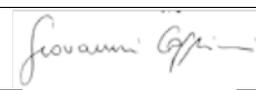
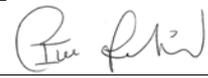
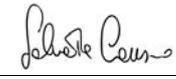


All'Autorità Portuale
di Civitavecchia, Fiumicino e Gaeta
Molo Vespucci – Porto di Civitavecchia
00053 Civitavecchia

alla c.a. Ing. Maurizio Marini
e p.c. Dott. Giorgio Fersini

Civitavecchia, li 26.04.2021

Oggetto: PROGETTO DI RICERCA
'Predisposizione delle attività di indagine per la realizzazione dello stralcio del I° Lotto
Funzionale del Nuovo Porto commerciale di Fiumicino' - Relazione di Avanzamento
attività art. 4.1.3 Convenzione Operativa n.1 PRP Fiumicino

Redatto	
Prof. Marco Marcelli	
Dr. Viviana Piermattei	
Dr. Simone Bonamano	
Dr. Sergio Scanu	
Dr. Daniele Piazzolla	
Dr. Alice Madonia	
Dr Emanuele Mancini	
Dr. Giovanni Coppini	
Dr. Ivan Federico	
Dr. Matteo Parodi	
Dr. Salvatore Causio	

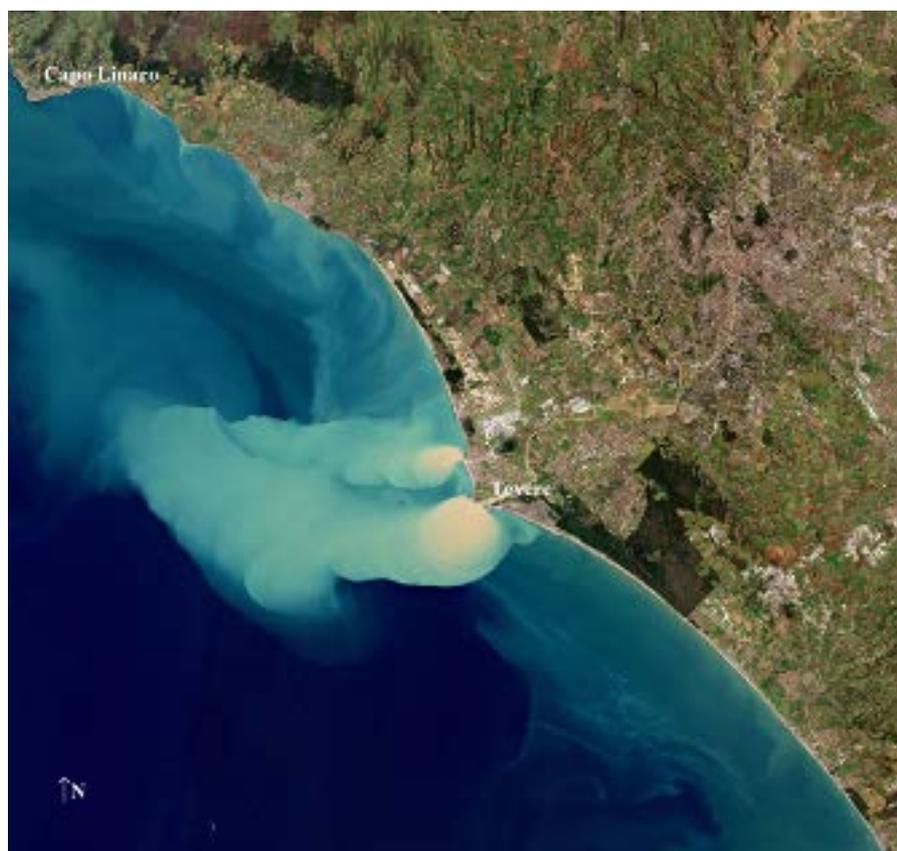
PROGETTO DI RICERCA:

**PREDISPOSIZIONE DELLE ATTIVITA' DI INDAGINE PER LA
REALIZZAZIONE DELLO STRALCIO DEL 1° LOTTO FUNZIONALE
DEL NUOVO PORTO COMMERCIALE DI FIUMICINO**

RELAZIONE AVANZAMENTO

Dati Raccolti

Agosto 2020 – Marzo 2021



Indice

1. INTRODUZIONE	4
2. OGGETTO E SCOPO	8
3. METODOLOGIA DI PROGETTO.....	9
3.1 Approccio scientifico.....	9
3.2 Area di studio.....	10
4. DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ E RISULTATI.....	14
4.1. Raccolta e analisi informazioni pregresse	14
4.2. Dataset necessario alla predisposizione dei modelli numerici	17
4.3. Caratterizzazione della colonna d'acqua	19
4.3.1 Operazioni in mare	21
4.3.2 Operazioni in laboratorio.....	22
4.3.3 Risultati dell'analisi dei profili in colonna d'acqua.....	24
4.3.4 Risultati dell'analisi della concentrazione di clorofilla <i>a</i> e dei solidi sospesi 35	
4.4 Remote Sensing	39
4.4.1 Risultati.....	41
4.5. Analisi della dinamica	58
4.5.1 Radar X-Band	59
4.5.2 ADCP.....	66
4.5.3 Drifter	70
4.6. Caratterizzazione della spiaggia sommersa.....	72
4.6.1 Profili della spiaggia sommersa.....	73

4.6.2 Campionamenti della spiaggia sommersa	76
4.7. Modelli a scala regionale e di dettaglio	81
4.7.1 Descrizione dei modelli numerici.....	82
4.7.2 Messa a punto dei modelli numerici.....	91
4.7.3 Validazione e risultati dei modelli numerici.....	102
5. ATTIVITÀ DI RICERCA SCIENTIFICA PER LA DIVULGAZIONE DEI RISULTATI DERIVANTI DAL PRESENTE PROGETTO.....	142
6. ALLEGATI	143
BIBLIOGRAFIA	143

1. INTRODUZIONE

Il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), con Decreto di Valutazione di Impatto Ambientale n. 7 del 16.02.2010, ha decretato *“giudizio positivo circa la compatibilità ambientale relativamente al progetto Variante al Piano Regolatore Portuale di Fiumicino [...]”* presentata dall'Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Centro Settentrionale. Il punto “10” del suddetto decreto riporta le condizioni e prescrizioni finalizzate alle misure di monitoraggio e mitigazione dei potenziali impatti dovuti alla realizzazione del Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino.

In particolare, le attività di monitoraggio si svolgeranno in conformità di quanto indicato nel punto 10.h del DEC VIA n. 7 del 16.02.2010 che nel dettaglio prevede:

- *“La predisposizione nell’ambito della progettazione esecutiva di un Piano di monitoraggio esteso a tutta l’Unità Fisiografica (da Capo Linaro a Capo Anzio)” [...]*
- *[...] “Porre attenzione sia al comparto biotico potenzialmente interessato dagli impatti dell’opera sia al comparto morfodinamico e di trasporto solido”.*
- *“Lo svolgimento del monitoraggio dovrà iniziare almeno prima dell’inizio dei lavori, in tempo utile da considerare almeno due stagioni significative e dovrà proseguire durante la fase di cantiere e fino ad almeno due anni dal completamento dell’opera”.*
- *“Il Piano di monitoraggio dovrà tenere conto di tutte le componenti biotiche e abiotiche comprese nelle matrici acqua, sedimento e benthos contenute anche all’interno del bacino portuale”.*
- *“Il monitoraggio sarà finalizzato ad individuare eventuali alterazioni a breve e lungo termine sull’evoluzione della linea di costa e sugli ecosistemi marini*

costieri e a mitigare gli stessi mediante adeguate azioni correttive da attuare in corso d'opera e in fase di esercizio”.

I risultati del presente progetto sono inoltre funzionali all'ottemperanza del successivo punto 10.i del citato DEC VIA n.7 del 16.02.2010 che decreta:

- *“In fase di progettazione esecutiva l’Autorità Portuale dovrà elaborare secondo modalità da concordare con ARPA Lazio un Programma di Monitoraggio finalizzato a valutare l’eventuale impatto sulla qualità delle acque di balneazione [...] nonché all’individuazione delle misure di mitigazione eventualmente necessarie.*
- *L’attività di monitoraggio, che potrà essere attuata mediante l’installazione di centraline fisse di monitoraggio ovvero mediante periodiche raccolte ed analisi di campioni, dovrà essere avviata prima dell’inizio delle attività di cantiere e dovrà essere estesa, con le modalità che verranno stabilite nel suddetto Programma, alla fase di esercizio delle opere in progetto”*

Il presente documento recepisce inoltre le indicazioni di ISPRA riferite al precedente progetto di monitoraggio riguardante le opere comprese all'interno del I Lotto funzionale (“Osservazioni al Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino. Progetto di Monitoraggio dei comparti Biotico, Morfodinamico e di Trasporto solido lungo l’Unità fisiografica Capo Linaro – Capo”) comunicate con documento prot.01291Z del 27 Marzo 2015.

Le opere verranno realizzate in più fasi, di cui la prima (c.d. I° Lotto Funzionale) prevede la realizzazione di:

- dighe frangiflutti (molo di sopraflutto e di sottoflutto);
- dragaggio dei fondali;
- sporgente crociere, che delimiterà anche la darsena pescherecci;
- casse di colmata.

Le successive opere, con cui si completerà la variante al Piano Regolatore Portuale (P.R.P.) di Fiumicino, interesseranno l’invaso portuale realizzato a seguito del

completamento del I° lotto funzionale (specchio acqueo delimitato dal molo di sopraflutto e dal molo di sottoflutto) e il II° Lotto Funzionale (dragaggio dell'invaso portuale).

Le esigenze connesse con le disponibilità finanziarie possono prevedere la realizzazione del I Lotto funzionale attraverso una programmazione di stralci funzionali successivi secondo un cronoprogramma basato su tre fasi.

Per l'inizio lavori è predisposto uno stralcio del I Lotto funzionale del Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino, come riportato nel "Progetto definitivo del I Lotto funzionale del *Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino*" (prot. 71/2018). Le opere ipotizzate come I Stralcio funzionale del I Lotto prevedono la realizzazione della Darsena pescherecci, protetta da opere foranee in parte conformi al I Lotto ed in parte riutilizzabili nel II Stralcio. Si tratta di un'infrastruttura dedicata alla flotta peschereccia di Fiumicino che costituirà il nucleo del I Lotto con 620 m di diga foranea di sopraflutto, 430 m di sottoflutto e 855 metri di banchine a servizio del naviglio con un bacino protetto di 80000 mq.

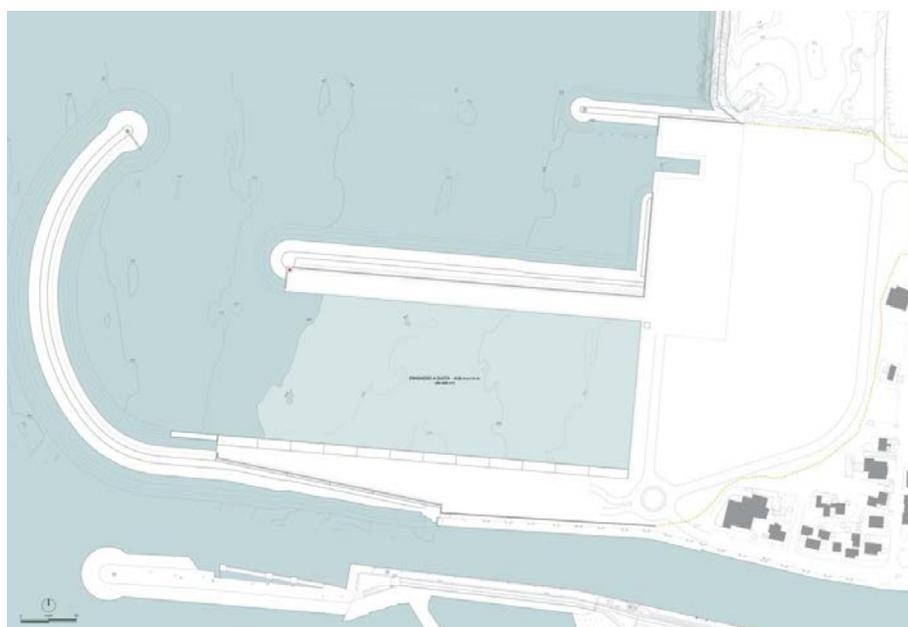


Figura 1 Opere previste nel primo stralcio del I Lotto funzionale



Il progetto deve rispondere a due principali requisiti: rispondere alle prescrizioni del Decreto di Valutazione di Impatto Ambientale (V.I.A.) n. 7 del 16.02.2010 e integrare le differenti attività legate allo studio dettagliato dell'ecosistema marino costiero nell'area oggetto delle prescrizioni. Il progetto di seguito presentato risponde inoltre alla necessità di operare una suddivisione in fasi delle attività conoscitive in funzione dell'esigenza di redigere un piano di monitoraggio il cui schema logico generale tenga conto di tutte le fasi di lavoro previste.

