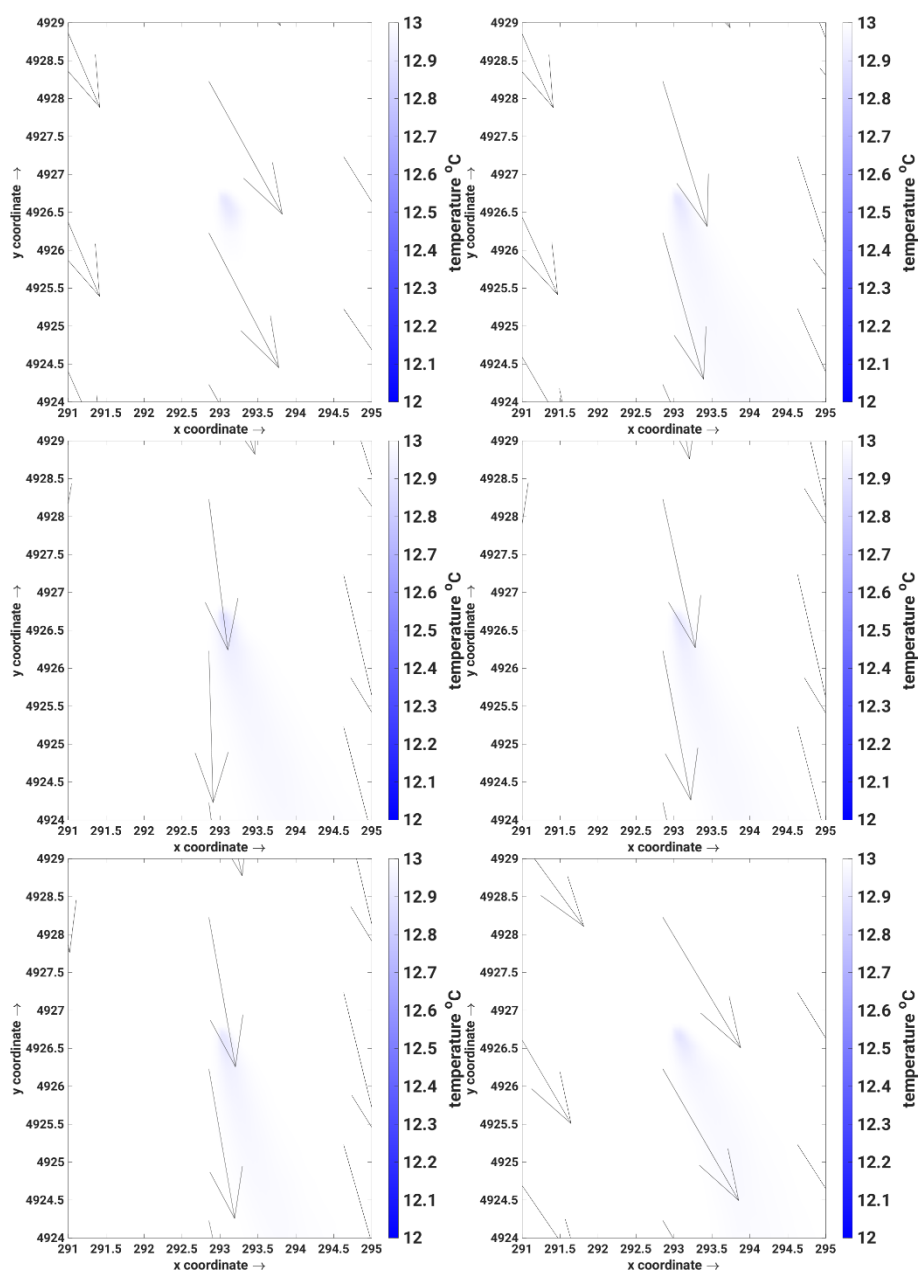


ALLEGATI

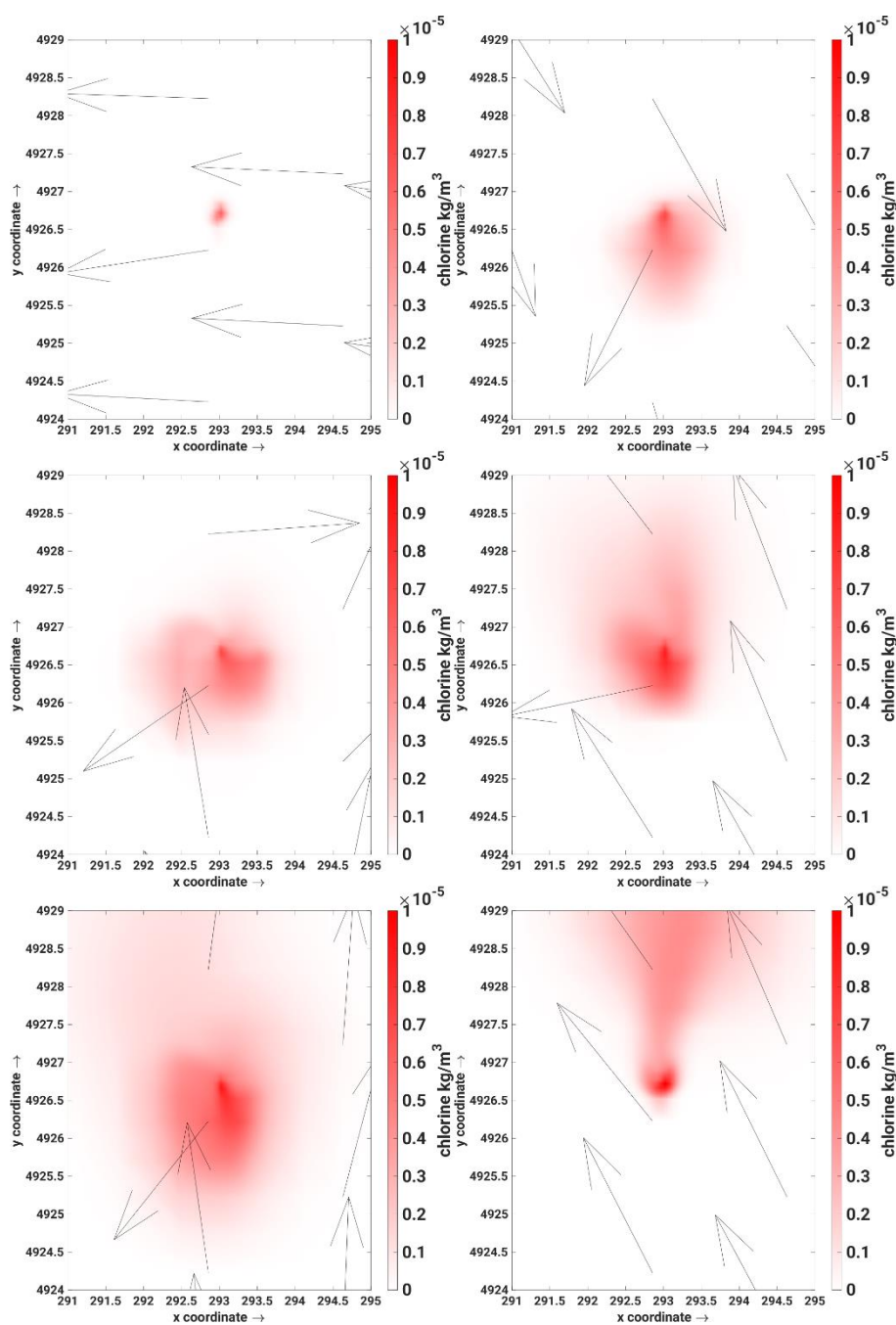
Si riportano di seguito gli ingrandimenti delle mappe in prossimità del rilascio dell'impianto a servizio della FSRU.



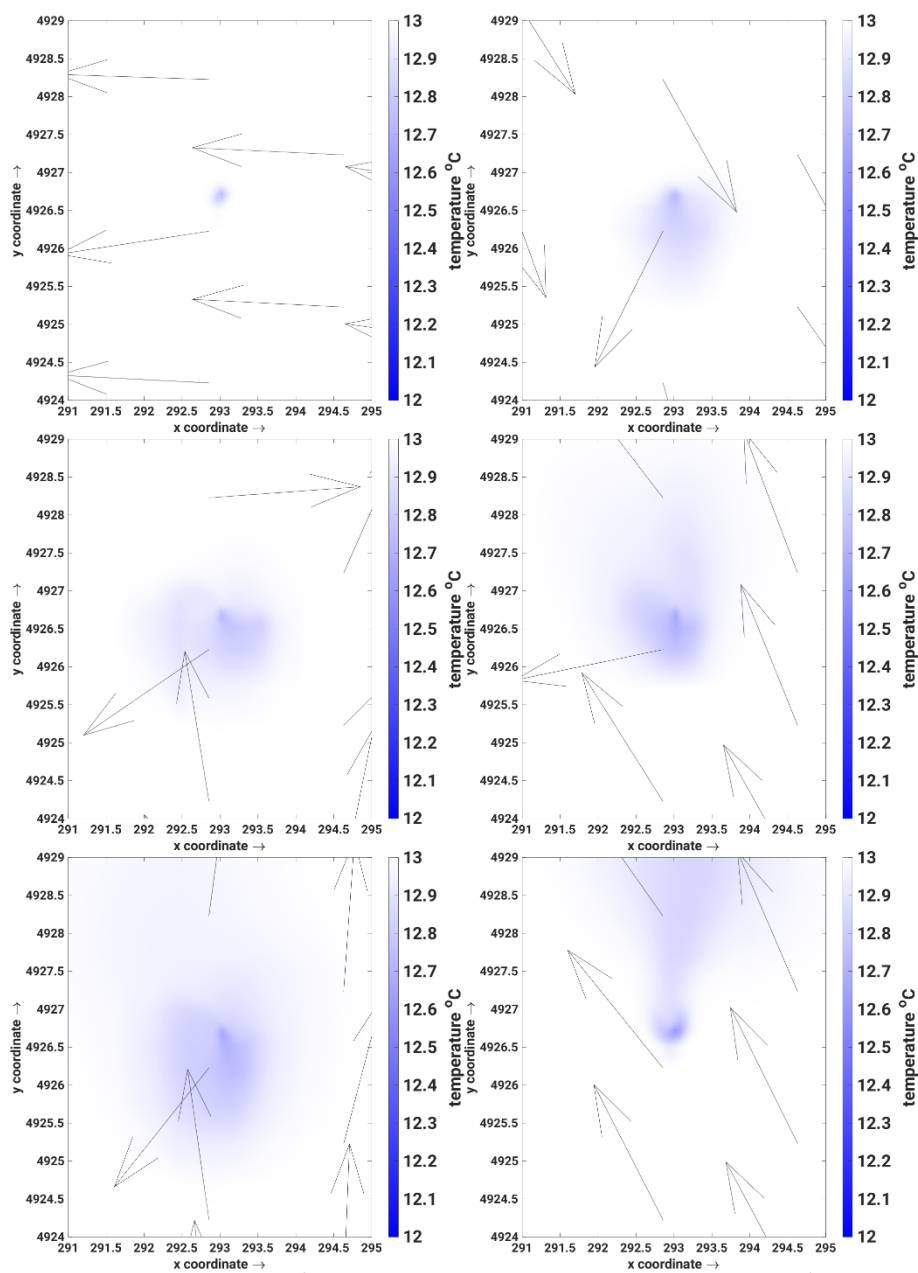
A 1. Zoom su scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 4.



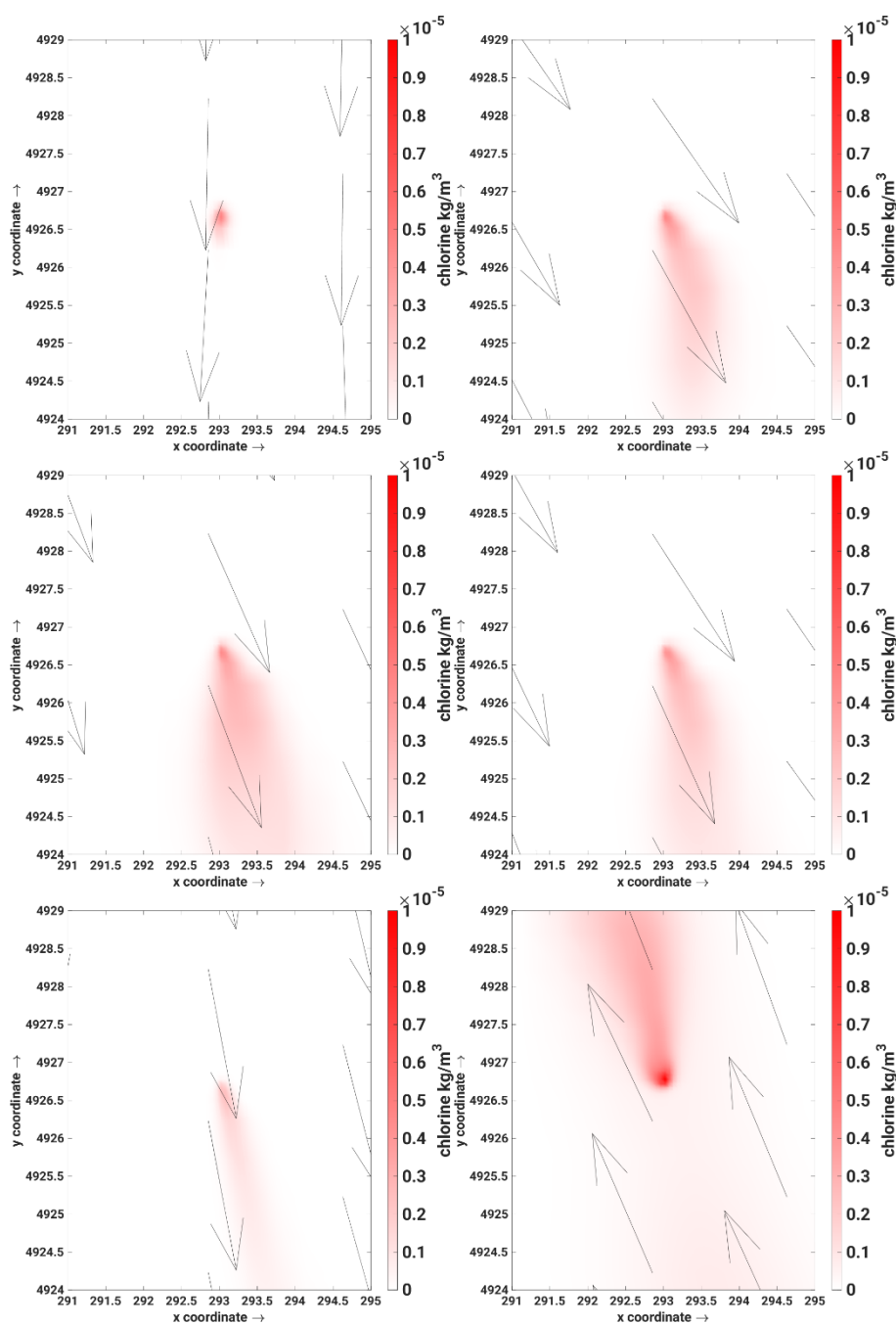
A 2. Zoom su scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 4.



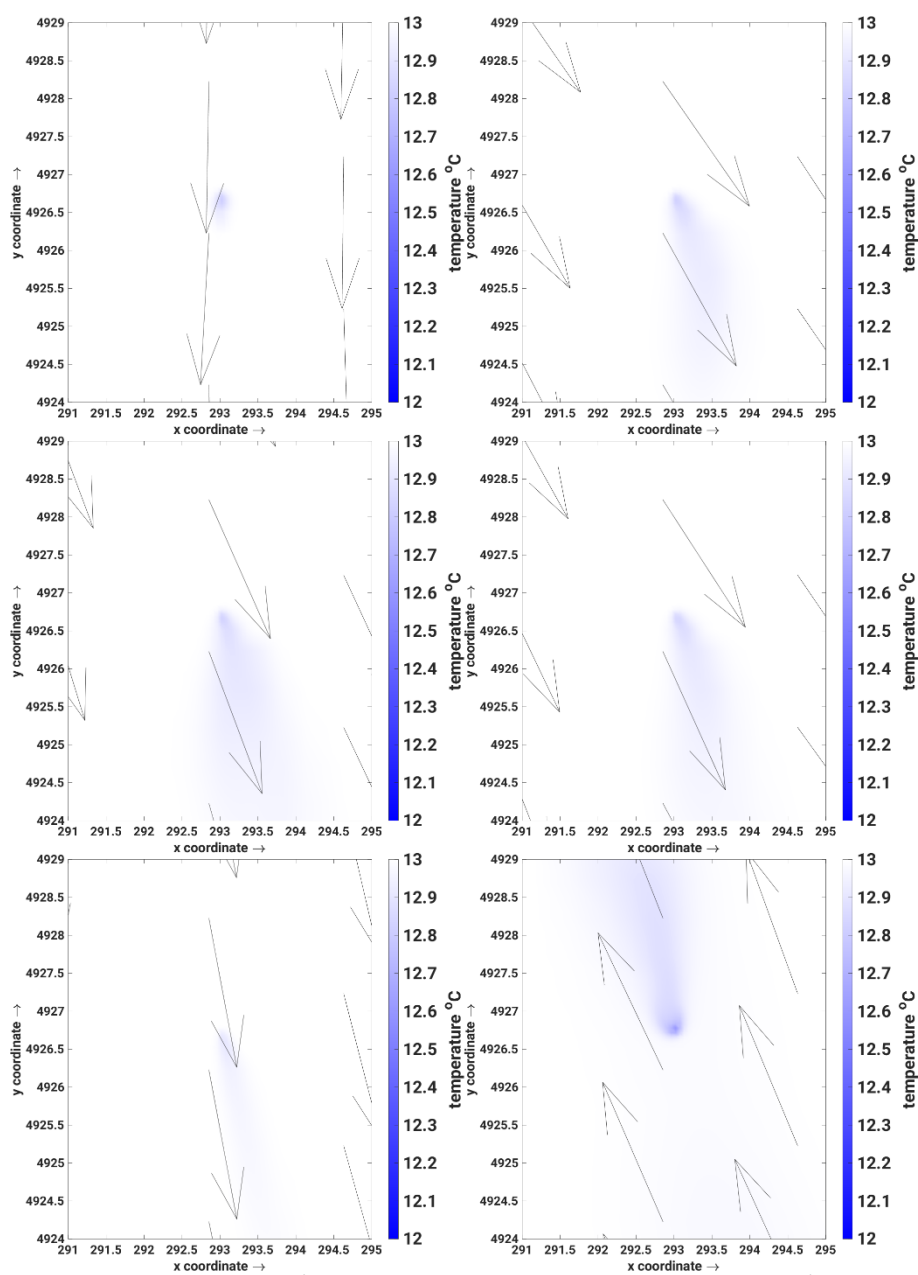
A 3. Zoom su scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 43.



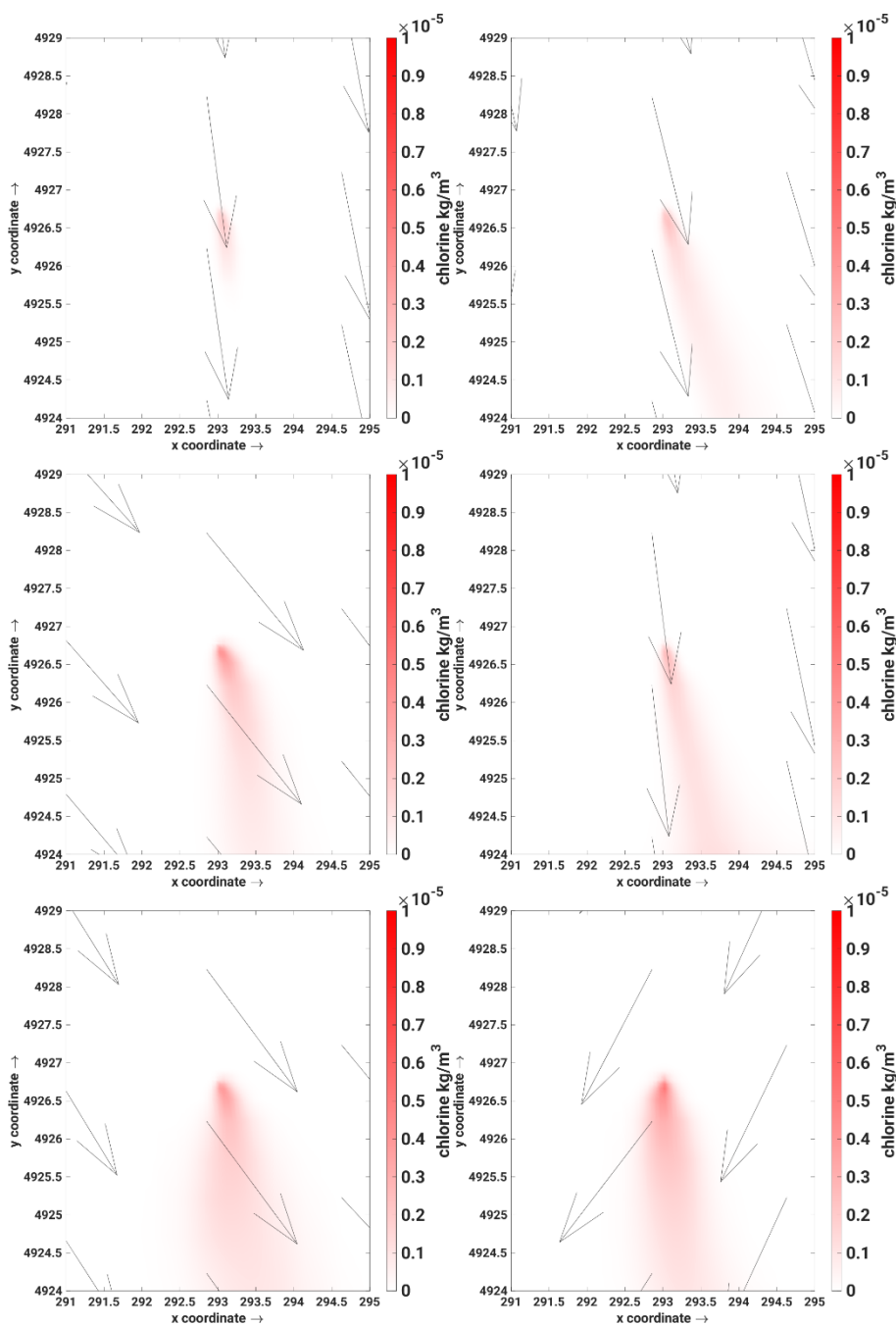
A 4. Zoom su scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 43.



