



# Dipartimento di Scienze e Tecnologie (DiST)

**FSRU Alto Tirreno - Scenari di deposizione di sedimenti  
marini, concentrazioni di IPA e metalli pesanti nell'area  
marina antistante Vado Ligure (Savona).**

**Rapporto tecnico-scientifico**

Prof. G. Budillon  
Dott. Ing. A. Ciappa

15 settembre 2024

## Sommario

<b>1. Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2. Analisi correntometriche del sito</b>	<b>4</b>
Scelta del dataset e strategia delle simulazioni	4
Adattamento dei flussi costieri	10
Dati utilizzati nelle simulazioni	12
<b>3. Descrizione del modello di trasporto</b>	<b>14</b>
Generalità	14
Sedimentazione	17
Diffusione	18
<b>4. Metodologie utilizzate</b>	<b>19</b>
Organizzazione ed esecuzione delle simulazioni	19
Stima dei quantitativi sedimentati	24
Stima delle concentrazioni di IPA e dei metalli pesanti	25
<b>5. Simulazioni effettuate</b>	<b>27</b>
Fasi 1 e 2 – Sollevamento dall’exit point e deponia (ottobre)	27
Fasi 3 e 4 – Recupero dalla deponia e ripristino all’exit point (dicembre)	29
Fase 5 - Post trenching della condotta (febbraio)	34
<b>6. Risultati finali</b>	<b>36</b>
Stime dei quantitativi sedimentati	36
Stime delle concentrazioni di IPA	43
Stime delle concentrazioni di metalli pesanti	52
<b>7. Conclusioni</b>	<b>57</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>59</b>

## *1. Introduzione*

Il Dipartimento di Scienze e Tecnologie dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope" ha stipulato la Convenzione di Ricerca **FSRU Alto Tirreno - Scenari di deposizione di sedimenti marini, concentrazioni di IPA e materiali pesanti nell'area marina antistante Vado Ligure (Savona) con imbarcazioni tipo "fall pipe vessel"** che prevede la simulazione di scenari di diffusione e sedimentazione dei materiali interessati dalle attività di costruzione dell'opera denominata FSRU Alto Tirreno e collegamento alla rete nazionale gasdotti.

In questa relazione vengono descritti i test di simulazione numerica relativi alla dispersione dei sedimenti, di IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici) e dei metalli pesanti in diversi contesti:

- (a) attività relative all'area del "exit point";
- (b) attività relative all'area di realizzazione della condotta.

L'analisi degli esperimenti numerici è finalizzata alla individuazione delle aree di deposizione, alla stima del quantitativo di sedimento depositato sul fondale e delle concentrazioni di IPA e dei metalli pesanti.

Le operazioni che interessano la movimentazione di sedimenti sono previste nei mesi di:

- ottobre 2025, scavo nell'exit point per il recupero fresa e deposizione del materiale di scavo in un'area di deposito temporaneo;
- dicembre 2025, recupero del materiale depositato e ripristino dello stesso nell'area di scavo all'exit point;
- febbraio 2026, interro della condotta sottomarina.

## ***2. Analisi correntometriche del sito***

Le condizioni dinamiche dell'area (correnti alle diverse quote dalla superficie al fondo) sono state investigate utilizzando dati CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) che rappresenta la componente di monitoraggio marino del Programma europeo Copernicus (<https://marine.copernicus.eu/>).

In prima istanza sono stati considerati due dataset CMEMS prodotti dal modello NEMO operativo nel Mar Mediterraneo su una griglia a circa 4.2 km di risoluzione, ambedue disponibili per gli ultimi 2-3 anni:

- **[A]** MEDSEA\_MULTIYEAR\_PHY\_006\_004, dataset di re-analisi che include le correnti medie mensili lungo la verticale;
- **[B]** MEDSEA\_ANALYSISFORECAST\_PHY\_006\_013, dataset di previsioni ed analisi che include le correnti medie giornaliere lungo la verticale.

### **Scelta del dataset e strategia delle simulazioni**

Un esempio dei dati medi mensili di re-analisi in ottobre 2022 e in ottobre 2023 è riportato in Fig. 1. I dati giornalieri sono disposti su un grigliato regolare sul quale sono riportati i valori alle diverse quote lungo la verticale.

Le simulazioni oggetto di questo studio hanno lo scopo di indicare le aree di sedimentazione e i carichi inquinanti, includendo possibilmente i diversi casi di circolazione nell'area. Questa informazione non è inclusa nel dataset di medie mensili **[A]**, sebbene più affidabile dell'altro **[B]** in quanto prodotto di re-analisi.

CMEMS - MEDSEA\_MULTIYEAR\_PHY\_006\_004 Mediterranean Sea Physical Reanalysis Product 3D monthly mean current

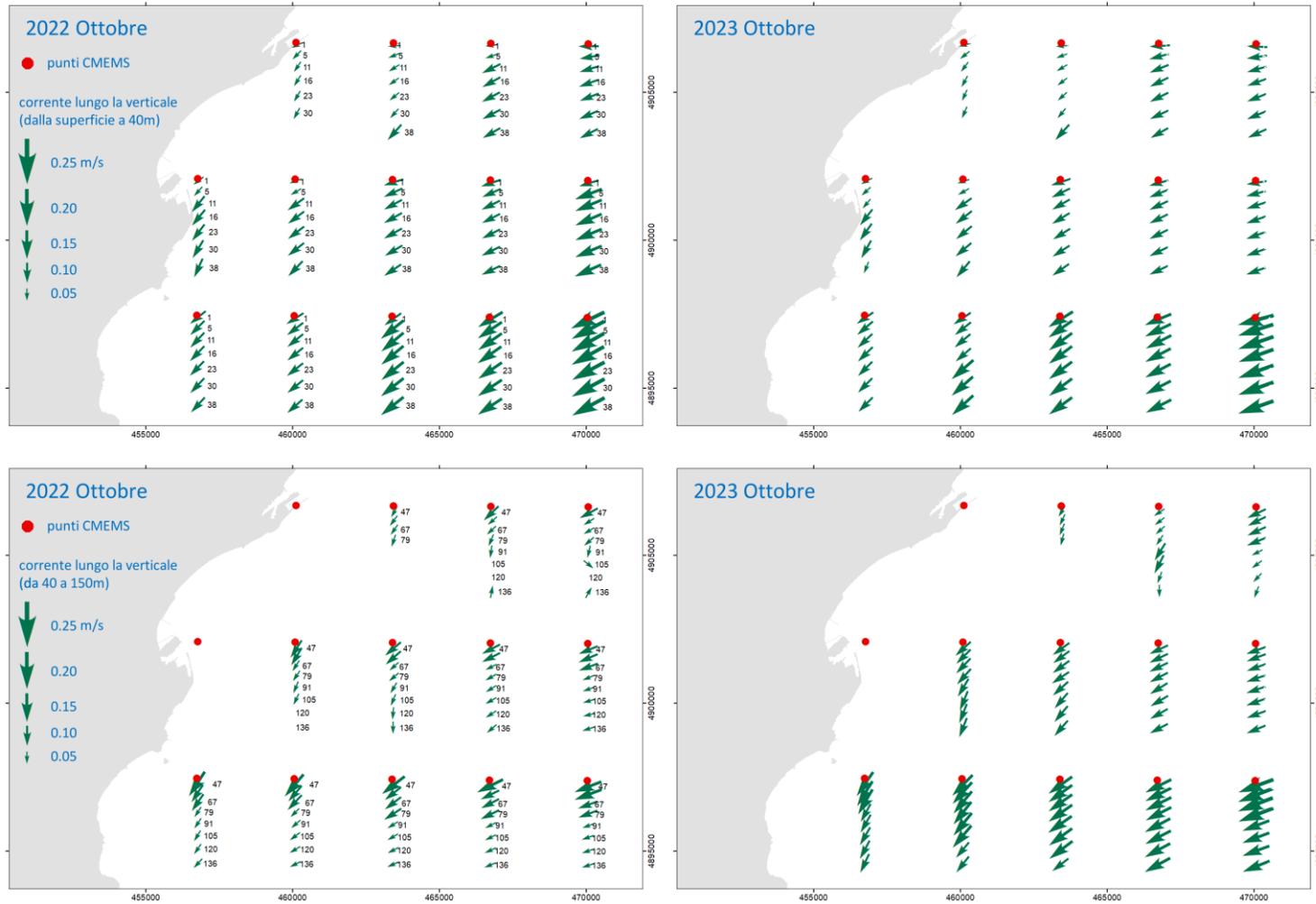


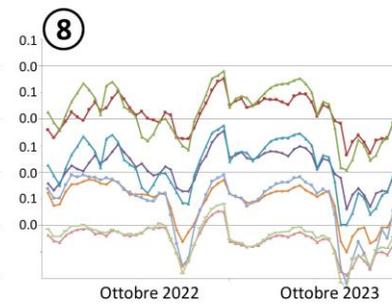
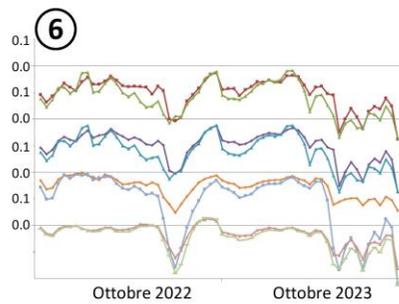
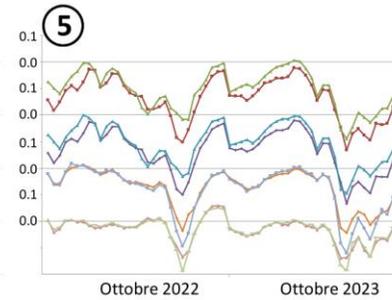
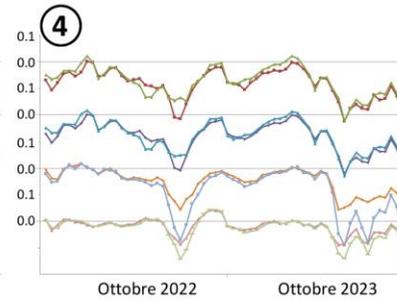
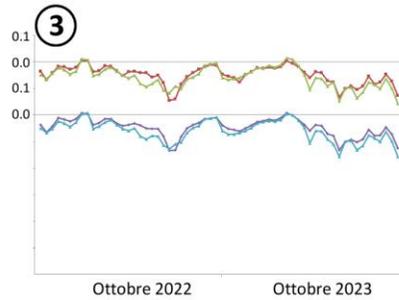
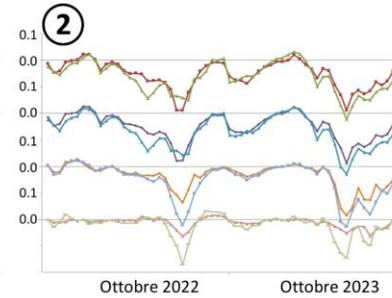
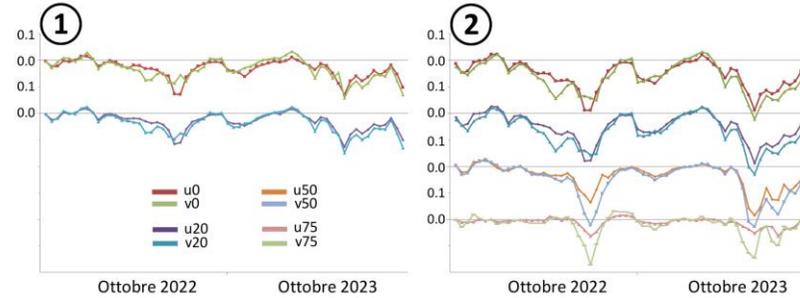
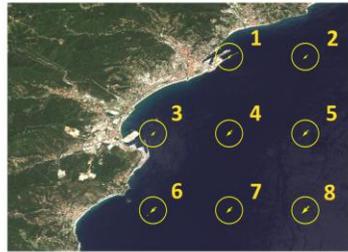
Fig. 1 – Dati di corrente media mensile CMEMS per i mesi di ottobre 2022 e ottobre 2023 dalla superficie a circa 40 m nei pannelli superiori, da 40 m a 150 m nei pannelli inferiori. La quota è indicata a fianco al vettore di corrente.

La scelta adottata è stata quindi quella di simulare gli scenari di sedimentazione con campi giornalieri di corrente riferiti ai periodi degli ultimi due anni al fine di includere ricorrenza, durata ed intensità degli schemi di circolazione che si sono verificati nel recente passato. In pratica, sono stati simulati scenari di sedimentazione come se le attività in mare fossero state effettuate nei mesi di:

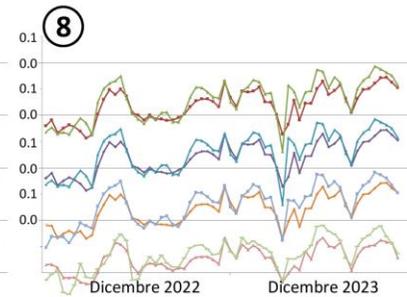
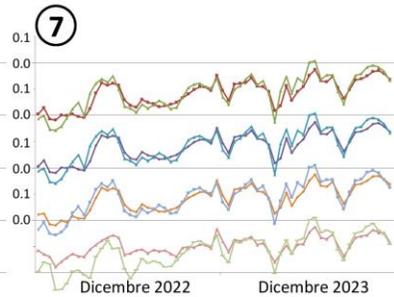
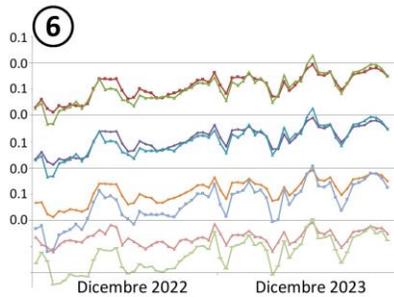
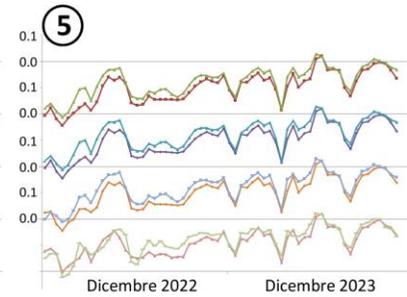
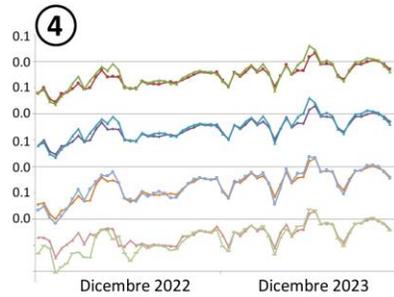
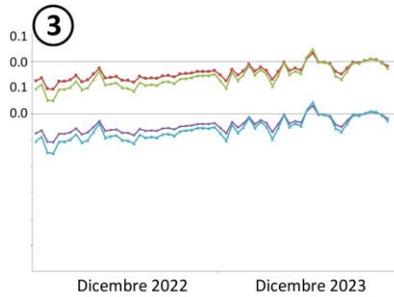
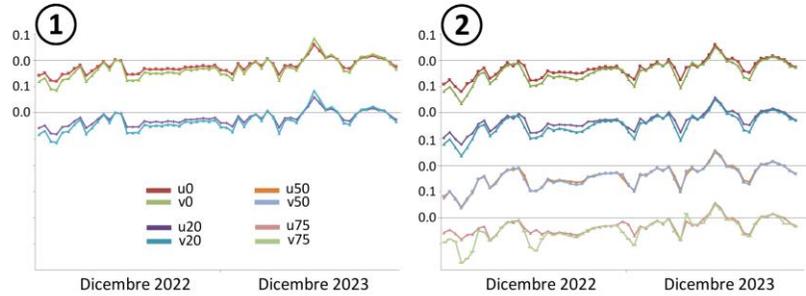
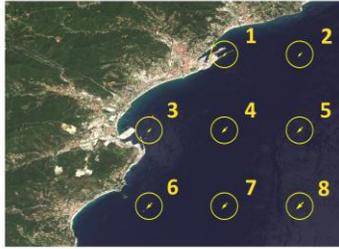
- ottobre e dicembre 2022, febbraio 2023;
- ottobre e dicembre 2023, febbraio 2024.

Il dataset di dati giornalieri è analogo a quello illustrato in Fig. 1, tranne che i vettori di corrente variano giorno per giorno. La componente mareale è inclusa nei dati giornalieri come correnti residue di marea (nello stesso dataset sono distribuiti analoghi ‘de-tided data’).

## OTTOBRE 2022 e 2023



DICEMBRE 2022 e 2023



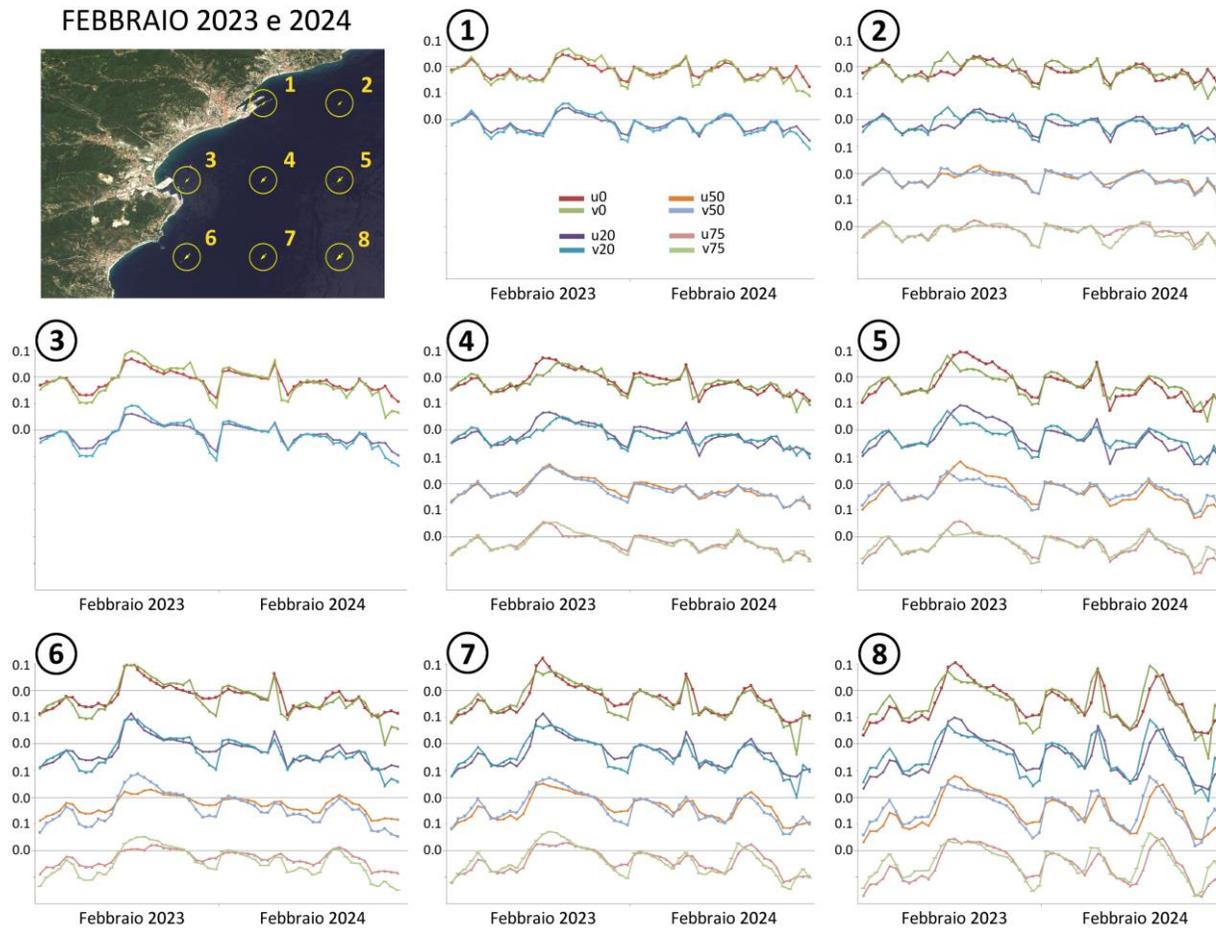


Fig. 2 – Dati di correnti giornaliere CMEMS (dataset MEDSEA\_ANALYSISFORECAST\_PHY\_006\_013) a 0, 20, 50 e 75m negli 8 punti adiacenti l’area delle operazioni per ottobre e dicembre 2022 e 2023 e febbraio 2023 e 2024. Le correnti sono rappresentate nelle due componenti U (direzione ovest-est) e V (direzione sud-nord).

I dati estratti nell'area di studio sono risultati in accordo con i dati 'in situ' analizzati nella relazione tecnica prodotta nel corso del progetto ("EMERGENZA GAS – INCREMENTO DI CAPACITA' DI RIGASSIFICAZIONE (DL 17.05.2022, n.50) FRSU Alto Tirreno e Collegamento alla rete Nazionale Gasdotti – STUDIO METEOMARINO, doc. REL-300-E-12090, SAIPEM).

I dati di corrente giornalieri alle quote di 0, 20, 50 e 75 m sono illustrati in Fig. 2 in termini di componenti U (direzione ovest-est) e V (direzione sud-nord).

Dalla Fig. 2 risulta evidente come le due componenti U e V siano sincrone sia quando assumono valori negativi, come nella maggior parte dei casi, sia quando assumono valori nulli o positivi. In ottobre e dicembre il flusso predominante nell'area è infatti diretto da NORD-EST verso SU-OVEST, con rari casi di inversione verso NORD-EST nei punti in prossimità della costa (punti 1, 2, 3, 4). In febbraio, i casi di inversione del flusso sono più frequenti ed includono i punti meridionali (6, 7, 8).

### **Adattamento dei flussi costieri**

I dati giornalieri CMEMS sono stati utilizzati in questo studio come se ottenuti da strumenti (correntometri) posizionati nei punti della griglia CMEMS. Da questi dati è stato necessario derivare dei campi di corrente con risoluzione maggiore da utilizzare per la simulazione della dispersione dei sedimenti.

I campi di corrente sono stati definiti alle quote di 0 (superficie), 20, 50 e 75 m, sufficienti a riprodurre la variabilità verticale della corrente nel dominio di interesse.