Inoltre, guardando al contesto normativo internazionale, il progetto si inquadra nell'ambito della Direttiva Europea sulla Strategia Marina, nata dalla consapevolezza che le pressioni sulle risorse marine sono spesso troppo elevate e dall'esigenza di ridurre gli impatti. Questo ha portato il Parlamento e il Consiglio dell'Unione Europea ad emanare la Direttiva quadro 2008/56/CE sulla strategia per l'ambiente marino (Marine Strategy Framework Directive - MSFD), è uno strumento innovativo per la protezione dei mari poiché costituisce il primo contesto normativo vincolante per gli Stati Membri a considerare l'ambiente marino in un'ottica sistemica, con lo scopo di prevenire il degrado e ripristinare gli ecosistemi danneggiati.

2. OGGETTO E SCOPO

In ottemperanza alle osservazioni di ISPRA nel documento sopra citato di marzo 2015, l'obiettivo del presente progetto è quello di effettuare una serie di attività di ricerca preliminari utili a predisporre il Piano di Monitoraggio di cui al DEC VIA n.7 del 16.02.2010, lettera "h" che prescrive la predisposizione "[...] nell'ambito della progettazione esecutiva, di un Piano di Monitoraggio esteso a tutta l'unità fisiografica (da Capo Linaro a Capo d'Anzio) [...]".

In considerazione delle opere previste e delle osservazioni presentate da ISPRA, il progetto che verrà redatto adotterà una strategia complessiva di suddivisione in fasi che contribuirà alla valutazione della variazione spazio-temporale dei processi oggetto di studio. Le attività preliminari previste da questa 'Fase 0' comprendono attività di campo e indagini a scala di Unità Fisiografica funzionali alla calibrazione di modelli numerici di simulazione per la realizzazione di scenari utili alla redazione del Piano di Monitoraggio Ambientale comprendente tutte le Fasi del progetto.

Al fine di soddisfare i requisiti di cui al citato DEC VIA è stato predisposto un innovativo progetto di ricerca che prevede differenti fasi operative:

- Fase 0: raccolta dati e predisposizione modelli a scala regionale e di dettaglio propedeutici alla valutazione dei potenziali effetti delle strutture portuali sugli ecosistemi marini e l'ottimizzazione delle attività di ricerca e monitoraggio;
- Fase 1 Ante Operam: necessaria per la comprensione delle condizioni antecedenti l'inizio dei lavori;
- Fase 2 Cantiere: fondamentale per studiare e prevenire durante le diverse operazioni gli eventuali impatti a breve termine sugli ecosistemi marini;
- Fase 3 Post Operam: per studiare le variazioni a medio-lungo termine.

3. METODOLOGIA DI PROGETTO

3.1 Approccio scientifico

Un moderno approccio allo studio delle dinamiche dei sistemi marini costieri richiede l'applicazione integrata di diversi approcci teorici e di campo. I differenti processi dinamici costieri infatti avvengono con scale spaziali e temporali molto spesso differenti fra loro e le differenti attività di monitoraggio che sono indissolubilmente legate alle scale spaziali e temporali delle piattaforme di misura (navi, barche, boe, etc.), rimangono spesso “fotografie” dei singoli differenti aspetti, e non consentono di avere un quadro sintetico ed univoco del sistema oggetto di studio. Una logica di studio dove i differenti comparti ambientali vengono analizzati in modalità indipendente gli uni dagli altri può generare una analisi a volte anche troppo dettagliata delle differenti componenti dei sistemi naturali marini, con un dispendio molto elevato di energie e costi ma spesso incompleta nella visione della fenomenologia complessiva.

L'approccio tenuto vuole superare questo problema mediante la creazione di un sistema osservativo e previsionale costituito da un sistema di modelli numerici calibrati e di rappresentazioni sinottiche, alimentato dalle informazioni provenienti da misure di campo ed immagini remote (Bonamano et. Al. 2016).

Il presente progetto si basa quindi su una strategia complessiva di rilevamento, trattamento dei dati e modellistica, che contribuirà alla valutazione della variazione spazio-temporale dei processi oggetto di studio.

I dati acquisiti nella Fase 0 verranno inseriti come input nei modelli numerici che simuleranno oltre alla possibile interferenza delle nuove opere con la dinamica litoranea, anche fenomeni potenzialmente collegati alle attività di dragaggio. Verranno inoltre utilizzati i dati già in possesso dell'Autorità Portuale di Sistema del Tirreno Centro-Settentrionale utili allo svolgimento di questo progetto.

3.2 Area di studio

L'area di studio comprende un tratto di costa lungo circa 100 km e si estende da Capo Linario a Nord e Capo Anzio a Sud, che costituiscono gli estremi dell'Unità Fisiografica.

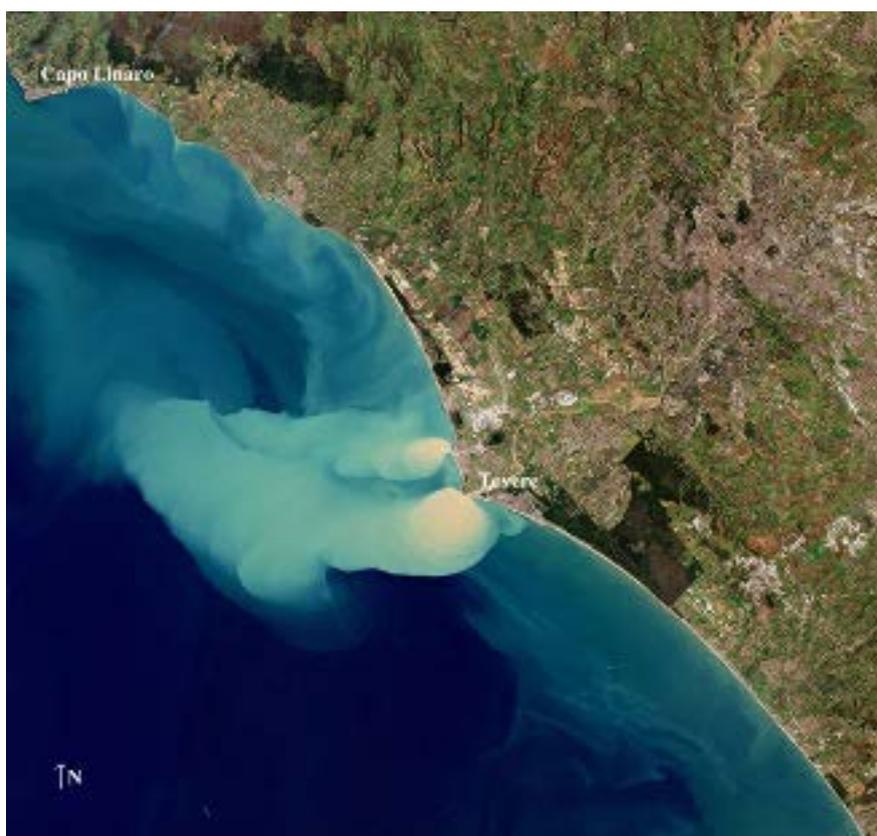


Figura 2 Plume del Tevere (Copernicus Sentinel) del giorno 25/02/2019

Al centro dell'unità di questo tratto di costa è presente la cuspide deltizia del Tevere che, con una lunghezza di 405 km e un bacino idrografico di 17375 km², rappresenta il principale corso d'acqua dell'Italia centrale.

La presenza del fiume Tevere condiziona con il suo apporto di sedimenti (Figura 2) la natura dei fondali e la morfologia e sedimentologia dei litorali presenti lungo la costa che sono costituiti principalmente da depositi sabbiosi ad eccezione delle porzioni a

nord e sud in prossimità dei due capi dove si ritrovano coste di natura rocciosa e ciottolosa.

Dalla analisi dei morfotipi costieri (Figura 3) si evince come il morfotipo costiero dominante sia infatti quello di pianura alluvionale. Oltre al fiume Tevere, lungo l'area di studio sono presenti 13 bacini idrografici minori che presentano un regime torrentizio la cui portata è condizionata principalmente dal regime pluviometrico.



Figura 3. Morfotipi presenti nel Lazio (Ferretti et Al. 2003)

I fondali costieri (0 – 50 m) prospicienti la costa oggetto di studio presentano una pendenza che varia tra lo 0.4 % e il 2 % e si presentano per lo più con un andamento morfologico che riflette l'andamento della linea di costa ad eccezione di alcune aree (soprattutto nel settore a nord del Tevere) dove sono presenti degli affioramenti rocciosi che costituiscono delle secche di importante valore ecologico.

In particolare, procedendo da nord verso sud si incontrano dapprima le Secche di Macchia Tonda, dinanzi l'omonima riserva naturale, a nord del centro abitato di Cerenova; successivamente si incontrano le Secche di Flavia a largo del centro abitato di Ladispoli, le Secche di Palo a largo di Palidoro.

A sud della foce del Tevere, un'area di particolare rilevanza ecologica è costituita dall'Area Marina Protetta delle Secche di Tor Paterno che, situata ad una distanza tra le 4 e le 7 miglia dalla costa, di fronte alla tenuta presidenziale di Castelporziano, è caratterizzata dall'essere completamente sommersa con un fondale che varia dai 18 ai 60 m.

In generale l'area costiera e deltizia presenta un'alta antropizzazione con conseguente perdita dei tratti caratteristici di spiaggia, con particolare riferimento alle strutture dunali ed alle linee di riva interessate da opere di protezione dall'erosione. Stante la perdita di naturalità dell'area costiera portuale e periportuale, a livello preliminare sono state individuate tre zone rappresentative in corrispondenza dell'area costiera di Palidoro a nord, di Castel Porziano a sud e di foci in prossimità del delta del fiume Tevere. Tali aree sono state successivamente utilizzate, come specificato di seguito, per la delimitazione dell'ambito locale dell'area di studio.