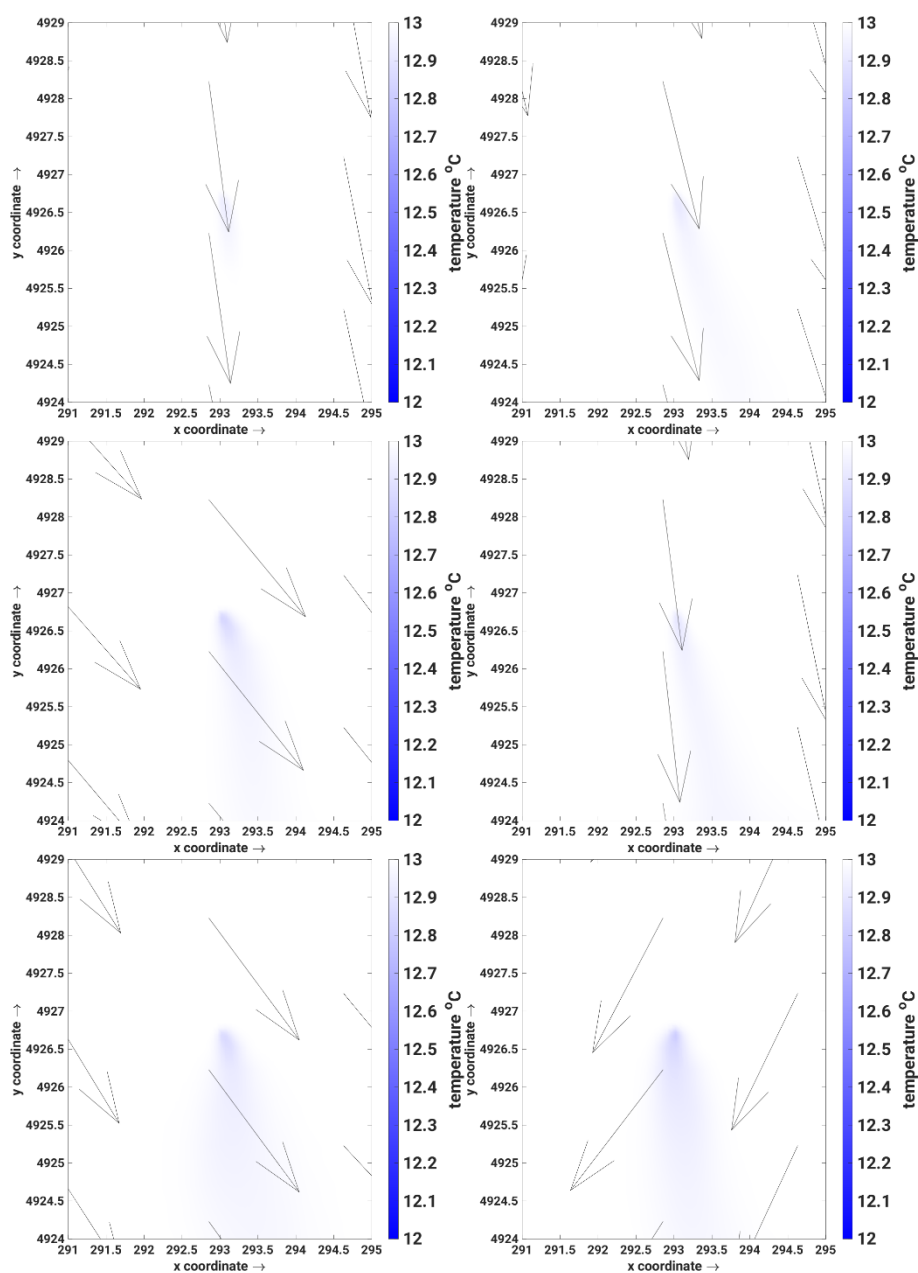
A 5. Zoom su scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 82.



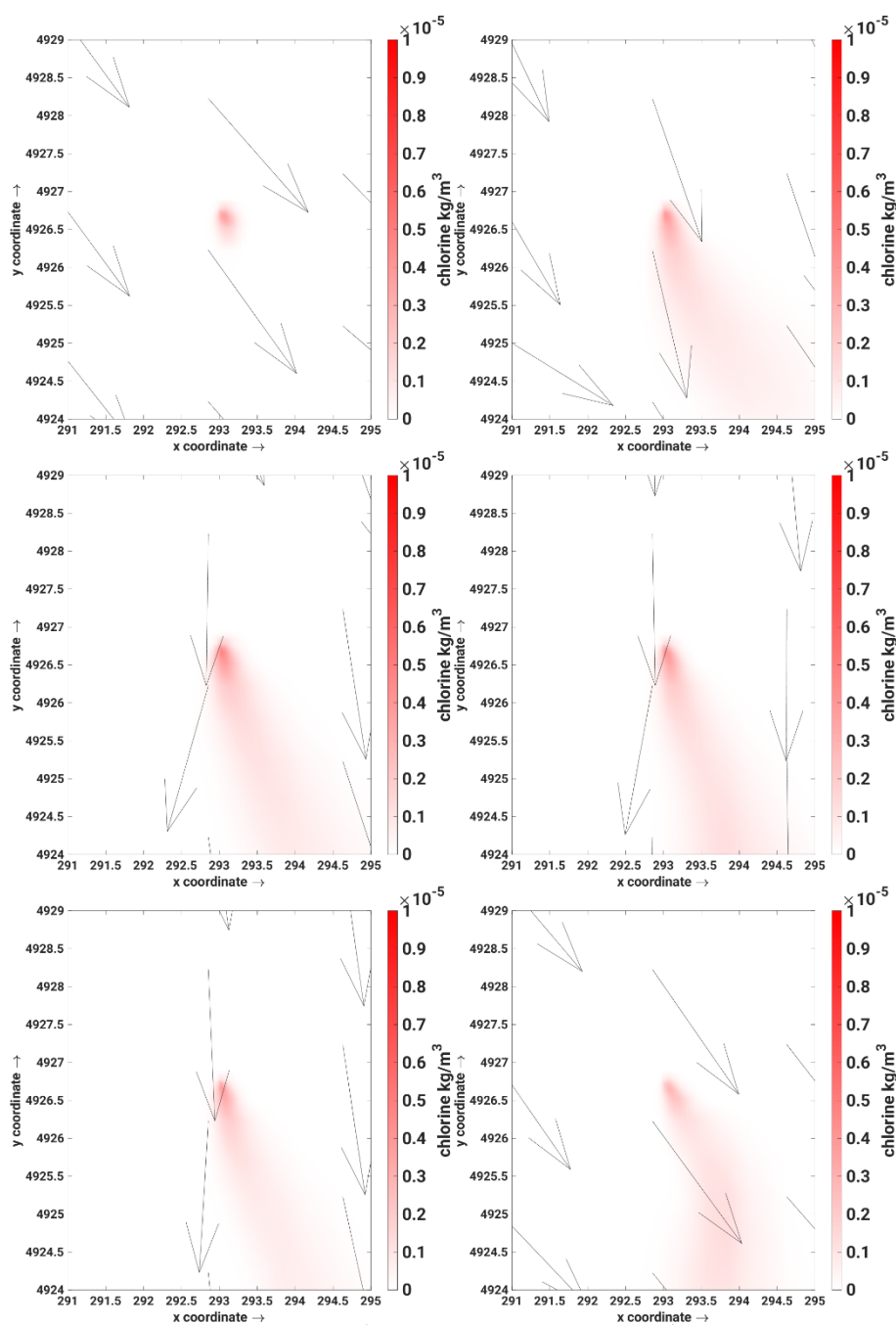
A 6. Zoom su scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 82.



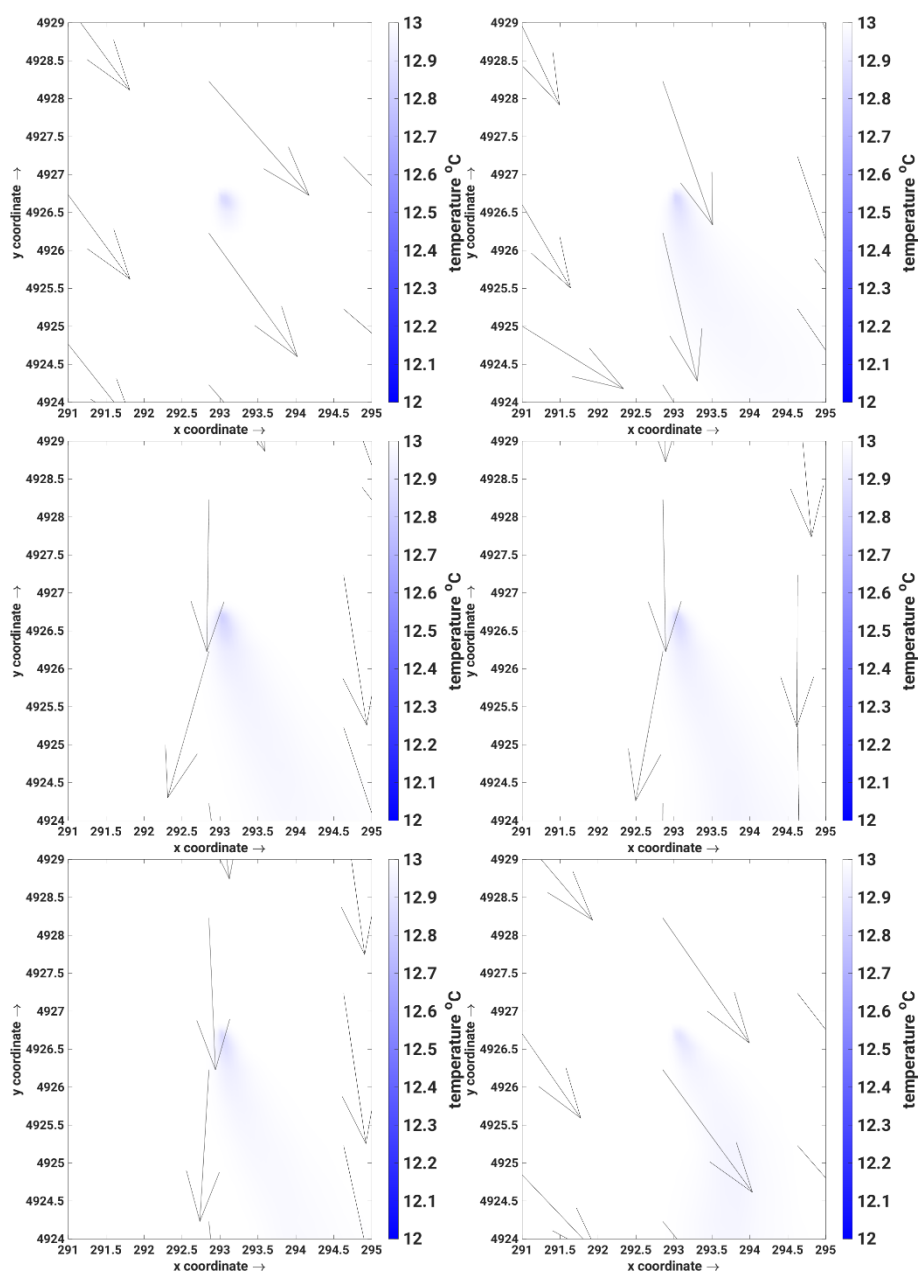
A 7. Zoom su scarico FSRU – Cloro sul fondo. Scenario 93.



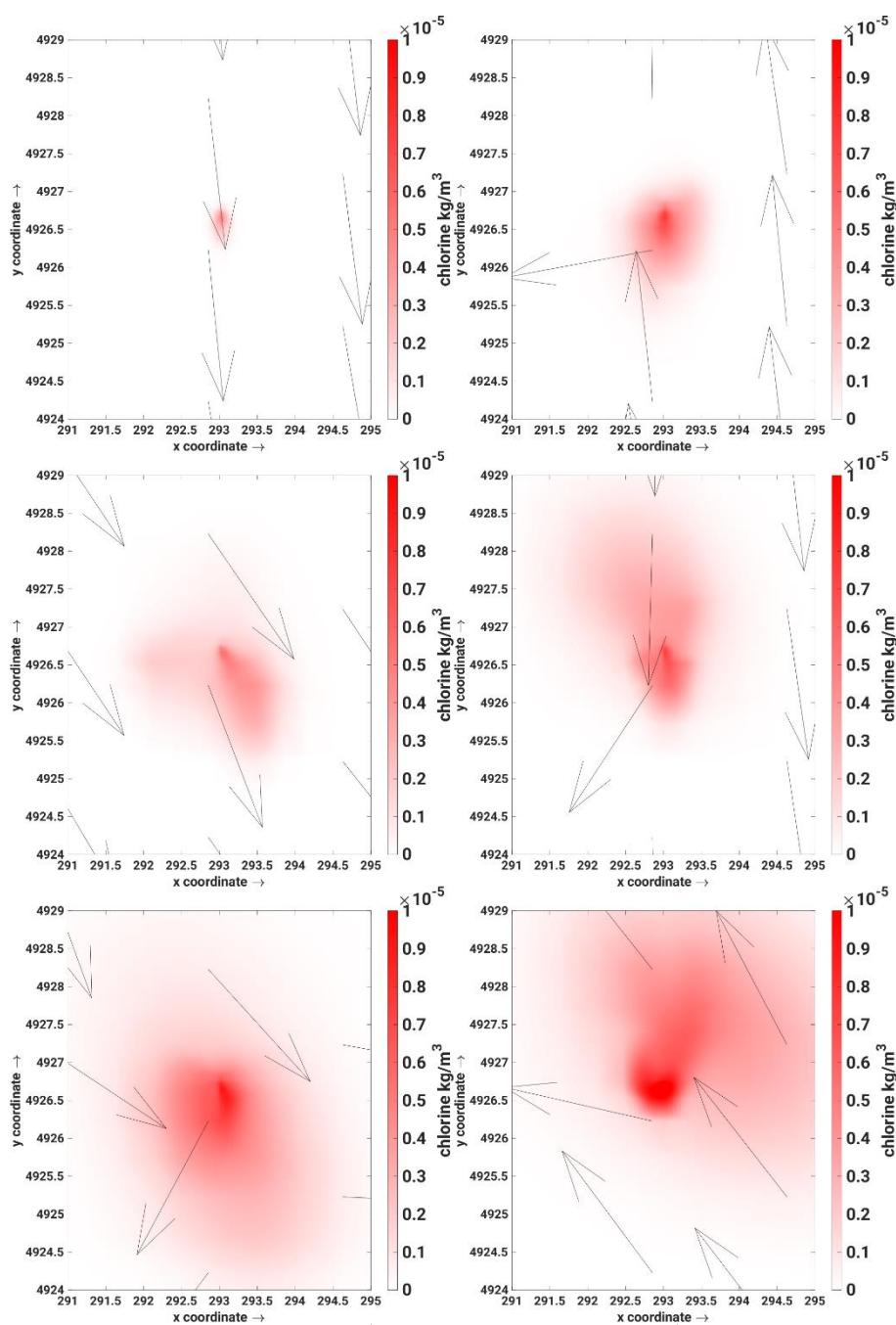
A 8. Zoom su scarico FSRU – Temperatura sul fondo. Scenario 93.



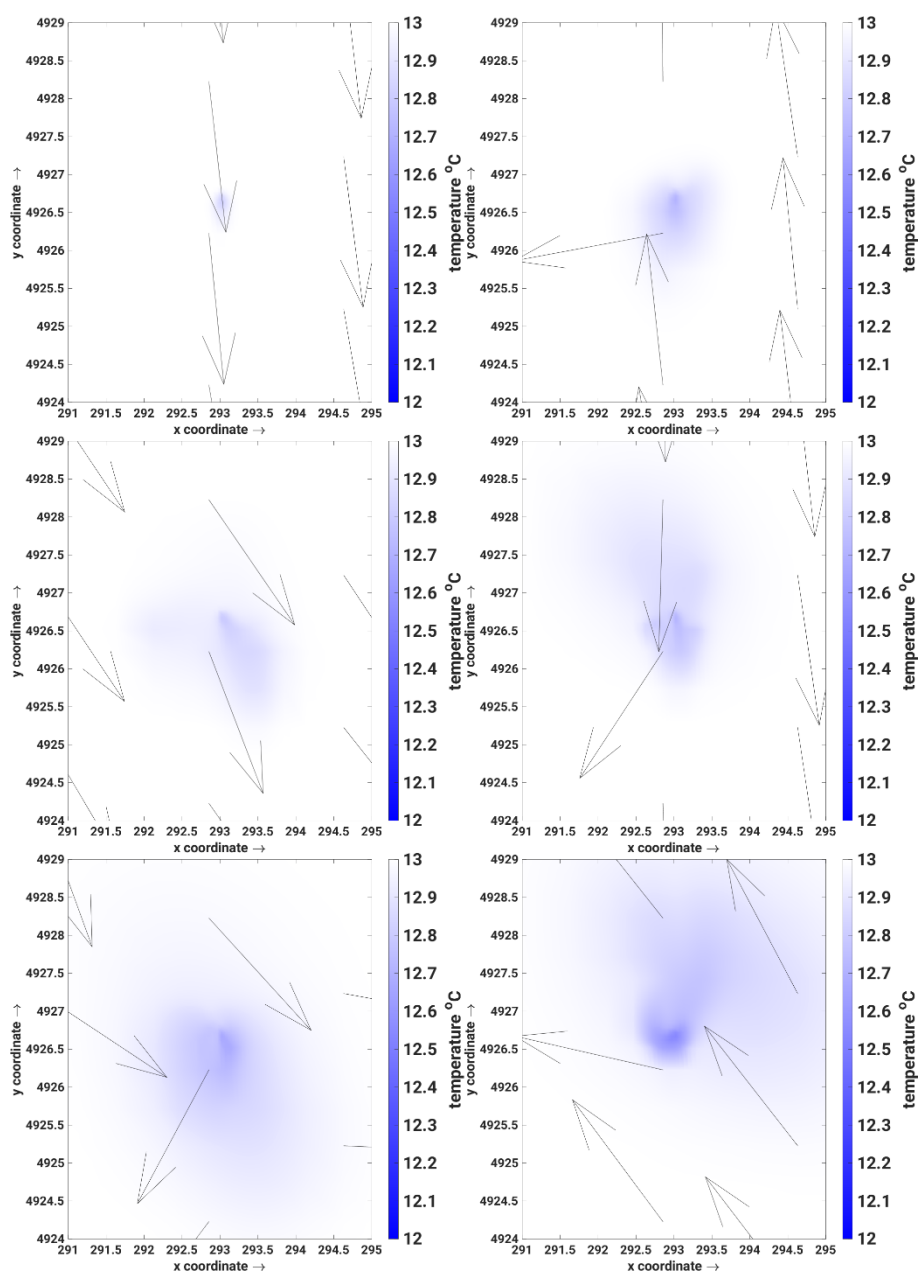
A 9. Zoom su scarico FSRU (simulazione con dati CMS) – Cloro sul fondo.
Scenario 4.



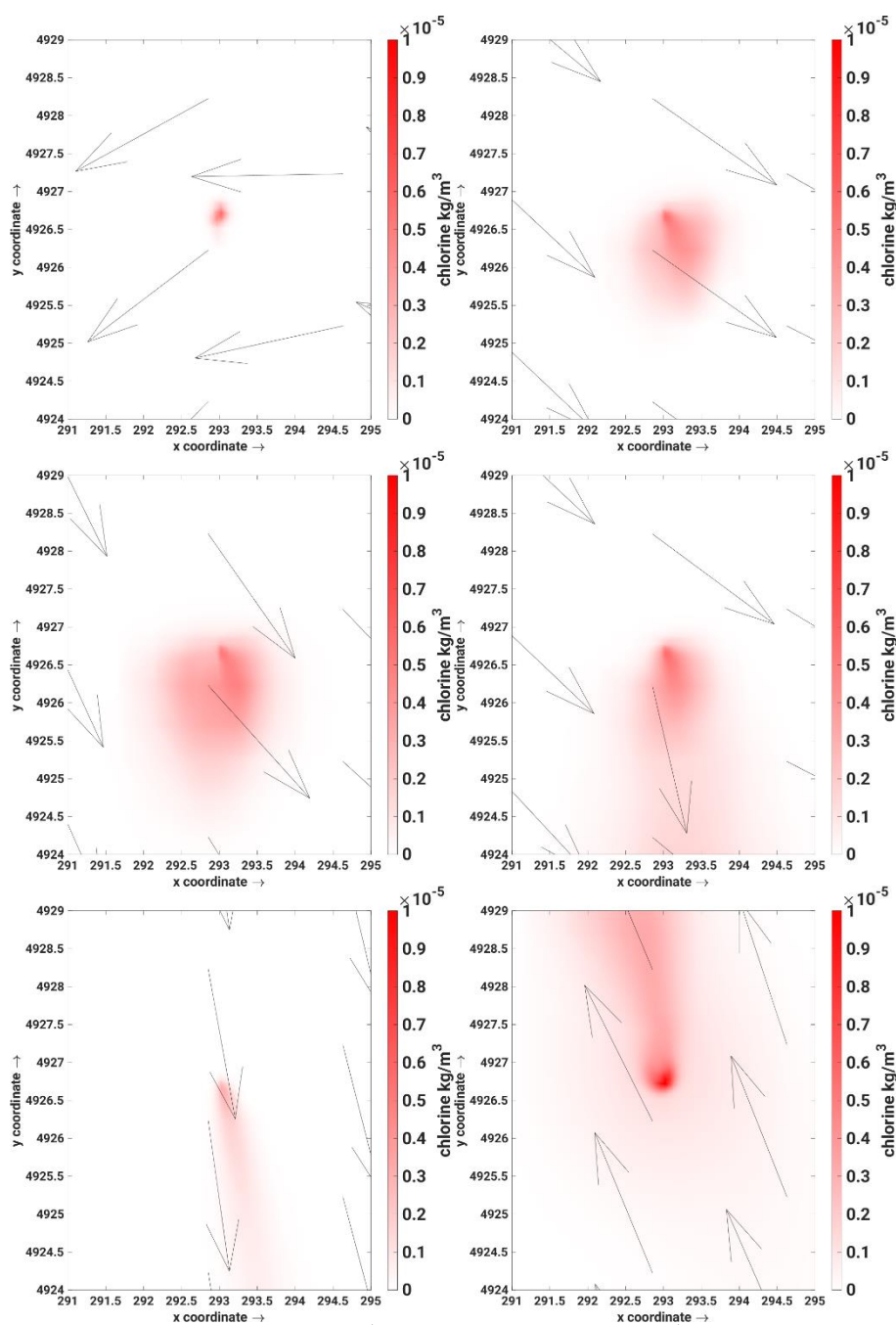
A 10. Zoom su scarico FSRU (simulazione con dati CMS) – Temperatura sul fondo. Scenario 4.