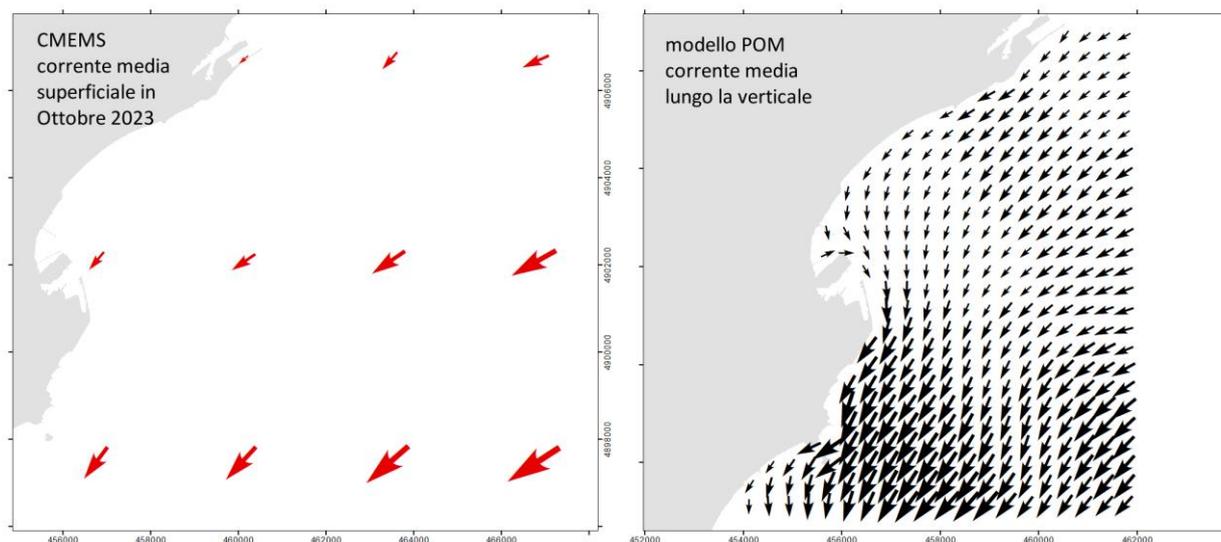


Fig. 3 – A sinistra: vettori di corrente superficiale sulla griglia CMEMS (correnti medie in ottobre 2023); a destra: pattern di corrente media verticale ottenuto da un run di POM (condizioni al contorno libere, mode=4 con temperatura e salinità costanti nel tempo). I vettori POM alla risoluzione spaziale di 100 m sono sottocampionati 1 ogni 3 per esigenze di rappresentazione grafica.

Il problema che si è immediatamente posto è stato quello di spazializzare i dati CMEMS (Fig. 3, a sinistra) non tanto in mare aperto ma in prossimità della costa, viste le scarse informazioni fornite dal data set. Per questa operazione è stato necessario mettere a punto una procedura automatica, essendo richiesta per circa 120 campi di corrente per mese di simulazione (giornalieri, a 4 quote diverse).

La procedura utilizzata è basata sull'integrazione dei dati CMEMS con un pattern di corrente simulato con il modello POM (Princeton Ocean Model, <http://www.ccpo.odu.edu/POMWEB/>) in Fig. 3 (a destra), dove i flussi costieri sono risolti dal modello (Ciappa, 2008).

Il primo passo della procedura consiste nell'interpolazione dei dati CMEMS su tutta l'area. Per le correnti al largo, oltre i 500 m dalla costa, i vettori interpolati CMEMS sono stati sostituiti ai vettori POM. Come si può notare in Fig. 3, i dati CMEMS ed i vettori POM nella maggior parte dei casi sono molto simili; in questi casi la variazione in media è stata di circa 5-6° in direzione e 0.05 m/s in modulo. Per i flussi costieri, dalla costa sino ad una distanza di 200 m è stato adottato il modulo interpolato da CMEMS e la direzione dei vettori POM, e nella fascia da 200 a 500 m le correnti

costiere sono state raccordate alle correnti al largo. Negli ultimi 2 m le correnti decrescono fino ad annullarsi in prossimità del fondo marino (Faria et al., 1998).

Due esempi di adattamento sono illustrati in Fig. 4. Il primo (in alto) è un caso di intenso flusso verso SUD-OVEST, il secondo (in basso) è un caso di inversione di flusso verso NORD-EST nell'area costiera a nord di Vado Ligure.

### **Dati utilizzati nelle simulazioni**

La soluzione adottata precedentemente descritta produce campi di corrente simili ai dati CMEMS in mare aperto e flussi coerenti con il campo stimato dal modello POM in prossimità della fascia costiera. I campi di corrente sono stati prodotti con la procedura precedentemente illustrata per ogni giorno del mese alle quote di 0, 20, 50 e 75 m, per i mesi di ottobre e dicembre 2022 e 2023 e per febbraio 2023 e 2024, per un totale di circa 720 pattern di corrente (giornalieri per 3 mesi, per due anni, per 4 quote).

I campi di corrente sono stati così inseriti alle varie quote nel modello di trasporto utilizzato per simulare i processi di avvezione/diffusione e sedimentazione.

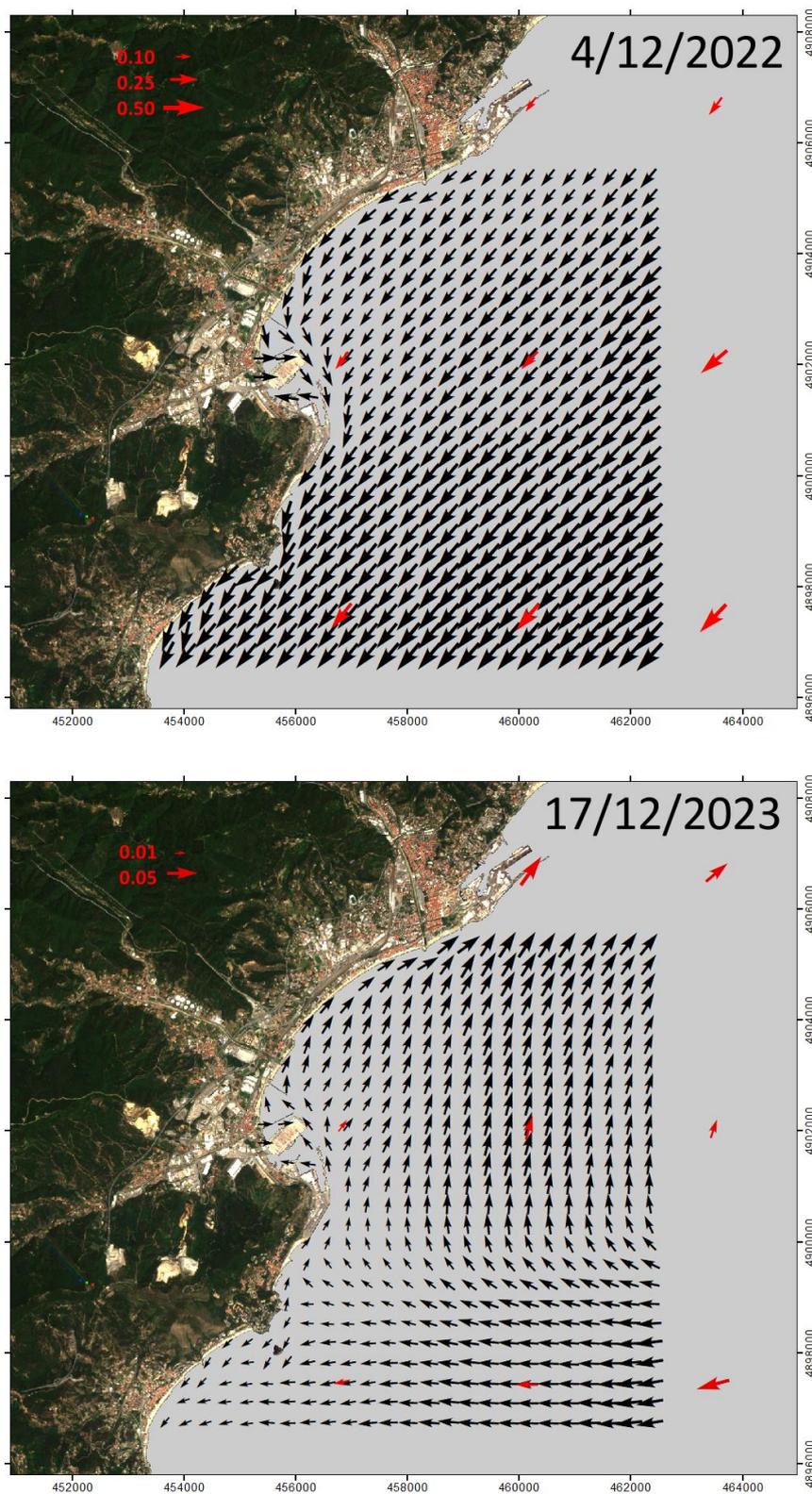


Fig. 4 – Adattamento dei dati di corrente CMEMS (in rosso) utilizzando le direzioni del pattern POM per le correnti costiere. In dicembre 2022-2023, in alto il caso di massimo flusso verso SUD-OVEST ed in basso un tipico caso di inversione della corrente costiera verso NORD-EST.

### **3. Descrizione del modello di trasporto**

#### **Generalità**

La simulazione della dinamica dei sedimenti è stata realizzata utilizzando con un modello che simula le traiettorie di un congruo numero di elementi lagrangiani (single-particle trajectory model). Ciascuna traiettoria rappresenta lo spostamento di una massa di sedimento omogenea in dimensione granulometrica e peso specifico, caratterizzata da specifiche velocità di sedimentazione e modalità di diffusione.

L'approccio lagrangiano è largamente utilizzato in fluido-dinamica per la simulazione di processi di sedimentazione, spostamenti di sversamenti di petrolio, dispersione di inquinanti chimici, impatto di impianti di acquacoltura (Luther and Meyers, 1998; Engell-Sorensen and Skyt, 2003; Doglioli et al., 2004; Chen et al., 2004; Budillon et al., 2011; Capello et al., 2011).

Le posizioni nel tempo degli elementi lagrangiani, a partire dall'istante di rilascio sino all'istante di deposizione sul fondo, sono ottenute dal modello ad intervalli temporali regolati dall'intervallo temporale prescelto per la simulazione. Le traiettorie partono dai punti di rilascio del sedimento e sono calcolate in base alla somma vettoriale dei seguenti contributi:

- le velocità 3D istantanee della corrente derivate da misure correntometriche o da modelli fluidodinamici;
- le velocità di sedimentazione, dipendenti dalle caratteristiche del sedimento (dimensione granulometrica e peso specifico) e dalla stratificazione (densità) della colonna d'acqua;
- la diffusione dei sedimenti, simulata con un processo di 'random walk' regolato da un coefficiente di diffusione.

In questa applicazione le simulazioni sono state effettuate con lo scopo di identificare aree di sedimentazione, masse e carichi inquinanti di sedimenti rilasciati in prossimità del fondo.

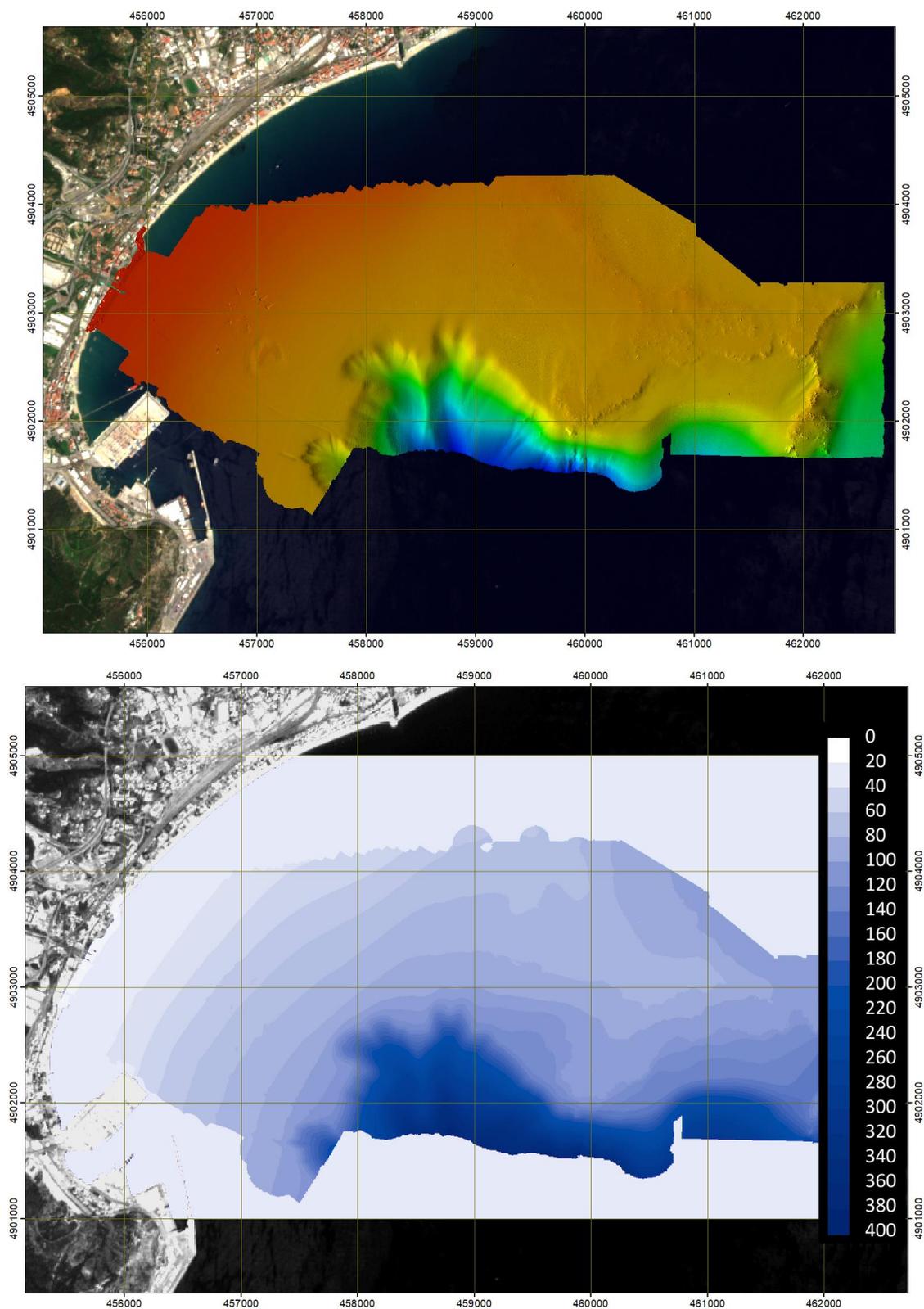


Fig. 5 – In alto: DTM (Digital Terrain Model) utilizzato per la batimetria, a risoluzione spaziale di 0.25 m. In basso: DTM riportato su una griglia regolare a 3 m di risoluzione utilizzata nelle simulazioni (isolinee plottate ogni 10 m). Nelle aree non coperte dal DTM (grigio chiaro) è stata adottata una profondità costante di 1 m.

Il modello necessita della batimetria e di dati di corrente e densità dell'acqua nel periodo di simulazione. Va inoltre specificata la tipologia dei sedimenti per classi granulometriche e la densità del materiale, i punti ed i tempi di rilascio dei sedimenti nella colonna d'acqua.

I dati batimetrici sono stati estratti dal DTM disponibile (Fig. 5, in alto) e posizionati su una griglia di riferimento utilizzata dal modello a 3 m di risoluzione spaziale (celle di 3 x 3 m<sup>2</sup>, in Fig. 5 in basso). La batimetria ricavata dal DTM è risultata sufficientemente estesa da contenere i risultati delle simulazioni per tutte le previste operazioni che causano la movimentazione del sedimento.

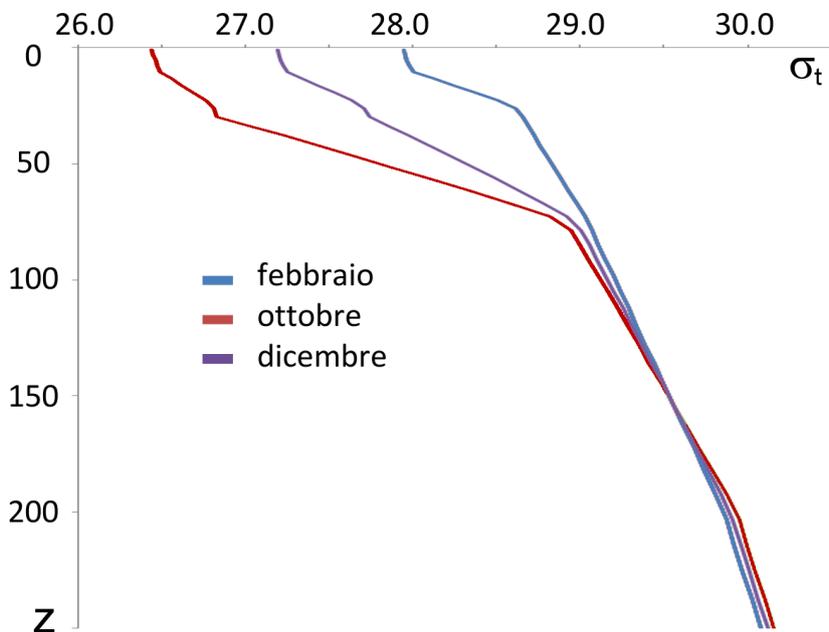


Fig. 6 – Profili di densità ottenuti da profili stagionali di temperatura e salinità (Picco et al., 2010) utilizzati nelle simulazioni: invernale per febbraio, estivo per ottobre ed intermedio per dicembre.

L'intervallo di tempo adottato nelle simulazioni è stato di 10 s, sufficientemente breve per una griglia a 3 m di risoluzione. Durante i run i dati di corrente sono caricati giorno per giorno alle quote di 0, 20, 50 e 75 m e linearmente interpolati nel tempo. La densità dell'acqua è uniforme su tutto il campo, e la stratificazione verticale è stata estratta da profili stagionali climatologici nel Mar Ligure (Picco et al., 2010), utilizzando un profilo estivo per ottobre, un profilo invernale per febbraio ed un profilo intermedio tra quello estivo ed invernale per dicembre (in Fig. 6).

## Sedimentazione

La composizione del sedimento è stata estratta da misure granulometriche documentate nel Report di caratterizzazione ambientale offshore (doc. REL-AMB-E-70035, Techfem).

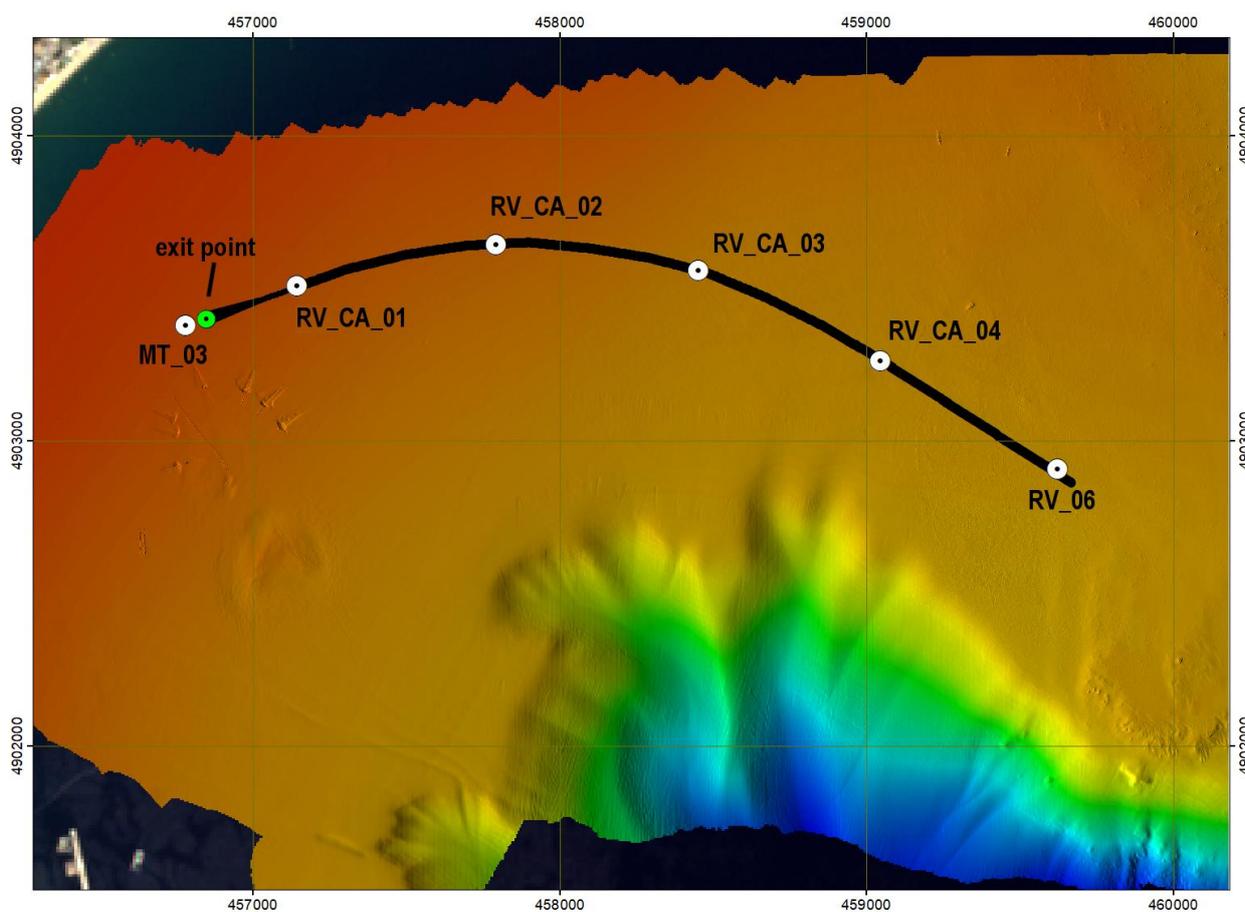


Fig. 7 – Stazioni di misura della composizione granulometrica del sedimento e della concentrazioni di inquinanti.

In dettaglio, le stazioni di misura considerate in questo studio sono illustrate in Fig. 7:

- le stazioni da RV\_CA\_01 ad RV\_CA\_04 ed RV\_06, per la caratterizzazione del sedimento sollevato durante il post-trenching della condotta;
- la stazione MT\_03 per la caratterizzazione del materiale di scavo presso l'exit point del micro-tunnel.

Le classi granulometriche del sedimento riportate in queste stazioni sono ghiaia, sabbia, limo (silt) ed argilla. La suddivisione in 4 classi granulometriche è stata mantenuta nelle simulazioni adottando dimensioni granulometriche di:

- circa 4  $\mu\text{m}$  per le argille;
- da 4 a 63  $\mu\text{m}$  per il limo (silt);
- da 63 a 1500  $\mu\text{m}$  per la sabbia;
- da 1500 a 2500  $\mu\text{m}$  per la ghiaia.

Per tutte è stata considerata una densità del sedimento di 1650  $\text{kg/m}^3$  (“broken granite”, fonte [simetric.co.uk](http://simetric.co.uk)).

Le simulazioni (run) sono state effettuate inizializzando 100000 elementi lagrangiani per ciascuna classe granulometrica, che è il massimo numero di traiettorie simulabili per mantenere i tempi di elaborazione in limiti ragionevoli. I diametri degli elementi lagrangiani sono stati assegnati con distribuzione uniforme nei limiti di ciascuna classe.

La velocità di sedimentazione dipende dalle dimensioni granulometriche, dalla densità specifica  $\rho_s/\rho_w$  (rapporto tra densità del sedimento e fluido) e da un opportuno coefficiente di attrito dipendente dal regime del fluido (Cheng, 1997; Jimenez et al., 2003). Per le velocità, calcolate con la formula di Jimenez et al. (2003), è stato posto un limite minimo di 0.11 mm/s (circa 0.4 metri per ora per le argille), come indicato nel rapporto Nord Stream A.G. (2008).

## Diffusione

La diffusione è simulata con un processo stocastico (random walk) dove lo spostamento  $\Delta r$  dell'elemento lagrangiano nel timestep  $\Delta t$  è definito da  $\Delta r = \sqrt{2K_h\Delta t} \cdot \hat{A}$ , con  $\hat{A} \in [-1,1]$  variabile stocastica e  $K_h$  coefficiente di diffusione.