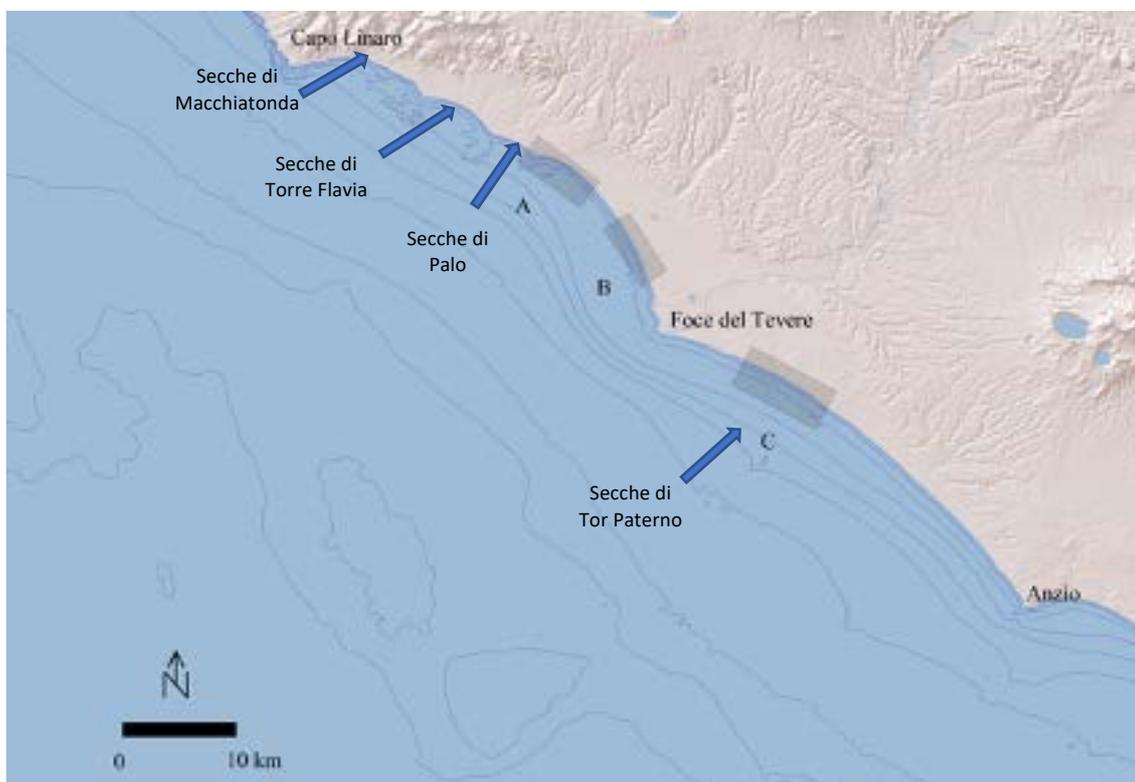


Figura 4. Unità Fisiografica Capo Linaro – Capo Anzio: aree costiere rappresentative presso Palidoro (A), Focene (B) e Castel Porziano (C)

4. DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ E RISULTATI

4.1. Raccolta e analisi informazioni pregresse

Al fine di identificare a priori le potenziali aree sensibili in funzione del valore ecosistemico intrinseco legato alle caratteristiche delle biocenosi bentoniche (Marcelli et al. 2018) alla biodiversità e del valore naturalistico, storico e di fruizione turistica è stata effettuata una approfondita analisi della bibliografia scientifica e dei rapporti tecnici istituzionali e privati disponibili.

La ricerca bibliografica non ha riguardato solamente gli ecosistemi bentonici, bensì è stata effettuata una ricerca su tutte le matrici oggetto di studio, in modo da avere dei riferimenti utili per analizzare le variazioni nel tempo dei dati acquisiti nell'area.

L'analisi completa della bibliografia è riportata nella Relazione 'PROGETTO DI RICERCA Predisposizione delle attività di indagine per la realizzazione dello stralcio del I° Lotto Funzionale del Nuovo Porto commerciale di Fiumicino - Relazione di Avanzamento attività art. 4.1.4 Convenzione Operativa n.1 PRP Fiumicino'.

Questa attività ha fornito una serie di informazioni ecologiche di base per programmare, attraverso gli scenari simulati dai modelli numerici, il corretto posizionamento dei punti di prelievo ed analisi dei diversi comparti per le successive fasi del progetto (Ante Operam, Cantiere, Post Operam), con particolare rilievo verso la fauna macrozoobentonica.

I dati raccolti hanno permesso di evidenziare le biocenosi più sensibili anche in relazione alle variazioni del regime sedimentario, consentendo così di ottimizzare il piano di campionamento per le varie fasi di monitoraggio.

Attualmente il macrozoobenthos di fondo mobile è inserito nella Direttiva Europea sulle Acque (Water Framework Directive, WFD, 2000/60/EC) ed è uno degli elementi biologici da utilizzare per definire lo stato di qualità ecologica (EcoQS), degli ambienti acquatici. Questa direttiva obbliga gli stati membri a classificare tutte le tipologie di

acque, interne e marine, in cinque categorie (classi ecologiche) comprese fra “alto” stato ecologico (condizioni prive di disturbo) e “pessimo” stato ecologico (condizioni di elevato disturbo). Negli ultimi anni sono stati proposti ed esaminati numerosi indici biotici come strumento per valutare la qualità ecologica e la maggior parte di essi si basano su pool di specie, suddivise sulla base delle caratteristiche ecologiche. L’attività di raccolta e analisi dei dati di letteratura sarà basata su una selezione di lavori che utilizzano l’AMBI (ATZI’s Marine Biotic Index) il cui valore varia tra 0 e 1 e corrisponde al Rapporto di Qualità Ecologica (RQE) richiesto dalla Direttiva 2000/60/CEE. L’indice AMBI sarà utilizzato al fine di valutare le potenziali variazioni dell’EcoQS nell’area di studio anche attraverso un confronto diretto con le valutazioni di qualità ecologica descritte nei rapporti di Arpa Lazio.

I dati relativi alle biocenosi bentoniche hanno consentito di costruire delle mappe, attraverso la piattaforma GIS predisposta, grazie alle quali è stato possibile valutare i potenziali effetti dovuti alla costruzione delle nuove infrastrutture portuali.

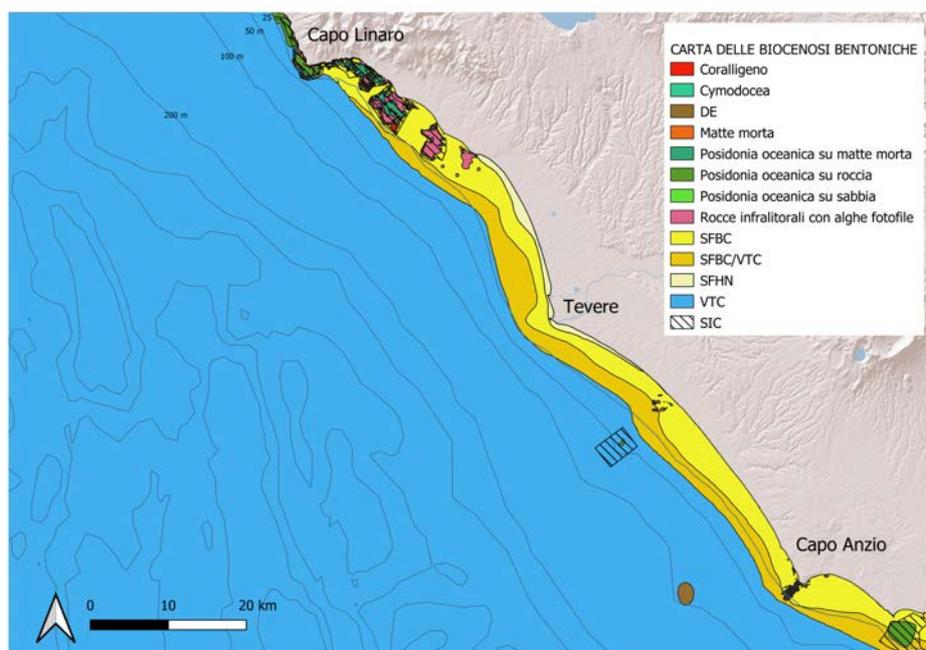


Figura 5 Mappa delle biocenosi bentoniche nell’area compresa tra Capo Linaro e Capo d’Anzio



4.2. Dataset necessario alla predisposizione dei modelli numerici

I modello idrodinamico e di moto ondoso necessitano di dati di input, condizioni iniziali e al contorno per fornire le principali caratteristiche ambientali del mare. Di seguito vengono riportati i principali dati richiesti dai modelli e le fonti da cui saranno reperiti.

- La morfologia sommersa dalla banca dati disponibile su Emodnet, la quale sarà integrata con i dati dei rilievi batimetrici acquisiti nell'area dell'Unità Fisiografica.

- La linea di riva da immagini satellitari ad alta risoluzione fornite dall'Autorità di Sistema Portuale del Tirreno centro-settentrionale.

- Il campo di vento dai dataset del sistema ECMWF fornito al CMCC dall'Aeronautica Militare.

- Gli inputs fluviali da dati bibliografici disponibili per il fiume Tevere (gli altri apporti fluviali verranno analizzati in seguito quando si dovrà studiare l'impatto del porto nella sua configurazione definitiva).

- Le correnti marine a mesoscala dal sistema Copernicus Marine Service (Modello NEMO).

- Il moto ondoso a mesoscala dal sistema Copernicus Marine Service (Modello WAM).

Tutti i dati raccolti, sia pregressi che di campo, saranno contenuti all'interno di un sistema informativo GIS che sarà predisposto per fornire rappresentazioni sinottiche utili nelle prime fasi del progetto.

Il data base sarà realizzato secondo i formati e gli standards "SeaDataNet" per poter effettuare lo sharing dei dati con la comunità scientifica di riferimento. Tutti i dati in formato SeaDataNet sono esportabili in formato universale CSV, importabile da qualsiasi altra piattaforma.

I risultati dei modelli saranno disponibili attraverso servizi di visualizzazione WMS e inseriti nel GIS del progetto laddove necessario.

La componente Cartografica sarà prodotta secondo i sistemi cartografici ESRI sia per quanto riguarda le componenti vettoriali che raster, compatibile con INSPIRE e il



Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali (RNDT), adottando gli standard WMS. L'infrastruttura del GIS che verrà sviluppato sarà compatibile con quanto realizzato da ISPRA. La cartografia benthos e sedimenti verrà prodotta secondo il sistema di riferimento WGS84 UTM fusi 32-33, mentre le sezioni oceanografiche verranno rappresentate in ODV WGS84.

4.3. Caratterizzazione della colonna d'acqua

Durante questa prima fase sono state effettuate campagne in diversi periodi al fine di avere una eterogenea caratterizzazione della colonna d'acqua, sia in condizione di stratificazione che di mescolamento, lungo 3 transetti costa largo sino alla batimetrica di 200 m in corrispondenza di Capo Linaro, foce del fiume Tevere, Capo d'Anzio, come riportato in Figura 6.

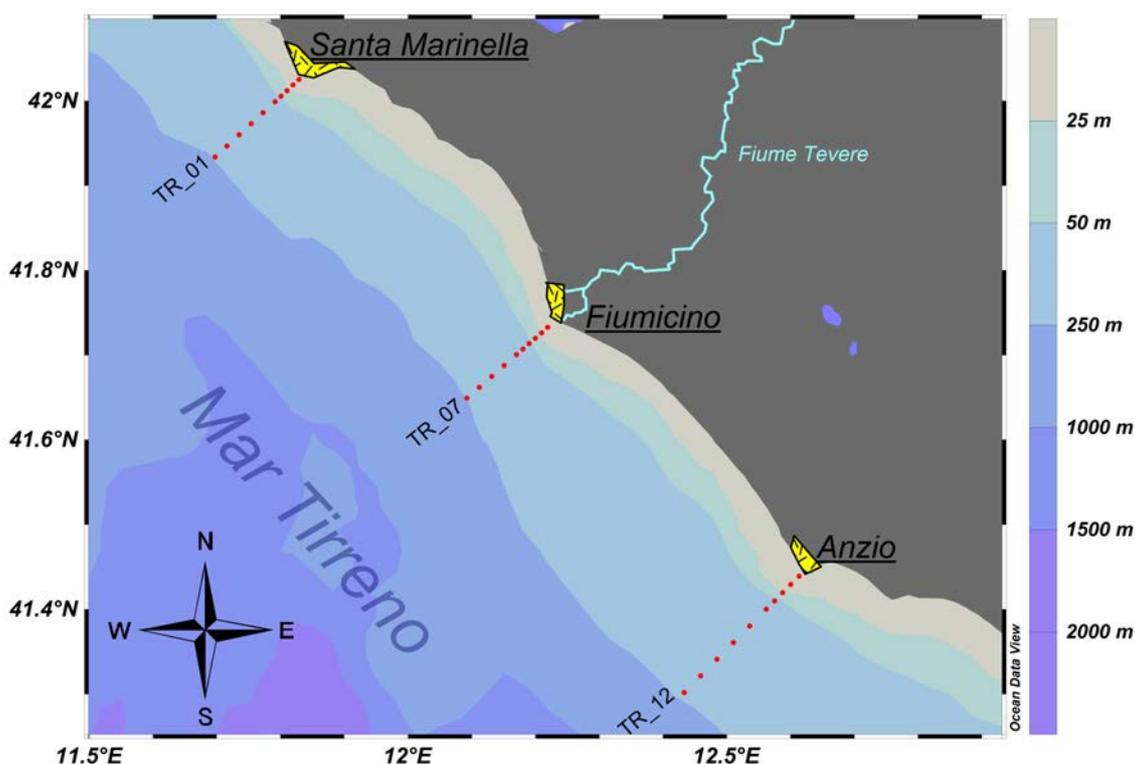


Figura 6 Campagna di caratterizzazione della colonna d'acqua

In corrispondenza dei transetti selezionati sono stati acquisiti lungo la colonna d'acqua, mediante l'uso di sonde multiparametriche, dati di pressione, temperatura, conducibilità (salinità, densità), ossigeno disciolto, clorofilla *a* e solido sospeso. Relativamente agli ultimi due parametri, sono stati effettuati n.30 campionamenti di acqua per ogni

parametro e per ciascuna campagna per un totale di 120 campioni, al fine di calibrare la strumentazione e comparare i dati acquisiti mediante remote sensing nell'arco del progetto.