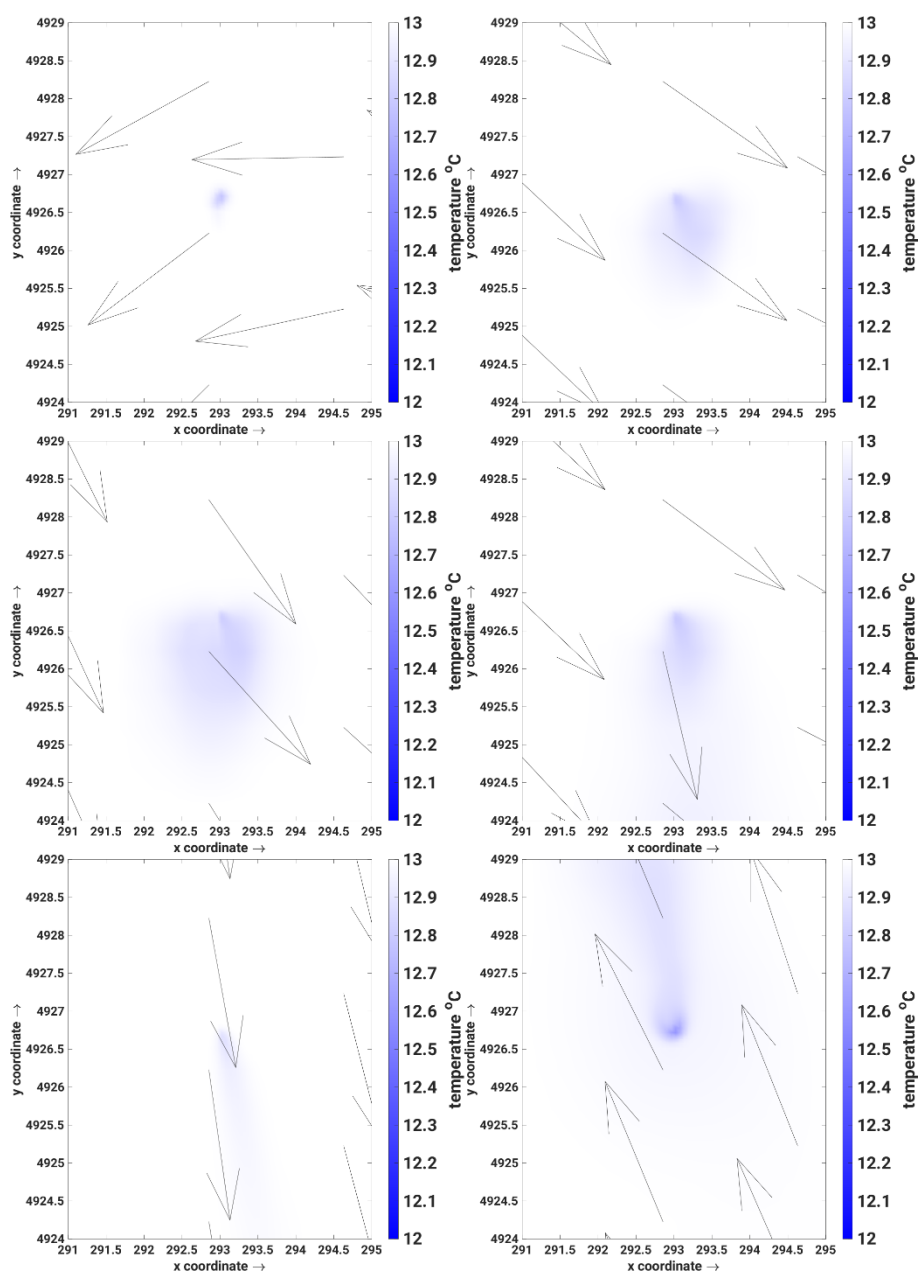
A 11. Zoom su scarico FSRU (simulazione con dati CMS) – Cloro sul fondo.
Scenario 43.



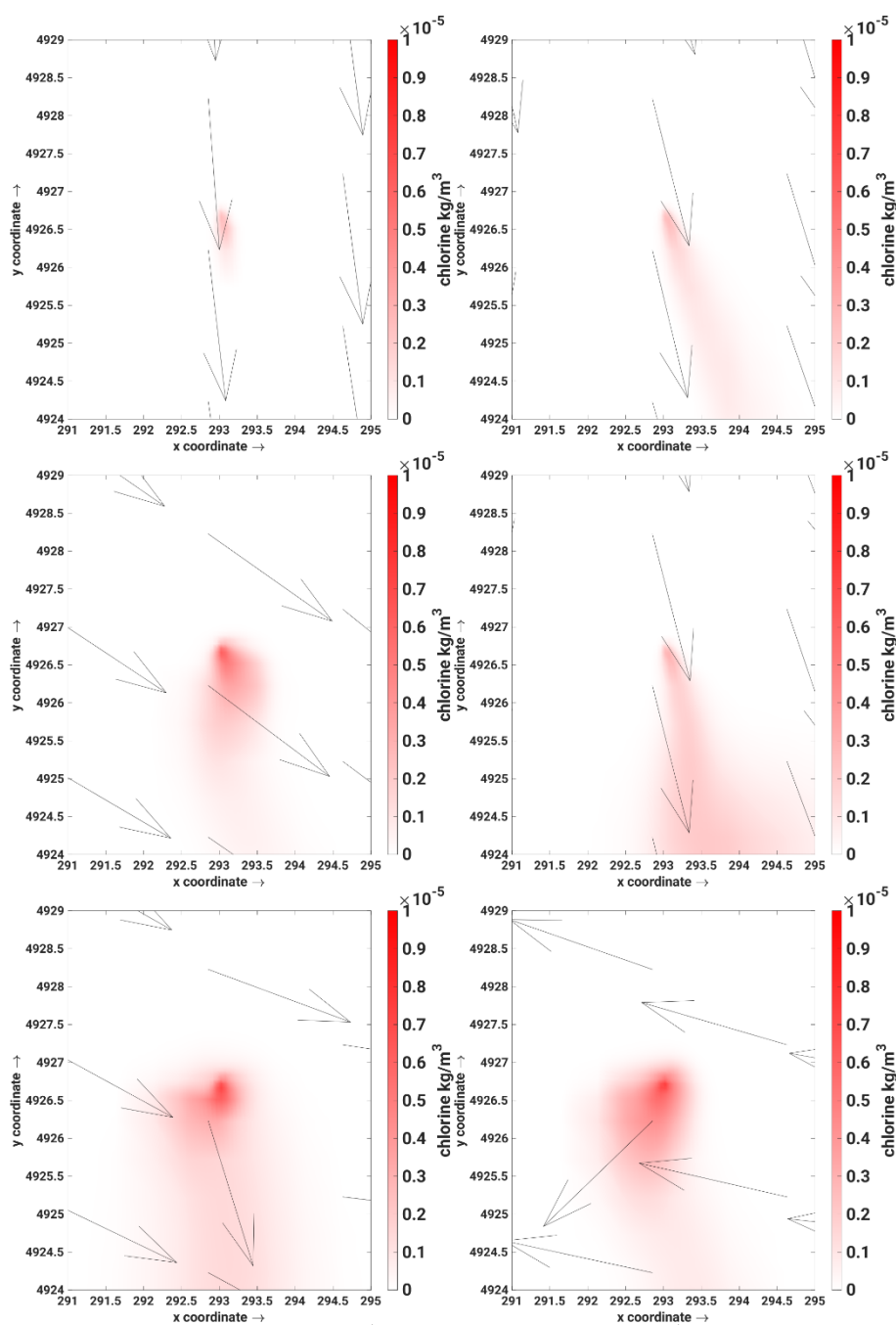
A 12. Zoom su scarico FSRU (simulazione con dati CMS) – Temperatura sul fondo. Scenario 43.



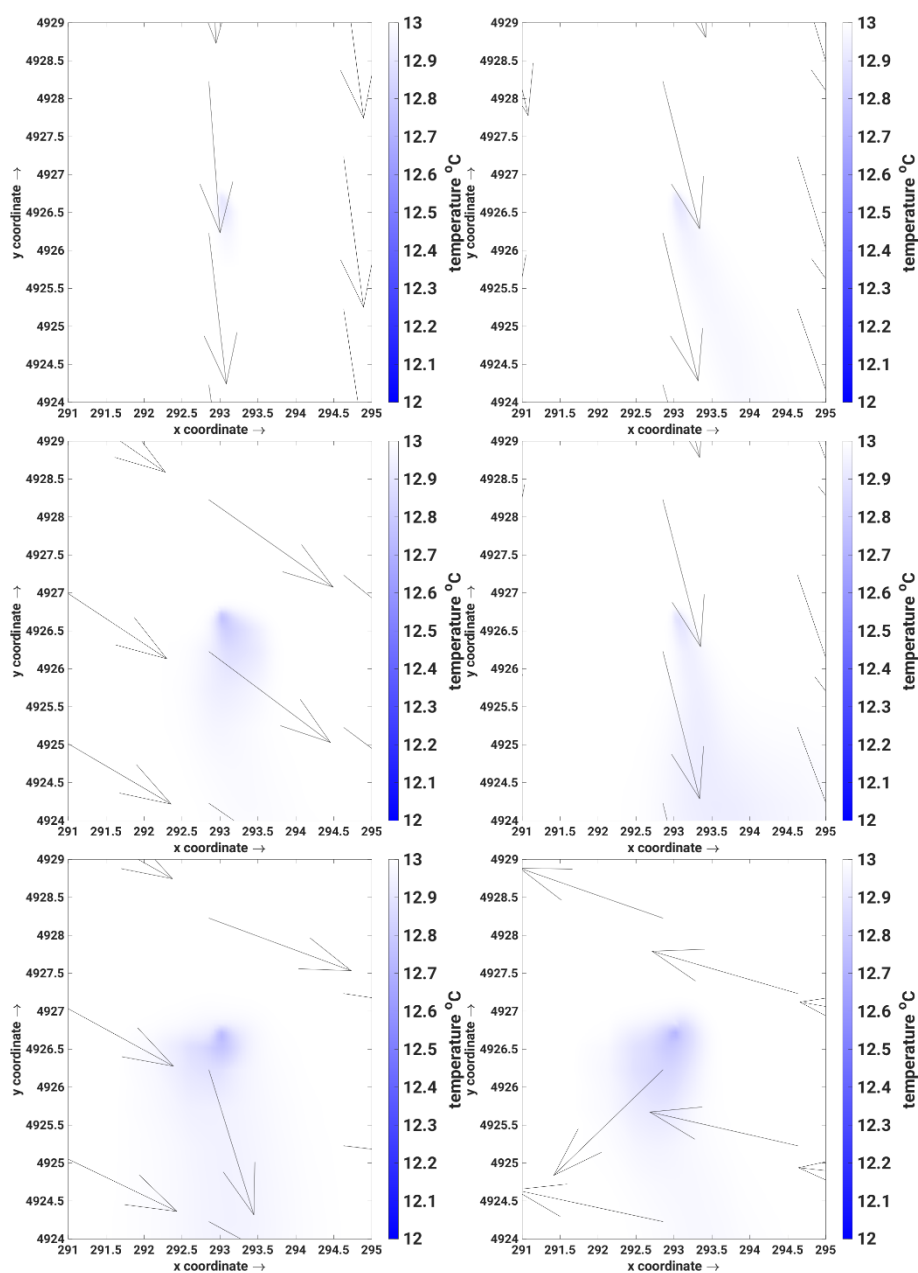
A 13. Zoom su scarico FSRU (simulazione con dati CMS) – Cloro sul fondo.
Scenario 82.



A 14. Zoom su scarico FSRU (simulazione con dati CMS) – Temperatura sul fondo. Scenario 82



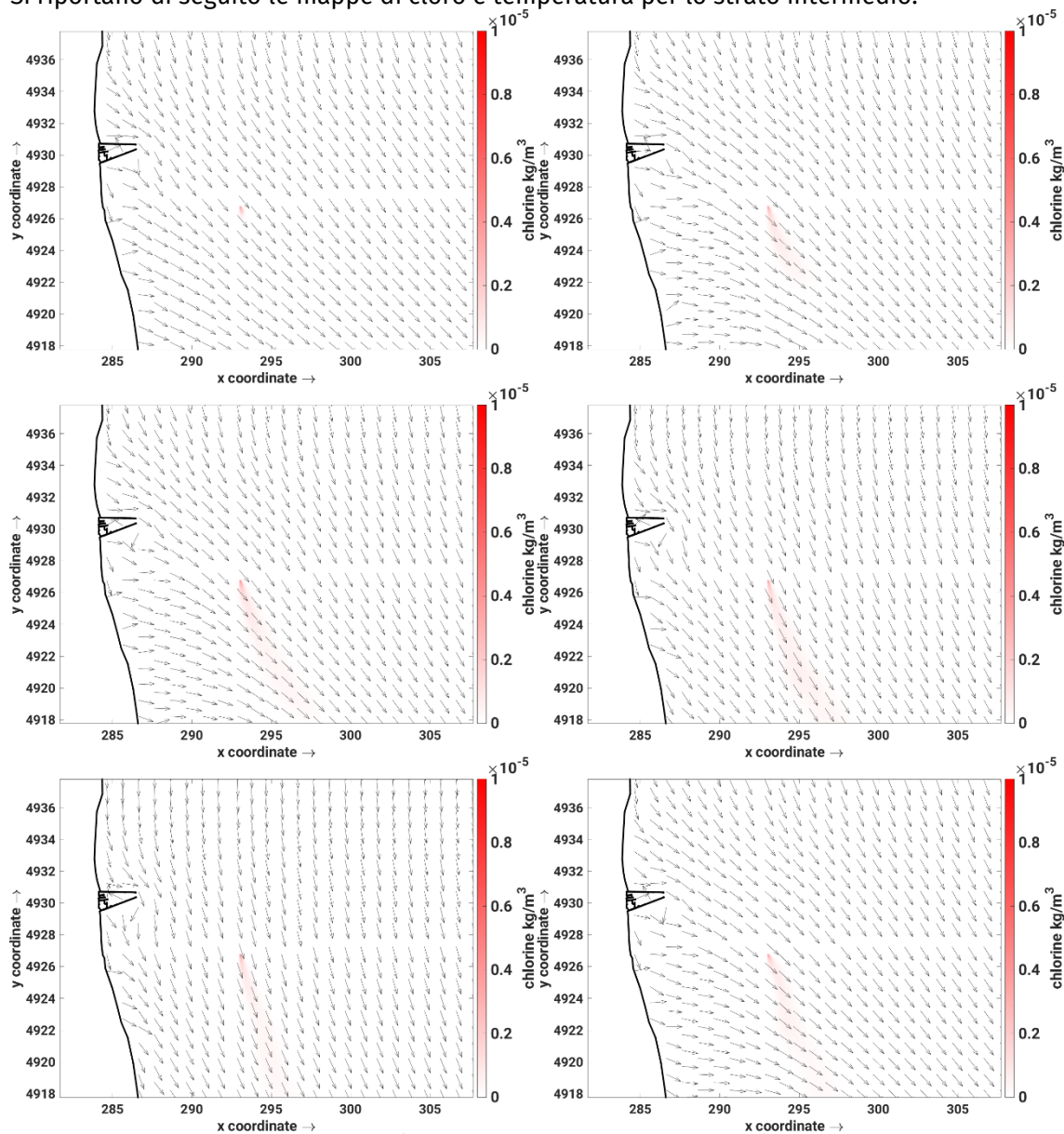
A 15. Zoom su scarico FSRU (simulazione con dati CMS) – Cloro sul fondo.
Scenario 93.



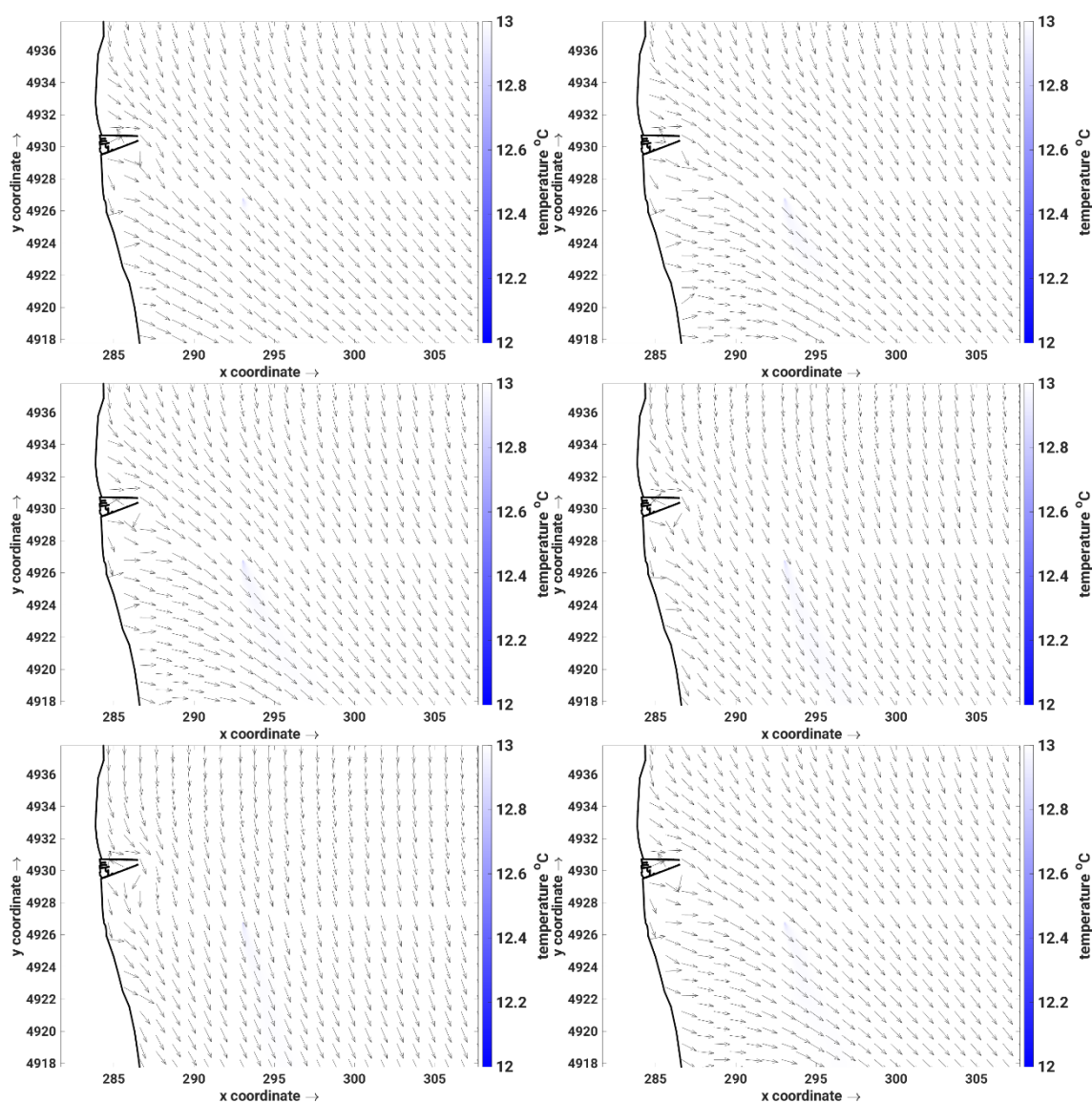
A 16. Zoom su scarico FSRU (simulazione con dati CMS) – Temperatura sul fondo. Scenario 93.



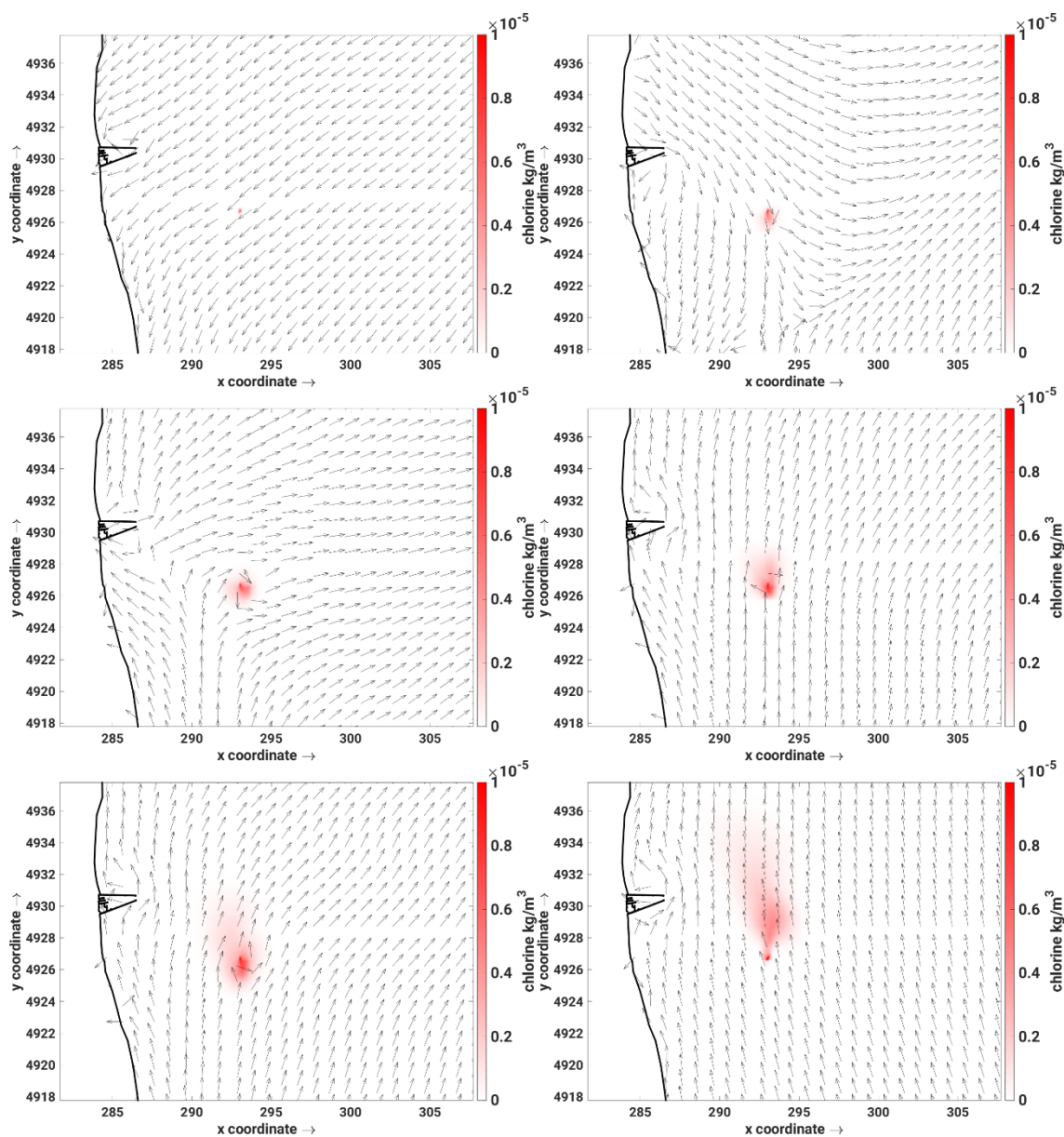
Si riportano di seguito le mappe di cloro e temperatura per lo strato intermedio.