Il coefficiente adottato nelle simulazioni è  $K_h = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ , valore tipico per aree mediterranee (Bacciola et al., 1993; Tsanis and Wu, 2000).

## **4. Metodologie utilizzate**

### **Organizzazione ed esecuzione delle simulazioni**

Come anticipato in precedenza, le simulazioni sono state effettuate considerando il campo termoalino e dinamico per i mesi di ottobre e dicembre 2022 e febbraio 2023; di ottobre, dicembre 2023 e febbraio 2024; per le seguenti 5 fasi:

- Fase 1 – Sollevamento del materiale di scavo dall'exit point in ottobre (\*)
- Fase 2 – Rilascio del materiale di scavo nell'area di deponia in ottobre (\*)
- Fase 3 – Recupero del materiale dall'area di deponia in dicembre (\*)
- Fase 4 - Ripristino del materiale all'exit point in dicembre (\*)
- Fase 5 - Post trenching della condotta in febbraio (\*)

(\*) Tali mesi corrispondono ai mesi in cui è prevista la realizzazione di ciascuna fase progettuale.

Il post trenching della condotta (febbraio) ha richiesto 5 separati run per anno in quanto ha dovuto considerare le 5 differenti distribuzioni granulometriche che sono state misurate lungo il percorso della condotta.

In ciascuna simulazione sono state simulate 100000 traiettorie per ciascuna classe di sedimenti (ghiaia, sabbia, limo ed argilla); pertanto i risultati delle simulazioni indicano dove andranno a depositarsi le diverse classi granulometriche ma non i pesi o i carichi inquinanti trasportati.

I pesi ed i carichi inquinanti sono stati quantificati successivamente assegnando una quota a ciascuna traiettoria in base al volume totale, alla percentuale granulometrica ed alla concentrazione di inquinante, caso per caso.

Di seguito sono descritti gli scenari ipotizzati per ciascuna fase con i dettagli utilizzati nelle simulazioni.

**Fase 1 – Sollevamento del materiale di scavo dall'exit point (ottobre)**

Questa fase consiste nel sollevamento di 25000 m<sup>3</sup> di materiale di scavo presso l'exit point del micro-tunnel. Gli scavi hanno profondità media attorno a 4 m (max 8 m) ed il sollevamento è effettuato con particolari accorgimenti atti a ridurre il quantitativo di sedimento disperso nella colonna d'acqua (benna ambientale).

Considerando l'uso di una benna ambientale, è stato ipotizzato un rilascio di sedimenti sul fondo durante il morso della benna. Il volume di sedimento tipicamente disperso per questo tipo di operazioni è 5% del totale (Nord Stream A.G., 2008). In questo caso, trattandosi di uno scavo di svariati metri, il rilascio di sedimenti avviene solo durante le prime fasi dello scavo in quanto, a scavo avviato, i sedimenti rilasciati rimangono confinati all'interno dello scavo stesso. Pertanto, il rilascio del 5% è stato considerato solo per il primo metro di scavo, ovvero per il 25% del volume sollevato.

Nelle simulazioni il rilascio dei sedimenti è ipotizzato in prossimità del fondo, all'interno di una semisfera di 1.5 m in circa 50 punti all'interno dell'area di scavo presso l'exit point. I sedimenti sono rilasciati in continuo a partire dall'1 sino al 28 ottobre, riservando gli ultimi giorni del mese alla completa deposizione degli ultimi sedimenti rilasciati.

Tabella.1. Distribuzione granulometrica all'exit point del micro-tunnel ottenuta dai dati della stazione MT\_03.

<b>Spessore in cm</b>	<b>Ghiaia %</b>	<b>Sabbia %</b>	<b>Limo %</b>	<b>Argilla %</b>
<b>0-50</b>	0.0	86.1	12.7	1.1
<b>50-100</b>	0.0	51.4	46.5	1.1
<b>100-200</b>	0.0	58.0	40.9	1.1
<b>200-400</b>	0.0	29.4	69.5	1.1
<b>400-600</b>	0.0	70.3	28.6	1.1
<b>600-800</b>	0.0	62.5	36.5	1.0
<i>Distribuzione granulometrica media utilizzata per le simulazioni</i>				
	0.0	46.5	52.4	1.1

La distribuzione granulometrica del sedimento nell'area di scavo è stata calcolata in base ai dati della stazione MT\_03 (Fig. 7), disponibili da carotaggi effettuati fino alla profondità massima dello

scavo, pari ad 8 metri. In Tabella 1 sono riportati i dati misurati nella stazione MT\_03 e i valori adottati come composizione granulometrica nelle simulazioni numeriche. Questa consiste nell'assenza di ghiaia, 46.5 % di sabbia, 52.4% di limo ed 1.1% di argilla.

Per un sollevamento di 25000 m<sup>3</sup> il volume di sedimento rilasciato è di 312.5 m<sup>3</sup> (ovvero il 5% del 25% di 25000 m<sup>3</sup>), che è il dato volumetrico utilizzato nelle simulazioni di questa fase. Tuttavia, una parte del volume rilasciato sedimenterà ancora all'interno dell'area di scavo e verrà rimosso, per cui il volume effettivo del materiale sollevato sarà quantificabile solo sulla base dei risultati di queste simulazioni.

### **Fase 2 – Rilascio del materiale di scavo nell'area di deponia (ottobre)**

In contemporanea alle operazioni di scavo, il materiale sollevato è trasferito e depositato in un'area di deponia temporanea con trasporti di 1000 m<sup>3</sup> ciascuno. La deposizione del materiale all'interno dell'area di deponia è effettuata con un 'fall pipe vessel' in grado di rilasciare il materiale ad 1 m dal fondo. Da test preliminari è emerso che punti di rilascio raggruppati in prossimità del margine a nord-est dell'area di deponia (25, per trasporti da 1000 m<sup>3</sup> ciascuno) limitano la deposizione delle frazioni più sottili all'esterno dell'area.

Nelle simulazioni il rilascio è stato ipotizzato alle ore 12:00 dal 4 al 28 del mese in 25 punti all'interno dell'area di deponia ad 1 m dal fondo. Anche in questa fase, il volume di sedimento effettivamente depositato nell'area di deponia non è noto a priori e sarà calcolato in base ai risultati delle simulazioni.

### **Fase 3 – Recupero del materiale nell'area di deponia (dicembre)**

In dicembre è previsto il recupero di tutto il materiale depositato nell'area di deponia. Un aspetto fondamentale di questa fase è la sequenza di recupero. La precedenza va data al materiale deposto che presenta il maggior carico inquinante, individuato tramite zonazione all'interno dell'area di deponia sulla base di misure effettuate su campioni di sedimento. Lo scopo è quello di neutralizzare il materiale maggiormente contaminato utilizzandolo come primo materiale di riempimento degli scavi all'exit point, e completare il riempimento degli scavi con materiali meno contaminati. In

questo modo si evita che, presso l'exit point, il materiale più contaminato sia esposto a diretto contatto con la colonna d'acqua.

Nelle simulazioni, il recupero avviene all'interno della zona di deponia su tutta l'area dove è distribuito il materiale scaricato. Prevedendo anche in questo caso l'uso di una benna ambientale (come nella Fase 1), è stato ipotizzato un rilascio di sedimento sul fondo, in una semisfera di 1.5 m di diametro, pari al 5% del volume totale sollevato.

Il recupero è ipotizzato che avvenga in continuo, dall'1 sino al 28 ottobre. Anche in questa fase, i risultati delle simulazioni indicheranno la quantità del sedimento rilasciato durante il sollevamento che ricadrà all'interno dell'area di deponia (che verrà successivamente recuperato), e le quantità che si disperderanno al di fuori dell'area di deponia.

#### **Fase 4 - Ripristino del materiale all'exit point (dicembre)**

Il ripristino del materiale nell'area degli scavi presso l'exit point è effettuato con trasporti di 1000 m<sup>3</sup> ciascuno e lo scarico è ancora effettuato da un mezzo navale tipo 'fall pipe vessel', in grado di depositare il materiale ad 1 m dal fondale. Questa tecnologia consente di depositare il primo materiale trasportato, quello eventualmente maggiormente contaminato, direttamente sul fondo degli scavi, e di provvedere ad un opportuno riempimento degli scavi con i materiali meno contaminati.

Nelle simulazioni si è supposto che il materiale più contaminato siano le argille, e che queste siano trasportate per prime e ricollocate sul fondo degli scavi, senza rilasci nella colonna d'acqua. In analogia a quanto ipotizzato per la Fase 1, il rilascio di sedimenti è previsto solo nell'ultima fase del riempimento degli scavi (durante il riempimento dell'ultimo metro di spessore) per un volume di solo limo e sabbia pari al 25% del volume totale ripristinato. Quindi questa fase è stata simulata con la dispersione di solo limo e sabbia per un volume pari al 25% del volume totale, in 25 rilasci da 1000 m<sup>3</sup> in altrettanti punti all'interno dell'area di scavo ad 1 m dal fondo, alle ore 12:00 dal 4 al 28 del mese di dicembre.

**Fase 5 - Post trenching della condotta (febbraio)**

La stima del volume di sedimento rilasciato durante il post-trenching della condotta è basata sulla ipotetica sezione di scavo di  $2.88 \text{ m}^2$  rappresentata in Fig. 8 (in alto) e di un volume movimentato per unità lineare pari a tre volte la sezione ( $8.64 \text{ m}^2$ ). Attuali tecniche di post-trenching limitano il rilascio di sedimenti al 2% del volume movimentato (Nord Stream A.G., 2008), ovvero  $0.173 \text{ m}^3$  per metro lineare di condotta.

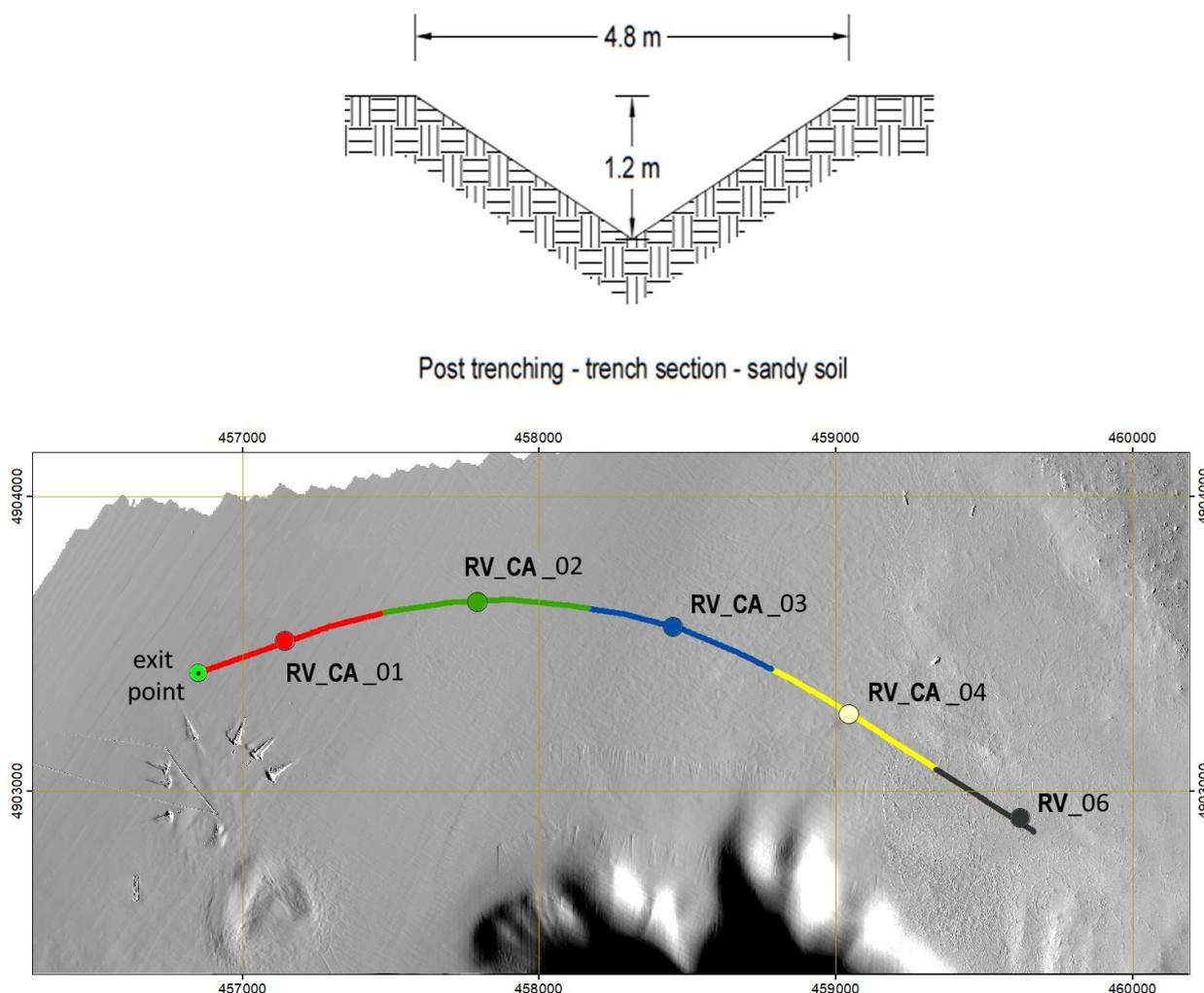


Fig. 8 – In alto: ipotetica sezione di scavo di post-trenching (tratta da Cherubini, 2019). In basso: distribuzioni granulometriche (evidenziate dal colore) dei 5 tratti della condotta in base alla vicinanza alla rispettiva stazione di misura granulometrica (RV\_CA\_01 etc...).

Considerando la lunghezza totale della condotta di circa 3000 m, il volume totale di sedimento rilasciato risulta essere di circa 520 m<sup>3</sup>.

Per tener conto delle diverse percentuali di ghiaia, sabbia, limo ed argilla lungo la condotta, la condotta è stata divisa in 5 tratte a cui sono state assegnate le distribuzioni granulometriche misurate nelle stazioni indicate in Fig. 8 (in basso) e riportate in Tabella 2.

Tabella 2. Percentuali granulometriche nelle stazioni in prossimità della condotta.

	RV_CA_01	RV_CA_02	RV_CA_03	RV_CA_04	RV_06
Ghiaia	0.0	0.0	0.0	1.7	5.1
Sabbia	52.5	47.4	41.9	34.6	49.7
Limo	46.2	51.0	56.6	62.4	43.5
Argilla	1.3	1.6	1.5	1.3	1.7

Nelle simulazioni si è assunto che queste percentuali granulometriche, misurate nello strato superficiale, siano indicative della granulometria media del sedimento nei primi 2 metri, che è la profondità a cui avviene l'interro.

Le simulazioni sono state effettuate per ciascuna tratta separatamente. Su ciascuna tratta, i sedimenti sono rilasciati in continuo dal 1 al 26 febbraio in prossimità del fondo, all'interno di una semisfera di 3 m di diametro in circa 500 punti di rilascio lungo tutto il tratto della condotta.

### **Stima dei quantitativi sedimentati**

La stima dei quantitativi sedimentati consiste nel calcolo dello spessore di sedimento aggiunto. Il calcolo si basa sul volume noto di sedimento disperso  $V$  di cui è nota la densità  $D$  e quindi la massa, distribuita in percentuale nelle 4 frazioni granulometriche considerate, ghiaia, sabbia, limo ed argilla. Le simulazioni sono state effettuate con 100000 traiettorie per classe granulometrica, ed è quindi nota la massa associata a ciascuna traiettoria per ciascuna classe granulometrica.

Le traiettorie sono contate all'arrivo in ogni cella della griglia di riferimento (di  $3 \times 3 = 9 \text{ m}^2$ ) e le rispettive masse sono sommate, ottenendo la massa di sedimento depositato su quest'area.

Utilizzando ancora la densità, dalle masse sono calcolati i volumi, ciascuno su di un'area di  $9 \text{ m}^2$ . Dividendo il volume del sedimento aggiunto per l'area, si ottiene l'elevazione del sedimento depositato.

I valori di elevazione ottenuti (riportati nelle figure in cm) sono riferiti a valori medi su aree di  $9 \text{ m}^2$ .

### Stima delle concentrazioni di IPA e dei metalli pesanti

La stima delle concentrazioni consiste nel calcolare l'incremento di concentrazione di IPA e/o metalli pesanti nelle aree circostanti. Considerando la concentrazione  $C_0$  del sedimento originario (espressa in mg/kg per i metalli pesanti e  $\mu\text{g}/\text{kg}$  per gli IPA), la massa movimentata dell'inquinante per un volume  $V$  di sedimento disperso di densità  $D$  sarà  $C_0VD$ . Sia gli IPA che i metalli pesanti si suppone siano trasportati dalla frazione granulometrica più leggera, ovvero dall'argilla.

Le 100000 traiettorie di argilla simulate in ogni run sono contate all'arrivo su ogni cella della griglia di  $3 \times 3 = 9 \text{ m}^2$ , e se  $x$  è la percentuale di traiettorie di argilla atterrate in una cella, la massa di inquinante depositato nell'area della cella è  $x \cdot C_0VD$ .

Le concentrazioni superficiali di IPA e dei metalli pesanti utilizzate in questo studio sono ottenute da prelievi con benna da 25 L con superficie di presa di  $0.1 \text{ m}^2$  (informazioni estratte dal documento "Report di caratterizzazione ambientale" - doc. REL-AMB-E-70035, Techfem, a pag. 17), il che equivale ad uno spessore di prelievo verticale di 0.25 m. Supponendo che in una cella di  $9 \text{ m}^2$  vi sia una concentrazione pregressa dello stesso inquinante  $C_1^{old}$ , misurata con la stessa benna su uno spessore verticale di 0.25 m, e giunga una massa di inquinante  $x \cdot C_0VD$ , la nuova concentrazione di inquinante  $C_1^{new}$  sarà data dal rapporto tra massa dell'inquinante e massa del sedimento  $M_i/M_s$ , misurate su una superficie di  $9 \text{ m}^2$  ed uno spessore di 0.25 m, e risulterà:

$$C_1^{new} = \frac{C_1^{old} \cdot 9\text{m}^2 \cdot 0.25\text{m} \cdot D + x \cdot C_0 \cdot V \cdot D}{9\text{m}^2 \cdot 0.25\text{m} \cdot D} = C_1^{old} + C_0 \cdot \frac{x \cdot V}{9\text{m}^2 \cdot 0.25\text{m}}$$

L'incremento della concentrazione dell'inquinante è pertanto dato da:

$$\Delta C = C_0 \cdot \frac{x \cdot V}{2.25}$$

dove  $C_0$  è la concentrazione nel sedimento disperso,  $x$  è la percentuale di traiettorie sedimentate nella cella e  $V$  il volume totale di sedimento disperso. Gli incrementi di concentrazione così ottenuti (in mg/kg per i metalli pesanti e  $\mu\text{g}/\text{kg}$  per gli IPA) sono valori medi su aree di  $9 \text{ m}^2$ .

## 5. Simulazioni effettuate

### Fasi 1 e 2 – Sollevamento dall'exit point e deponia (ottobre)

I risultati delle simulazioni della Fase 1 e 2 effettuate con i dati correntometrici degli anni 2022 e 2023 sono illustrati in Fig. 9. Appare evidente come le due diverse simulazioni diano risultati tra loro molto simili.

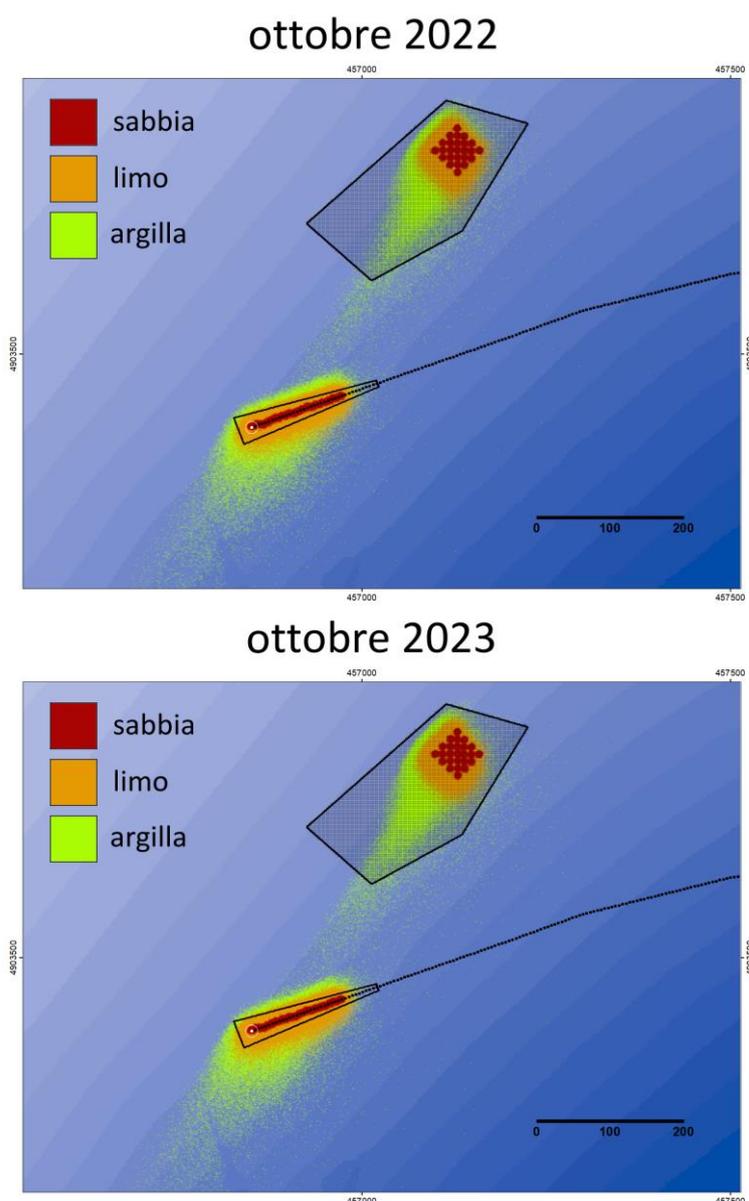


Fig. 9 – Aree di deposizione di sedimenti dispersi sul fondo durante il sollevamento in prossimità dell'exit point e la deponia del materiale di scavo in ottobre 2022 ed ottobre 2023.

Per il sollevamento (Fase 1), si prevede di asportare 25000 m<sup>3</sup> di materiale di scavo causando una dispersione stimata in 312.5 m<sup>3</sup>. Mentre una parte dei sedimenti dispersi si deposerà fuori l'area di scavo, parte di questi ricadranno nell'area di scavo e verranno anch'essi rimossi.

Tutto il materiale rimosso sarà poi depositato nell'area di deponia (Fase 2), ed anche durante questa fase parte del materiale potrebbe depositarsi all'esterno dell'area e non essere più recuperabile. Per calcolare questi volumi, le percentuali di deposizione all'interno delle due aree sono state estratte dalle simulazioni e sono riportate in Tabella 3.

Tabella 3. Percentuali di deposizione all'interno dell'area di scavo durante il sollevamento del materiale dall'exit point (Fase 1) e percentuali di deposizione all'interno dell'area di deponia (Fase 2), estratte dalle simulazioni.