Le attività sopra descritte, fondamentali per l'ottimizzazione dei risultati dei modelli matematici e per acquisire una prima base conoscitiva dell'area, forniscono informazioni essenziali sulle caratteristiche oceanografiche dell'area di studio evanno a integrare le misure effettuate nell'ambito del quadro di riferimento istituito dalla Direttiva 2008/56/CE (Marine Strategy Framework Directive, MSFD), con particolare riferimento ai Descrittori 5 (eutrofizzazione) e 7 (Condizioni Idrografiche).

In particolare, le attività di ricerca e monitoraggio svolte permetteranno di acquisire un set di dati utili a soddisfare anche le disposizioni contenute nel D.Lgs. 152/06 ed i successivi Decreti attuativi 131/08 e 56/09, nonché al DM 260/10 del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, che costituiscono il riferimento normativo vigente per i piani di monitoraggio ambientale nazionali, fornendo una specifica definizione delle modalità per la caratterizzazione dei corpi idrici, il monitoraggio e l'identificazione delle condizioni di riferimento, in attesa della versione definitiva dei piani di monitoraggio 2021-2026.

Di seguito il dettaglio delle metodologie utilizzate per le diverse attività effettuate e i principali risultati ottenuti.

4.3.1 Operazioni in mare

Durante le campagne di misura sono stati raccolti campioni di acqua attraverso una bottiglia Niskin, dotata di un sistema di apertura e chiusura attivabile alla profondità selezionata. I campioni hanno permesso di analizzare le concentrazioni della clorofilla *a* e del solido sospeso. Le procedure adottate per l'analisi dei parametri sopra indicati sono conformi ai metodi riportati nelle procedure ISO per il campionamento, la conservazione e l'analisi dei campioni di acqua di mare, nei Manuali e Linee Guida APAT/CNR IRSA n. 29/2003 e successivi aggiornamenti, nei Manuali e Linee Guida ISPRA 56/2010 Metodologie di studio del Plancton marino, nei Quaderni IRSA e in 'Metodologie Analitiche di Riferimento-Programma di Monitoraggio per il controllo dell'Ambiente marino costiero/Triennio 2001.2003', MATTM, ICRAM, Roma 2001 e successivi aggiornamenti.

Modalità di campionamento

Clorofilla a

Il campione d'acqua prelevato per la determinazione della concentrazione di clorofilla *a* è stato travasato dalla bottiglia di campionamento in una bottiglia di plastica scura da 5l, interponendo il retino da plancton con maglia da 250 µm, in modo da trattenere lo zooplancton e le macroalghe eventualmente presenti. Prima della raccolta del campione la bottiglia è stata avvinata tre volte.

Torbidità

Il campione d'acqua prelevato per avere la quantità di solido sospeso è stato prelevato dalla bottiglia di campionamento e travasato in bottiglie di plastica da 2l. Prima della raccolta del campione la bottiglia è stata avvinata tre volte.

Conservazione dei campioni

Di seguito si riportano le modalità di conservazione dei campioni adottate per l'analisi dei parametri sopra indicati:

Clorofilla a

La conservazione dei campioni prelevati per la determinazione della concentrazione di clorofilla a è stata effettuata ponendo le bottiglie di raccolta del campione al fresco, lontano dai raggi solari, fino al momento della filtrazione, avvenuta immediatamente dopo il prelievo, a bordo dell'imbarcazione. In particolare, per ciascun campione è stato filtrato un volume noto (da 1 a 3l) con filtri in fibra di vetro Whatman GF/F 25 mm. I filtri sono stati conservati in provette da 10 ml, immersi in 5 ml di Acetone 100% disidratato e mantenuti al buio ad una temperatura di -20°C fino al momento delle analisi di laboratorio.

Torbidità

I campioni d'acqua prelevati dalla bottiglia di campionamento sono stati riposti in contenitori di plastica da 2l. I campioni sono stati analizzati nel più breve tempo possibile al fine di ridurre al minimo la possibilità di variazioni chimiche o fisiche o biologiche durante la conservazione.

4.3.2 Operazioni in laboratorio

Di seguito si riportano le attività di laboratorio ed i metodi di riferimento adottati per l'analisi dei parametri sopra indicati.

Clorofilla a

Una volta in laboratorio, i filtri, conservati a -20°C, sono stati triturati con un pestello in vetro. Il volume dell'estratto acetone è stato portato a 10 ml attraverso l'aggiunta di

Acetone 80%, in modo tale da ottenere un estratto finale di Acetone 90%. I campioni sono stati, quindi, riposti ad una temperatura di 4°C per 24h per completare l'estrazione. Al termine dell'estrazione, ciascuna provetta è stata centrifugata per 15 minuti a 4000 giri/min, in modo da separare il filtro dalla soluzione. Si è, pertanto, proceduto alla lettura spettrofotometrica del soprannatante secondo le metodiche ISO (10260:1992) e ISPRA (Lazzara et al., 2010).

Calcoli

La stima dei pigmenti fotosintetici è stata effettuata applicando le seguenti formule:

- metodo della stima della clorofilla a (con feopigmenti) (Jeffrey & Humphrey, 1975);
- metodo per la stima delle clorofille a, b e c (Lorenzen & Jeffrey, 1980);
- metodo per la stima separata della clorofilla a e dei feopigmenti (Lorenzen, 1967).

Torbidità

I campioni prelevati in situ sono stati filtrati (Volumi noti da 1 a 3l) utilizzando filtri con pori di diametro medio di 0,45 µm, pre-essiccati per 1 ora in stufa ad una temperatura di 105°C e pesati al decimo di milligrammo dopo averli lasciati raffreddare in essiccatore per 30 minuti. Al termine della filtrazione i filtri sono stati risciacquati con acqua distillata ultrapura. Ultimata la filtrazione, i filtri sono stati a loro volta essiccati ad una temperatura di 105 °C per un'ora e pesati secondo i metodi riportati in Strickland & Parson (1972) e APAT IRSA (2003).

Calcoli

Il contenuto di solidi totali disciolti alla temperatura scelta è dato da:

$$\text{Solidi Sospesi} \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{(M1 - M0) * 1000}{V}$$

dove:

M1 = peso (mg) del filtro e del residuo dopo essiccamento;

M0 = peso (mg) del filtro;

V = volume (ml) di campione sottoposto a filtrazione.

4.3.3 Risultati dell'analisi dei profili in colonna d'acqua

I dati acquisiti lungo la colonna d'acqua hanno consentito di costruire delle sezioni profondità-distanza, orientate SW-NE, che rappresentano la distribuzione delle diverse variabili nello spazio. I transetti sono stati rappresentati mediante il software Ocean Data View (ODV) (Schlitzer, Reiner, Ocean Data View, <https://odv.awi.de>, 2020) e di seguito vengono riportati le sezioni della distribuzione di temperatura, salinità, clorofilla *a*, solido sospeso e ossigeno disciolto.

I singoli files CTD sono stati acquisiti e quindi sottoposti a Data Quality Control secondo le procedure previste dal manuale SeaDataNet della Pan-European Infrastructure for Ocean & Marine Data Management.

L'analisi dei dati CTD permette di identificare tre aree costa largo con caratteristiche specifiche.

Una zona prossima alla costa dominata da processi di dinamica litoranea, un'area di transizione dove si passa da una struttura della colonna d'acqua intermedia fra le acque costiere e quelle di largo e l'area di largo che rappresenta la "chiusura" delle acque costiere e sancisce il passaggio definitivo a caratteristiche oceanografiche tipiche del Tirreno (mediamente solo il profilo di largo è quello che può essere considerato, durante le attività di caratterizzazione, di acque "indisturbate").

Il Tevere rappresenta una sorgente di acque dolci, nutrienti e solidi sospesi che modulano e condizionano in maniera molto evidente le caratteristiche oceanografiche di tutta l'area considerata.

Nell'area prospiciente il Tevere, nelle situazioni oceanografiche analizzate, la porzione della colonna d'acqua fortemente influenzata dall'ambiente costiero si estende sino a circa 10 km dalla costa, fino alla batimetrica di 40-50 m.

Nel transetto estivo (figure 7a e 7b), è ben visibile la plume del Tevere che, dopo essersi parzialmente mescolata con le acque marine si propaga al largo restando confinata parte in superficie e parte in profondità trascinando un carico di solidi sospesi e nutrienti che alimentano massimi relativi di clorofilla a.

Nella figura 12 si vede chiaramente come le stazioni più costiere (10701 e 10702) presentino valori di salinità e solidi sospesi fortemente condizionati dall'apporto del Tevere. Le stazioni 10703 e 10705 rappresentano una transizione verso largo dove mentre si riescono a distinguere ancora nettamente le acque condizionate dagli apporti del Tevere, in profondità non si rilevano le acque con le salinità più profonde caratteristiche del Tirreno centrale. Le stazioni intermedie rappresentano una transizione graduale verso le acque di largo e nella stazione 10708 si vede chiaramente ancora l'influenza del Tevere, che nelle stazioni più al largo 10709 e 10710 (vedi fig. 13) diminuisce progressivamente, dove invece si iniziano a notare caratteristiche comparabili con quelle riscontrate in letteratura (vedi fig. 14), e con i profili ARGO nello stesso periodo, tutte caratterizzate da una elevata salinità di circa 38,6 PSU (oltre 38.7 g/kg di salinità assoluta) già alla profondità fra i 150 e i 200 m.

Analoghe considerazioni si possono fare per lo stesso transetto nel periodo invernale, dove il maggior deflusso del Tevere permette di visualizzare una ancora più spiccata visione della plume del Tevere che, in corrispondenza della foce, genera una forte laminazione delle acque dolci parzialmente mescolate con le acque del Tirreno che restano confinate in superficie per diversi km al largo della foce con il loro elevato carico di solidi sospesi. Anche in inverno si nota una massa d'acqua subsuperficiale con elevato carico di solidi sospesi e nutrienti che va ad alimentare la biomassa fitoplanctonica.

In estate a sud si osserva una colonna d'acqua stratificata con un minimo subsuperficiale di circa 38 psu alla profondità di circa 20 m in corrispondenza del termoclino.

La biomassa clorofilliana è prevalentemente profonda con un DCM fra i 90 e i 100 m di profondità. Maggiore concentrazione dei solidi sospesi confinata entro i 5 km dalla costa.

La plume, deflessa a sud dalle condizioni meteo, nel transetto 12 invernale, sembra influenzare le acque superficiali sino ad una distanza di oltre 15 km dalla costa, con acque molto fredde e superficiali schiacciate verso costa, mentre si vede una massa d'acqua sub-superficiale che trasporta una notevole quantità di solidi sospesi a 7-8 km dalla costa. Il DCM è caratteristico del periodo di fine inverno con elevati valori di biomassa e una profondità molto minore (40-50m) rispetto al periodo estivo.

Il profilo settentrionale estivo è stato effettuato dopo una forte mareggiata che ha rimescolato la porzione superficiale della colonna d'acqua facendo sprofondare il termoclino sino alla profondità di oltre 40 m e parzialmente distruggendo il DCM con la biomassa clorofilliana che si distribuisce in maniera piuttosto omogenea nei primi 90 m della colonna d'acqua.