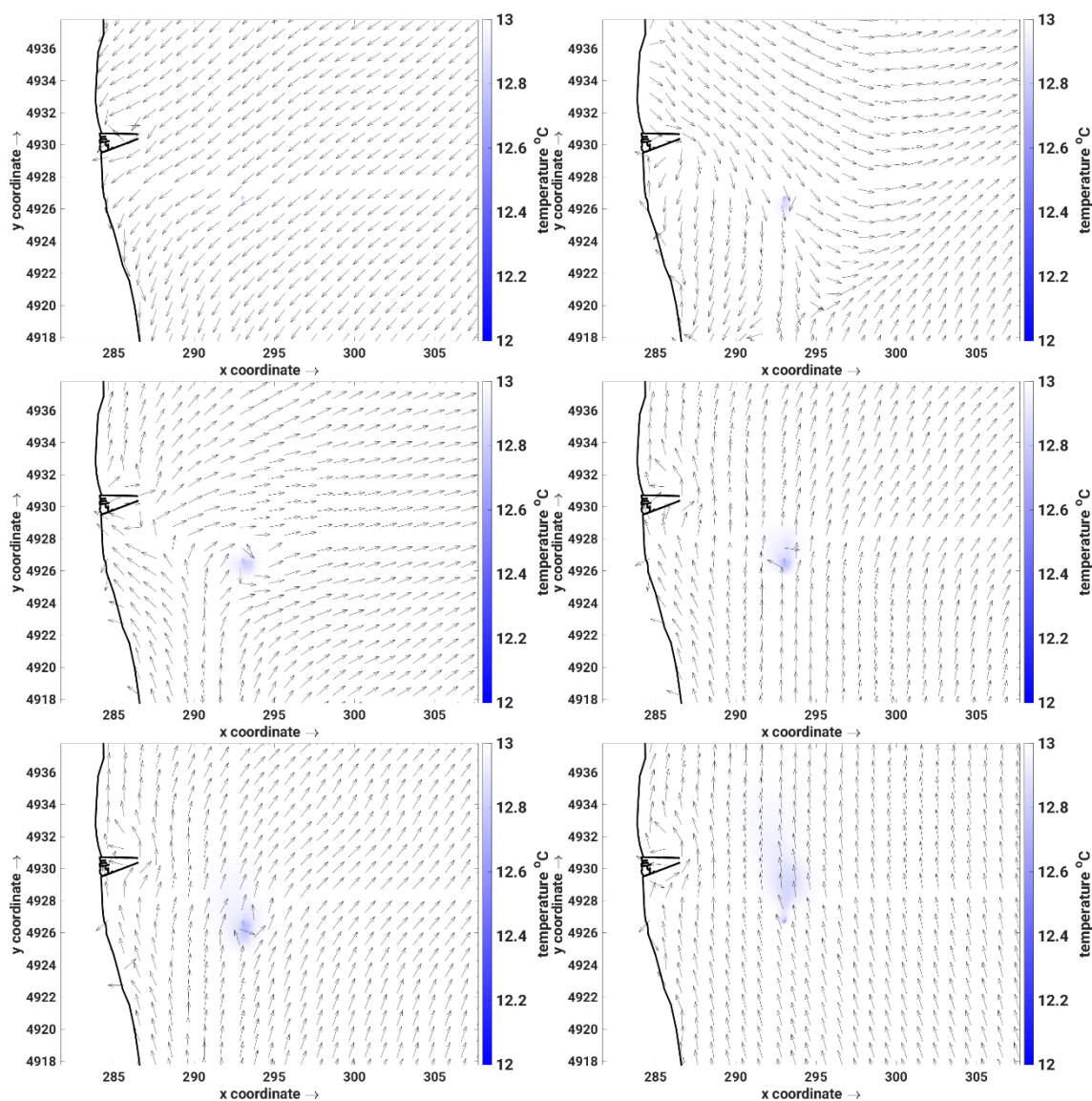
A 17. Scarico FSRU – Cloro a ≈ 5 m. Scenario 4.



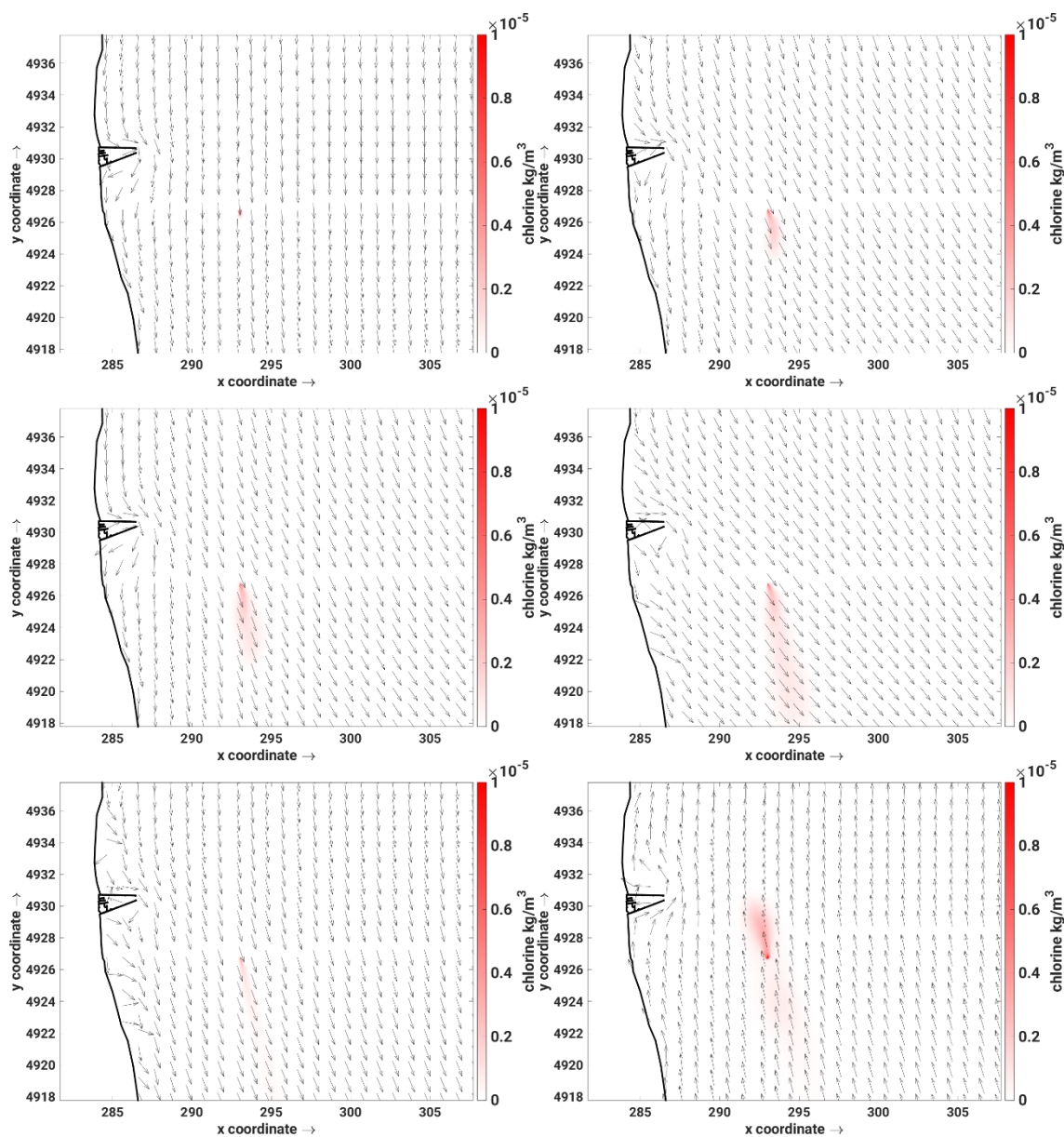
A 18. Scarico FSRU – Temperatura a ≈ -5 m. Scenario 4.



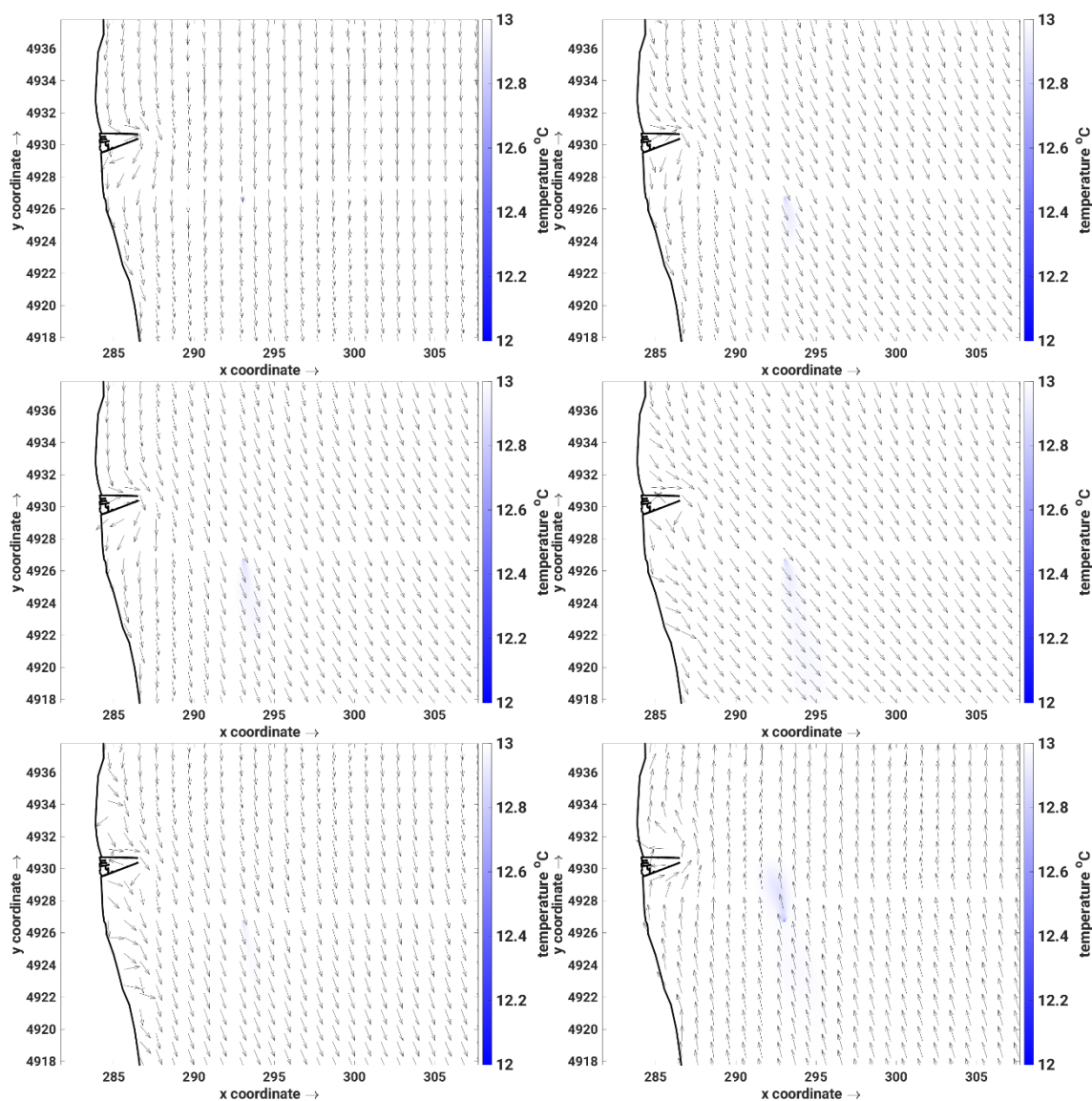
A 19. Scarico FSRU – Cloro a ≈ -5 m. Scenario 43.



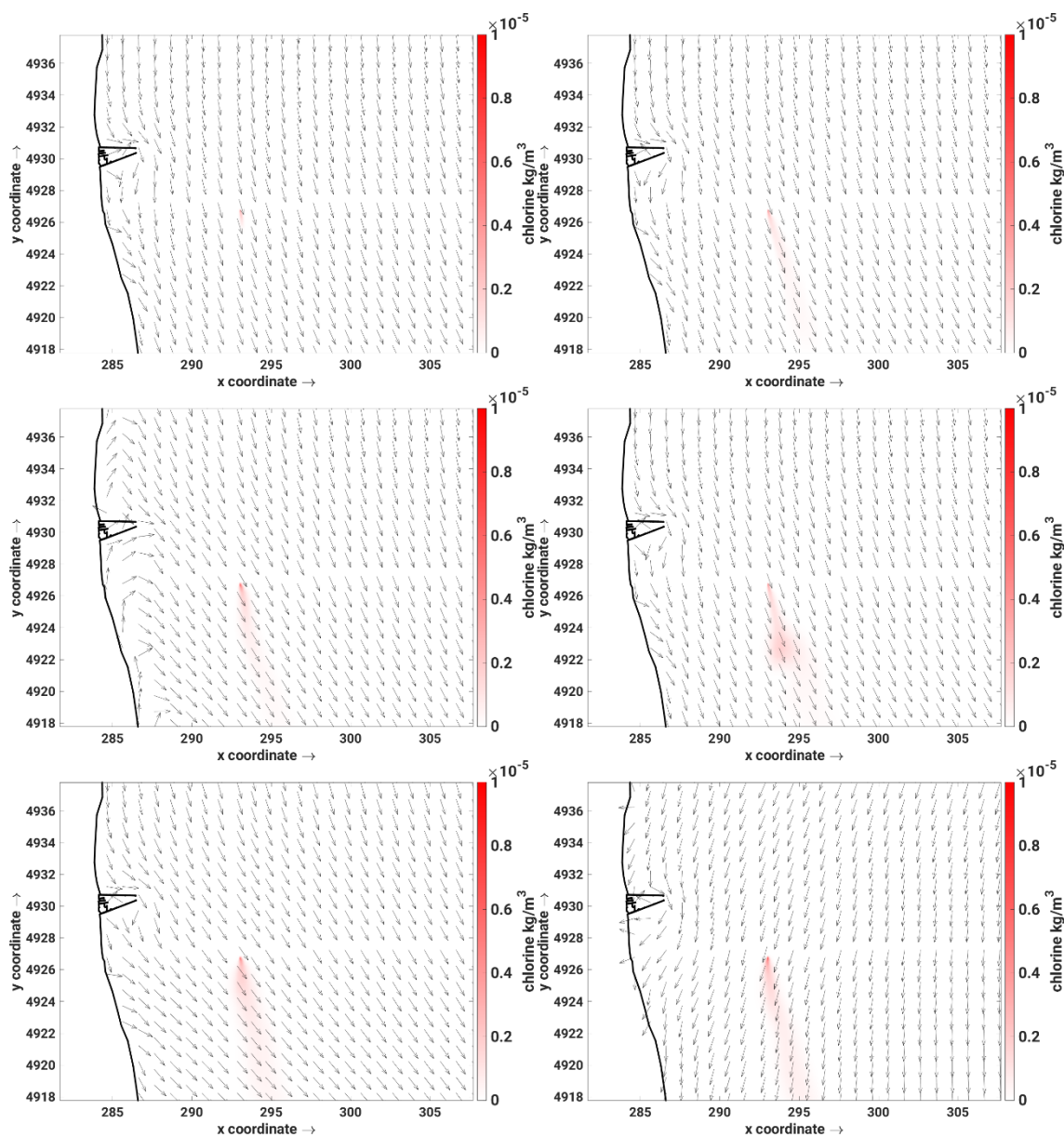
A 20. Scarico FSRU – Temperatura a ≈ -5 m. Scenario 43.



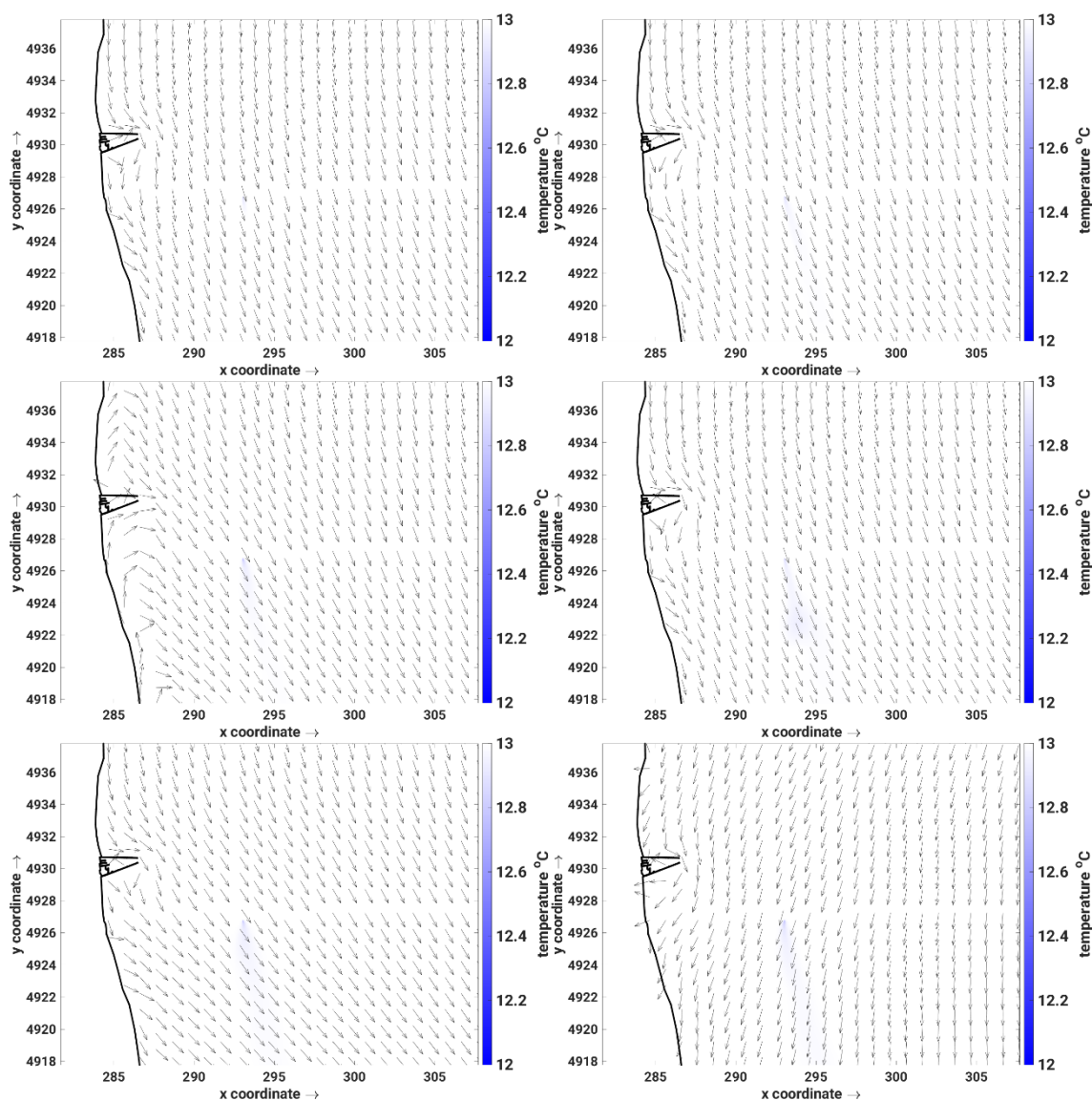
A 21. Scarico FSRU – Cloro a ~ 5 m. Scenario 82.



A 22. Scarico FSRU – Temperatura a ≈ -5 m. Scenario 82.



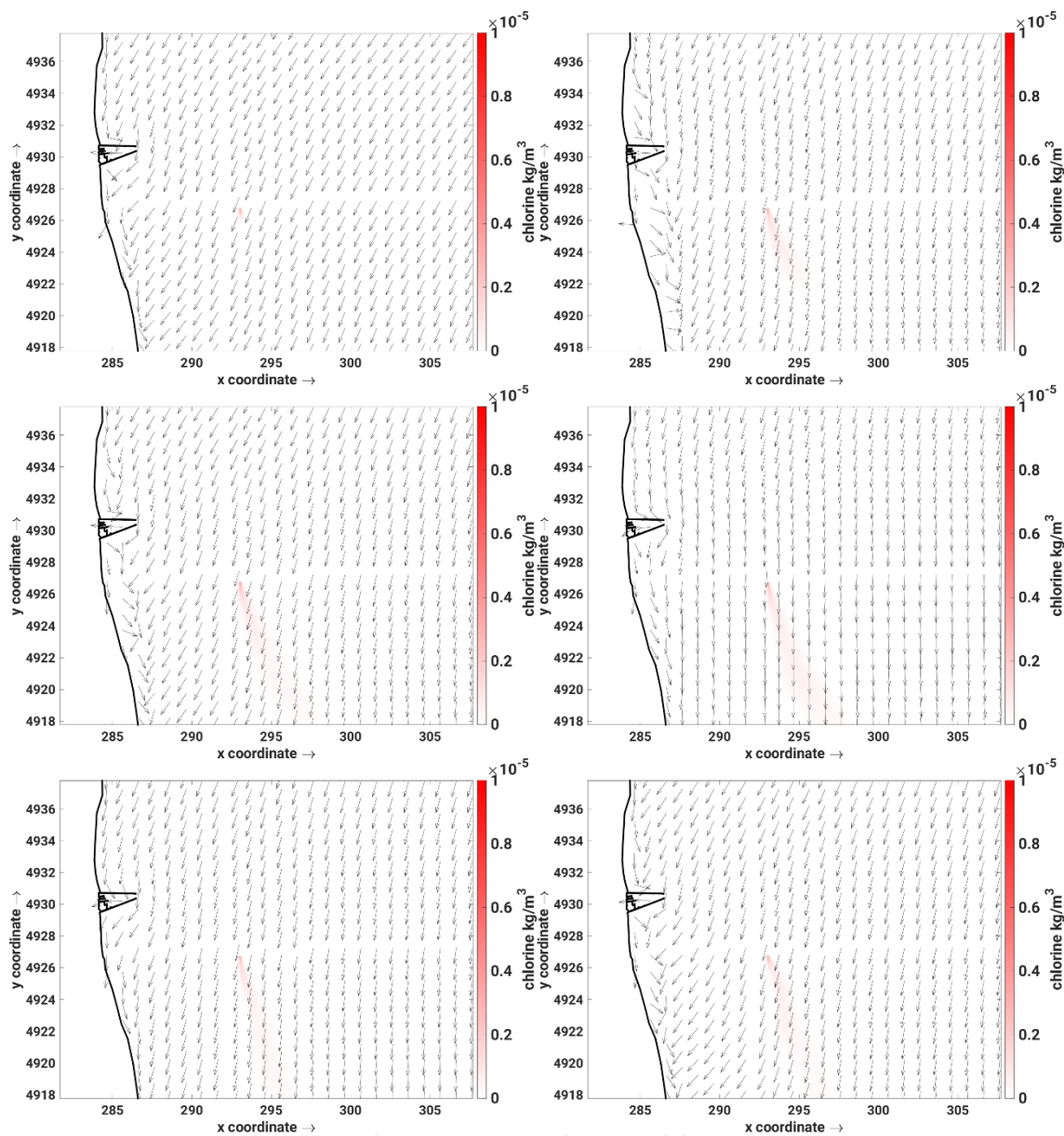
A 23. Scarico FSRU – Cloro a ~ 5 m. Scenario 93.