<b>Ottobre 2022</b>	<b>Percentuali depositate all'interno dell'area di scavo (Fase 1)</b>	<b>Percentuali depositate all'interno dell'area di deponia (Fase 2)</b>
argilla	60.7	96.6
Limo	86.1	99.9
sabbia	100	100
<b>Ottobre 2023</b>		
argilla	60.1	96.6
Limo	85.6	99.9
sabbia	100	100

A titolo di esempio, sono di seguito riportati i calcoli relativi alle due fasi di sollevamento e deponia simulate con i dati correntometrici di ottobre 2022. Per il sollevamento dall'area di deponia sono dispersi 312.5 m<sup>3</sup> che consistono (secondo la composizione granulometrica in Tab.1, ovvero 1.1% di argilla, 52.4% di limo e 46.5% di sabbia) di 3.4 m<sup>3</sup> di argilla, 163.7 m<sup>3</sup> di limo e 145.3 m<sup>3</sup> di sabbia.

I risultati delle simulazioni (Fig. 9) ed i dati in Tabella 3 ('Percentuali depositate all'interno dell'area di scavo') indicano che gran parte di questi ricadono nella stessa area di scavo, ovvero 2.1 m<sup>3</sup> di argilla, 140.9 m<sup>3</sup> di limo e 145.3 m<sup>3</sup> di sabbia, ed anch'essi verranno rimossi. La parte restante dei 312.5 m<sup>3</sup>, ovvero 1.3 m<sup>3</sup> di argilla e 22.8 m<sup>3</sup> di limo, si è deposta all'esterno dell'area di scavo.

Questi volumi sono riportati come 'Volumi esterni all'area di scavo' in Tabella 4. I 'Volumi sollevati dall'area di scavo', nella stessa tabella, sono calcolati come differenza tra l'iniziale ed il

disperso. I ‘Volumi sollevati dall’area di scavo’ (volume totale di 24975.9 m<sup>3</sup>) sono quindi i volumi trasferiti sull’area di deponia. Le piccole variazioni volumetriche intercorse non hanno alterato la composizione granulometrica del sedimento trasportato, che rimane uguale a quella iniziale.

Durante la deponia, le simulazioni (Fig. 9) ed i dati in Tabella 3 (‘Percentuali depositate all’interno dell’area di deponia’) indicano che quasi tutto il materiale deposto rimane all’interno dell’area. Precisamente, il 96.6% dell’argilla, ovvero 264.4 m<sup>3</sup>, il 99.9% del limo, ovvero 13064.1 m<sup>3</sup> ed il 100% della sabbia, ovvero 11625.0 m<sup>3</sup>. Questi volumi sono riportati in Tabella 4 come ‘Volumi interni all’area di deponia’. Per differenza sono stimate le perdite, anch’esse riportate in Tabella 4 come ‘Volumi esterni all’area di deponia’.

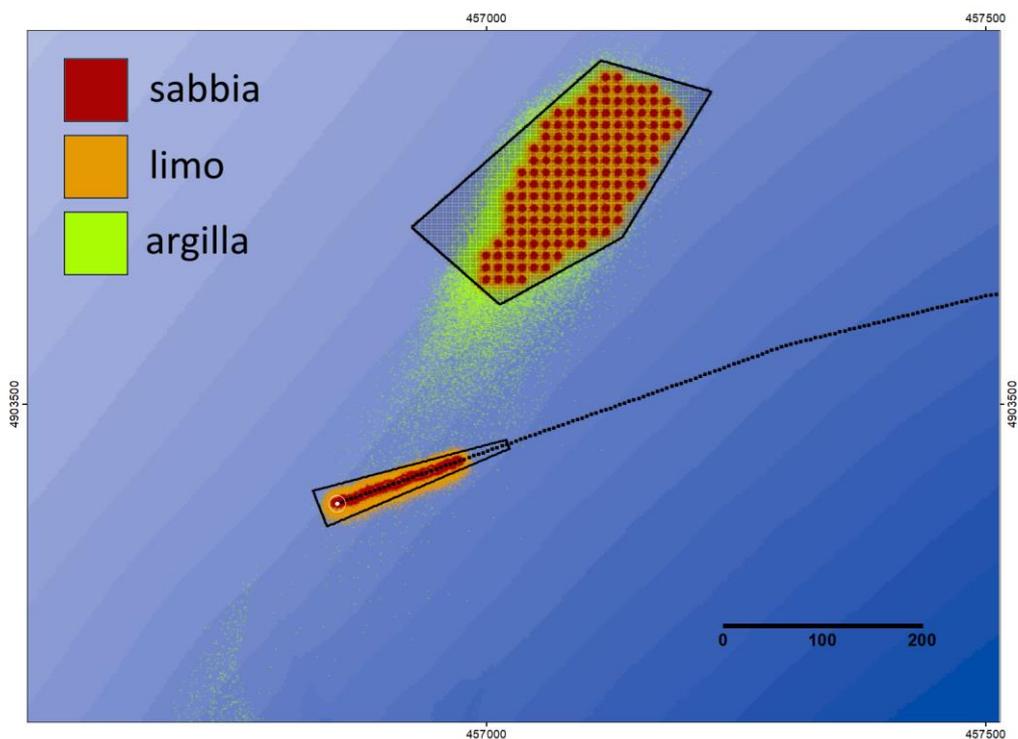
Tabella 4. Volumi movimentati e dispersi (in m<sup>3</sup>) durante le fasi di sollevamento dall’area di scavo all’exit point e di deposito nell’area di deponia.

		Sollevamento dall’area di scavo (Fase 1)		Deponia (Fase 2)	
ottobre 2022	Volumi Iniziali	Volumi esterni all’area di scavo	Volumi sollevati dall’area di scavo (per la deponia)	Volumi esterni all’area di deponia	Volumi interni all’area di deponia (per il recupero)
argilla	275	1.3	273.7	9.3	264.4
limo	13100	22.8	13077.2	13.1	13064.1
sabbia	11625	0.0	11625.0	0.0	11625.0
totale	25000	24.1	24975.9	22.4	24953.5
ottobre 2023	Volumi Iniziali	Volumi esterni all’area di scavo	Volumi sollevati dall’area di scavo (per la deponia)	Volumi esterni all’area di deponia	Volumi interni all’area di deponia (per il recupero)
argilla	275	1.4	273.6	9.3	264.3
limo	13100	23.6	13076.4	13.1	13063.3
sabbia	11625	0.0	11625.0	0.0	11625.0
totale	25000	25.0	24975.0	22.4	24952.6

### Fasi 3 e 4 – Recupero dalla deponia e ripristino all’exit point (dicembre)

I risultati delle simulazioni della Fase 3 e 4 sono illustrati in Fig. 10 per dicembre 2022 e dicembre 2023.

## dicembre 2022



## dicembre 2023

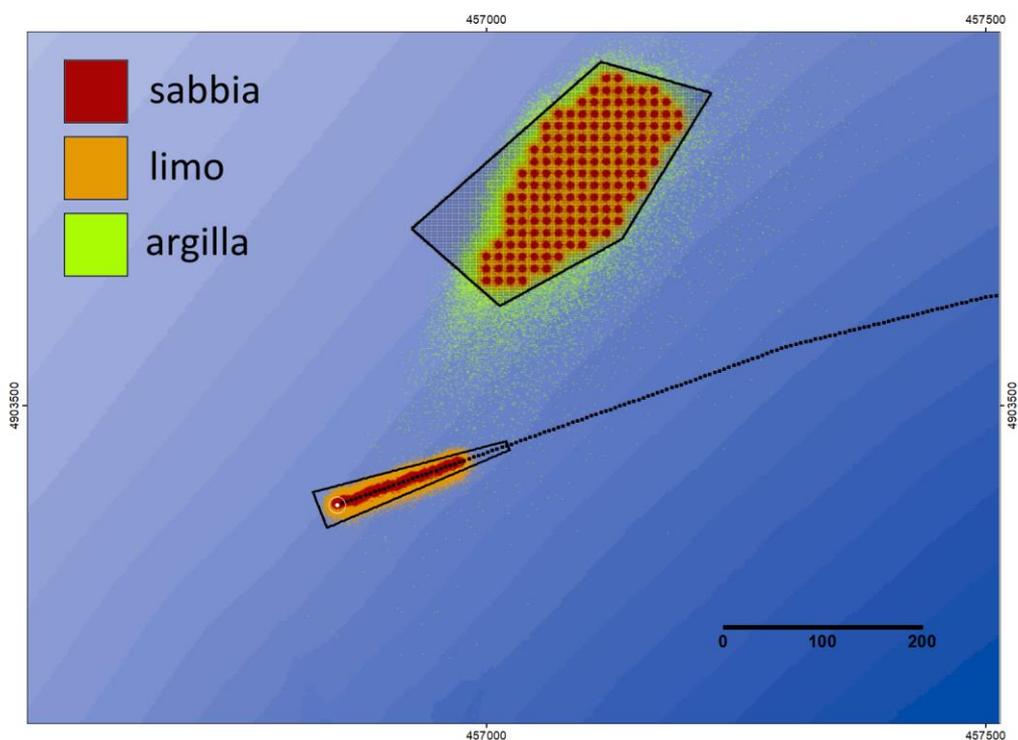


Fig. 10 – Aree di deposizione di sedimenti dispersi sul fondo durante il recupero del materiale dall'area di deponia ed il ripristino nell'area di scavo presso l'exit point in dicembre 2022 e dicembre 2023.

Il recupero del materiale di scavo dall'area di deponia è stato simulato in punti di recupero posizionati in base alla distribuzione del materiale deposto in ottobre (Fig. 9). I dati estratti dalle simulazioni della Fase 3 e 4 sono le percentuali di deposizione all'interno dell'area di deponia, durante il sollevamento del materiale, e la percentuale di deposizione all'interno dell'area di scavo durante il ripristino, in Tabella 5.

Durante il ripristino del materiale nell'area di scavo all'exit point, i sedimenti dispersi attorno l'area di scavo saranno esclusivamente limo e sabbia, in quanto l'argilla è collocata sul fondo degli scavi come primo materiale di riempimento, secondo la sequenza descritta precedentemente, e quindi non è sostanzialmente soggetta a fenomeni di dispersione nella colonna d'acqua.

Tabella 5. Percentuali di deposizione all'interno dell'area di deponia (Fase 3) durante il recupero ed all'interno dell'area di scavo (Fase 4) durante il ripristino, estratte dalle simulazioni.

<b>dicembre 2022</b>	<b>Percentuale all'interno dell'area di deponia (Fase 3)</b>	<b>Percentuale all'interno dell'area di scavo (Fase 4)</b>
argilla	90.2	100
limo	99.9	97.3
sabbia	100	100
<b>dicembre 2023</b>		
argilla	91.3	100
limo	99.9	97.6
sabbia	100	100

A titolo di esempio, sono di seguito riportati i calcoli relativi alle simulazioni effettuate con i dati correntometrici di dicembre 2022 (v. Capitolo 2). Nel recupero del materiale dall'area di deponia (Fase 3), si recupera globalmente un materiale che ha una distribuzione granulometrica leggermente diversa rispetto a quello del sedimento originale, ovvero 1.0% di argilla, 52.4% di limo e 46.6% di sabbia, in quanto piccoli volumi di argilla e limo sono stati dispersi nelle due fasi precedenti. Si recuperano dunque 24953.5 m<sup>3</sup> nell'area di deponia (Tabella 4, 'Volumi interni all'area di deponia'), e durante questa fase si disperdono 1247.7 m<sup>3</sup> (il 5% di 24953.5 m<sup>3</sup>), che consistono in 12.5 m<sup>3</sup> di argilla, 653.8 m<sup>3</sup> di limo e 581.4 m<sup>3</sup> di sabbia.

Le simulazioni indicano che quasi tutti i sedimenti dispersi durante il recupero ricadono nell'area di deponia (Tabella 5, 'Percentuali all'interno dell'area di deponia'), ovvero 11.3 m<sup>3</sup> di argilla, 653.1 m<sup>3</sup> di limo e 581.4 m<sup>3</sup> di sabbia, ed anch'essi verranno recuperati. La parte restante dei 1247.7 m<sup>3</sup>, ovvero 1.2 m<sup>3</sup> di argilla e 0.7 m<sup>3</sup> di limo, si è deposita all'esterno dell'area di deponia e non viene quindi recuperata: è indicata come 'Volumi esterni all'area di deponia' in Tabella 6.

I 'Volumi recuperati dall'area di deponia' sono calcolati come differenza tra l'iniziale ed il disperso, anch'essi indicati in Tabella 6. Questi sono i volumi riportati sull'area degli scavi all'exit point, per un totale di 24951.6 m<sup>3</sup>.

Durante il ripristino nell'area di scavo (Fase 4), l'argilla è depositata sul fondo degli scavi seguita da limo e sabbia, secondo la sequenza di recupero descritta precedentemente. Per questa fase è sostanzialmente prevista una dispersione associata solo al limo e alla sabbia durante l'ultima fase del riempimento, per un volume pari al 25% del volume totale di 24951.6 m<sup>3</sup>, ovvero per 6237.9 m<sup>3</sup>. Considerando la proporzione tra limo e sabbia del materiale ripristinato, 52.9% e 47.1% rispettivamente, il sedimento disperso consisterà di 3299.9 m<sup>3</sup> di limo e 2938.0 m<sup>3</sup> di sabbia.

Tabella 6. Volumi movimentati e dispersi (in m<sup>3</sup>) durante le fasi di recupero dall'area di deponia e di ripristino nell'area di scavo all'exit point.

		Recupero dall'area di deponia (Fase 3)		Ripristino nell'area di scavo (Fase 4)	
<b>dicembre 2022</b>	<b>Volumi nell'area di deponia</b>	<b>Volumi esterni all'area di deponia</b>	<b>Volumi recuperati dall'area di deponia (per il ripristino)</b>	<b>Volumi esterni all'area di scavo</b>	<b>Volumi interni all'area di scavo</b>
Argilla	264.4	1.2	263.2	0.0	263.2
Limo	13064.1	0.7	13063.4	89.8	12973.6
sabbia	11625.0	0.0	11625.0	0.0	11625.0
Totale	24953.5	1.9	24951.6	89.8	24861.8
<b>dicembre 2023</b>	<b>Volumi nell'area di deponia</b>	<b>Volumi esterni all'area di deponia</b>	<b>Volumi recuperati dall'area di deponia (per il ripristino)</b>	<b>Volumi esterni all'area di scavo</b>	<b>Volumi interni all'area di scavo</b>
argilla	264.3	1.1	263.2	0	263.2
Limo	13063.3	0.7	13062.6	79.2	12983.4
sabbia	11625.0	0.0	11625.0	0.0	11625.0
totale	24952.6	1.8	24950.8	79.2	24871.6

Dalla Tabella 5 ('Percentuali all'interno dell'area di scavo'), si evince che all'interno dell'area di scavo si depositerà il 100% della sabbia, ovvero 2938.0 m<sup>3</sup>, ed il 97.3% di limo, ovvero 3210.1 m<sup>3</sup>, mentre 89.8 m<sup>3</sup> di limo si depositeranno all'esterno. Il volume di limo depositato all'esterno dell'area di scavo è riportato nella colonna 'Volumi esterni all'area di scavo' in Tabella 6; i 'Volumi interni all'area di scavo' si ricavano per differenza. Pertanto, i 'Volumi interni all'area di scavo' sono i volumi effettivamente riportati per il ripristino dell'area di scavo.

Tabella 7. Sintesi dei volumi di materiale disperso (in m<sup>3</sup>) durante le 4 fasi di sollevamento, deponia, recupero e ripristino nell'area di scavo all'exit point.

<b>ottobre e dicembre 2022</b>	<b>Sollevamento (Fase 1)</b>	<b>Deponia (Fase 2)</b>	<b>Recupero (Fase 3)</b>	<b>Ripristino (Fase 4)</b>	<b>Totale disperso</b>	<b>Volume Iniziale</b>	<b>Volume ripristinato</b>
argilla	1.3	9.3	1.2	0.0	11.8	275	263.2
limo	22.8	13.1	0.7	89.8	126.4	13100	12973.6
sabbia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11625	11625.0
<b>totale</b>	<b>24.1</b>	<b>22.4</b>	<b>1.9</b>	<b>89.8</b>	<b>138.2</b>	<b>25000</b>	<b>24861.8</b>
<hr/>							
<b>ottobre e dicembre 2023</b>	<b>Sollevamento (Fase 1)</b>	<b>Deponia (Fase 2)</b>	<b>Recupero (Fase 3)</b>	<b>Ripristino (Fase 4)</b>	<b>Totale disperso</b>	<b>Volume Iniziale</b>	<b>Volume ripristinato</b>
argilla	1.4	9.3	1.1	0	11.8	275	263.2
limo	23.6	13.1	0.7	79.2	116.6	13100	12983.4
sabbia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11625	11625.0
<b>totale</b>	<b>25.0</b>	<b>22.4</b>	<b>1.8</b>	<b>79.2</b>	<b>128.4</b>	<b>25000</b>	<b>24871.6</b>

Riconsiderando le quattro fasi, in Tabella 7 sono sintetizzati i volumi di materiale dispersi durante ciascuna fase, ovvero fuori dell'area di scavo durante il sollevamento (Fase 1), all'esterno dell'area di deponia durante la deponia (Fase 2), all'esterno dell'area di deponia durante il recupero (Fase 3) ed infine all'esterno dell'area di scavo durante il ripristino (Fase 4).

Partendo dagli iniziali 25000 m<sup>3</sup> di materiale di scavo rimossi, ne vengono ripristinati 24861.8 m<sup>3</sup> secondo gli scenari simulati con il campo correntometrico di ottobre e dicembre 2022, e 24871.8 m<sup>3</sup> secondo gli scenari simulati con i dati correntometrici di ottobre e dicembre 2023. Le rispettive perdite di 138.2 e 128.2 m<sup>3</sup> sono i residui dispersi del materiale di scavo che si sono depositati nelle aree circostanti.

## Fase 5 - Post trenching della condotta (febbraio)

Le simulazioni della dispersione del sedimento sollevato durante il post trenching della condotta sono state effettuate separatamente in cinque tratte per tener conto delle differenti distribuzioni granulometriche lungo il percorso (in Tabella 2). Nelle simulazioni è stato ipotizzato un volume di sedimento disperso pari a 526 m<sup>3</sup> lungo tutta la condotta, rilasciato in continuo dall'1 al 26 febbraio da una semisfera sul fondo di 3 m di diametro. I risultati delle simulazioni con i dati correntometrici di febbraio 2023 sono illustrati in Fig. 11.

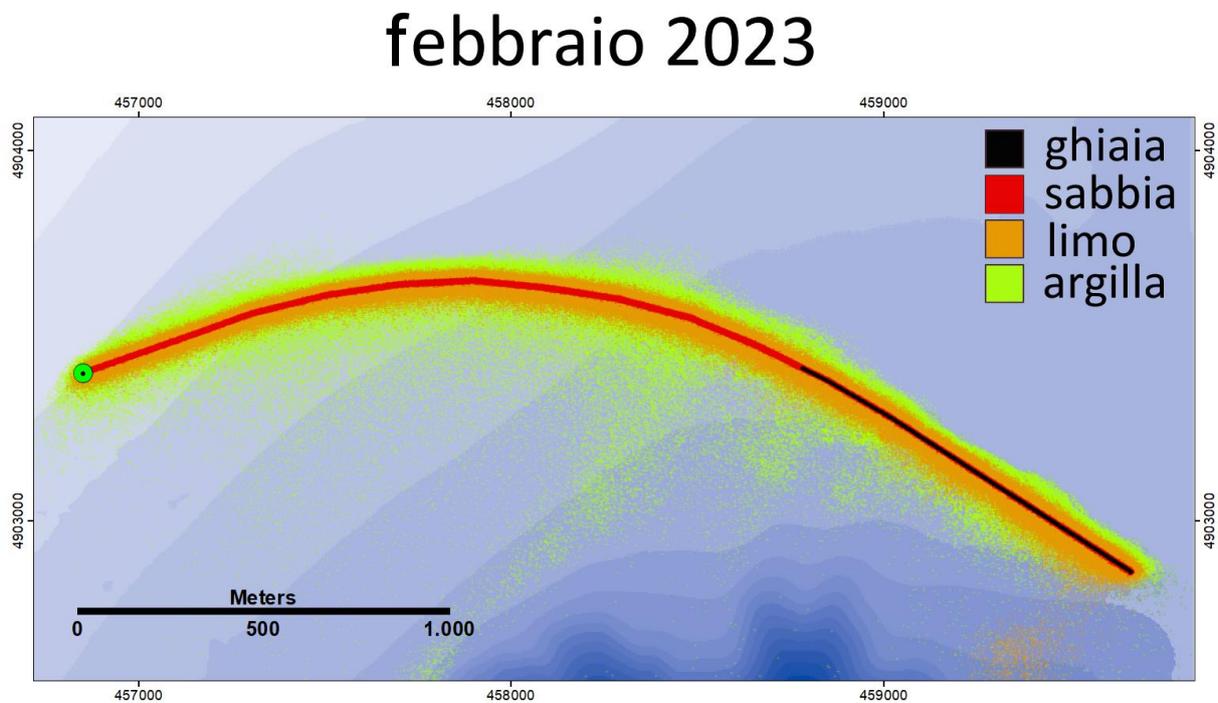


Fig. 11 – Aree di deposizione di sedimenti dispersi in prossimità del fondo durante il post trenching della condotta in febbraio 2023. Piccole percentuali di ghiaia sono presenti nei sedimenti lungo l'ultimo tratto della condotta (Tabella 2).

I risultati delle simulazioni con i dati correntometrici di febbraio 2024 sono illustrati in Fig. 12: risultano molto simili ai risultati ottenuti con i dati correntometrici dell'anno precedente.

## febbraio 2024

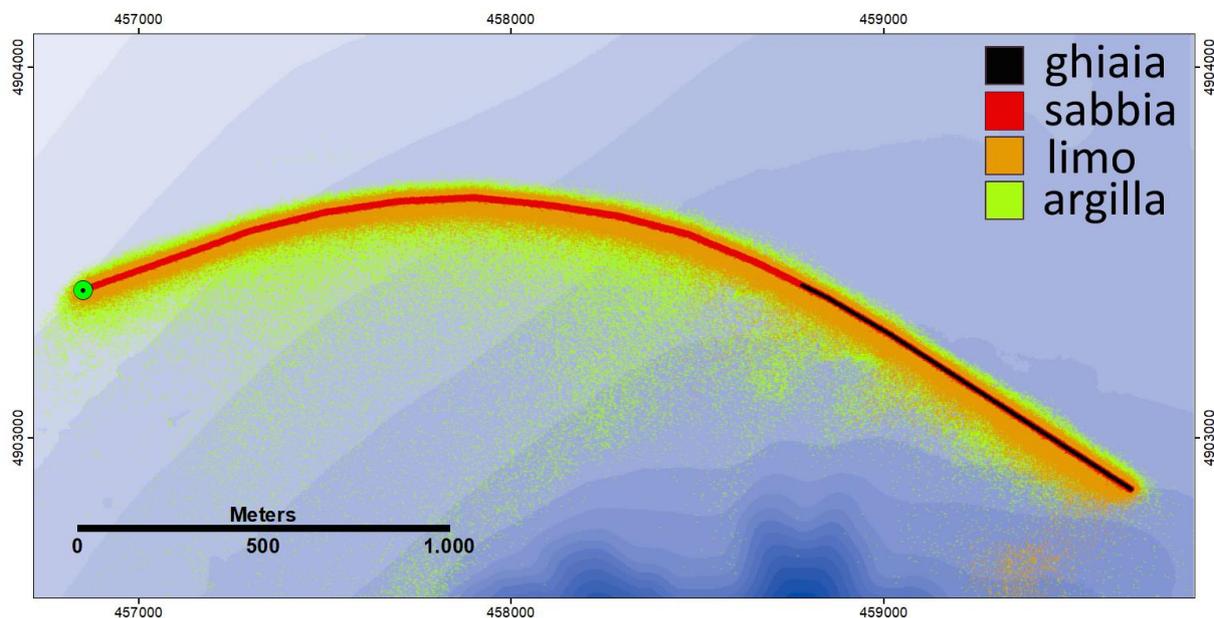


Fig. 12 – Aree di deposizione di sedimenti dispersi in prossimità del fondo durante il post trenching della condotta in febbraio 2024.