Il solido sospeso è più abbondante nella acqua costiera entro i 5 km dalla costa e si vede una netta influenza nella salinità superficiale costiera dovuta agli apporti di acqua dolce che restano confinati verso costa.

Nel profilo invernale settentrionale si vedono due zone distinte una nettamente influenzata da apporti costieri, sino a circa 8-10 km dalla costa, prevalentemente dalla plume del Tevere (per la salinità che sebbene bassa indica un mescolamento durato un periodo di tempo più lungo rispetto ad apporti locali) che modula la biomassa fitoplanctonica con massimi costieri sub-superficiali e il solido sospeso con concentrazioni più elevate sino alla profondità di circa 70-80 m, una zona a caratteristiche oceaniche con un DCM in formazione alla profondità di circa 50 m caratterizzata da forte mescolamento separato dalle acqua costiere da una breve area di transizione.

In conclusione, i deflussi del Tevere influenzano, in funzione delle caratteristiche meteomarine, le acque costiere sia a nord che a sud sino ai limiti geografici esplorati (Capo Linaro - Capo d'Anzio) e direttamente al largo sino a batimetriche variabili fra i

150 e i 200 m, che rappresentano le zone dove potrebbe trovarsi un fronte le cui ondulazioni sono modulate dalle piene del Tevere e in genere dalle condizioni oceanografiche del Tirreno.

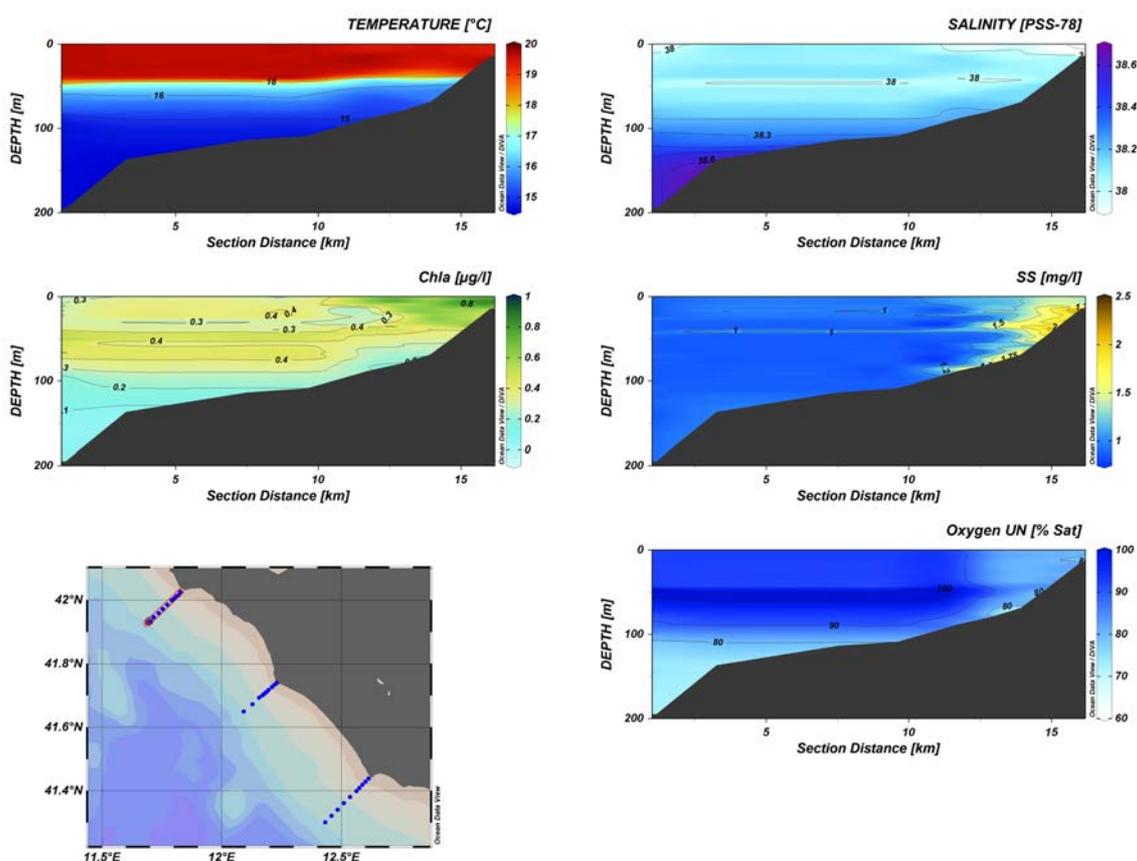
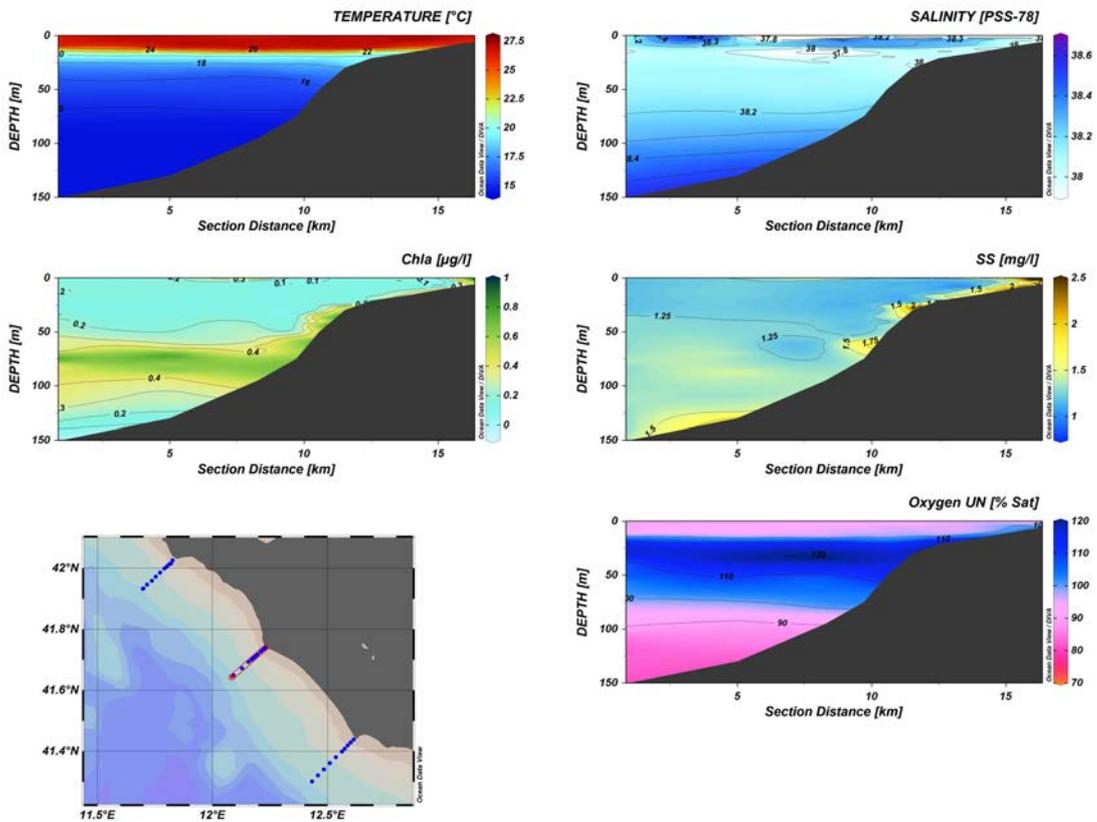
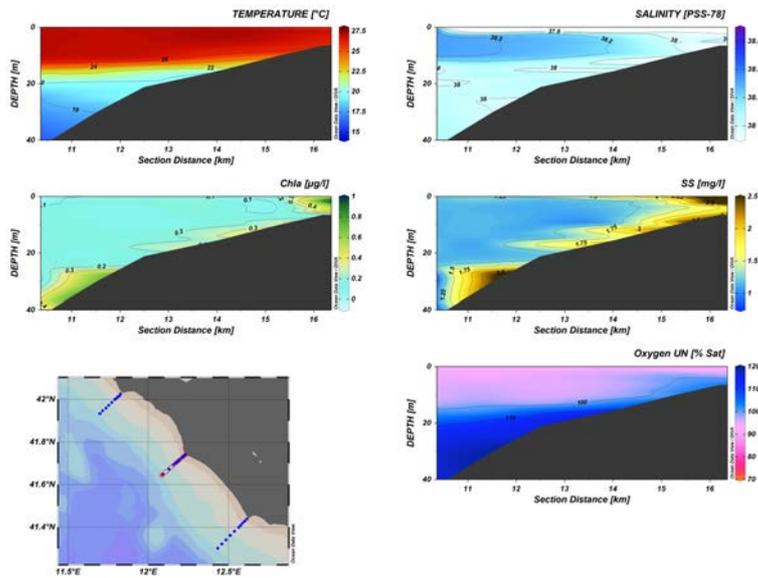


Figura 7 Transetto 1 Capo Linaro periodo estivo



a)



b)

Figura 7a in alto e 7b in basso. Transetto 2 Fiumara Grande periodo estivo. In alto il transetto completo, in basso uno zoom dei primi 6 km costa largo.