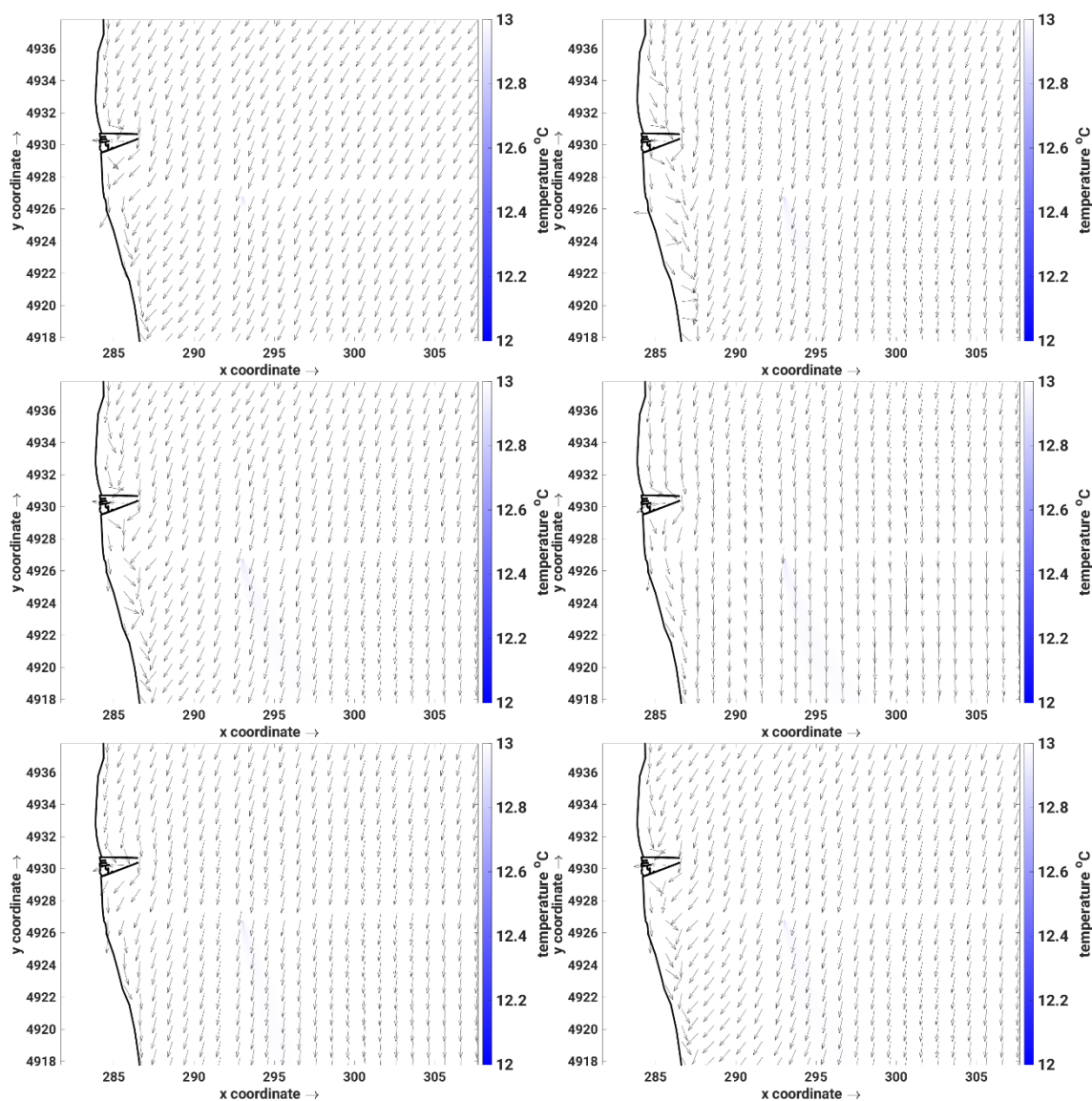
A 24. Scarico FSRU – Temperatura a ≈ -5 m. Scenario 93.



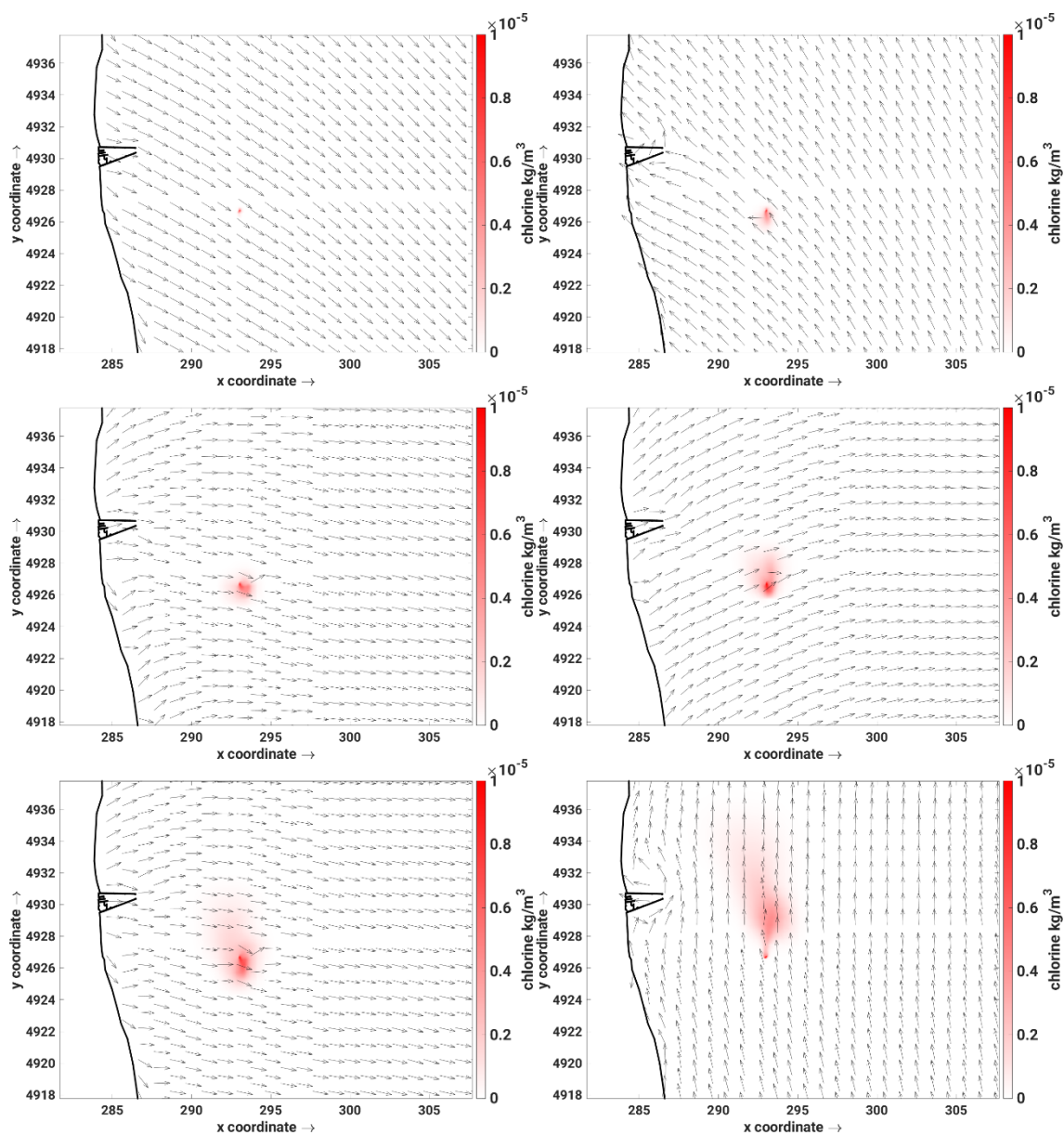
Si riportano di seguito le mappe di cloro e temperatura per lo strato superficiale.



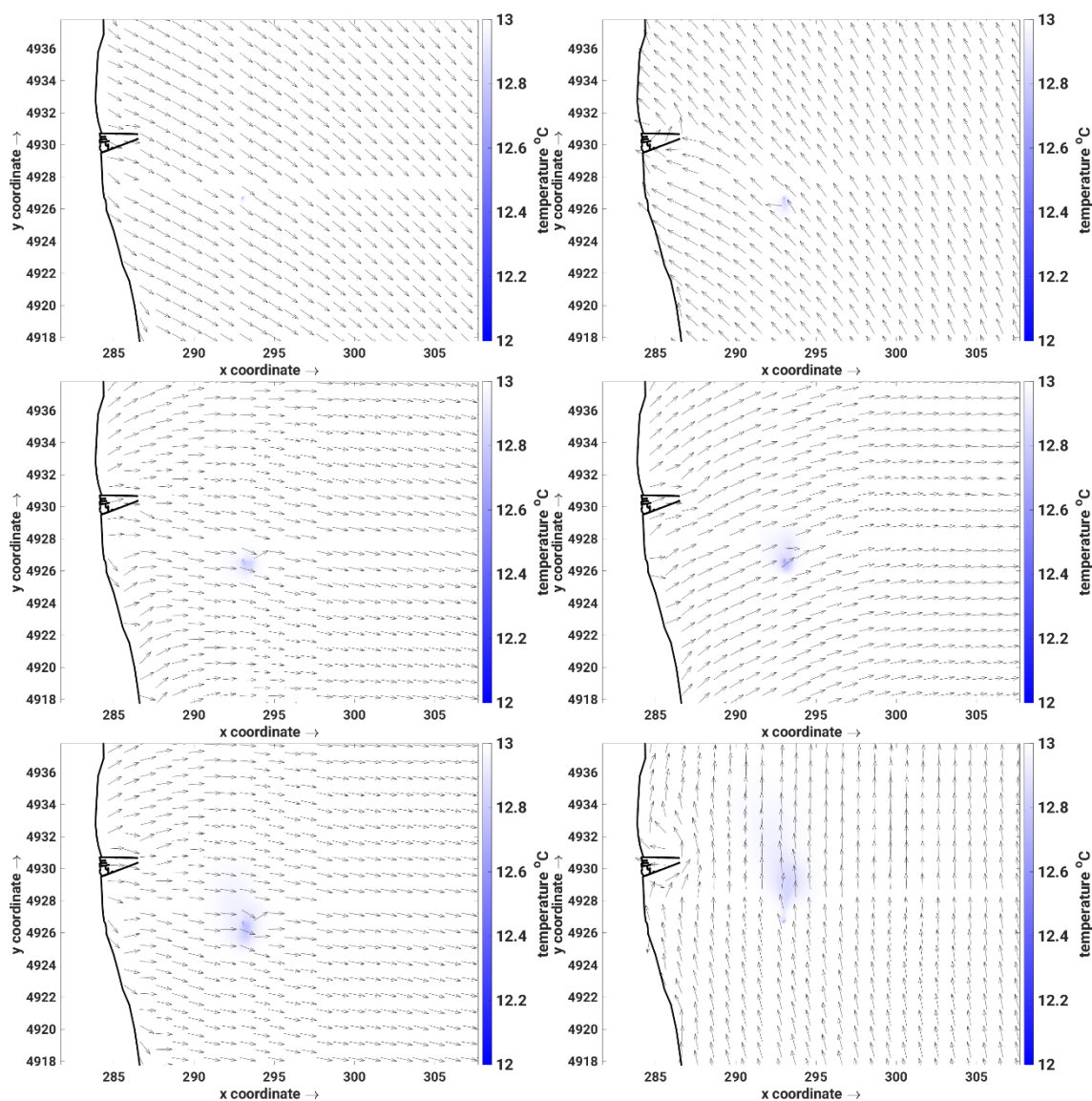
A 25. Scarico FSRU – Cloro in superficie. Scenario 4.



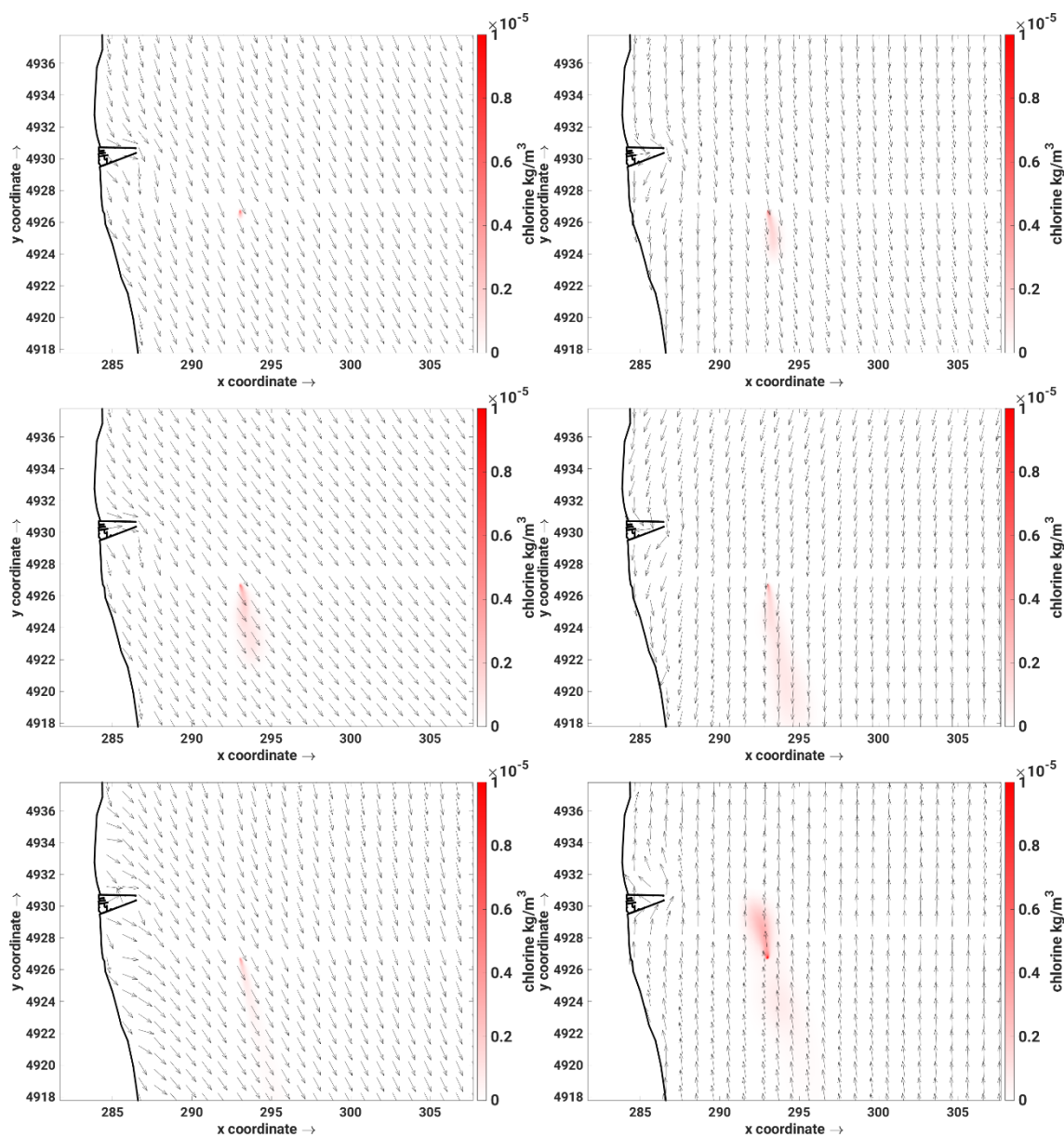
A 26. Scarico FSRU – Temperatura in superficie. Scenario 4.



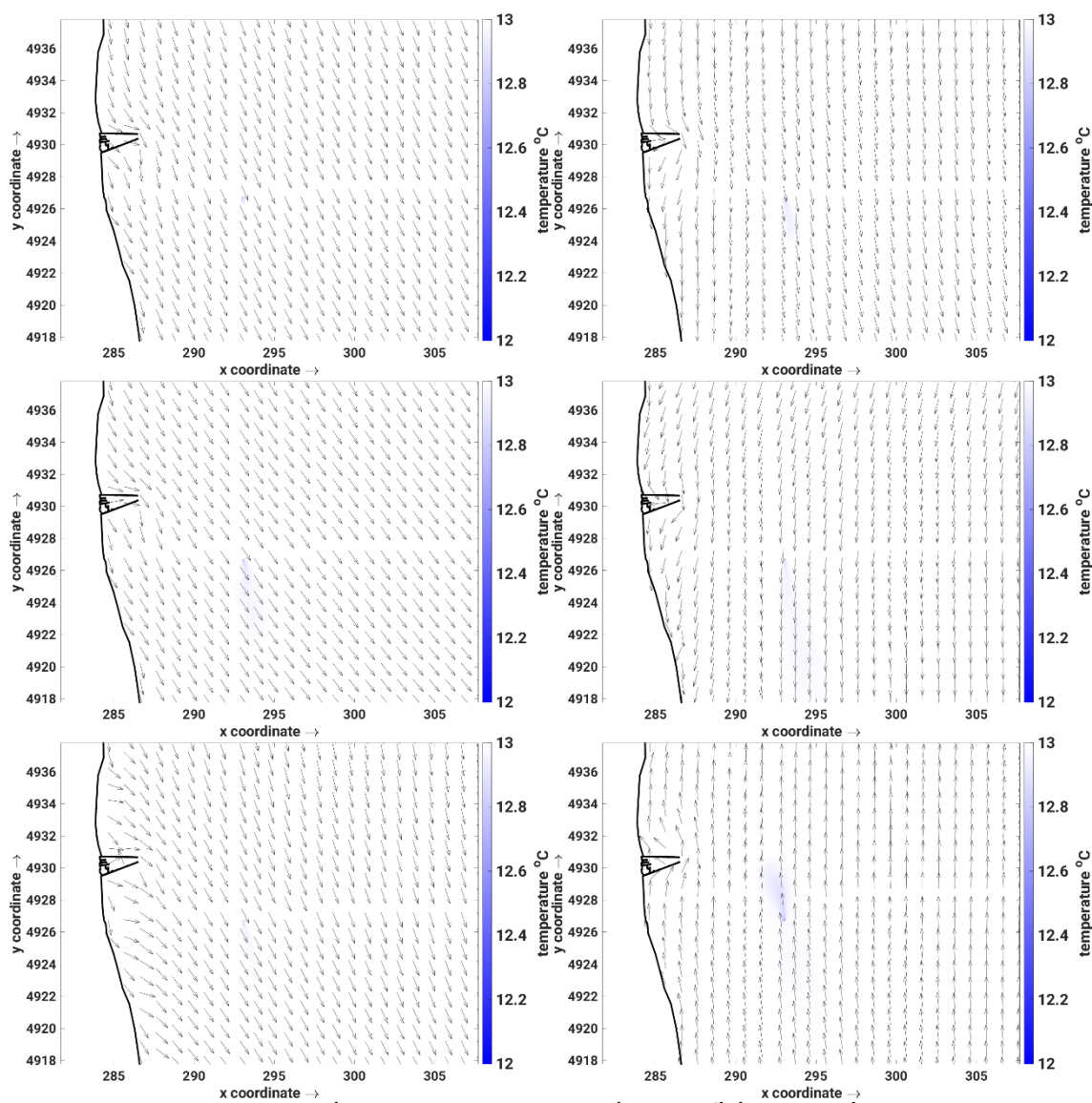
A 27. Scarico FSRU – Cloro in superficie. Scenario 43.



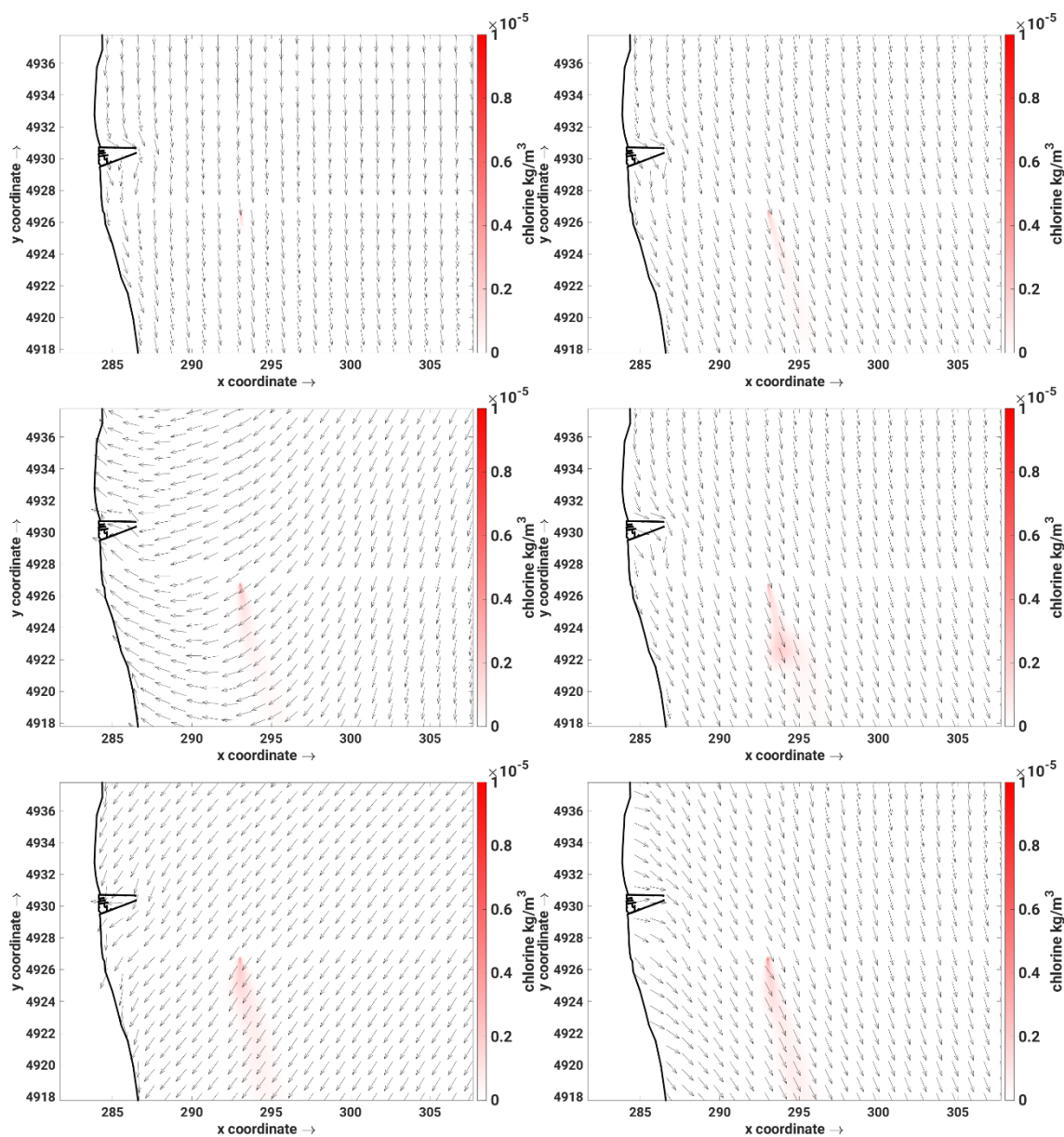
A 28. Scarico FSRU – Temperatura in superficie. Scenario 43.