La quasi totalità del sedimento sollevato (distribuzione granulometrica media lungo la condotta: 1.3% di ghiaia, 45.2% di sabbia, 51.9% di limo ed 1.5% di argilla) consiste di sabbia e limo che si depositano in prossimità del tracciato. L'argilla in parte si deposita presso il tracciato della condotta ed in parte si disperde su di una area più ampia. Tuttavia, la già bassa percentuale volumetrica dell'argilla nel sedimento, se distribuita su una vasta area ha effetti scarsamenti rilevanti sia in termini di spessore di sedimento aggiunto sia di carico inquinante aggiunto, come verrà dettagliato nel seguito.

## 6. Risultati finali

### Stime dei quantitativi sedimentati

#### Fasi 1 – 4 (ottobre e dicembre)

La quantificazione dello spessore dei sedimenti dispersi si basa sui volumi e sulle distribuzioni granulometriche dei sedimenti per ciascuna fase simulata. I valori utilizzati durante le prime quattro fasi di operazioni in ottobre e dicembre sono riassunti in Tabella 8.

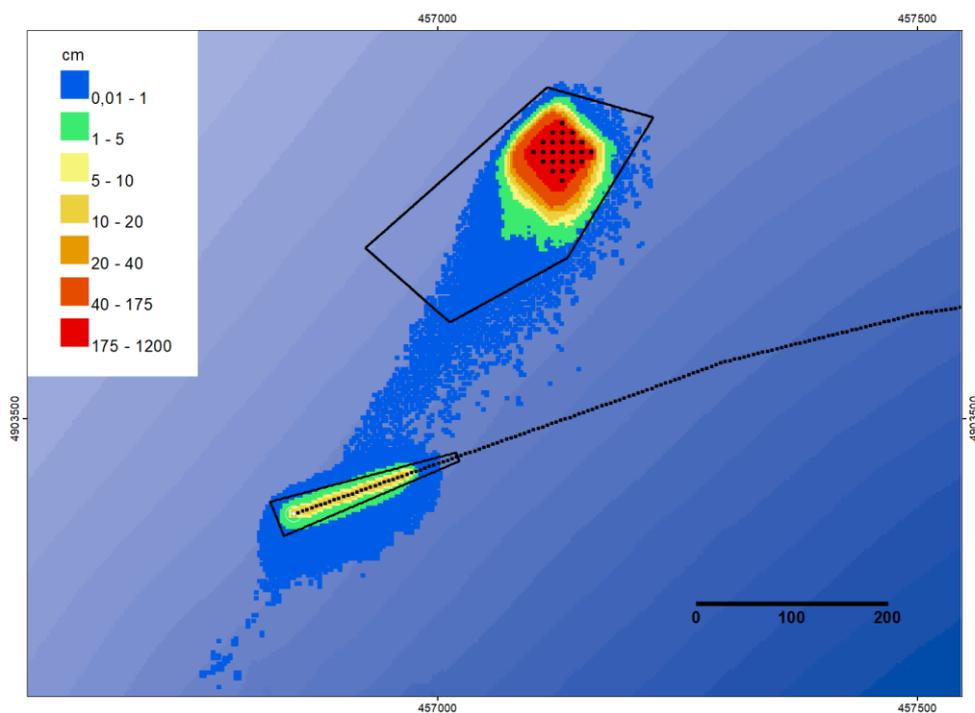
Tabella 8. Volumi e percentuali granulometriche (A=argilla, L=limo, S=sabbia) del sedimento disperso durante le prime quattro fasi eseguite in ottobre e dicembre 2022 e 2023. La composizione granulometrica originaria è quella del sedimento sollevato presso l'exit point (Tabella 1).

	2022		2023	
	m <sup>3</sup> di sedimento rilasciato	Composizione Granulometrica	m <sup>3</sup> di sedimento rilasciato	Composizione Granulometrica
Fase 1 – sollevamento in ottobre	312.5	A=1.1%, L=52.4%, S=46.5% (orig.)	312.5	A=1.1%, L=52.4%, S=46.5% (orig.)
Fase 2 – deponia in ottobre	24975.9	A=1.1%, L=52.4%, S=46.5% (orig.)	24975.0	A=1.1%, L=52.4%, S=46.5% (orig.)
Fase 3 – recupero in dicembre	1247.7	A=1.0%, L=52.4%, S=46.6%	1247.6	A=1.0%, L=52.4%, S=46.6%
Fase 4 – ripristino in dicembre	6237.9	L=52.9% S=47.1%	6237.7	L=52.9% S=47.1%

La somma degli incrementi di spessore del sedimento per le due fasi in ottobre 2022 e 2023 (Fase 1 e Fase 2) sono illustrati in Fig. 13. Queste distribuzioni sono la somma degli incrementi di spessore causati dal rilascio di sedimento durante il sollevamento dall'area di scavo e durante la deponia.

La somma degli incrementi di spessore del sedimento per le due fasi in dicembre 2022 e 2023 (Fase 3 e Fase 4) sono illustrati in Fig. 14, e sono la somma degli incrementi di spessore causati dalla dispersione di sedimento durante il recupero dall'area di deponia e durante il ripristino del materiale nell'area di scavo nell'area dell'exit point.

## ottobre 2022



## ottobre 2023

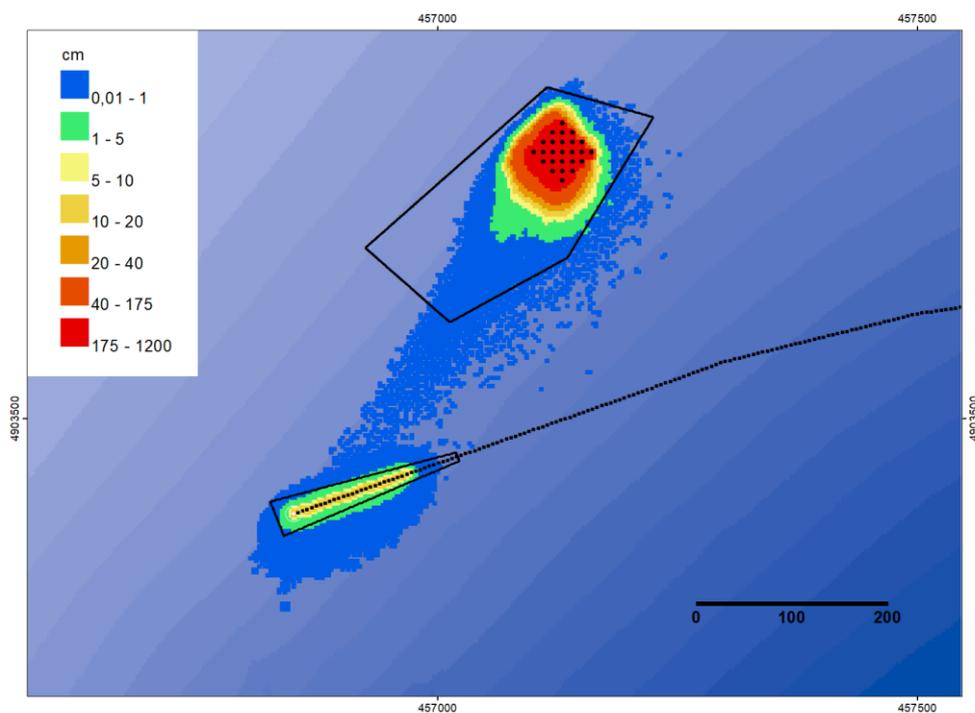
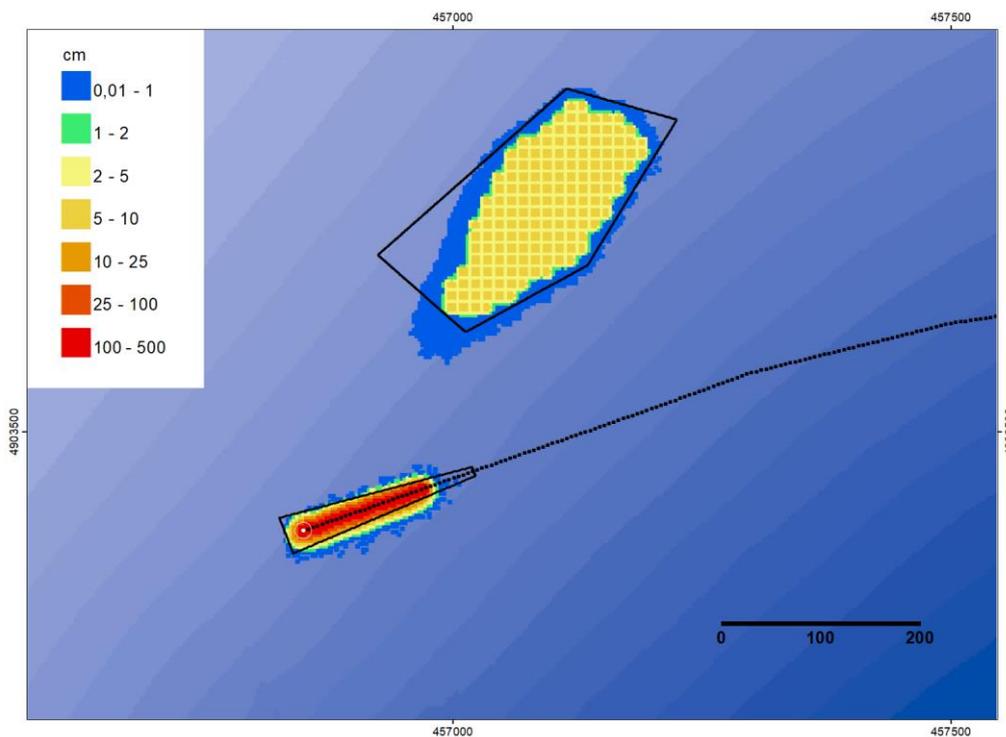


Fig. 13 – Incrementi di spessore [cm] causati dai sedimenti dispersi nelle prime due fasi di operazioni (sollevamento dall'area di scavo e deposito nell'area di deponia) in ottobre 2022 ed ottobre 2023.

## dicembre 2022



## dicembre 2023

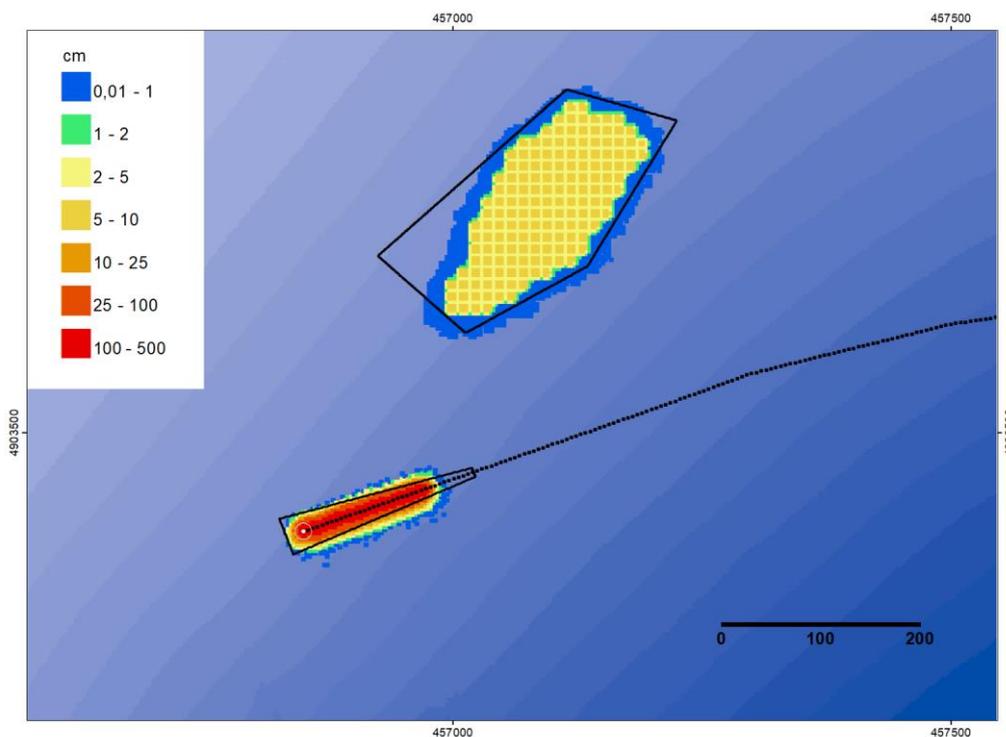


Fig. 14 – Incrementi di spessore [cm] causati dai sedimenti dispersi nelle ultime due fasi di operazioni (recupero dall'area di deponia e ripristino nell'area di scavo) in dicembre 2022 e dicembre 2023.

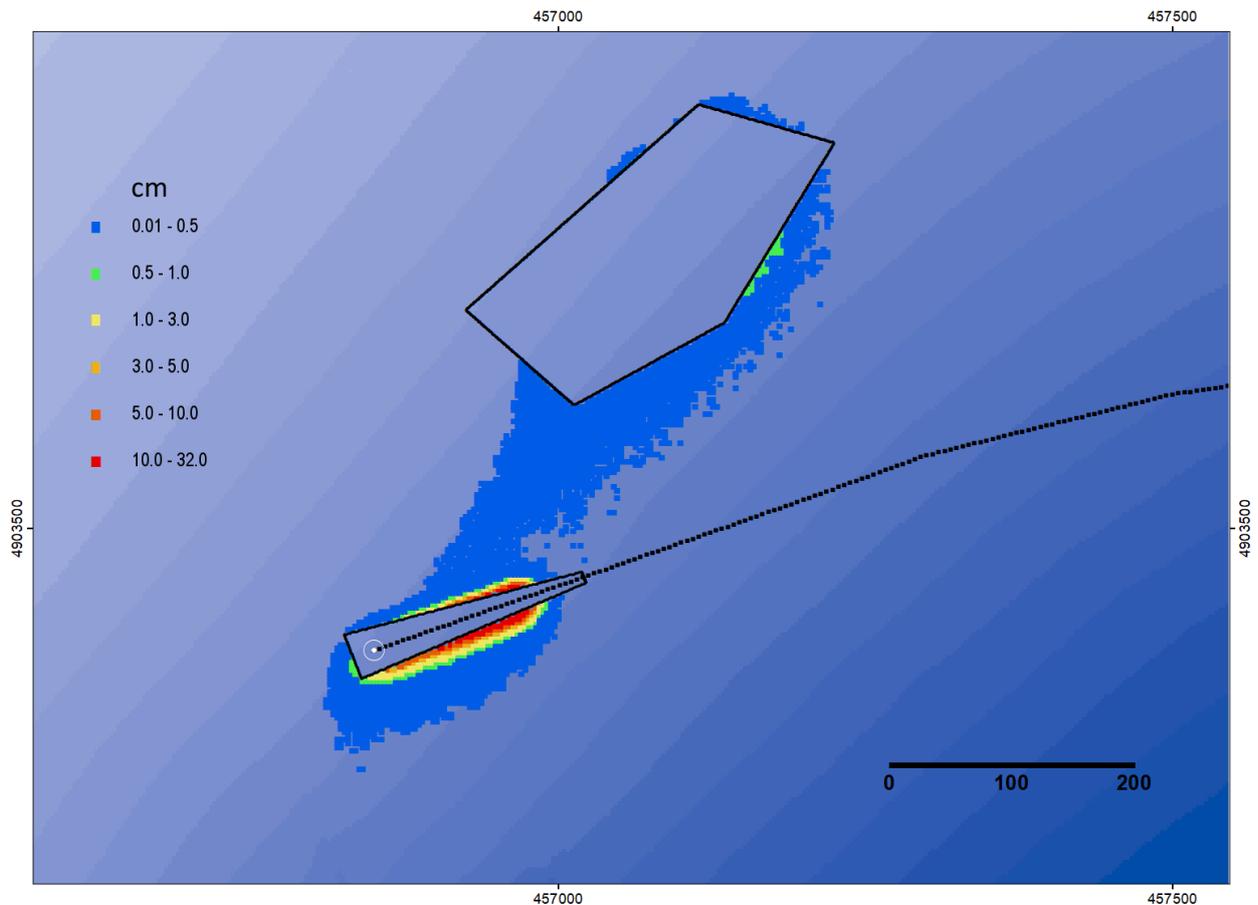


Fig. 15 – Incrementi di spessore [cm] al termine delle operazioni in ottobre e dicembre (media degli anni 2022 e 2023).

Nelle figure 13 e 14 non sono riportati i decrementi di spessore, sia dovuti al prelevamento del materiale dall'area di scavo (Fase 1), sia dovuti al recupero del materiale dall'area di deponia (Fase 3). In realtà, alla fine delle operazioni, l'area di deponia sarà sostanzialmente riportata alle condizioni morfologiche pre-esistenti e l'area di scavo sarà ripristinata allo stato iniziale, meno il volume di materiale disperso all'esterno delle due aree. Una rappresentazione più realistica degli incrementi di spessore risultanti al termine delle operazioni è illustrata in Fig. 15, dove le distribuzioni dei due anni sono state mediate ed è stato considerato il recupero di tutto il materiale all'interno dell'area di deponia ed il ripristino dello stesso nell'area di scavo.

Le simulazioni effettuate con dati correntometrici di ottobre e dicembre 2022 ed ottobre e dicembre 2023 indicano che la differenza tra il volume prelevato ed il volume ripristinato (circa 130-140 m<sup>3</sup>

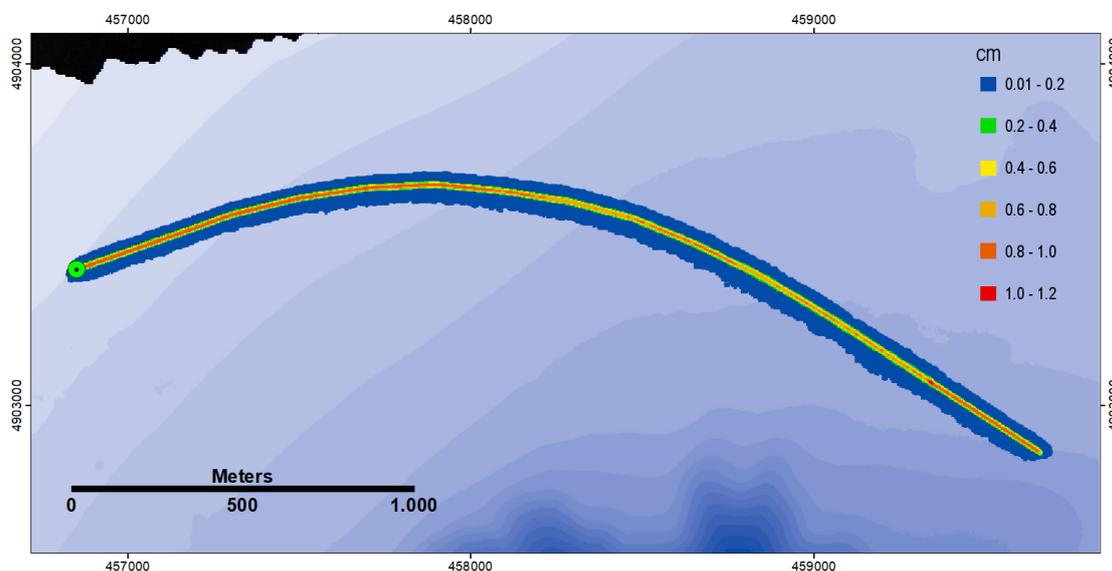
di limo ed argilla, in Tabella 7) è trasportato verso sud-ovest dalle correnti, e lo si ritrova in prossimità dell'area di scavo ed attorno all'area di deponia in tracce.

### **Post trenching della condotta in febbraio**

Gli incrementi di spessore dei sedimenti dispersi durante il post trenching della condotta in febbraio 2023 e febbraio 2024 sono illustrati in Fig. 16 e anche in questo caso risultano molto simili nei due anni.

Gli incrementi di spessore sono essenzialmente dovuti alla deposizione del limo, della sabbia e della ghiaia dove presente. Nell'ampia zona di diffusione dell'argilla (Fig. 11 e Fig. 12) gli incrementi di spessore risultano inferiori a 0.01 cm e non sono riportati in queste figure.

## febbraio 2023



## febbraio 2024

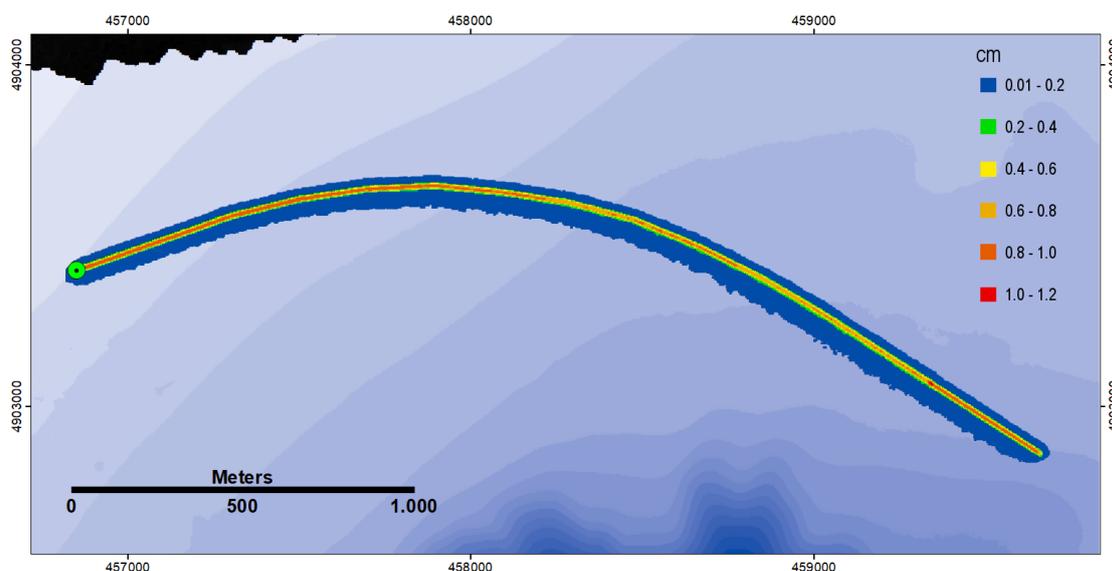


Fig. 16 – Incrementi di spessore [cm] causati dai sedimenti dispersi durante il post trenching della condotta in febbraio 2023 e febbraio 2024.