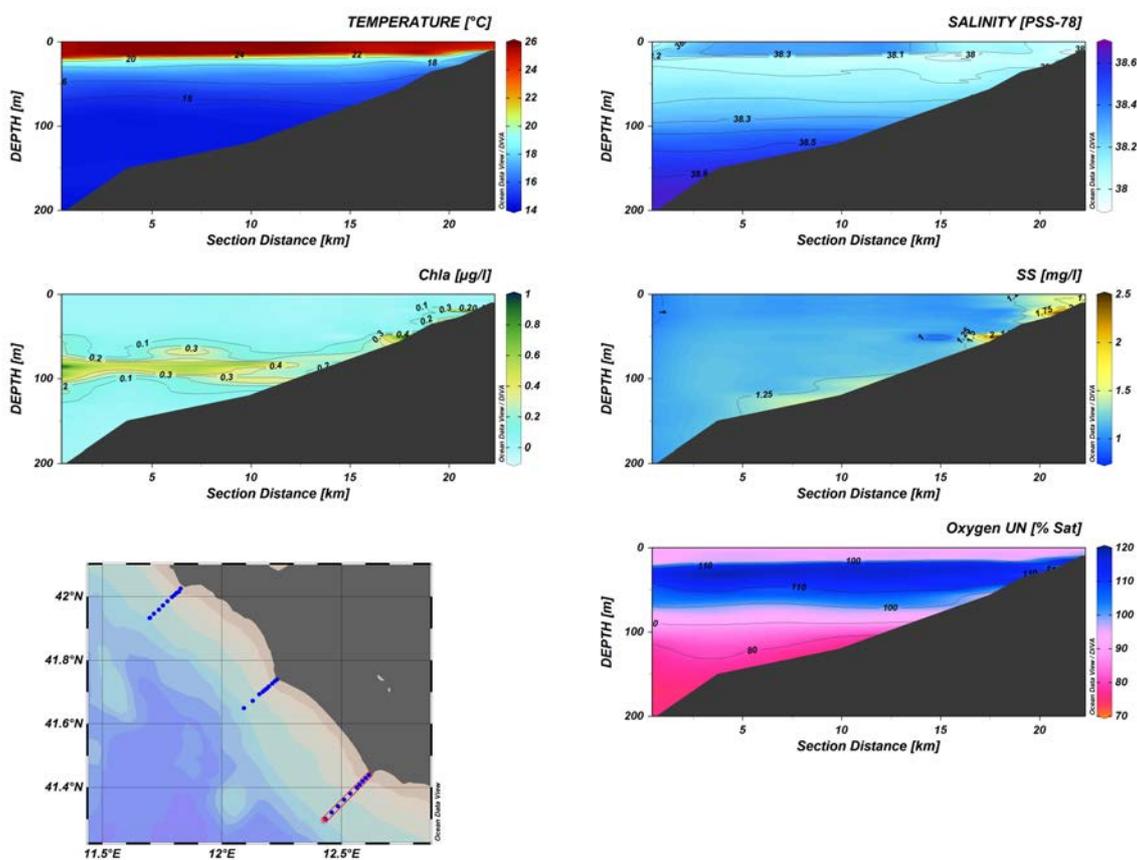


Figura 8 Transetto 3 Anzio periodo estivo

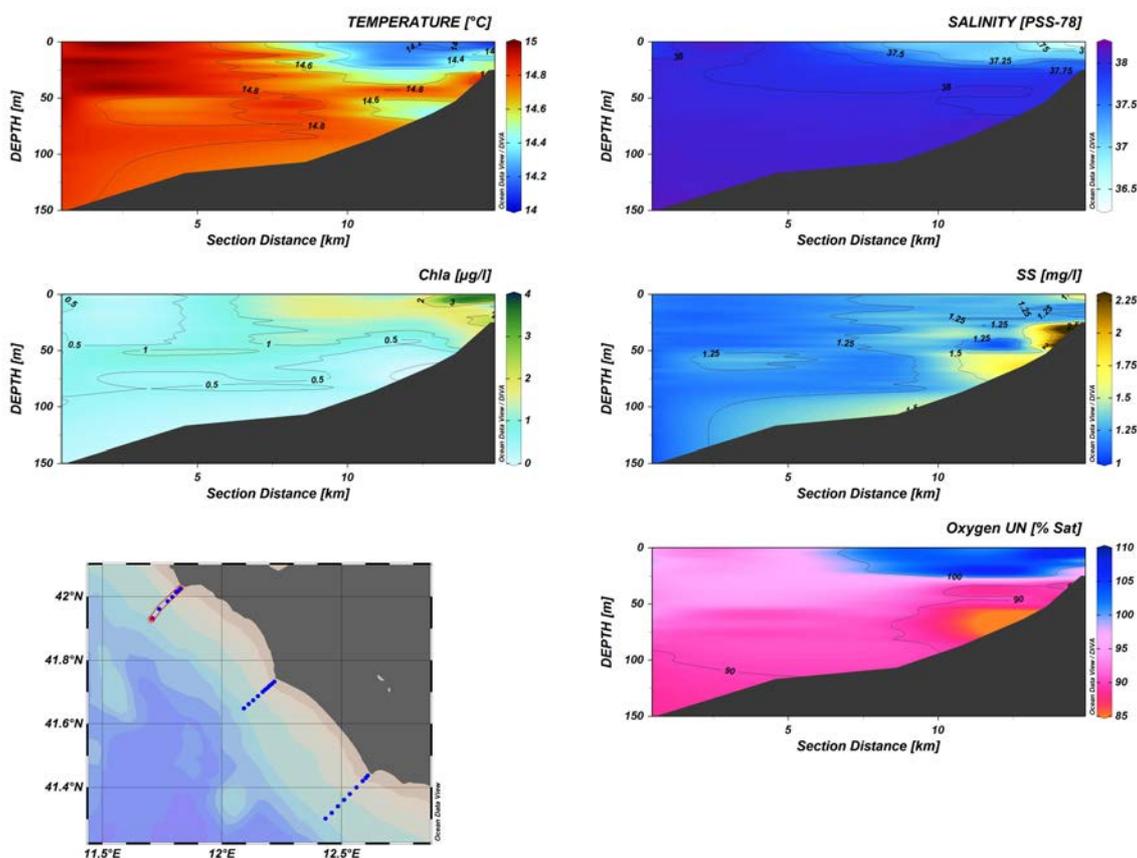


Figura 9 Transetto 1 Capo Linaro periodo invernale

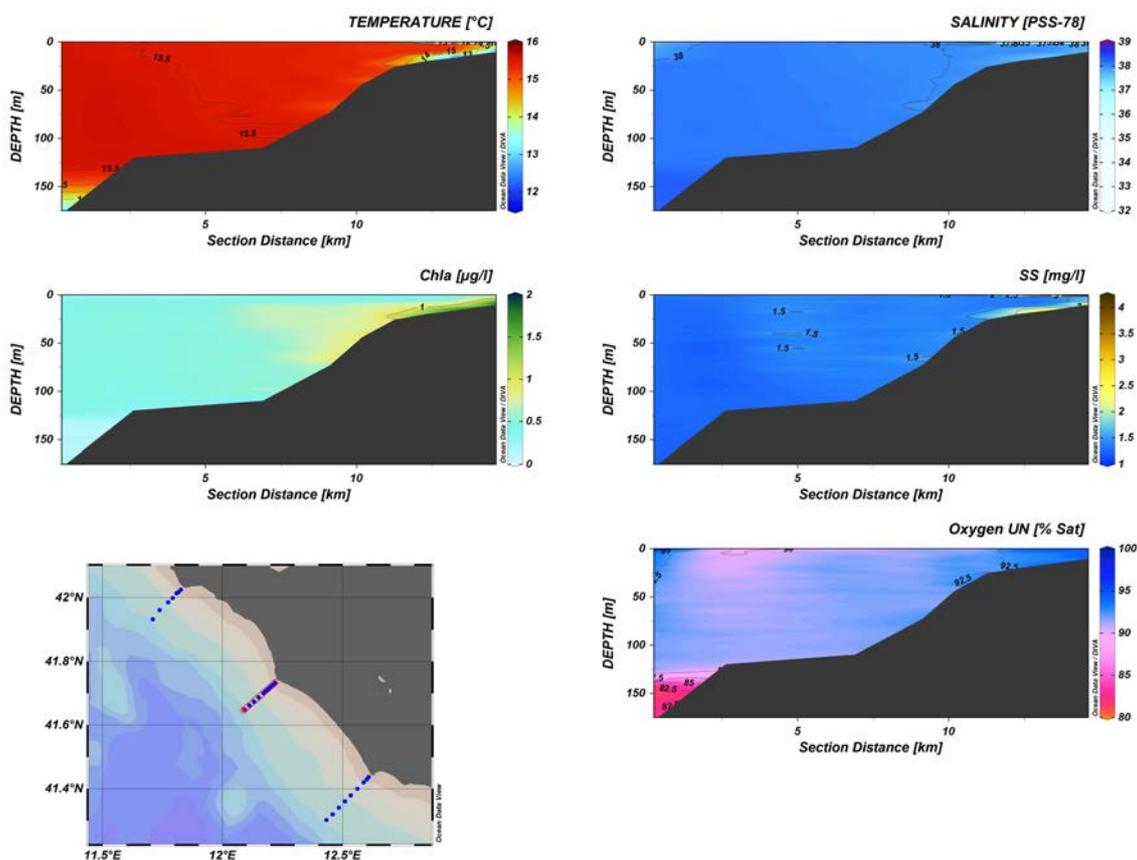


Figura 10 Transetto 2 Fiumara Grande periodo invernale

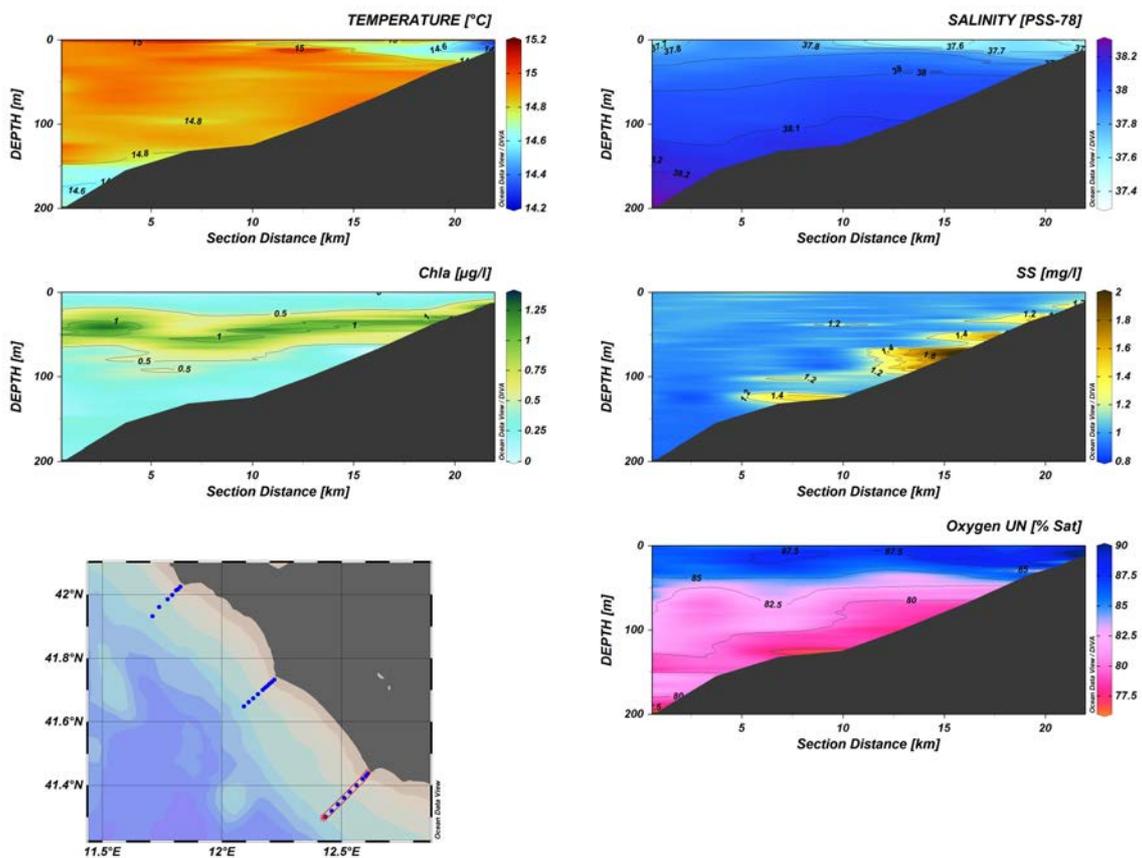


Figura 11 Transetto 3 Anzio periodo invernale

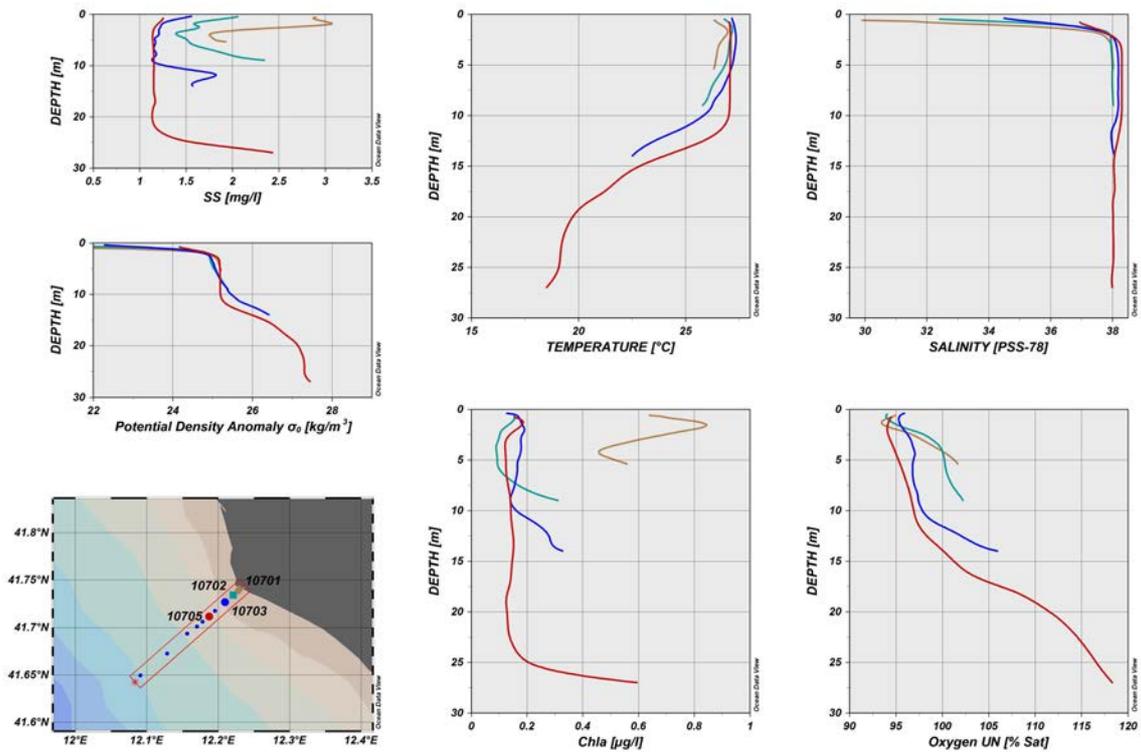
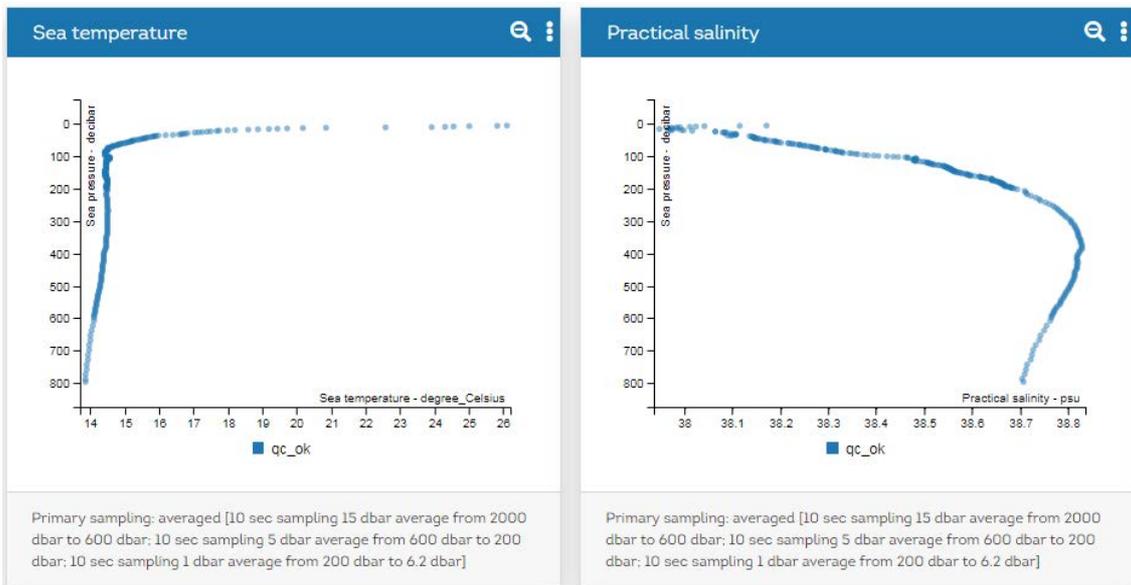


Figura 12 Profili CTD di 4 stazioni costa largo del transetto 7 estivo



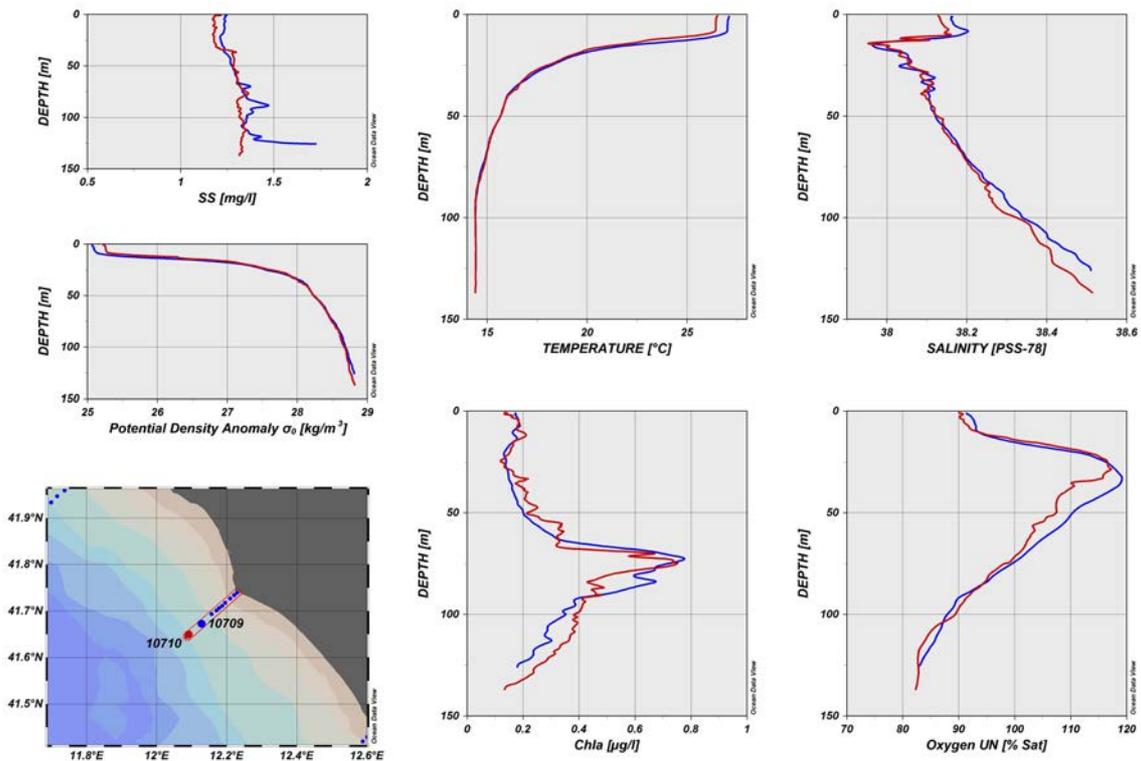


Figura 13 Profili CTD di 4 stazioni costa largo del transetto 2 estivo

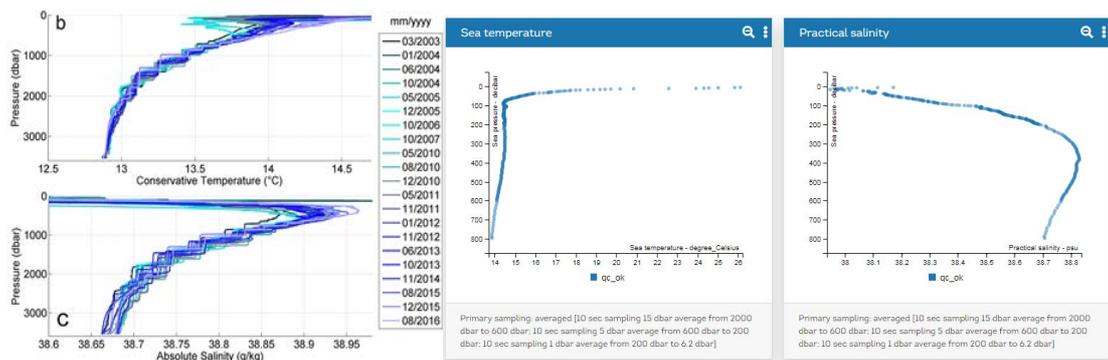


Figura 14 A sinistra profili T e Sal assoluta nelle stazioni prese in considerazione nel lavoro “Durante, S., Schroeder, K., Mazzei, L., Pierini, S., Borghini, M., & Sparnocchia, S. (2019). Permanent thermohaline staircases; a destra Profili CTD di ARGO Float 6902767 41.70744N 11.46386E 22.08.2020 04:58:20 2 estivo

4.3.4 Risultati dell'analisi della concentrazione di clorofilla *a* e dei solidi sospesi

Durante le campagne di misura sono stati raccolti n.121 campioni di acqua di mare, n. 61 di clorofilla *a* e n. 60 di solido sospeso, distribuiti in due stagioni significative. Di seguito si riportano i risultati delle analisi effettuate sui campioni di acqua di mare raccolti nel corso delle campagne di misura in corrispondenza delle stazioni riportate di seguito nelle tabelle:

Tab.1 Concentrazione della clorofilla *a* di n. 31 campioni di acqua di mare prelevati durante le campagne di misura effettuate nel periodo estivo-autunnale

Stazione	Data	Profondità (m)	Clorofilla <i>a</i> (µg/l)
TR01 01	31/10/2020	5	0.4025
TR01 03	31/10/2020	10	0.2986
TR01 03	31/10/2020	20	0.2719
TR01 04	31/10/2020	10	0.2719
TR01 04	31/10/2020	20	0.2304
TR01 06	31/10/2020	10	0.4958