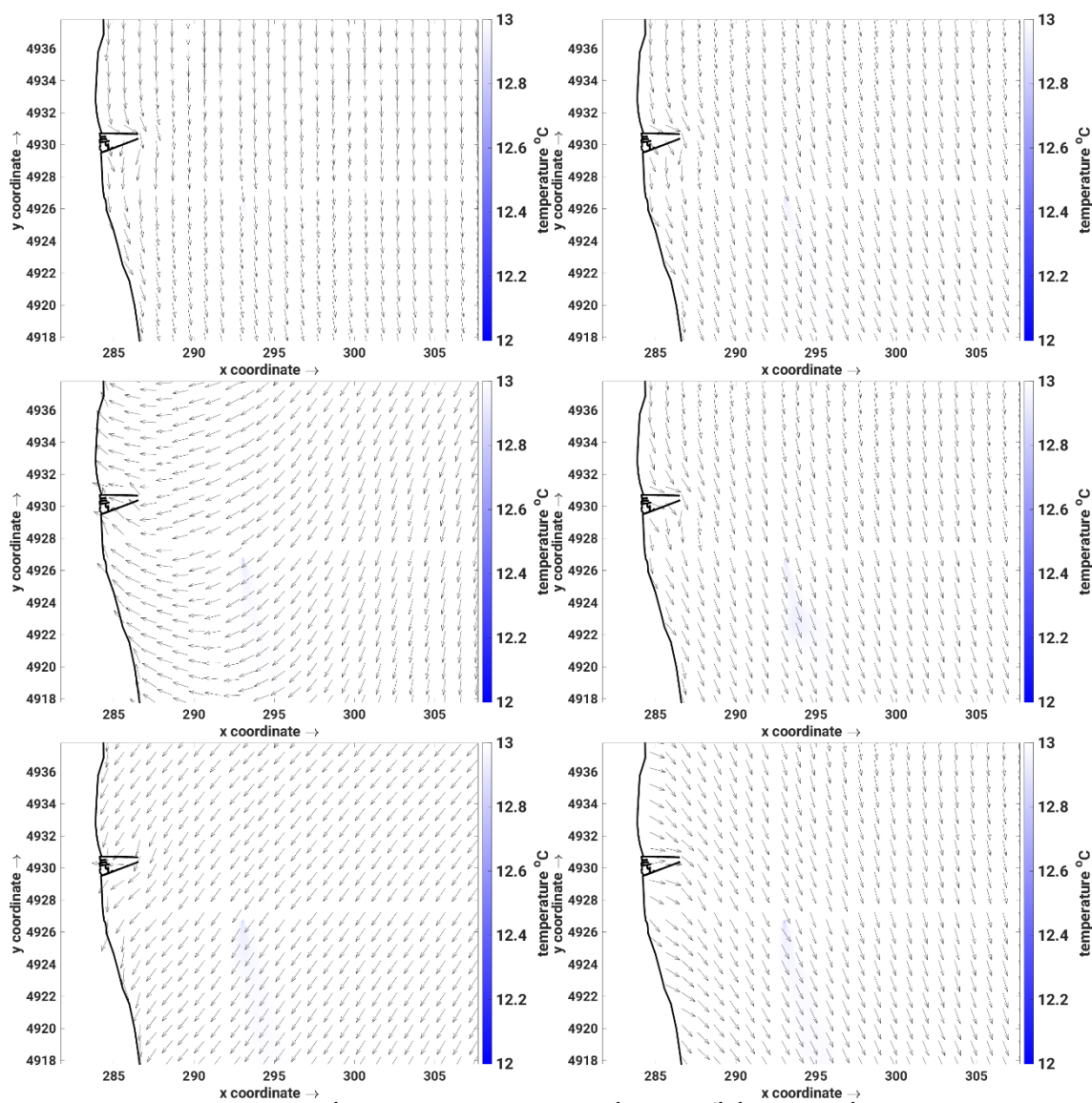
A 29. Scarico FSRU – Cloro in superficie. Scenario 82.



A 30. Scarico FSRU – Temperatura in superficie. Scenario 82.



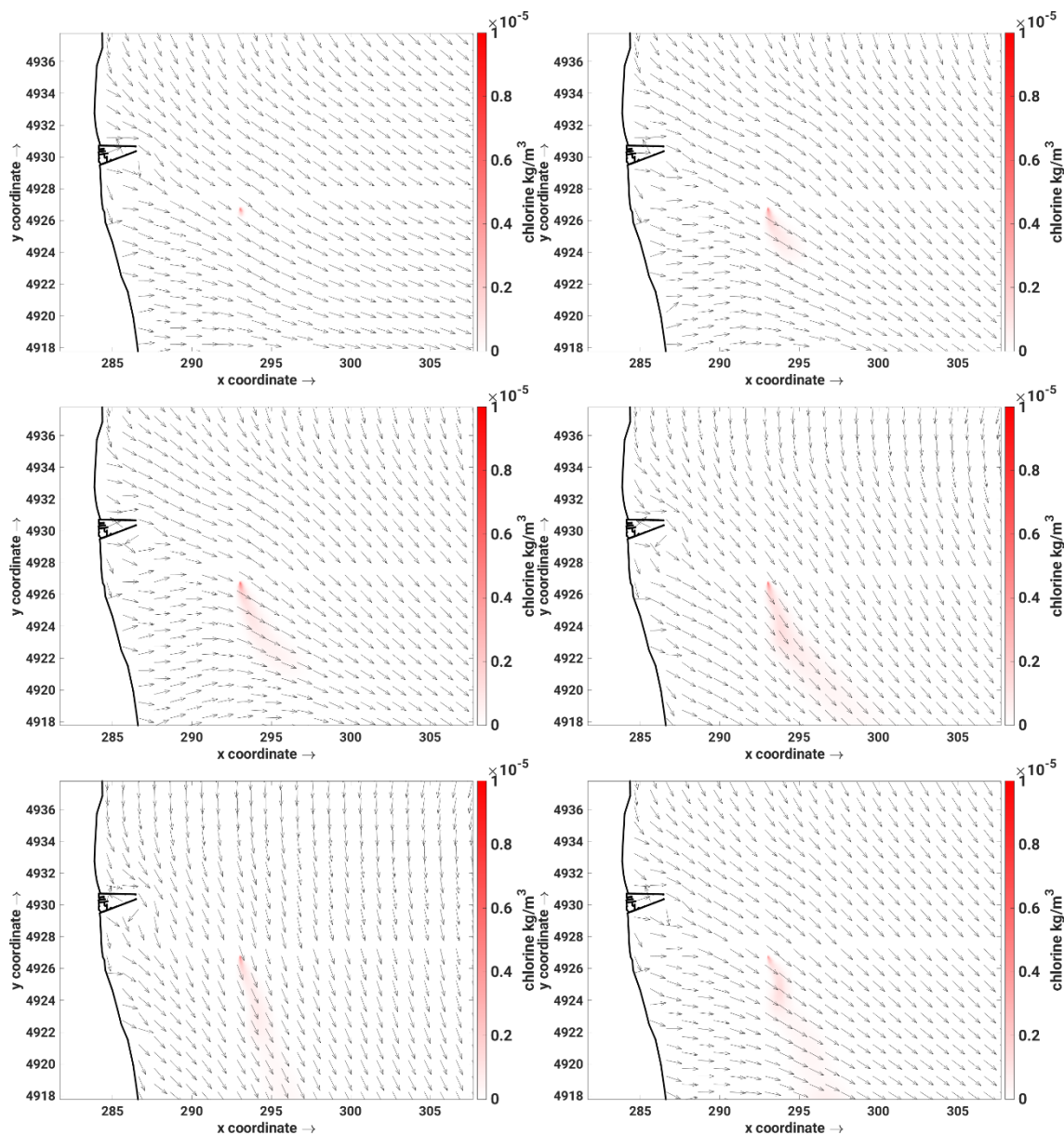
A 31. Scarico FSRU – Cloro in superficie. Scenario 93.



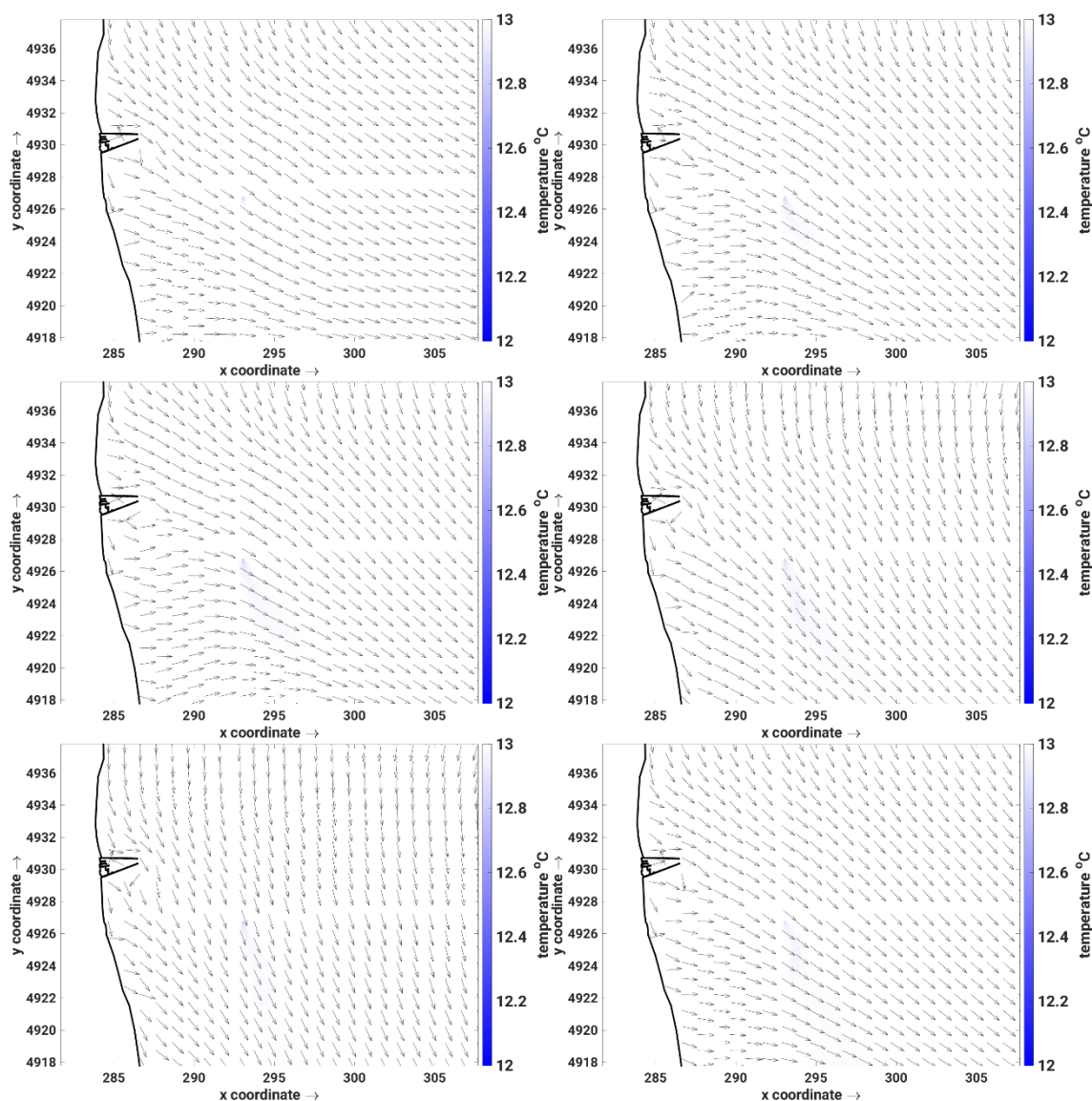
A 32. Scarico FSRU – Temperatura in superficie. Scenario 93.



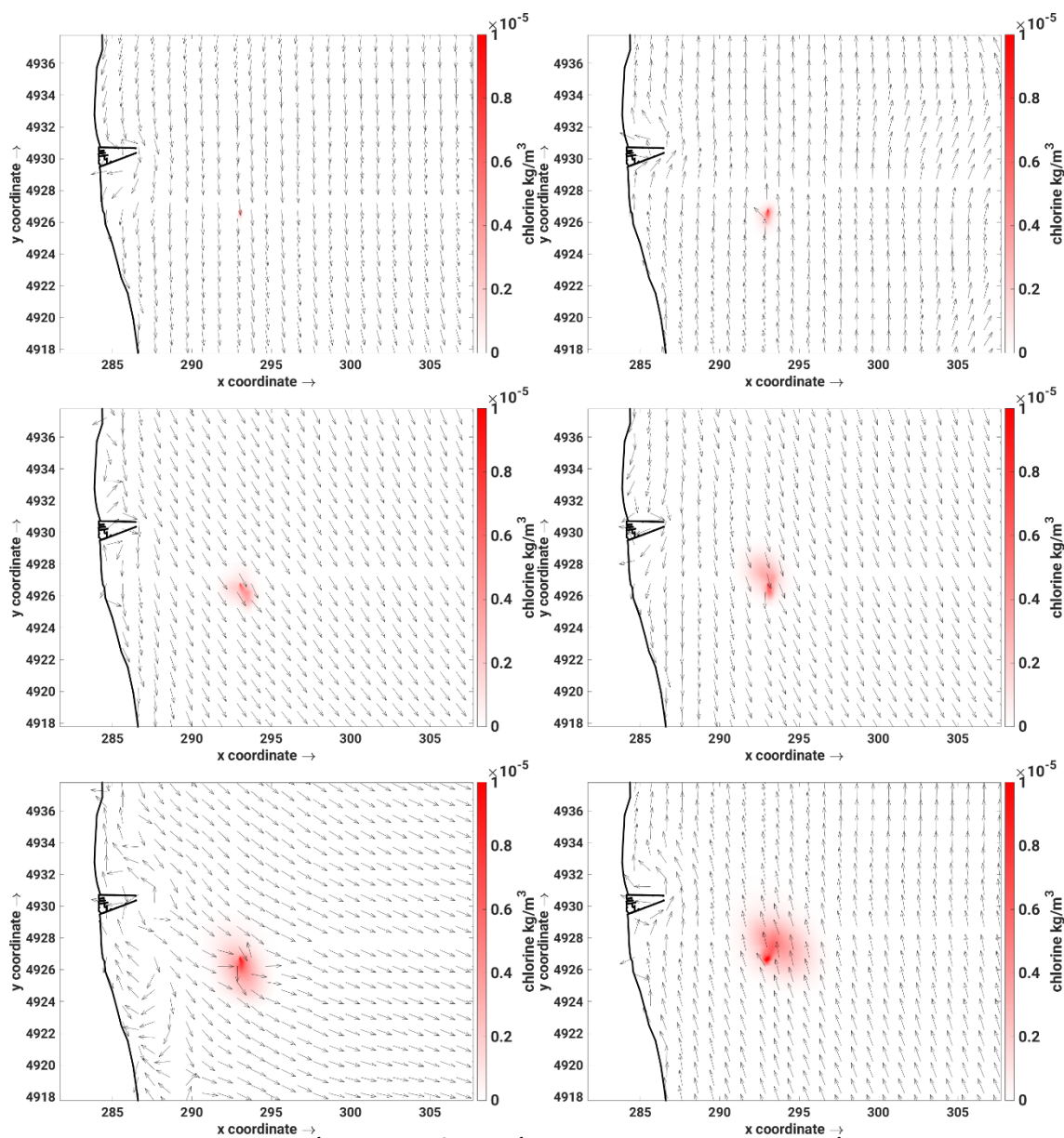
Si riportano di seguito le mappe di cloro e temperatura per lo strato intermedio, associate alle simulazioni forzate anche con dati CMS.



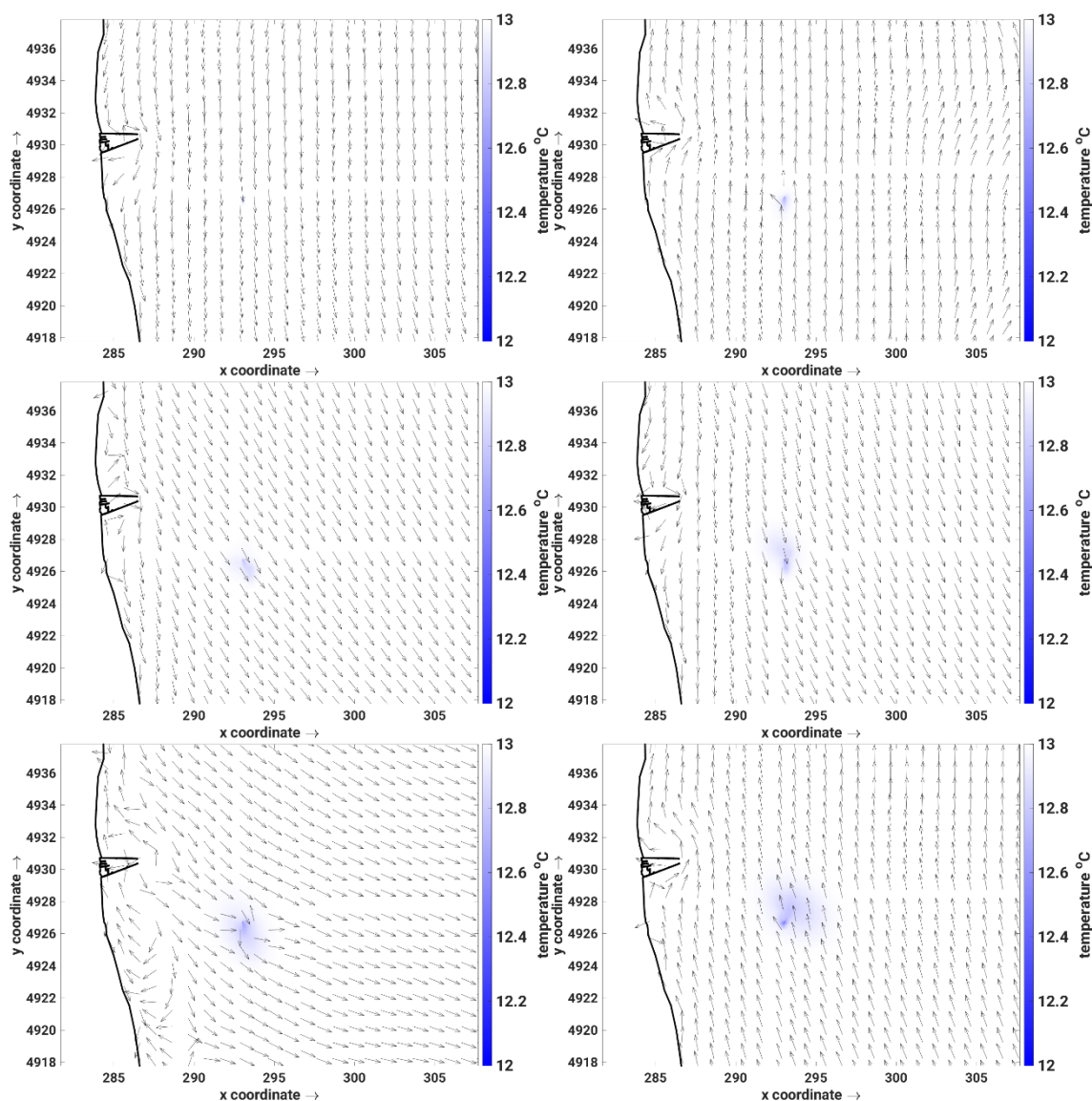
A 33. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro a $\approx -5m$. Scenario 4.