La distribuzione media nei due anni (febbraio 2023 e febbraio 2024) è illustrata in Fig. 17, assieme ad un tratto della condotta dove si riscontrano i massimi spessori. Picchi fino a 1.2 cm risultano nel tratto iniziale e finale della condotta, come illustrato in Fig. 17 (in alto). In media, lo spessore aggiunto di sedimento è superiore a 0.2 cm in una fascia larga circa 25 m attorno la condotta (Fig.

17, in basso) raggiungendo un massimo intorno a 0.8 cm in corrispondenza del tracciato della condotta.

## media 2023 e 2024

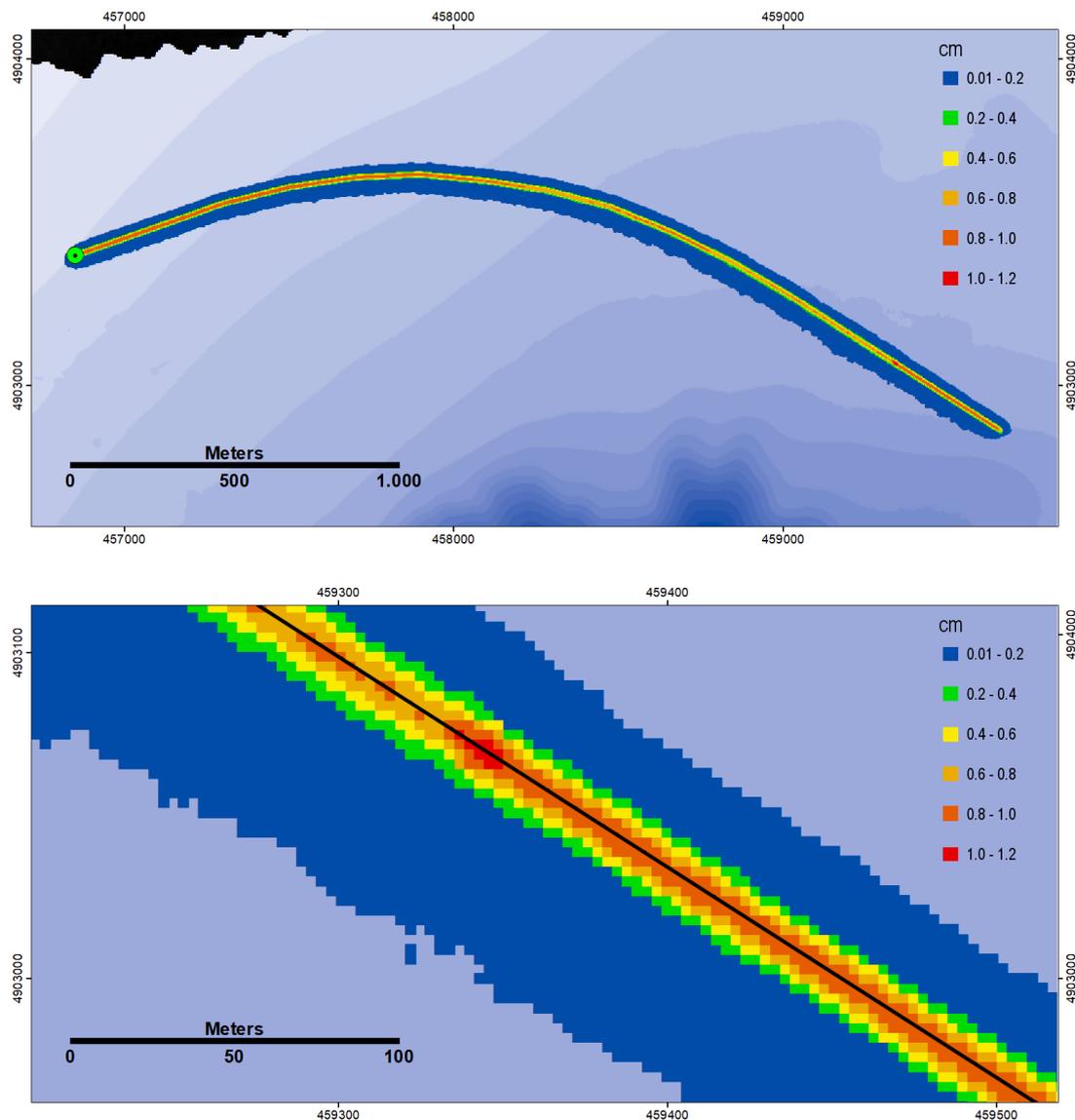


Fig. 17 – In alto: media degli incrementi di spessore [cm] causati dai sedimenti dispersi durante il post trenching della condotta in febbraio 2023 e febbraio 2024. In basso: dettaglio del tratto terminale della condotta dove sono stati riscontrati i massimi spessori di sedimento (1.2 cm).

## Stime delle concentrazioni di IPA

Le concentrazioni di IPA nel sedimento prelevato nell'area di scavo presso l'exit point sono state estratte dalle concentrazioni misurate nella stazione MT\_03 (Fig.7), riportate in Tabella 9.

Tabella 9. Concentrazioni [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ] di IPA da carotaggi effettuati nella stazione MT\_03. In tabella sono riportate: le concentrazioni da 0 a 50 cm, da 50 a 100 cm, da 100 a 200 cm, da 200 a 400 cm, da 400 a 600 cm e da 600 ad 800 cm; i livelli chimici di riferimento L1 ed L2; le concentrazioni medie risultanti nei primi 4 metri e nei primi 2 metri, ed infine i rapporti percentuali tra le concentrazioni medie nei primi 2 metri e le concentrazioni superficiali.

	Acef	Aceft	Antr	Bzantr	Bzpir	Bzflu	Bzep	Bzper	Bzflu	Bzkflu	Cris	Dbzant	Fluoran	Fluor	Inden	Naft	Fena	Pir	$\Sigma$
0-50 cm	10.2	33.9	52.6	288.1	314.7	289.8	233.4	116.4	99.1	101.5	258.4	30.3	561.2	12.3	252.1	15.2	98.1	494.1	3261.3
50-100 cm	<1	<1	<1	<1	<1	1.1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1.6	<1	1.7	21.5	<1	1.5	27.5
100-200 cm	<1	<1	1.0	<1	<1	1.2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	2.8	<1	4.2	5.2	<1	2.7	17.0
200-400 cm	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1.5	<1	<1	1.5
400-600 cm	<1	<1	<1	<1	<1	1.2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1.1	<1	<1	2.3
600-800 cm	<1	<1	<1	<1	<1	1.2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1.1	<1	1.1	3.4
L1			24	75	30	40		55		20	108		110	21	70	35	87	153	900
L2			245	500	100	500		100		500	846		1494	144	100	391	544	1398	4000
<b>Concentrazione media di IPA nei primi 4 metri</b>																			
	1.3	4.2	6.6	36.0	39.3	36.7	29.2	14.6	12.4	12.7	32.3	3.8	71.0	1.5	32.8	6.7	12.3	62.6	415.1
<b>Concentrazione media di IPA nei primi 2 metri</b>																			
	2.5	8.5	13.2	72.0	78.7	73.3	58.3	29.1	24.8	25.4	64.6	7.6	142.1	3.1	65.5	11.8	24.5	125.2	830.2
<b>Rapporto (%) tra concentrazione media nei primi 2 metri e concentrazione superficiale</b>																			
	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.3	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.3	25.0	26.0	77.4	25.0	25.3	25.5

Legenda: Acef = Acenafteene; Aceft = Acenafilene; Antr = Antracene; Bzantr = Benzoantracene; Bzpir = Benzo(a)pirene; Bzflu = Benzofluorantene; Bzep = Benzo(e)pirene; Bzper = Benzoperilene; Bzjflu = benzo(j)fluorantene; Bzkflu = benzo(k)fluorantene; Cris = Crisene; Dbzant = Dibenz(a,h)antracene; Fluoran = Fluorantene; Fluor = Fluorene; Inden = Indeno(1,2,3-cd)pirene; Naft = Naftalene; Fena = Fenantrene; Pir = Pirene.

Essendo in media l'area di scavo profonda 4 m, le concentrazioni di IPA nei sedimenti prelevati nell'area di scavo all'exit point sono state ottenute mediando le concentrazioni della stazione MT\_03 in questo strato (in Tabella 9).

Per i sedimenti sollevati durante il post trenching della condotta sono disponibili le concentrazioni di IPA nello strato superficiale misurate nelle stazioni da RV\_CA\_01 ad RV\_CA\_04 ed RV\_06, tutte disposte lungo la condotta (Fig. 8). Tuttavia, essendo il sedimento rimosso da circa 2 m di profondità, occorrerebbero le concentrazioni medie di IPA nello spessore di 2 metri. Sono stati pertanto ricavati dei coefficienti di scala che mettono in relazione la concentrazione superficiale di IPA con la concentrazione media di IPA nei primi due metri. I coefficienti di scala sono stati ricavati dai dati della stazione MT\_03 (Tabella 9), la stazione più vicina alla condotta tra quelle in cui sono stati effettuati carotaggi (descritte nel documento "Report di caratterizzazione ambientale" – doc. REL-AMB-E-70035, Techfem, citato a pag.17).

Dalla Tabella 9, le concentrazioni medie di IPA nei primi 2 metri risultano all'incirca pari al 25% delle concentrazioni superficiali, tranne che per il naftalene, dove il rapporto è pari al 77%. La media dei rapporti su tutti gli IPA (28.0%) è stata utilizzata per scalare le concentrazioni superficiali nelle stazioni da RV\_CA\_01 ad RV\_CA\_04 ed RV\_06 ed ottenere le concentrazioni medie di IPA lungo la condotta nello strato di 2 metri.

In Tabella 10 sono quindi riassunte le concentrazioni di IPA utilizzati nelle simulazioni. Per il materiale rimosso dall'area di scavo (Fasi 1 - 4) sono state utilizzate le concentrazioni di IPA all'exit point mediate da 0 a 4 m, per il post trenching sono state utilizzate le concentrazioni di IPA lungo la condotta mediate da 0 a 2 m, ottenute scalando le concentrazioni superficiali del 28%.

Tabella 10. Concentrazioni [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ] di IPA utilizzate nelle simulazioni: all'exit point (medie nei primi 4 metri) e lungo la condotta (medie nei primi 2 metri). Gli IPA evidenziati in neretto presentano concentrazioni critiche rispetto al massimo livello chimico di riferimento L2.

	Acef	Aceft	Antr	Bzant	Bzpir	Bzflu	Bzep	Bzper	Bzflu	Bzkflu	Cris	Dbzant	Fluoran	Fluor	Inden	Naft	Fena	Pir	☐
<b>Concentrazioni di IPA all'exit point (medie su 4m)</b>																			
<b>exit point</b>	1.3	4.2	<b>6.6</b>	<b>36.0</b>	<b>39.3</b>	<b>36.7</b>	29.2	<b>14.6</b>	12.4	12.7	32.3	3.8	71.0	1.5	<b>32.8</b>	6.7	<b>12.3</b>	62.6	415.1
<b>Concentrazioni di IPA lungo la condotta (in superficie)</b>																			
RV_CA_01	34.3	67.3	<b>105.7</b>	<b>541.0</b>	<b>542.8</b>	<b>516.3</b>	360.3	<b>288.7</b>	259.2	244.2	458.0	98.1	1046.5	52.9	<b>237.1</b>	34.6	<b>454.9</b>	816.0	5538.4
RV_CA_02	50.3	106.3	<b>136.0</b>	<b>692.1</b>	<b>736.3</b>	<b>710.3</b>	494.8	<b>410.0</b>	343.1	337.2	643.8	116.1	1393.1	70.7	<b>314.4</b>	51.4	<b>648.6</b>	1120.5	7537.1
RV_CA_03	51.5	94.3	<b>205.3</b>	<b>706.5</b>	<b>754.8</b>	<b>693.9</b>	488.9	<b>404.2</b>	341.1	338.3	618.9	115.4	1269.5	82.1	<b>298.6</b>	75.7	<b>592.4</b>	1025.1	7326.3
RV_CA_04	12.8	47.2	<b>93.4</b>	<b>211.5</b>	<b>246.9</b>	<b>246.8</b>	174.4	<b>157.8</b>	122.6	120.0	183.8	54.6	350.8	21.6	<b>116.8</b>	27.1	<b>152.1</b>	299.1	2342.2
RV_06	12.3	22.6	<b>43.3</b>	<b>109.7</b>	<b>129.3</b>	<b>136.7</b>	94.0	<b>91.9</b>	57.6	68.4	95.4	24.6	183.0	14.8	<b>75.3</b>	19.8	<b>81.7</b>	162.4	1271.1
<b>Concentrazioni di IPA lungo la condotta (medie su 2m)</b>																			
RV_CA_01	9.6	18.8	<b>29.6</b>	<b>151.5</b>	<b>152.0</b>	<b>144.6</b>	100.9	<b>80.8</b>	72.6	68.4	128.2	27.5	293.0	14.8	<b>66.4</b>	9.7	<b>127.4</b>	228.5	1550.8
RV_CA_02	14.1	29.8	<b>38.1</b>	<b>193.8</b>	<b>206.2</b>	<b>198.9</b>	138.6	<b>114.8</b>	96.1	94.4	180.3	32.5	390.1	19.8	<b>88.0</b>	14.4	<b>181.6</b>	313.7	2110.4
RV_CA_03	14.4	26.4	<b>57.5</b>	<b>197.8</b>	<b>211.3</b>	<b>194.3</b>	136.9	<b>113.2</b>	95.5	94.7	173.3	32.3	355.5	23.0	<b>83.6</b>	21.2	<b>165.9</b>	287.0	2051.4
RV_CA_04	3.6	13.2	<b>26.1</b>	<b>59.2</b>	<b>69.1</b>	<b>69.1</b>	48.8	<b>44.2</b>	34.3	33.6	51.5	15.3	98.2	6.1	<b>32.7</b>	7.6	<b>42.6</b>	83.8	655.8
RV_06	3.4	6.3	<b>12.1</b>	<b>30.7</b>	<b>36.2</b>	<b>38.3</b>	26.3	<b>25.7</b>	16.1	19.2	26.7	6.9	51.2	4.1	<b>21.1</b>	5.5	<b>22.9</b>	45.5	355.9
<b>Livelli chimici di riferimento (L1 ed L2)</b>																			
L1			<b>24</b>	<b>75</b>	<b>30</b>	<b>40</b>		<b>55</b>		20	108		110	21	<b>70</b>	35	<b>87</b>	153	900
L2			<b>245</b>	<b>500</b>	<b>100</b>	<b>500</b>		<b>100</b>		500	846		1494	144	<b>100</b>	391	<b>544</b>	1398	4000

Gli incrementi di concentrazione di IPA dovuti alla dispersione del sedimento durante le 5 fasi delle operazioni previste sono stati calcolati per ogni run secondo la metodologia descritta nel Paragrafo 4 (Stima delle concentrazioni di IPA e dei metalli pesanti), ovvero utilizzando la concentrazione iniziale di IPA nel sedimento, il volume totale del sedimento e la dispersione dell'argilla. Gli incrementi di concentrazione, mediati nei due anni considerati, sono riportati nelle mappe illustrate di seguito.

Gli incrementi di concentrazione sono stati calcolati per gli IPA vicini ai limiti massimi L2 o nel sedimento rimosso presso l'exit point o lungo la condotta. Questi, evidenziati in neretto in Tabella 10, sono l'antracene, benzoantracene, benzopirene, benzofluorantene, benzoperilene, indenopirene e fenantrene, e sono illustrati in Fig. 18-24.

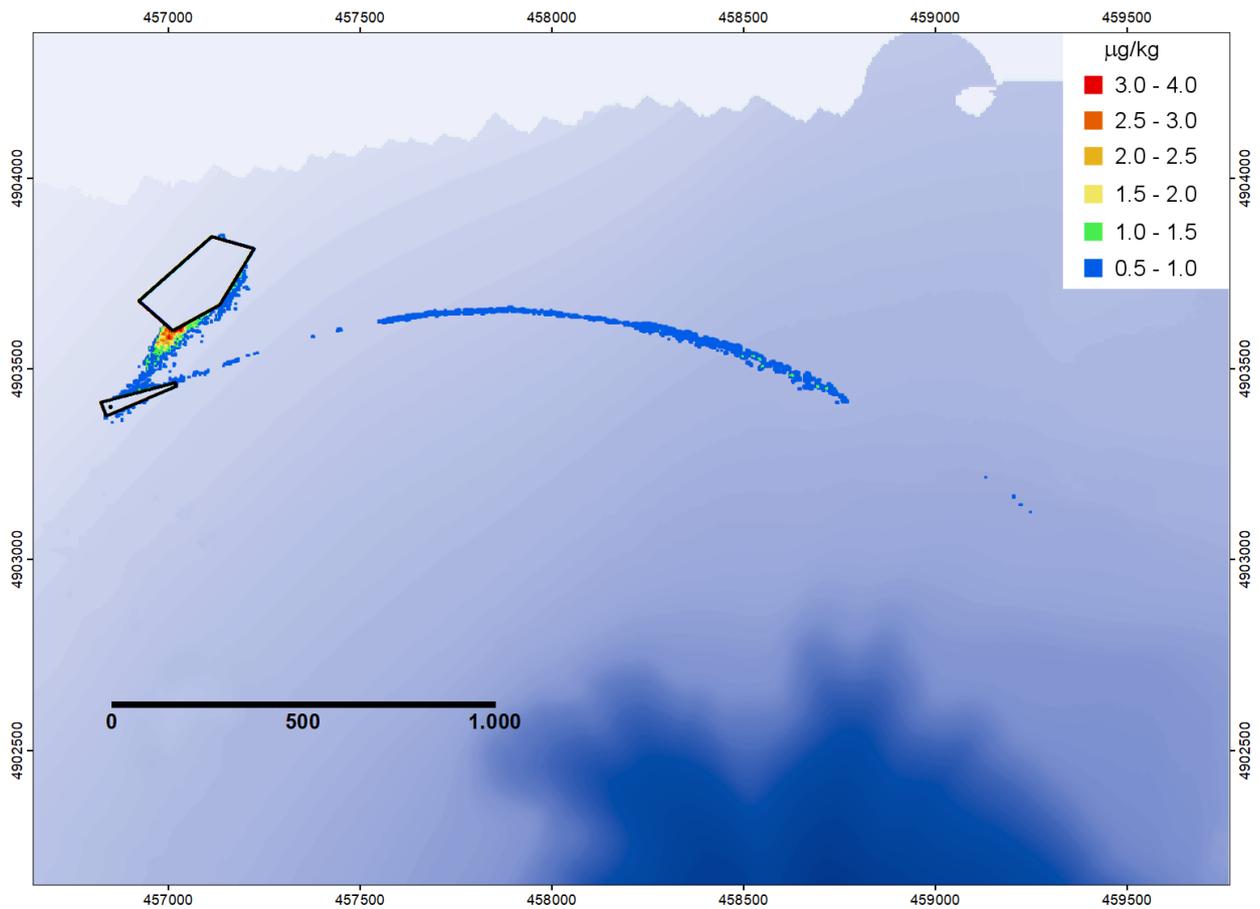


Fig. 18 – Incrementi di concentrazione di antracene (media per le operazioni effettuate in ottobre, dicembre 2022 e febbraio 2023, ed ottobre, dicembre 2023 e febbraio 2024). Massimo incremento = 4.0 µg/kg. I livelli chimici di riferimento per l'antracene sono L1=24 ed L2=245 µg/kg.

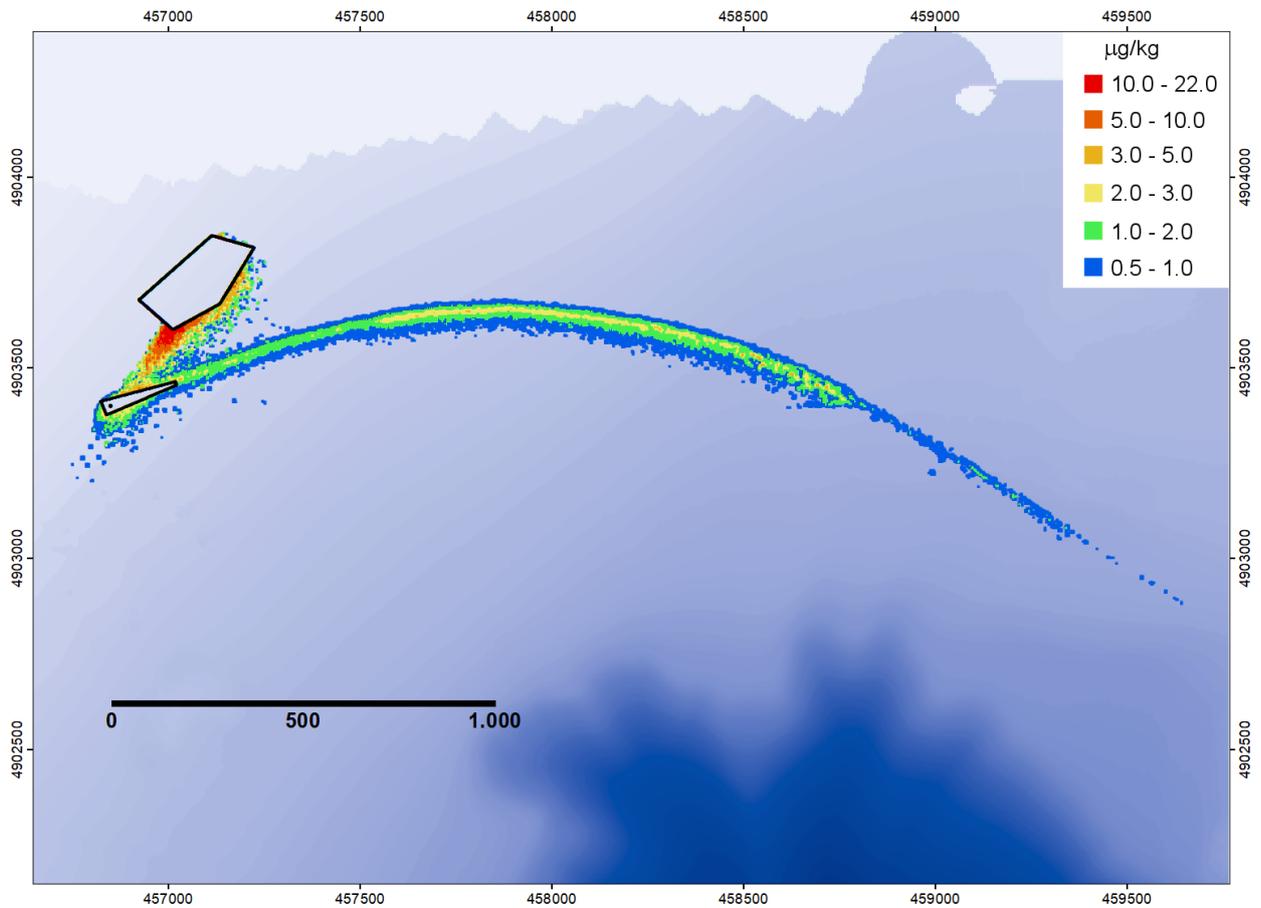


Fig. 19 – Incrementi di concentrazione di benzoantracene (media per le operazioni effettuate in ottobre, dicembre 2022 e febbraio 2023, ed ottobre, dicembre 2023 e febbraio 2024). Massimo incremento = 21.9 µg/kg. I livelli chimici di riferimento per il benzoantracene sono L1=75 ed L2=500 µg/kg.