TR01 06	31/10/2020	20	0.1813
TR01 08	31/10/2020	10	0.3012
TR01 08	31/10/2020	20	0.3119
TR01 10	31/10/2020	10	0.4985
TR01 10	31/10/2020	20	0.5358
TR04 05	27/08/2020	3	0.1919
TR06 03	21/08/2020	2	0.8317
TR06 05	21/08/2020	2	1.1249
TR06 07	21/08/2020	2	0.2407
TR06 11	21/08/2020	10	0.072
TR07 02	18/08/2020	2	0.5118
TR07 04	18/08/2020	2	0.1546
TR07 05	18/08/2020	2	0.1919
TR07 06	18/08/2020	2	0.08
TR07 10	18/08/2020	2	0.0267
TR09 05	09/09/2020	6	0.2293
TR09 08	09/09/2020	12	0.1173
TR10 01	09/09/2020	3	0.4425
TR10 03	09/09/2020	5	0.3359

TR10_05	09/09/2020	8	0.1919
TR10_09	09/09/2020	30	0.2026
TR11_05	03/09/2020	8	0.1146
TR11_10	03/09/2020	50	0.1386
TR12_05	03/09/2020	8	0.0906
TR12_07	03/09/2020	10	0.0826

Tab.2 Concentrazione dei solidi sospesi di n. 30 campioni di acqua di mare prelevati in durante le campagne di misura effettuate nel periodo estivo-autunnale

Stazione	Data	Profondità (m)	Solidi sospesi (mg/l)
TR01_03	31/10/2020	10	0.95
TR01_03	31/10/2020	20	0.65
TR01_04	31/10/2020	10	1.12
TR01_04	31/10/2020	20	0.8
TR01_06	31/10/2020	10	0.82
TR01_06	31/10/2020	20	0.65
TR01_08	31/10/2020	10	1.4
TR01_08	31/10/2020	20	0.7
TR01_10	31/10/2020	10	1.4
TR01_10	31/10/2020	20	0.6
TR04_05	27/08/2020	3	2.86
TR06_02	21/08/2020	2	4.24
TR06_03	21/08/2020	2	2.86
TR06_04	21/08/2020	2	3.95
TR06_05	21/08/2020	2	3.6
TR06_07	21/08/2020	2	2.35
TR06_11	21/08/2020	10	4.4
TR07_02	18/08/2020	2	4.05
TR07_04	18/08/2020	2	2.63
TR07_05	18/08/2020	2	2.5
TR07_06	18/08/2020	2	2.5
TR07_10	18/08/2020	2	2.9
TR08_05	21/08/2020	2	9.2
TR08_09	21/08/2020	5	10.3
TR09_05	09/09/2020	6	7
TR09_08	09/09/2020	12	7.6
TR10_01	09/09/2020	3	8.3
TR10_03	09/09/2020	5	7.1

TR10_05	09/09/2020	8	7.1
TR10_09	09/09/2020	30	8.1

Tab.3 Concentrazione della clorofilla a di n.30 campioni di acqua di mare prelevati durante le campagne di misura effettuate nel periodo invernale