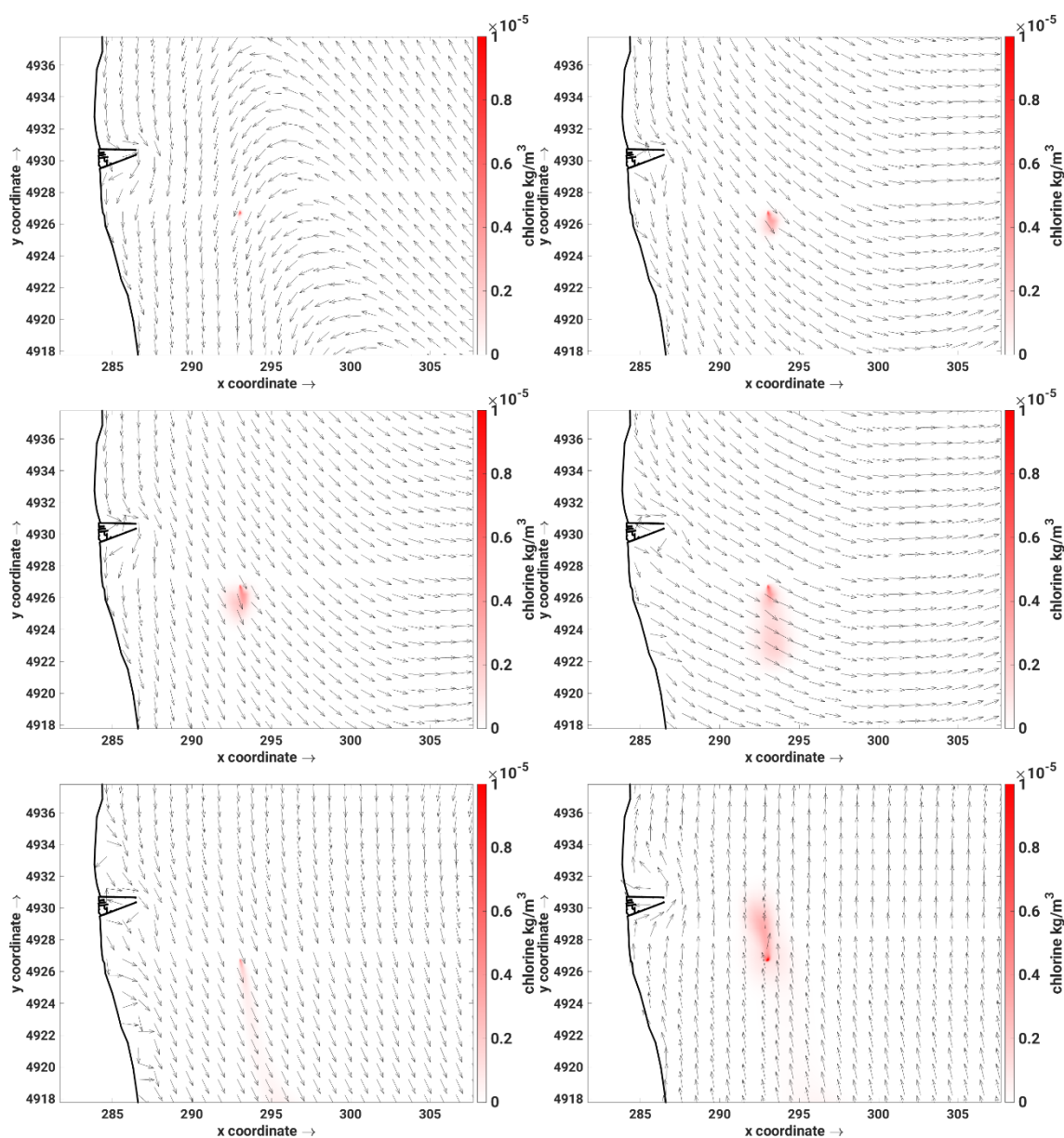
A 34. Scarico FSRU + forzanti CMS. Temperatura a ~5m. Scenario 4.



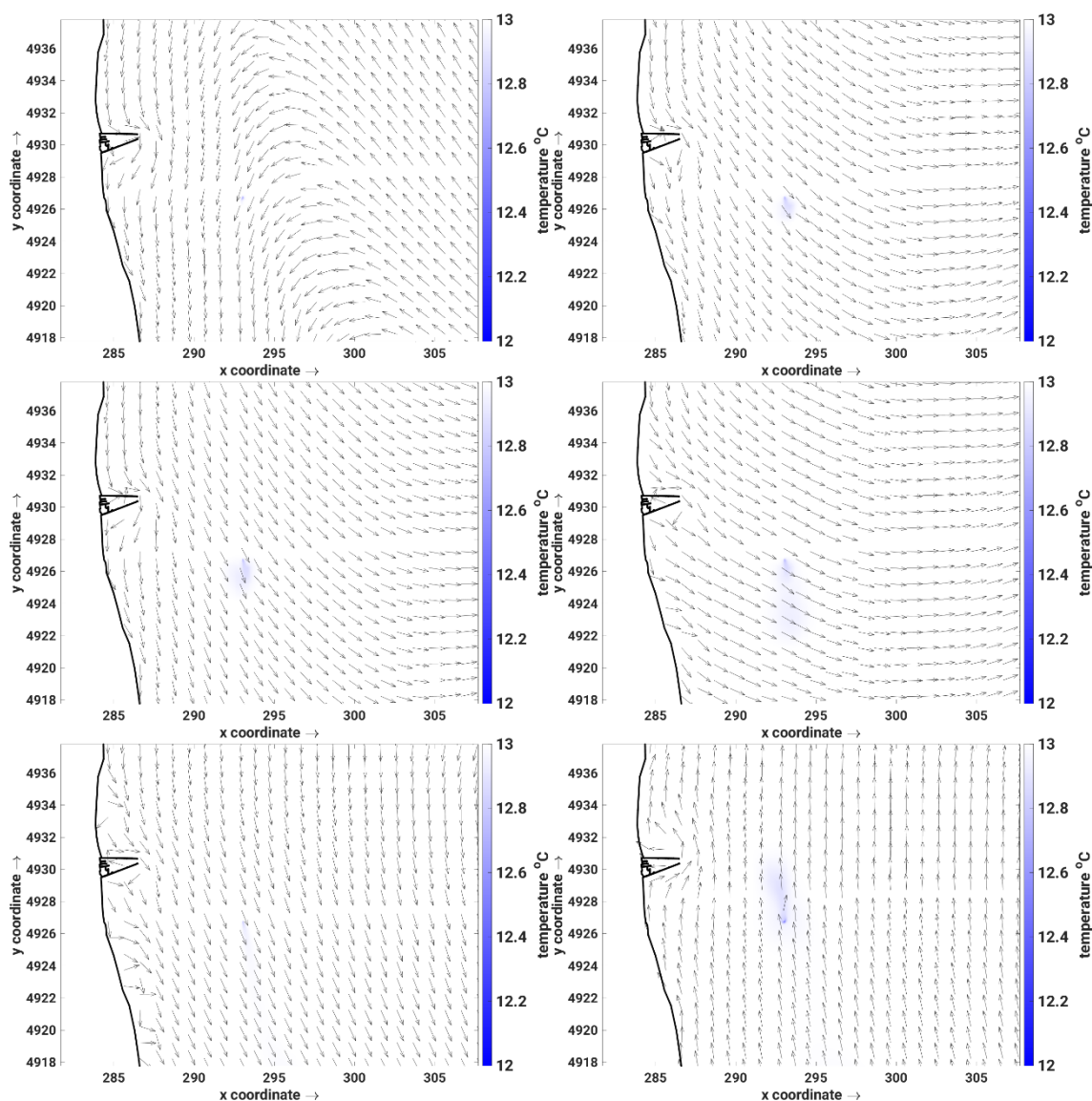
A 35. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro a $\approx 5m$. Scenario 43.



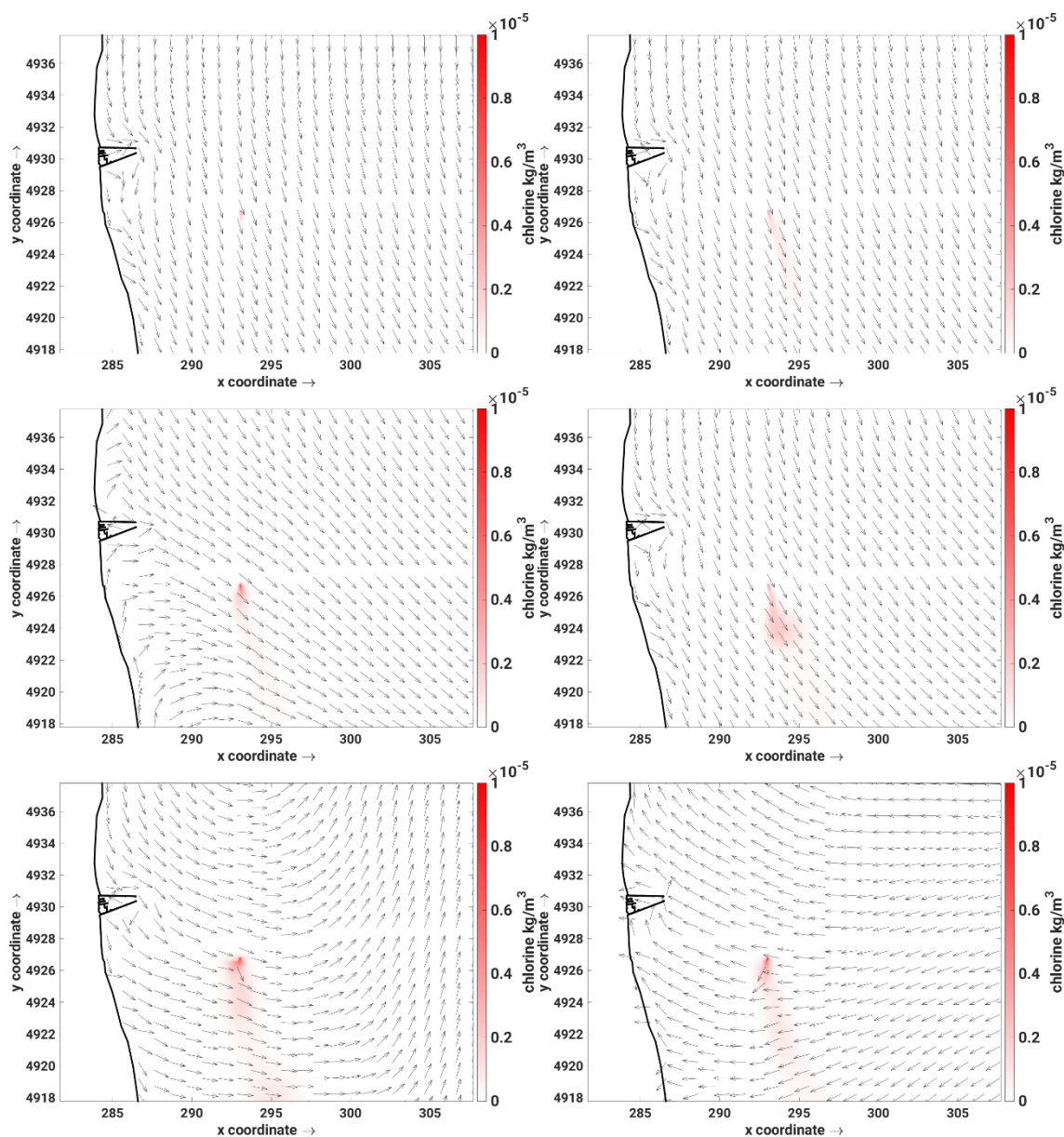
A 36. Scarico FSRU + forzanti CMS. Temperatura a $\approx -5m$. Scenario 43.



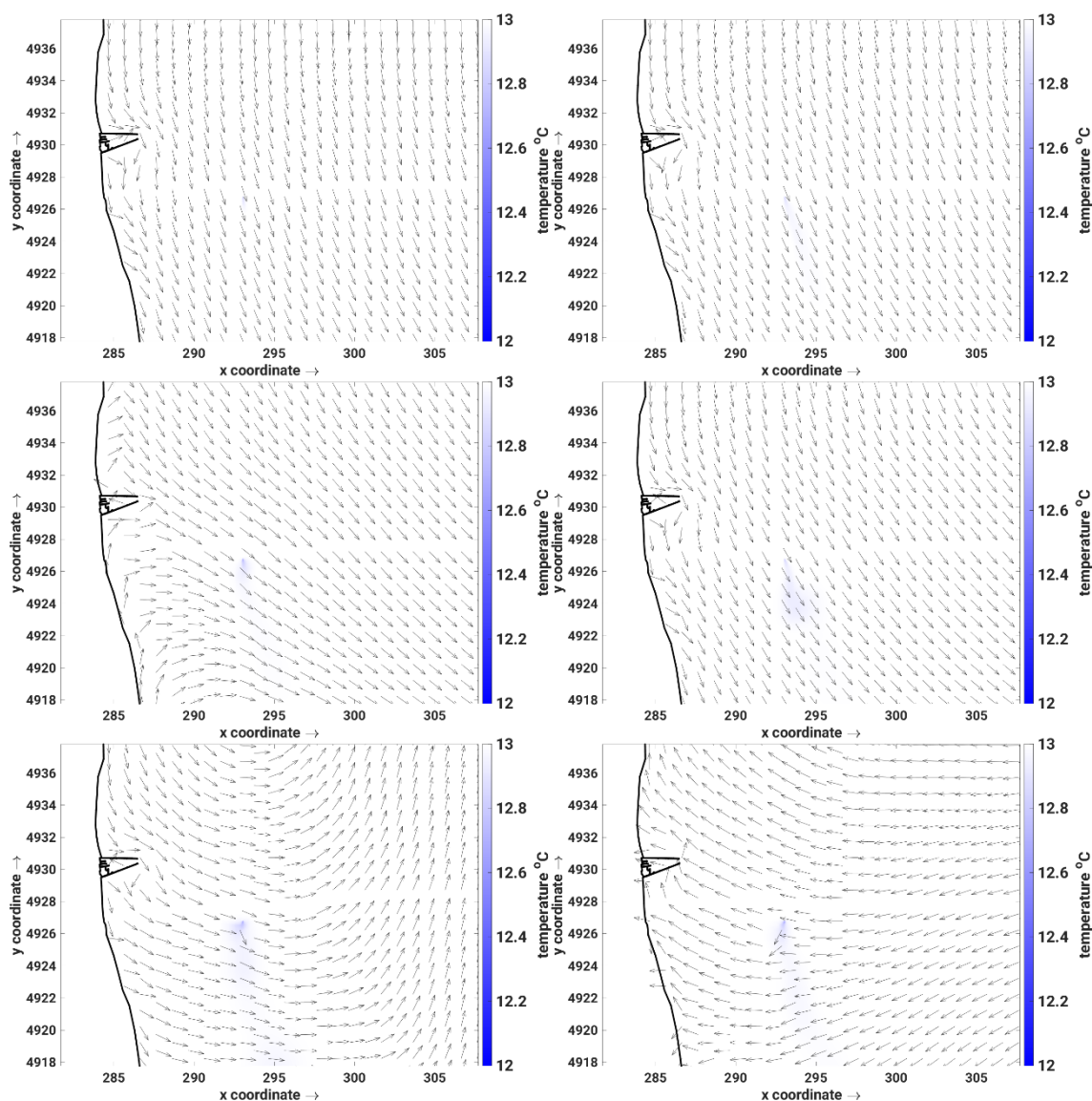
A 37. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro a $\sim 5m$. Scenario 82.



A 38. Scarico FSRU + forzanti CMS. Temperatura a $\approx -5m$. Scenario 82.



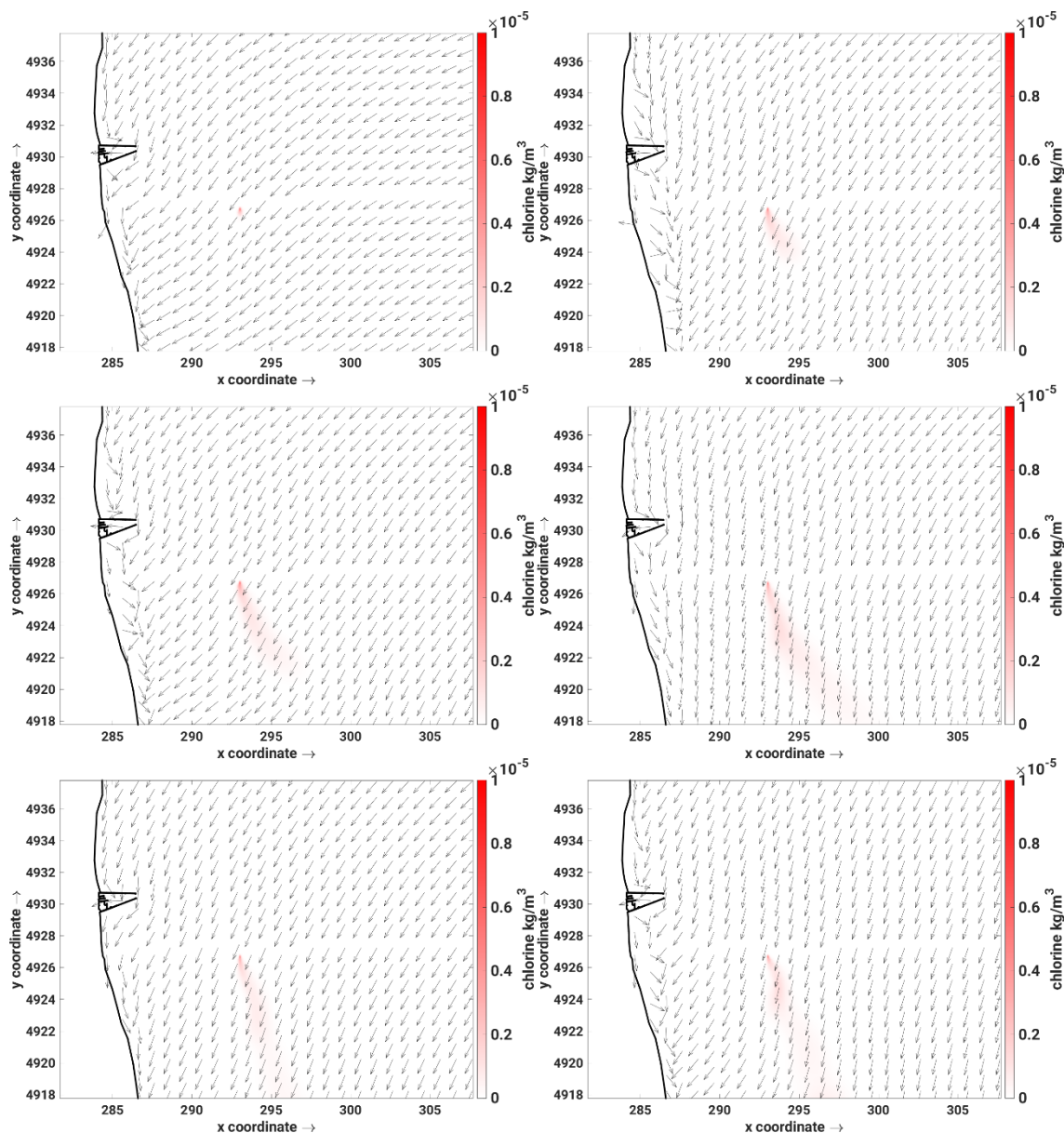
A 39. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro a $\approx -5m$. Scenario 93.



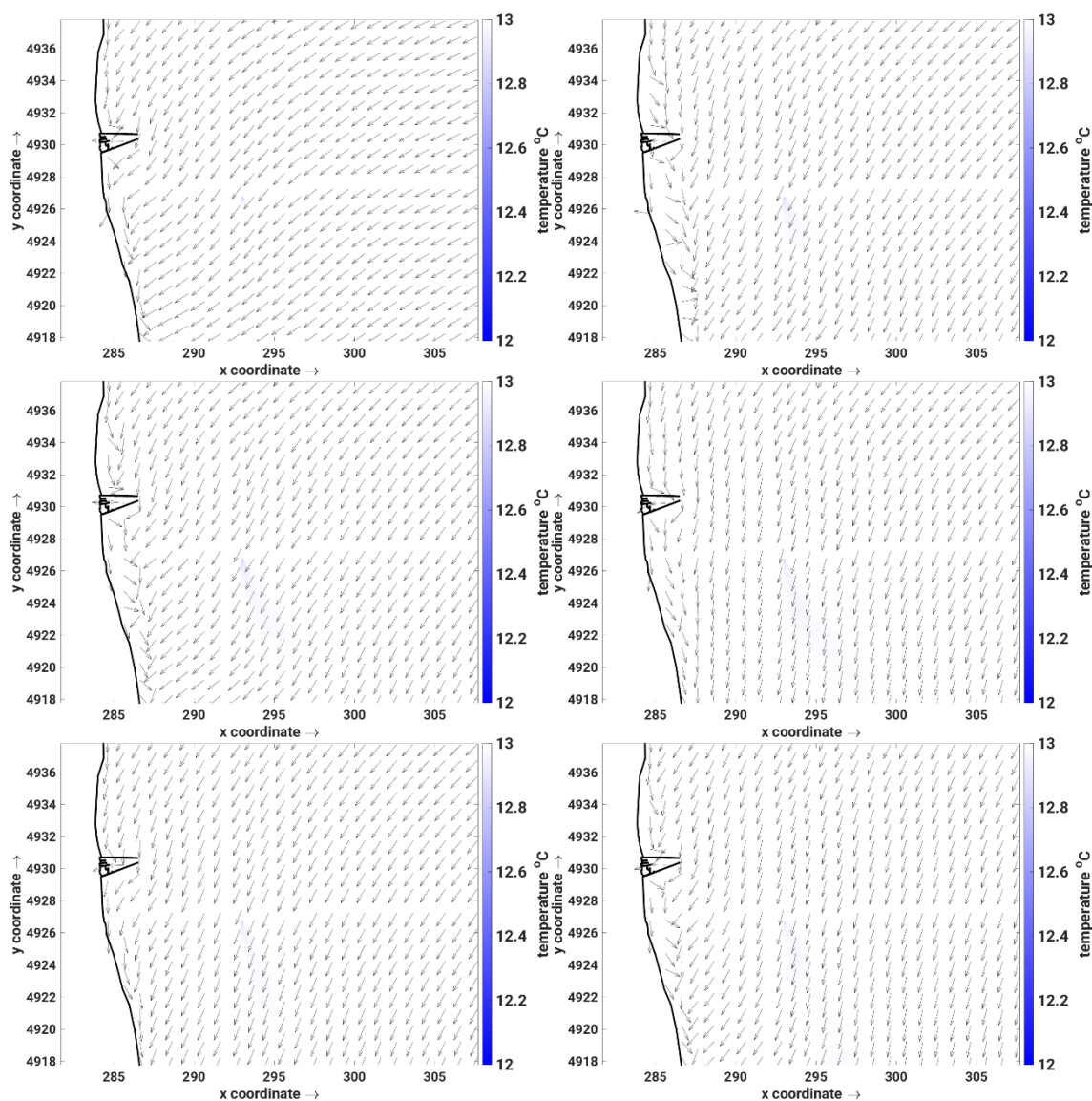
A 40. Scarico FSRU + forzanti CMS. Temperatura a ~-5m. Scenario 93.