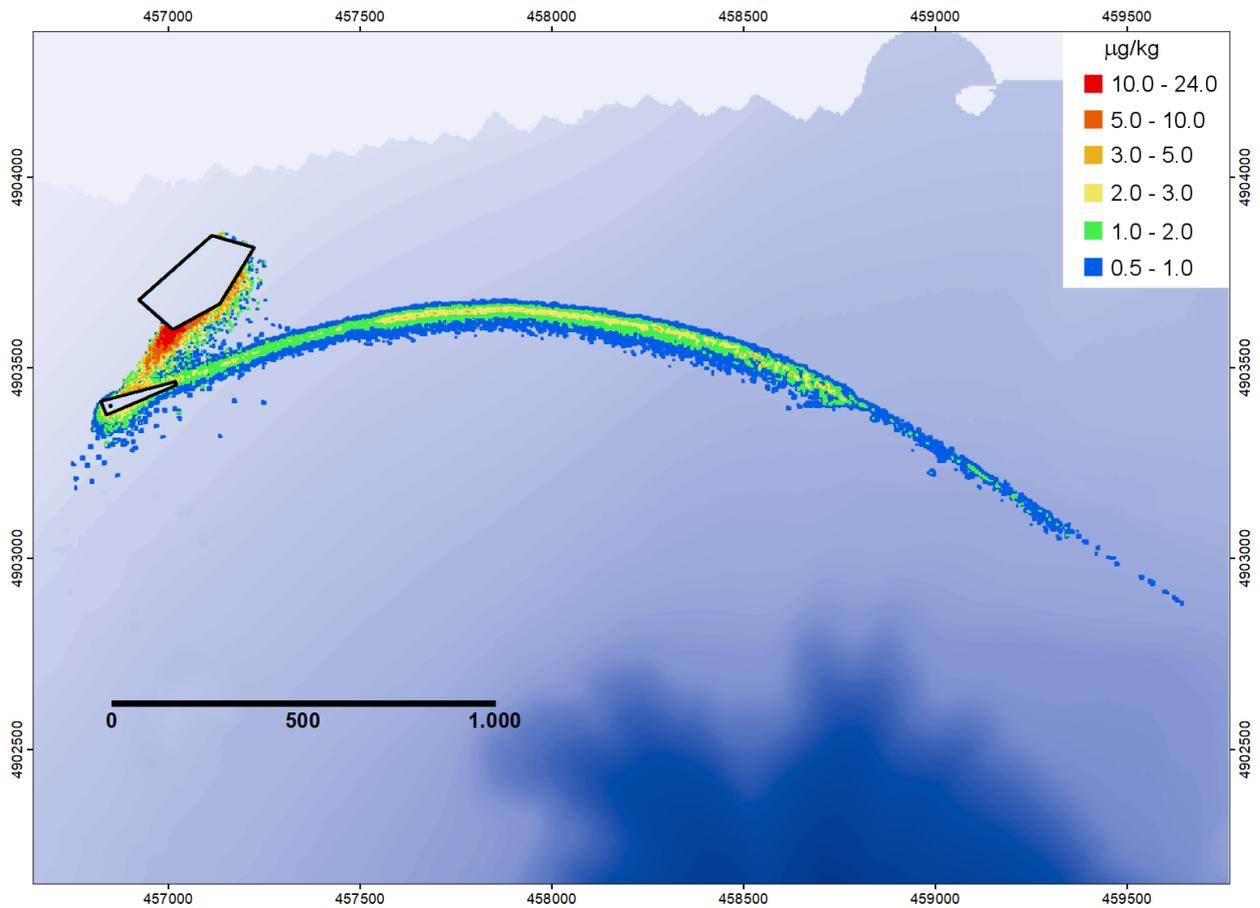


Fig. 20 – Incrementi di concentrazione di benzopirene (media per le operazioni effettuate in ottobre, dicembre 2022 e febbraio 2023, ed ottobre, dicembre 2023 e febbraio 2024). Massimo incremento = 23.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . I livelli chimici di riferimento per il benzopirene sono L1=30 ed L2=100  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .

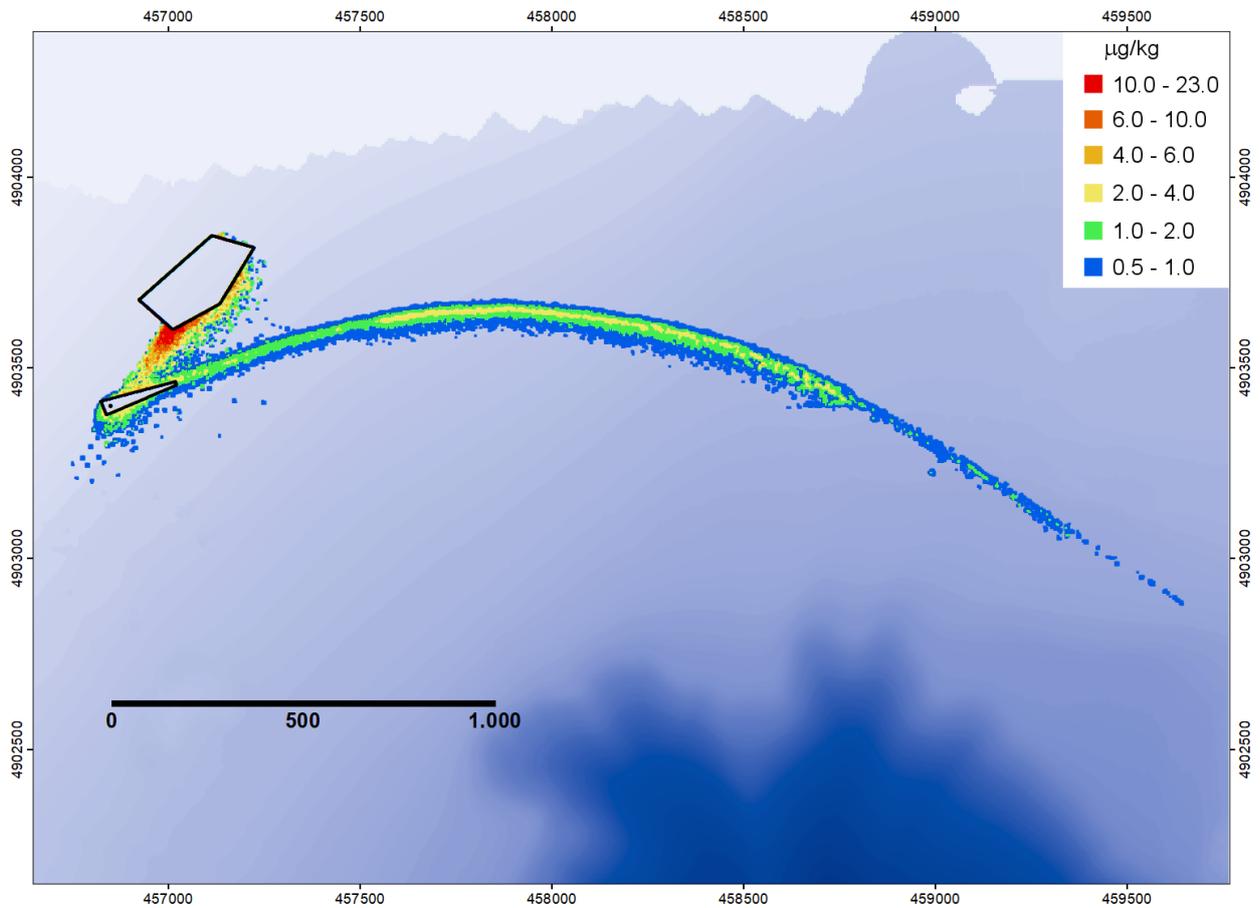


Fig. 21 – Incrementi di concentrazione di benzo(a)fluorantene (media per le operazioni effettuate in ottobre, dicembre 2022 e febbraio 2023, ed ottobre, dicembre 2023 e febbraio 2024). Massimo incremento = 22.4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . I livelli chimici di riferimento per il benzo(a)fluorantene sono L1=40 ed L2=500  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .

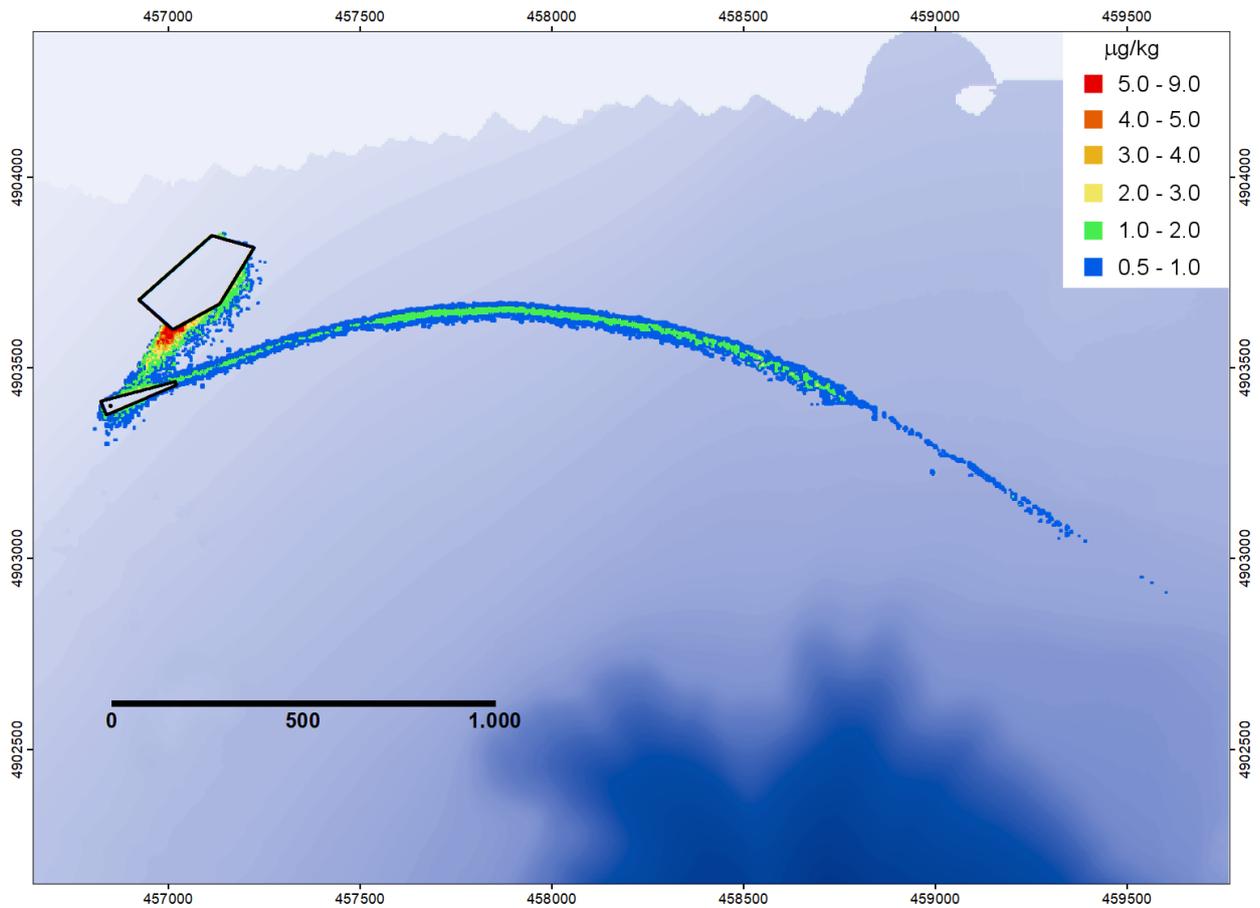


Fig. 22 – Incrementi di concentrazione di benzoperilene (media per le operazioni effettuate in ottobre, dicembre 2022 e febbraio 2023, ed ottobre, dicembre 2023 e febbraio 2024). Massimo incremento = 8.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . I livelli chimici di riferimento per il benzoperilene sono L1=55 ed L2=100  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .

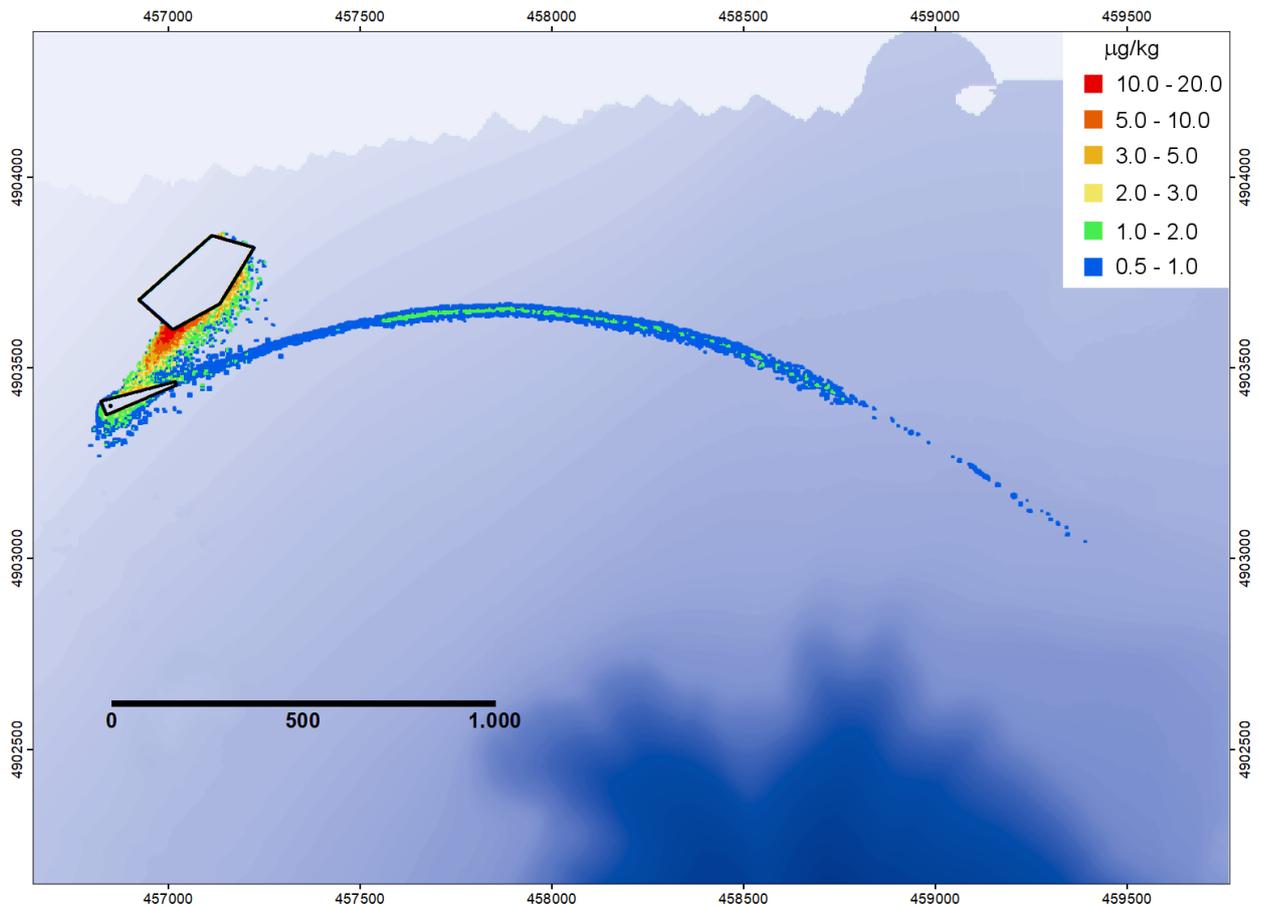


Fig. 23 – Incremento della concentrazione di indenopirene (media per le operazioni effettuate in ottobre, dicembre 2022 e febbraio 2023, ed ottobre, dicembre 2023 e febbraio 2024). Massimo incremento = 19.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . I livelli chimici di riferimento per l'indenopirene sono L1=70 ed L2=100  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .

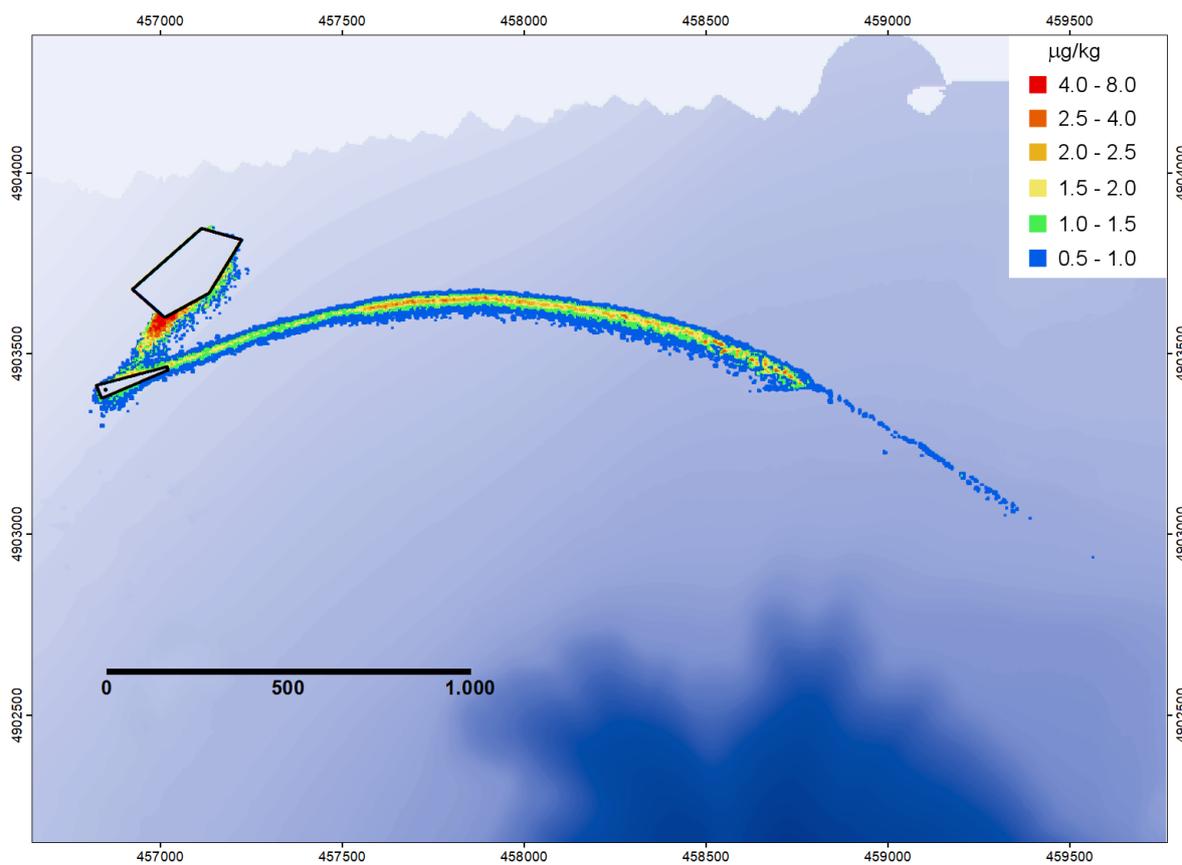


Fig. 24 – Incrementi di concentrazione di fenantrene (media per le operazioni effettuate in ottobre, dicembre 2022 e febbraio 2023, ed ottobre, dicembre 2023 e febbraio 2024). Massimo incremento = 7.5 µg/kg. I livelli chimici di riferimento per il fenantrene sono L1=87 ed L2=544 µg/kg.

Gli incrementi di concentrazione di IPA si verificano tra l'area di deponia e l'exit point, nonché lungo la condotta. I valori massimi si riscontrano a sud dell'area di deponia e solo per il fenantrene lungo alcuni tratti della condotta. I massimi incrementi di concentrazione di IPA sono tutti inferiori al minimo limite chimico di riferimento L1 (Tabella 11).

Tabella 11. Massimi incrementi di concentrazione [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ] di IPA all'esterno dell'area di scavo e deponia risultanti dalle simulazioni e limiti chimici di riferimento L1 ed L2.

IPA	L1	L2	Massimo incremento di concentrazione
Antracene	24	245	4.0
Benzoantracene	75	500	21.9
Benzopirene	30	100	23.9
Benzofluorantene	40	500	22.4
Benzoperilene	55	100	8.9
Indenopirene	70	100	19.9
Fenantrene	87	544	7.5

## Stime delle concentrazioni di metalli pesanti

Similmente agli IPA, le concentrazioni di metalli pesanti nell'area di scavo sono state estratte dalla vicina stazione MT\_03 (Fig.7). Le concentrazioni di metalli in questa stazione sono riportate in Tabella 12.

Tabella 12. Concentrazioni [ $\text{mg}/\text{kg}$ ] di metalli pesanti da carotaggi effettuati presso la stazione MT\_03. In tabella sono riportate: le concentrazioni da 0 a 50 cm, da 50 a 100 cm, da 100 a 200 cm, da 200 a 400 cm, da 400 a 600 cm e da 600 ad 800 cm; i livelli chimici di riferimento L1 ed L2; le concentrazioni medie risultanti nei primi 4 metri e nei primi 2 metri, ed infine i rapporti percentuali tra le concentrazioni medie nei primi 2 metri e la concentrazione superficiale.

Stazione MT_03	Al	As	Cd	Cr tot	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb	V	Zn
0-50 cm	1.6	15.2	0.1	47.9	16.6	2.5	0.3	27.7	35.9	39.4	135.6
50-100 cm	2.0	16.0	0.1	43.8	15.5	2.7	0.0	30.4	23.6	39.7	64.2
100-200 cm	1.8	14.1	0.1	35.6	12.3	2.5	0.0	24.2	21.5	35.7	60.5
200-400 cm	1.5	12.4	0.1	33.1	12.7	2.4	0.0	24.0	18.8	31.3	57.9
400-600 cm	1.8	16.0	0.1	68.4	11.7	2.2	0.0	43.5	13.7	41.7	50.1
600-800 cm	1.1	8.7	0.1	29.4	9.7	2.0	0.0	22.3	16.5	23.1	56.3
L1	-	12	0.3	50	40	-	0.3	30	30	-	100
L2	-	20	0.8	150	52	-	0.8	75	70	-	150
<b>Concentrazione media dei metalli nei primi 4 metri</b>											
	1.6	13.6	0.1	36.9	13.4	2.5	0.0	25.3	22.2	34.4	69.1
<b>Concentrazione media dei metalli nei primi 2 metri</b>											
	1.8	14.8	0.1	40.7	14.2	2.6	0.1	26.6	25.6	37.6	80.2
<b>Rapporto (%) tra concentrazione media nei primi 2 metri e concentrazione superficiale</b>											
	112.1	97.5	78.6	84.9	85.3	102.1	30.9	96.1	71.4	95.4	59.1

Nelle simulazioni, le concentrazioni dei metalli adottate per i sedimenti prelevati nell'area di scavo sono quelle della stazione MT\_03 mediate nei primi 4 metri. Anche per i metalli pesanti sono stati ricavati i rapporti tra la concentrazione superficiale e la concentrazione media nei primi due metri, da utilizzare per scalare le concentrazioni superficiali lungo la condotta (in Tab. 12). Al contrario degli IPA, dove i rapporti per le varie sostanze erano quasi tutti intorno al 25%, i rapporti per i metalli pesanti sono risultati molto variabili (dal 31 al 112%) ed ogni metallo è stato scalato con il proprio coefficiente di scala.

La Tabella 13 riassume le concentrazioni di metalli pesanti utilizzate nelle simulazioni, ovvero le concentrazioni all'exit point (media su 4 m) e le concentrazioni lungo la condotta (medie su 2m).

Tabella 13. Concentrazioni [mg/kg] di metalli pesanti utilizzate nelle simulazioni: all'exit point (medie nei primi 4 metri) e lungo la condotta (medie nei primi 2 metri). I metalli pesanti evidenziati in neretto presentano concentrazioni critiche rispetto al massimo livello chimico di riferimento L2.

	Al	<b>As</b>	Cd	<b>Cr tot</b>	Cu	Fe	Hg	<b>Ni</b>	Pb	V	Zn
<b>Concentrazioni di metalli all'exit point (medie su 4m)</b>											
exit point	1.6	<b>13.6</b>	0.1	<b>36.9</b>	13.4	2.5	0.0	<b>25.3</b>	22.2	34.4	69.1
<b>Concentrazioni di metalli lungo la condotta (in superficie)</b>											
RV_CA_01	1.8	<b>18.9</b>	0.1	<b>78.5</b>	25.7	2.3	0.3	<b>45.5</b>	41.8	40.4	120.5
RV_CA_02	2.29	<b>19.1</b>	0.1	<b>123.6</b>	40.2	2.6	0.3	<b>71.4</b>	51.7	48.0	123.0
RV_CA_03	1.83	<b>18.0</b>	0.1	<b>198.0</b>	37.7	2.6	0.4	<b>113.6</b>	51.9	48.0	110.6
RV_CA_04	1.82	<b>21.4</b>	0.1	<b>265.6</b>	28.8	2.8	0.2	<b>148.6</b>	46.8	58.2	104.1
RV_06	2.19	<b>28.5</b>	0.0	<b>223.7</b>	23.9	2.7	0.1	<b>141.5</b>	32.3	65.8	77.8
<b>Concentrazioni di metalli lungo la condotta (medie su 2m)</b>											
RV_CA_01	2.0	<b>18.5</b>	0.1	<b>66.6</b>	22.0	2.4	0.1	<b>43.8</b>	29.8	38.6	71.3
RV_CA_02	2.6	<b>18.7</b>	0.1	<b>105.0</b>	34.3	2.6	0.1	<b>68.6</b>	36.9	45.8	72.7
RV_CA_03	2.1	<b>17.5</b>	0.1	<b>168.2</b>	32.1	2.6	0.1	<b>109.2</b>	37.1	45.8	65.4
RV_CA_04	2.0	<b>20.9</b>	0.0	<b>225.5</b>	24.6	2.9	0.1	<b>142.8</b>	33.4	55.6	61.6
RV_06	2.5	<b>27.8</b>	0.0	<b>189.9</b>	20.4	2.7	0.0	<b>136.0</b>	23.1	62.8	46.0
<b>Livelli chimici di riferimento (L1 ed L2)</b>											
L1	-	<b>12</b>	0.3	<b>50</b>	40	-	0.3	<b>30</b>	30	-	100
L2	-	<b>20</b>	0.8	<b>150</b>	52	-	0.8	<b>75</b>	70	-	150

Le distribuzioni degli incrementi di concentrazione sono stati calcolati per i metalli pesanti che sono vicini ai limiti massimi L2 o nel sedimento rimosso presso l'exit point o nel sedimento rimosso lungo la condotta. Questi sono arsenico, cromo totale e nichel, evidenziati in neretto in Tabella 12, e le distribuzioni ottenute sono illustrate in Fig. 25-27.

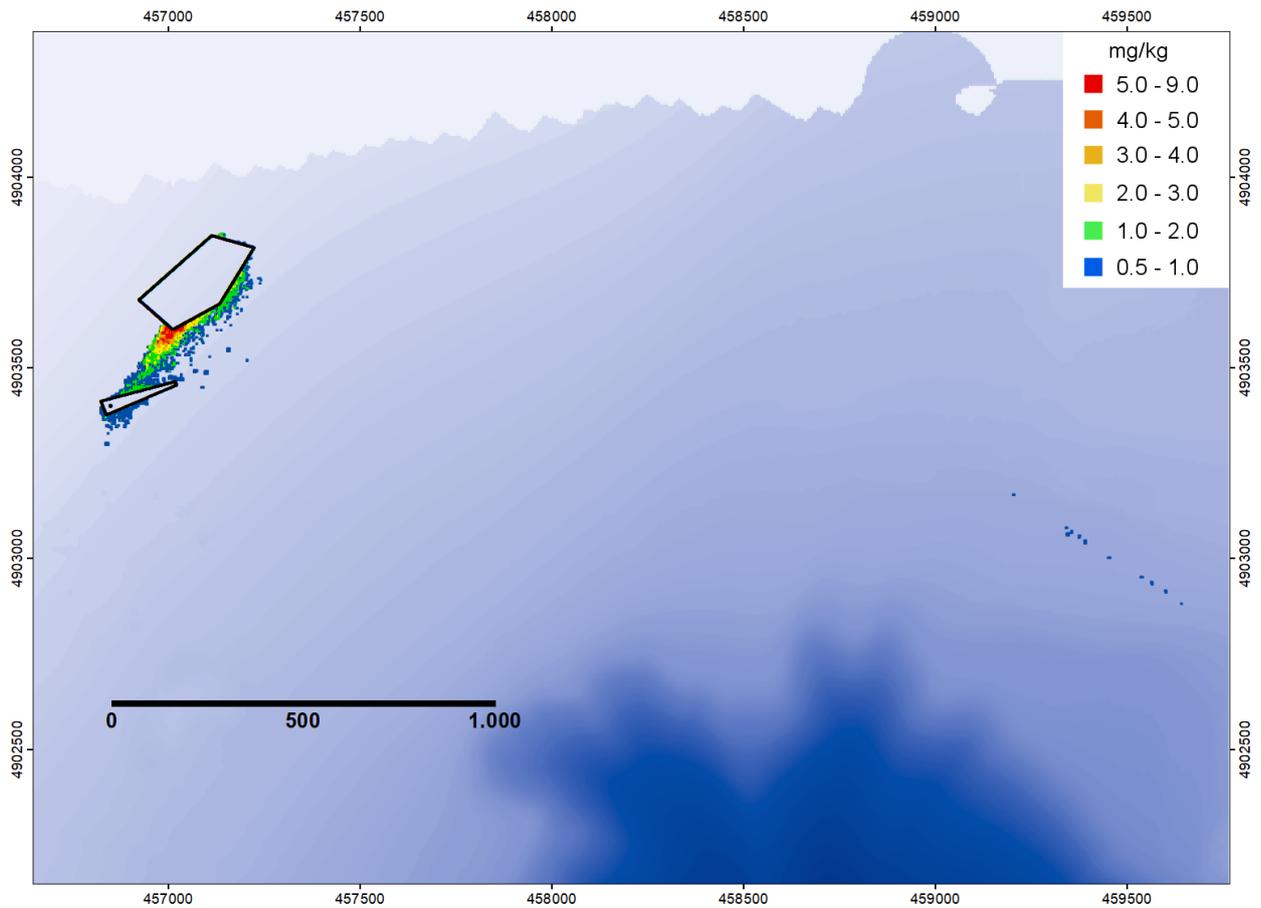


Fig. 25 – Incrementi di concentrazione di arsenico (media per le operazioni effettuate in ottobre, dicembre 2022 e febbraio 2023, ed ottobre, dicembre 2023 e febbraio 2024). Massimo incremento = 8.3 mg/kg. I livelli chimici di riferimento sono L1=12 ed L2=20 mg/kg.

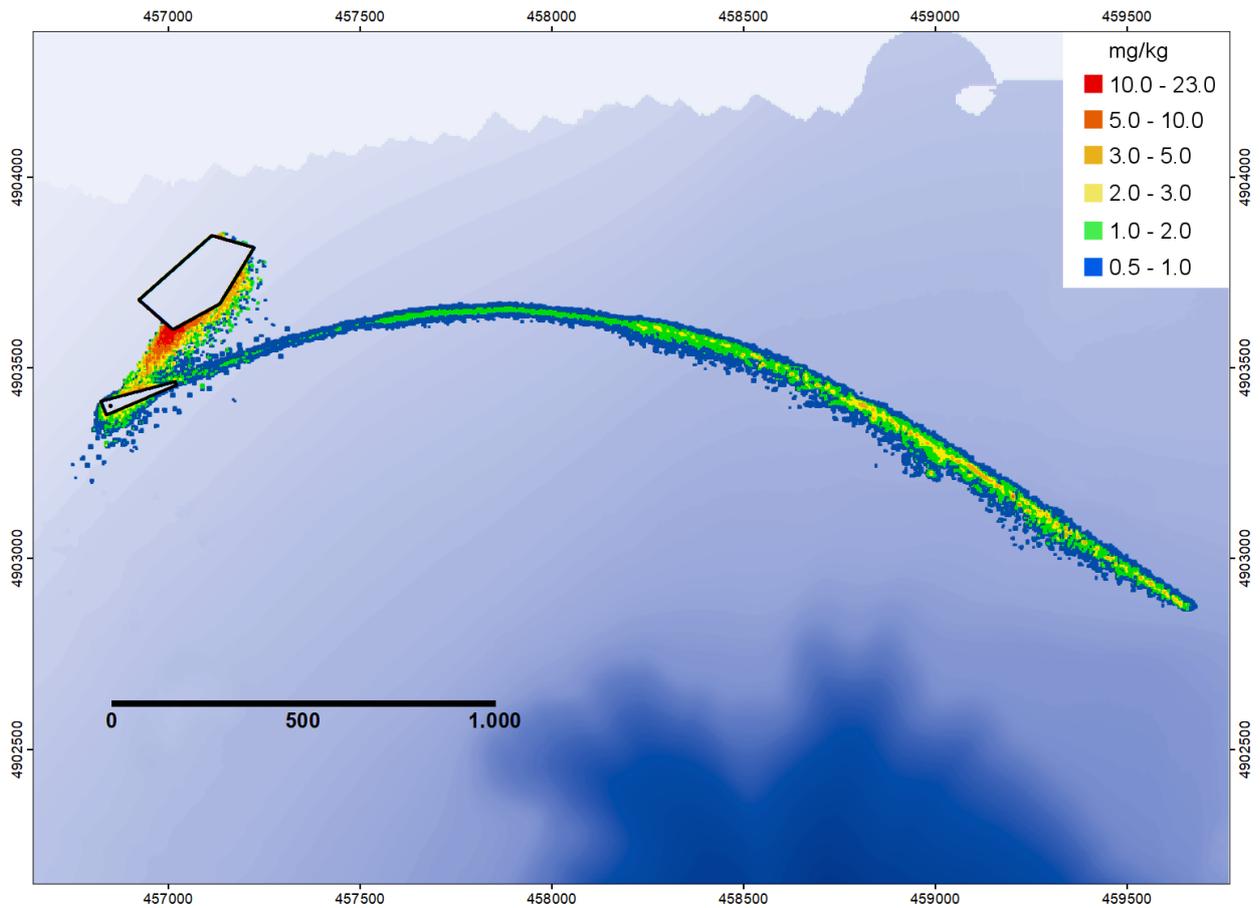


Fig. 26 – Incrementi di concentrazione di cromo totale (media per le operazioni effettuate in ottobre, dicembre 2022 e febbraio 2023, ed ottobre, dicembre 2023 e febbraio 2024). Massimo incremento = 22.5 mg/kg. I livelli chimici di riferimento sono L1=50 ed L2=150 mg/kg.

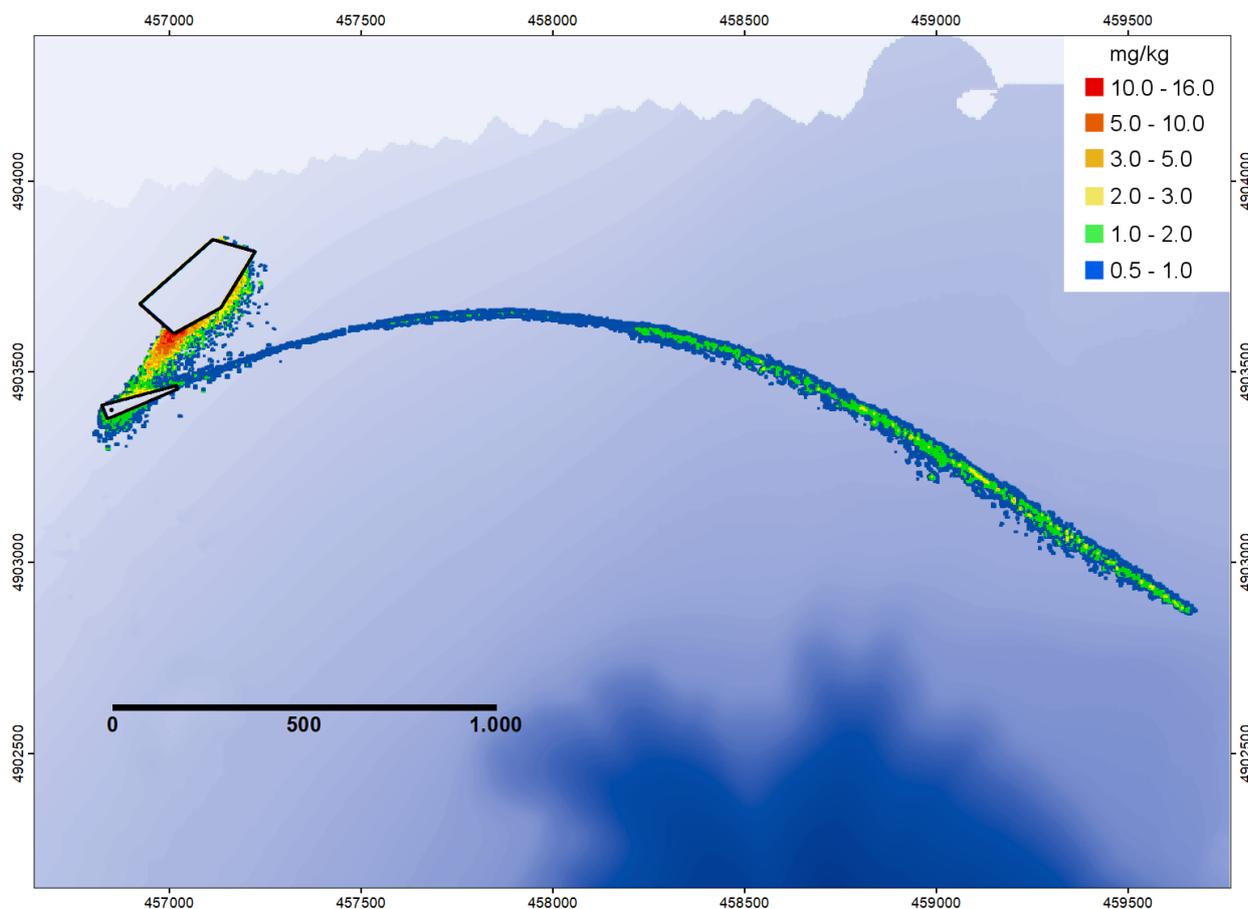


Fig. 27 – Incrementi di concentrazione di nichel (media per le operazioni effettuate in ottobre, dicembre 2022 e febbraio 2023, ed ottobre, dicembre 2023 e febbraio 2024). Massimo incremento = 15.4 mg/kg. I livelli chimici di riferimento sono L1=30 ed L2=75 mg/kg.

Anche per i metalli pesanti, gli incrementi di concentrazione si verificano tra l'area di deponia e l'exit point, e lungo la condotta, con valori massimi a sud dell'area di deponia. I massimi incrementi di concentrazione di metalli pesanti risultano tutti inferiori al minimo limite chimico di riferimento L1 (Tabella 14).

Tabella 14. Massimi incrementi di concentrazione [mg/kg] di metalli pesanti all'esterno dell'area di scavo e deponia risultanti dalle simulazioni e limiti chimici di riferimento L1 ed L2.

metalli pesanti	L1	L2	Massimo incremento di concentrazione
<b>Arsenico</b>	12	20	8.3
<b>Cromo totale</b>	50	150	22.5
<b>Nichel</b>	30	75	15.4

## **7. Conclusioni**

Sono state effettuate simulazioni modellistiche per descrivere le aree interessate dalla deposizione di sedimenti rilasciati durante le operazioni di sollevamento (Fase 1), deponia (Fase 2), recupero (Fase 3) e ripristino del materiale di scavo (Fase 4), e di post trenching della condotta (Fase 5).

Lo scopo delle simulazioni descritte in questo studio è stato quello di riprodurre vari scenari operativi che hanno permesso di evidenziare le criticità su cui volta per volta si è intervenuto al fine di minimizzare gli impatti sull'ambiente.

Le simulazioni finali qui presentate sono quindi il prodotto di un raffinamento successivo delle varie fasi di operazioni, concordate sulla base di periodiche riunioni con la committenza.

Le simulazioni finali hanno riguardato 4 classi granulometriche di argilla, limo, sabbie e ghiaia in ipotetici scenari di operazioni, utilizzando campi tridimensionali delle correnti marine ricavati dalla banca dati CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) che rappresenta la componente di monitoraggio marino del Programma europeo Copernicus (<https://marine.copernicus.eu/>). Tali dati sono stati utilizzati per ottenere i campi dinamici con i quali sono stati calcolati gli scenari di deposizione del materiale movimentato durante le operazioni di cantiere; tale scelta è risultata necessaria non avendo a disposizione idonee serie temporali di corrente marina ottenute da strumenti posizionati nell'area di interesse.

Per la corretta interpretazione dei risultati esposti in questo rapporto è opportuno tener conto che:

- l'utilizzo di dati correntometrici provenienti dai dataset CMEMS (gli unici disponibili nella zona di interesse) - sebbene sia stato verificato che questi dati ben riproducono i tipi di circolazione aspettati (vedi inversioni) - essendo prodotti da modelli, non riproducono l'intensità e la variabilità degli eventi reali;
- le simulazioni sono state ovviamente basate su dati pregressi di corrente non essendo possibile avere previsioni attendibili sulla dinamica in atto durante le effettive operazioni di cantiere;
- sono state applicate assunzioni fatte sui volumi e sulle modalità di rilascio dei sedimenti dispersi durante le varie fasi delle operazioni tratte dalla letteratura, dalle informazioni avute dalla committenza e dalle esperienze pregresse; alcune differenze potrebbero risultare in funzione

della strumentazione e dalle metodologie effettivamente utilizzate e, naturalmente, in funzione delle condizioni meteomarine in atto durante le operazioni.

Le principali scelte finali sono di seguito sintetizzate:

- l'utilizzo di una benna ambientale (o di sistemi equivalenti che non rilascino sedimenti nella colonna d'acqua) durante il sollevamento del materiale dall'area degli scavi (Fase 1) e durante il recupero del materiale dall'area di deponia (Fase 3);
- la scelta di prevedere il deposito nell'area di deponia in punti raggruppati e verso il bordo NE dell'area, per fare in modo che anche le frazioni leggere del materiale disperso si depositino all'interno dell'area;
- l'utilizzo di un 'fall pipe vessel' che depositi il materiale ad 1 m dal fondo, sia per la deponia (Fase 2) che per il ripristino del materiale all'exit point (Fase 4);
- il rispetto di una sequenza nelle operazioni di recupero del materiale dall'area di deponia (Fase 3) e del contemporaneo ripristino nell'area di scavo all'exit point (Fase 4), che prevede il riempimento delle aree di scavo prima con i materiali più inquinanti e poi con i materiali meno inquinanti.

Queste scelte, motivate dallo scopo di ridurre il quantitativo di sedimenti dispersi durante l'intero processo, minimizzano il trasporto operato dalle correnti marine e l'influenza della loro variabilità sul risultato delle operazioni di cantiere.

Si ritiene opportuno sottolineare che i risultati presentati in questo elaborato costituiscono degli "scenari" ottenuti da simulazioni numeriche basate sulle ipotesi di lavoro sopradescritte e da condizioni ambientali ottenute da modelli dinamici che potrebbero risultare diverse durante le effettive operazioni in campo. Risulta quindi opportuno mantenere un'attenta azione di monitoraggio dell'area durante le operazioni di cantiere che possa fornire indicazioni finalizzate a dare un quadro completo dei reali processi di sedimentazione nelle diverse condizioni ambientali.

Prof. Giorgio Budillon

Dr. Ing. Achille Ciappa

## **Bibliografia**

Bacciola D. et al., 1993. *Esperimenti per la determinazione del coefficiente di diffusione locale*. Technical report, ENEA. RTI/AMB/GEM-MAR/93/07.

Budillon G. et al., 2011. *Circulation and Lagrangian Dispersal in the Gulf of Vlora (Albania)*. *Journal of Coastal Research: Special Issue 58*: pp. 35 – 53.

Capello M. et al., 2011. *ADCP and CTD evaluations of the nepheloid-layer pathway for a mathematical dredging of relict sand for beach nourishment (Tuscany, Italy)*. 2011 SedNet 2011 Conference, Venice, Italy.

Chen C., Wang L., J.W. Budd, Schwab J., Beletsky P., et al., 2004. *Impacts of suspended sediment on the ecosystem in Lake Michigan: A comparison between the 1998 and 1999 plume events*. *Journal of Geophysical Research*, 109, C10S05, doi:10.1029/2002JC001687.

Cheng, N.S., 1997. *A simplified settling velocity formula for sediment particle*. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 132(2), 149–152.

Cherubini F., 2019. *Analysis of sediment dispersion from offshore post-trenching machine*. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Università Politecnica delle Marche, Anno Accademico 2018-2019.

Ciappa, A.C., 2008. *A method for reducing pressure gradient errors improving the sigma coordinate stretching function: An idealized flow patterned after the Libyan near-shore region with the POM*. *Ocean Modelling* 23 (2008) 59–72.

Doglioli A. M., M.G. Magaldi, L. Vezzulli, S. Tucci, 2004. *Development of a numerical model to study the dispersion of wastes coming from a marine fish farm in the Ligurian Sea*. *Aquaculture*, 231, 215–235.

Engell-Sorensen K., Skyt P.H., 2003. *Evaluation of the effects of sediment spill from off-shore wind farm construction on marine fish*. Report by Bio/Consult as for SEAS.

Faria A.F.G., E.B. Thornton, T.P. Stanton, C.V. Soares and T.C. Lippmann, 1998. *Vertical profiles of longshore currents and related bed shear stress and bottom roughness*. *Geophys.Res.*, 103(C2), 3217-3232, 1998

Jimenez, J. and Madsen, O., 2003. *A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments*. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 129 (2), 70–78.

Luther., M.E. and Meyers, S.D., 1998. *An integrated Model of Tampa Bay*, Technical report, USF College of Marine Science.

Nord Stream A.G., 2008. *Offshore pipeline through the Baltic Sea, spreading of sediment and contaminants during works in the seabed*. Memo 4.3A-5, September 2008

Picco P., Cappelletti A., Sparnocchia S., Schiano M.E., Pensieri S., Bozzano R., 2010. *Upper layer current variability in the Central Ligurian Sea*, *Ocean Sci.*, 6, 825–836, 2010, doi:10.5194/os-6-825-2010

Tsanis, I.K. and J. Wu, 2000. *Application and Verification of a Three Dimensional Hydrodynamic Model to Hamilton Harbour*, *International Journal of Global Nest*, 1(2), 77-89.