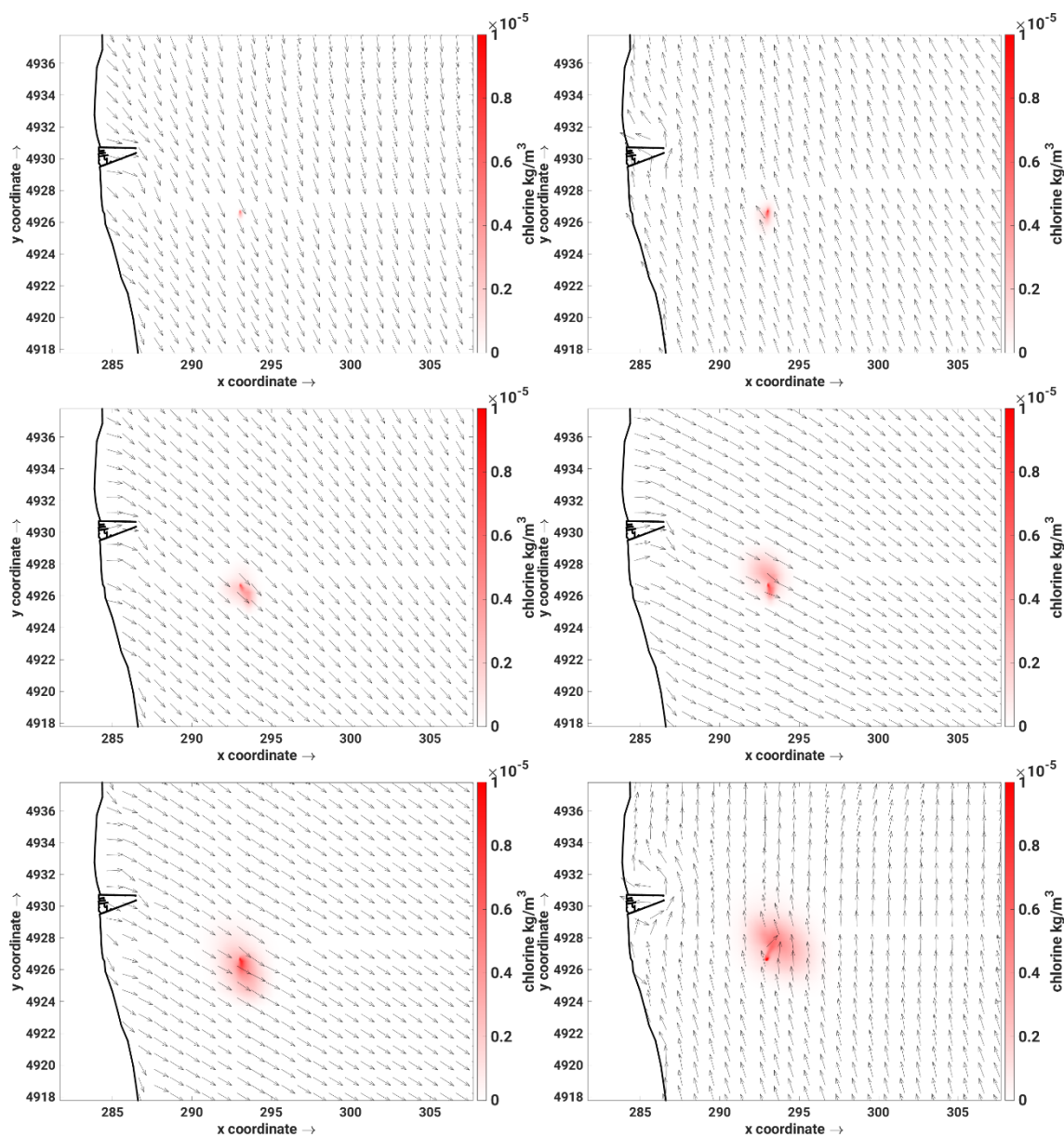
Si riportano di seguito le mappe di cloro e temperatura per lo strato superficiale, associate alle simulazioni forzate anche con dati CMS.



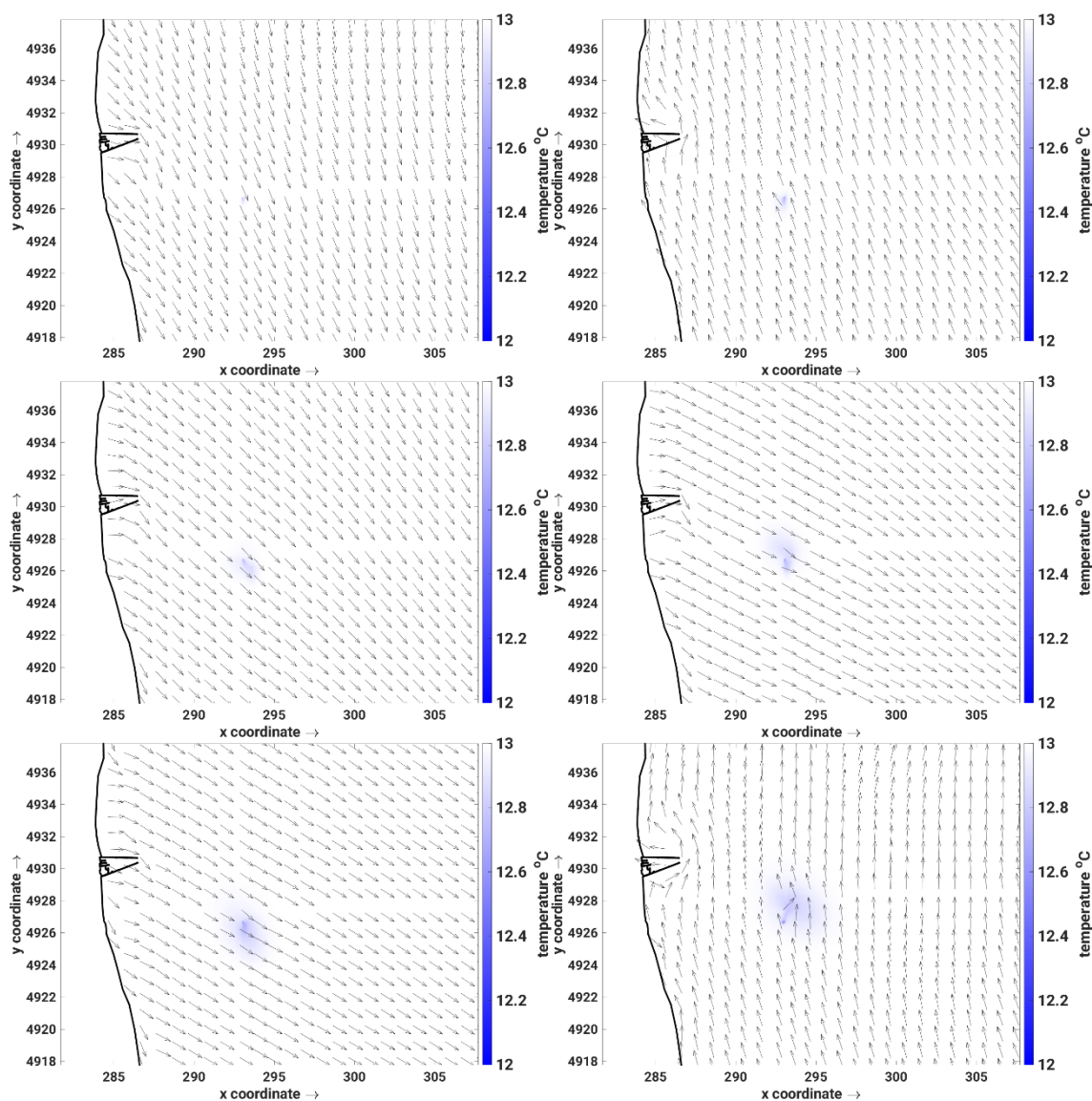
A 41. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro in superficie. Scenario 4.



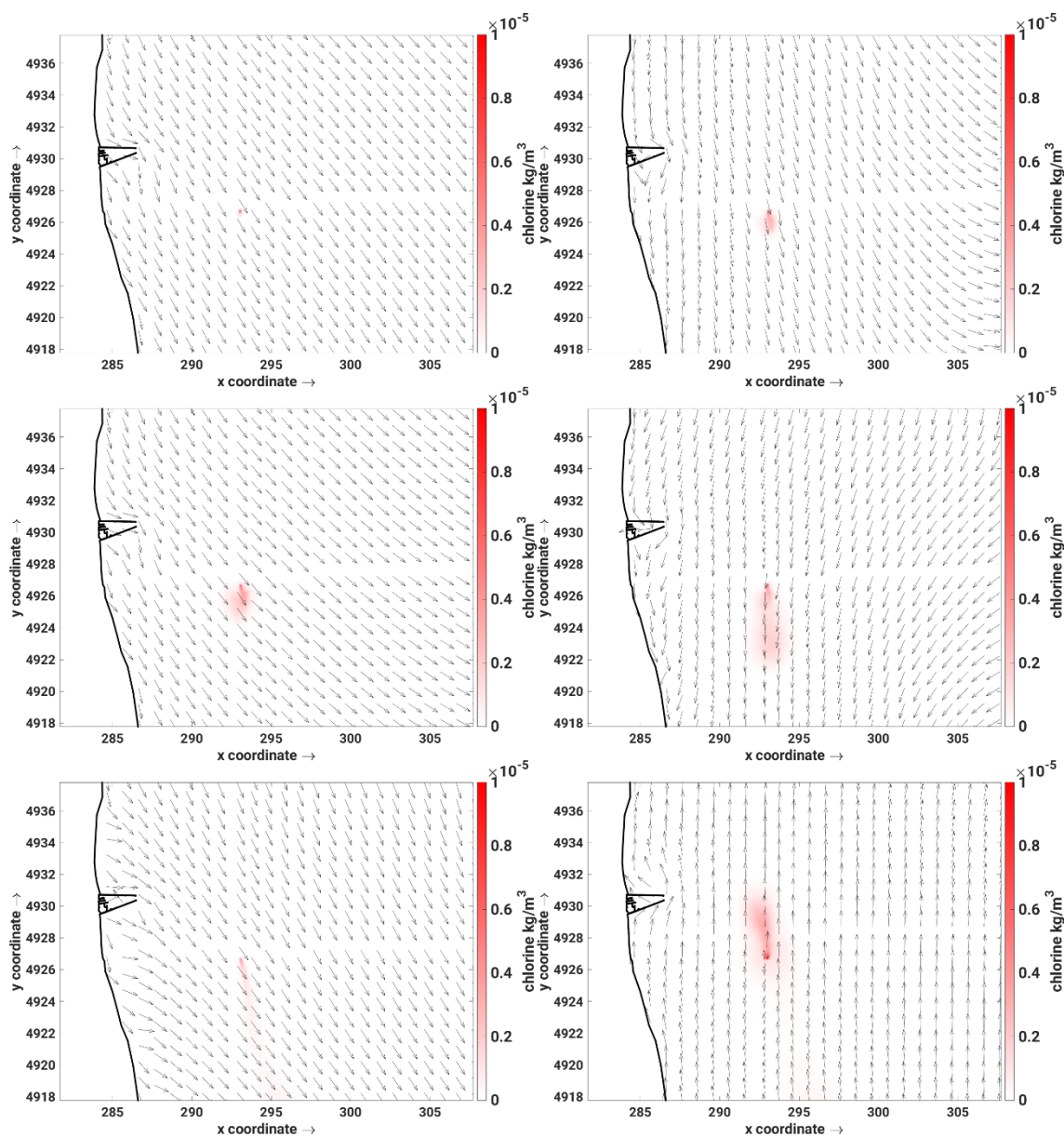
A 42. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura in superficie. Scenario 4.



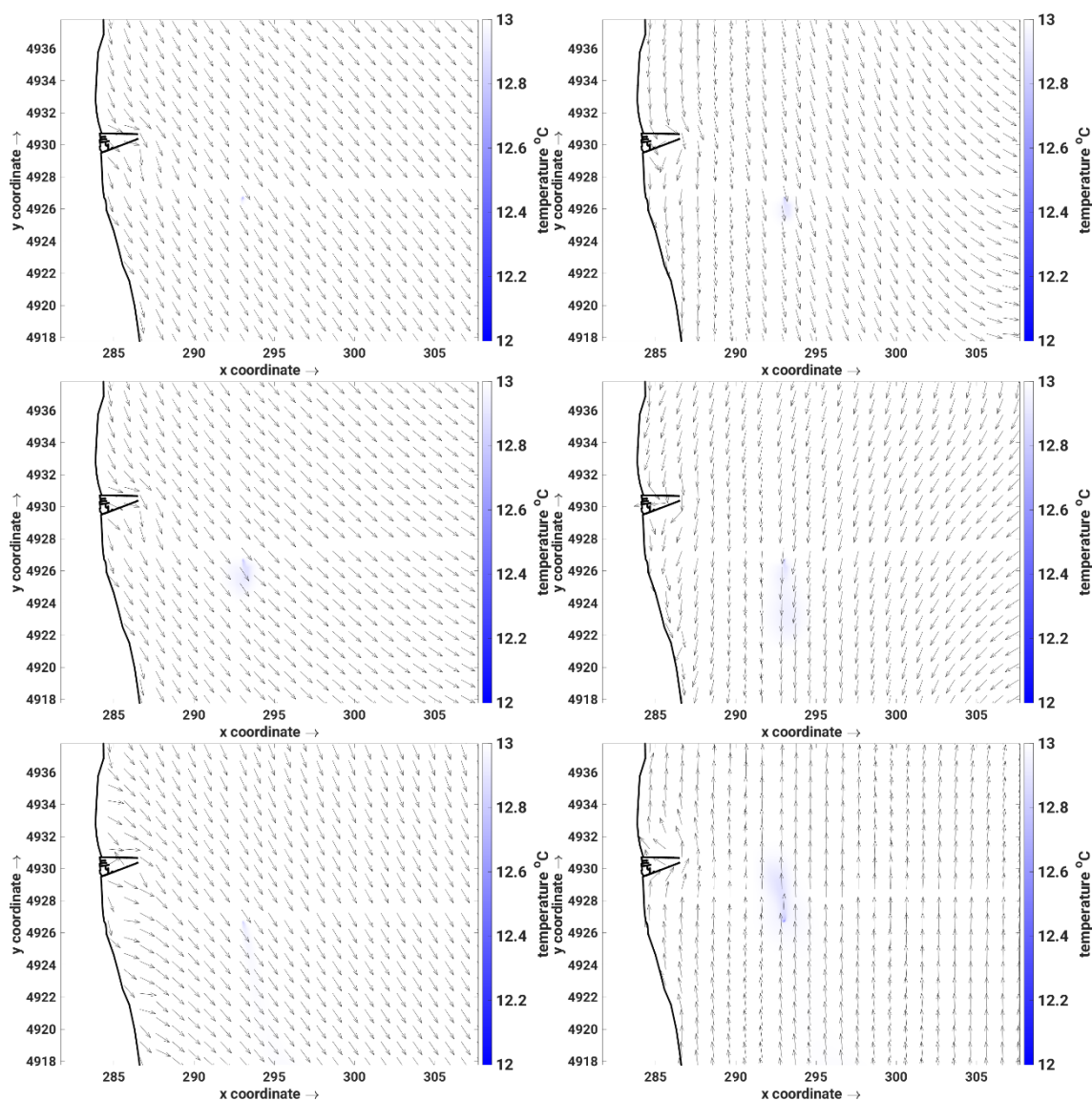
A 43. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro in superficie. Scenario 43.



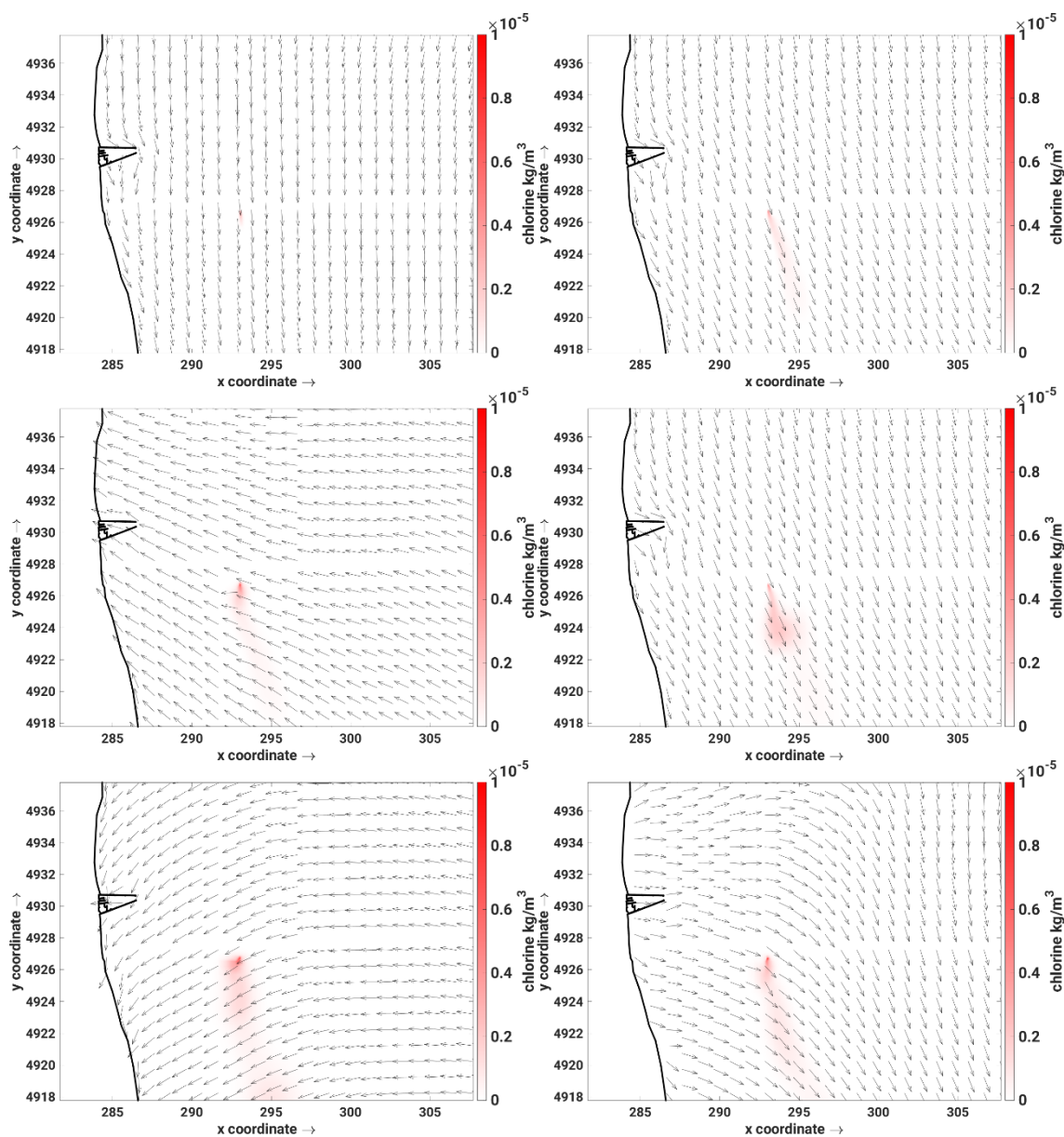
A 44. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura in superficie. Scenario 43.



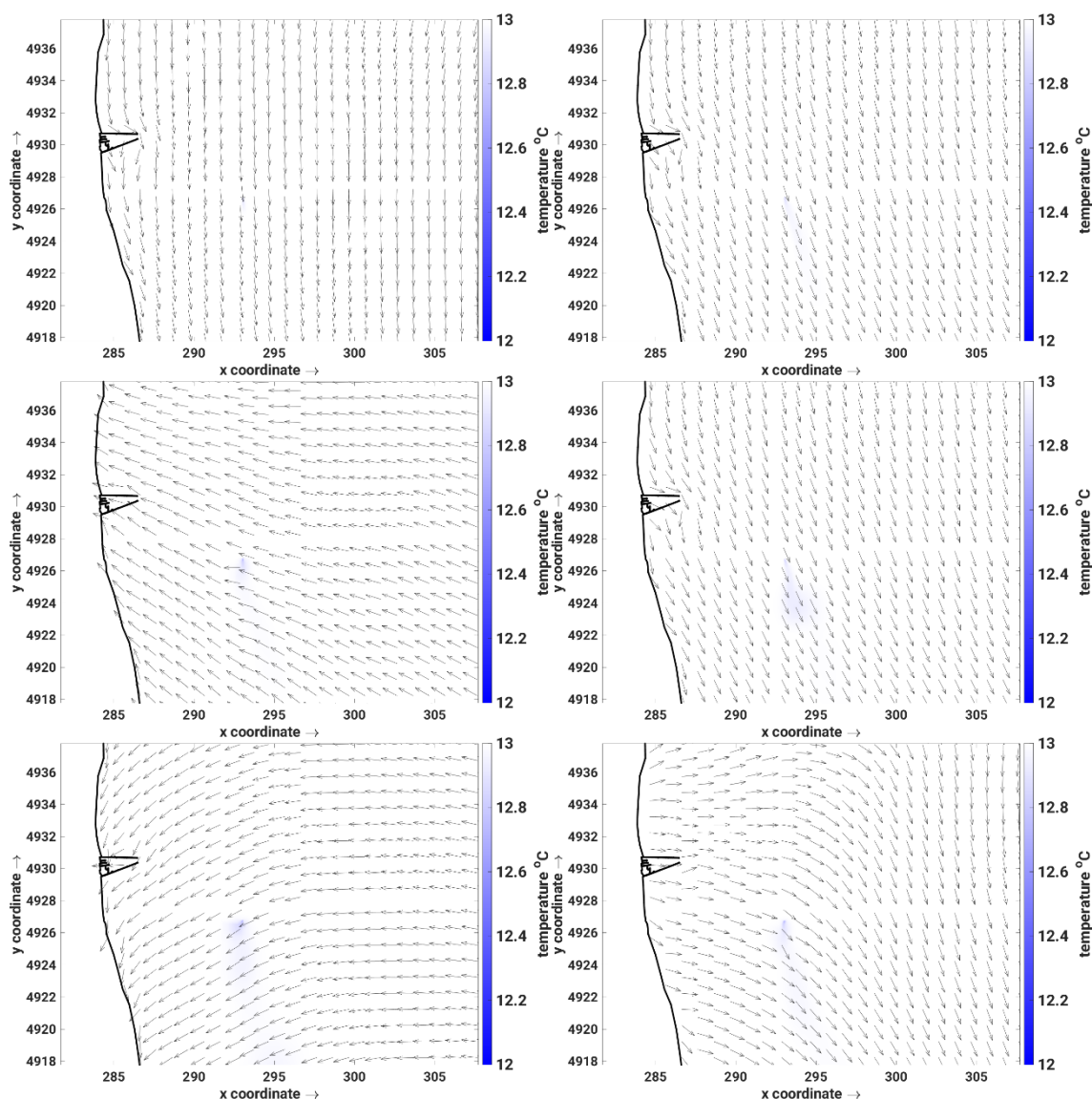
A 45. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro in superficie. Scenario 82.



A 46. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura in superficie. Scenario 82.



A 47. Scarico FSRU + forzanti CMS – Cloro in superficie. Scenario 93.



A 48. Scarico FSRU + forzanti CMS – Temperatura in superficie. Scenario 93.