Stazione	Data	Profondità (m)	Clorofilla a (µg/l)
TR06_1_204	18/02/2021	2	2.0313
TR06_1_204	18/02/2021	5	1.8873
TR06_1_204	18/02/2021	10	1.1889
TR06_1_205	18/02/2021	2	1.4821
TR06_1_205	18/02/2021	10	1.0236
TR06_1_205	18/02/2021	15	0.6398
TR06_1_206	18/02/2021	5	1.4395
TR06_1_206	18/02/2021	10	1.0343
TR06_1_206	18/02/2021	18	0.6264
TR06_1_207	18/02/2021	5	1.2529
TR06_1_207	18/02/2021	20	0.6318
TR06_1_207	18/02/2021	30	0.4811
TR06_1_208	18/02/2021	10	0.7784
TR06_1_208	18/02/2021	30	0.4265
TR06_1_208	18/02/2021	50	0.4798
TR07_1_203	19/01/2021	2	0.7411
TR07_1_204	19/01/2021	2	0.7731
TR07_1_205	19/01/2021	3	0.6504
TR07_1_206	19/01/2021	4	0.5971
TR07_2_204	17/02/2021	2	1.3169
TR07_2_204	17/02/2021	5	0.8477
TR07_2_204	17/02/2021	10	0.6878
TR07_2_205	17/02/2021	2	1.0716
TR07_2_205	17/02/2021	5	0.9437
TR07_2_205	17/02/2021	10	0.6611
TR07_2_206	17/02/2021	5	0.7944
TR07_2_206	17/02/2021	10	0.7144
TR07_2_206	17/02/2021	15	0.6451
TR07_2_207	17/02/2021	2	1.3115
TR07_2_207	17/02/2021	15	0.8104

Tab.4 Concentrazione dei solidi sospesi di n.30 campioni di acqua di mare prelevati durante le campagne di misura effettuate nel periodo invernale

Stazione	Data	Profondità (m)	Solidi sospesi (mg/l)
TR06_1_204	18/02/2021	2	2.96
TR06_1_204	18/02/2021	5	1.57
TR06_1_204	18/02/2021	10	2.82
TR06_1_205	18/02/2021	2	2.88
TR06_1_205	18/02/2021	10	1.2
TR06_1_205	18/02/2021	15	1.37
TR06_1_206	18/02/2021	5	1.32
TR06_1_206	18/02/2021	10	1.42
TR06_1_206	18/02/2021	18	1.09
TR06_1_207	18/02/2021	5	1.49
TR06_1_207	18/02/2021	20	1.32
TR06_1_207	18/02/2021	30	0.96
TR06_1_208	18/02/2021	10	1.21
TR06_1_208	18/02/2021	30	1.56
TR06_1_208	18/02/2021	50	1.04
TR07_1_203	19/01/2021	2	4.55
TR07_1_204	19/01/2021	2	4.2
TR07_1_205	19/01/2021	3	4.33
TR07_1_206	19/01/2021	4	4.12
TR07_2_204	17/02/2021	2	3.94
TR07_2_204	17/02/2021	5	1.62
TR07_2_204	17/02/2021	10	1.57
TR07_2_205	17/02/2021	2	2.99
TR07_2_205	17/02/2021	5	1.64
TR07_2_205	17/02/2021	10	1.74
TR07_2_206	17/02/2021	5	1.72
TR07_2_206	17/02/2021	10	1.51
TR07_2_206	17/02/2021	15	1.41
TR07_2_207	17/02/2021	2	2.19
TR07_2_207	17/02/2021	15	1.3

4.4 Remote Sensing

Durante le attività di progetto sono state acquisite le immagini satellitari per l'elaborazione delle mappe superficiali di clorofilla *a* e solido sospeso, quando disponibili in funzione dei passaggi dei satelliti e della copertura nuvolosa. Le mappe acquisite sono state confrontate con i risultati delle analisi dei campioni di acqua raccolti durante le campagne oceanografiche al fine di avere un confronto preliminare tra i prodotti ottenuti dal satellite e i dati *in situ*.

L'utilizzo dei satelliti come supporto negli studi oceanografici è consolidato ormai da anni, mediante l'impiego di sistemi remoti operativi a risoluzioni spaziali intermedie, incentrati principalmente sull'acquisizione di dati di Ocean Color, che permettono di ottenere come prodotto finale la distribuzione di clorofilla *a* e solido sospeso, sulla base di algoritmi già sviluppati. Da pochi anni sono stati messi a disposizione della comunità scientifica dati a risoluzione spaziale più elevata (Sentinel), consentendo l'acquisizione di dati dettagliati anche nelle aree costiere. Le informazioni da remoto il più possibile coerenti in termini di risoluzione spaziale, come quelle al momento disponibili, prevedono l'impiego delle piattaforme satellitari Landsat 8-OLI (Operational Land Imager), ultima della famiglia Landsat, appartenente alla costellazione NASA e Sentinel (in particolare 2A e 2B) lanciate dall'ESA nell'ambito del programma Copernicus.

L'utilizzo dei dati di remote sensing consente di ottenere mappe sinottiche di distribuzione superficiale delle variabili geofisiche di interesse per la valutazione della qualità dell'area marina oggetto di studio, quali la concentrazione di solido sospeso e di clorofilla *a*.

Questi satelliti nascono con strumentazione idonea per lo studio dell'Ocean Color e quindi per l'osservazione delle variabili descrittive dell'ambiente marino, ma con diverse caratteristiche per quanto attiene la risoluzione e i tempi di rivisitazione della stessa area.

Per quanto i dati remoti rimangono uno strumento fondamentale per l'analisi e la descrizione dei processi marini, permane un grande limite rappresentato dalla

disponibilità delle immagini, fortemente legata alla sensoristica (nel caso di eventuale copertura nuvolosa che impedisce di avere dati nelle bande del visibile), e dai tempi di rivisitazione.

La famiglia dei satelliti Landsat opera con sensori ad alta risoluzione per acquisire sistematicamente dati di riflettanza in un'area 180x180 Km della superficie terrestre con una risoluzione spaziale di 30 m; grazie a queste caratteristiche il loro impiego fornisce un contributo significativo al monitoraggio delle aree marino costiere, dove le peculiari caratteristiche delle shallow water richiedono una maggiore risoluzione sia radiometrica che spaziale (acque di Caso 2). Inoltre, il nuovo sensore OLI presenta caratteristiche potenziate in termini di numero di bande di acquisizione, come la banda blu Coastal, e di radiometria, mantenendo allo stesso tempo le stesse funzionalità di base per quanto concerne risoluzione e intervalli di rivisitazione rispetto ai precedenti sensori. Quest'ultimo fattore può però rappresentare un limite nelle applicazioni, in quanto un intervallo di acquisizione dati di 16 giorni risulta, talvolta, insufficiente per lo studio dei fenomeni marino costieri, caratterizzati per loro natura da rapidi mutamenti e intervalli temporali ristretti spesso a pochi giorni, come ad esempio un dragaggio.

I Sentinel sono una famiglia di missioni sviluppate dall'ESA per far fronte alle esigenze operative del programma Copernicus. Ogni missione è dotata di una diversa gamma di tecnologie e si concentra su aspetti diversi dell'Osservazione della Terra: il monitoraggio atmosferico, quello oceanico e quello terrestre; i dati raccolti vengono utilizzati per un'ampia gamma di applicazioni. La missione Sentinel-2 si basa su una costellazione di due satelliti identici (2A e 2B) posizionati sulla stessa orbita al fine di ottenere copertura e trasmissione dei dati ottimali. I due satelliti viaggiano in orbita a una distanza di 180° l'uno dall'altro, in modo tale che lo stesso punto al di sopra dell'equatore venga coperto ogni cinque giorni (o anche a intervalli più brevi, a latitudini maggiori). Entrambi possiedono una strumentazione ottica, Sistema imaging Multispettrale (MSI, Multispectral imager), che misura la riflettanza in 13 bande spettrali da VNIR a SWIR, fornendo così informazioni destinate a molte applicazioni

quali la mappatura delle variabili biofisiche e il monitoraggio costiero e delle acque interne e costiere.

I dati satellitari sono liberamente accessibili dal sito USGS EarthExplorer <http://glovis.usgs.gov> e Copernicus Science Hub; qui è possibile selezionare l'area di interesse e visionare ogni giornata al fine di valutare la qualità del dato satellitare. Si deve infatti considerare che il segnale luminoso della superficie del mare (ma anche della terra) ricevuto dal satellite è fortemente influenzato dagli strati di atmosfera attraversati durante il cammino ottico della radiazione elettromagnetica e in particolare, in presenza di copertura nuvolosa, non è possibile ottenere un dato qualitativamente valido.

A tal riguardo, il processamento dei dati satellitari ha previsto l'utilizzo di software specifici per la correzione atmosferica, quale ACOLITE.

Il software Acolite è stato sviluppato specificatamente per il Landsat8-OLI, poiché l'osservazione da remote sensing delle aree costiere tramite la banda coastal necessita di una più accurata procedura di correzione atmosferica, in particolare per quanto riguarda il contributo dell'aerosol per la radiazione al top dell'atmosfera (TOA); a tale scopo è stato sviluppato uno specifico algoritmo correttivo basato sulla radiazione SWIR (Short Wave InfraRed), il quale permette una migliore restituzione del dato (ad esempio per il solido sospeso) per acque molto torbide, come appunto sono da considerare quelle costiere (Vanhellemont Q. & Ruddick K.,2015).

4.4.1 Risultati

I dati acquisiti sono stati elaborati utilizzando differenti algoritmi sviluppati per il calcolo del solido sospeso e della clorofilla *a*. In particolare, oltre all'elaborazione delle riflettanze (R_{rs_* : the remote sensing reflectance (sr^{-1}) for water pixels, $R_{rs} = \rho_w / \pi$), per il solido sospeso sono stati utilizzati i seguenti algoritmi:

- spm_nechad2016: Suspended Matter Concentration (gm^{-3}) utilizzando l'algoritmo di Nechad et al. (2010) ricalibrato da Bouchra Nechad a Settembre 2016;
- t_nechad2016: Turbidity (FNU) utilizzando l'algoritmo di Nechad et al. (2009) recalibrated by Bouchra Nechad a Settembre 2016;
- t_dogliotti: Turbidity (FNU) utilizzando l'algoritmo di Dogliotti et al. (2015);

Per la clorofilla *a* sono stati elaborati i seguenti algoritmi:

- chl_oc2, chl_oc3: Chlorophyll *a* concentration ($\mu\text{g/l}$) utilizzando il rapporto tra le bande blu/verde. La differenza tra oc2 e oc3 è che usano rispettivamente due e tre bande;
- chl_re_gons: Chlorophyll *a* concentration ($\mu\text{g/l}$) utilizzando l'algoritmo di Gons et al. (2002);
- chl_re_gons740: Chlorophyll *a* concentration ($\mu\text{g/l}$) utilizzando l'algoritmo di Gons et al. (2002), questo prodotto usa la banda 5 a 740 nm dell'MSI;
- chl_re_mishra: Chlorophyll *a* concentration ($\mu\text{g/l}$) utilizza l'algoritmo Normalised Difference Chlorophyll Index di Mishra and Mishra (2012);
- chl_re_moses3b, chl_re_moses3b740: Chlorophyll *a* concentration ($\mu\text{g/l}$) utilizzando l'algoritmo di Moses et al. (2012).

Di seguito viene riportata la tabella delle immagini disponibili nel periodo compreso tra Gennaio 2019 e Dicembre 2020 e che sono state elaborate e riportate in Allegato al documento.

Tabella 5 delle immagini Sentinel e Landsat disponibili nel periodo compreso tra Gennaio 2019 e Dicembre 2020

Periodo Gennaio 2019 - Dicembre 2020		
SENTINEL	SENTINEL	LANDSAT
01/01/19	07/11/19	data
06/01/19	20/11/19	01/01/19
11/01/19	22/11/19	06/03/19
14/01/19	07/12/19	22/03/19
26/01/19	12/12/19	07/04/19
05/02/19	17/12/19	26/06/19
15/02/19	22/12/19	28/07/19
20/02/19	27/12/19	13/08/19
02/03/19	15/02/20	14/09/19
12/03/19	06/03/20	16/10/19
22/03/19	21/03/20	01/11/19
09/04/19	05/04/20	05/02/20
11/04/19	10/04/20	21/02/20
25/06/19	15/04/20	08/03/20
30/06/19	25/04/20	24/03/20
05/07/19	10/05/20	09/04/20
20/07/19	20/05/20	25/04/20
25/07/19	25/05/20	11/05/20
30/07/19	24/06/20	27/05/20
04/08/19	29/06/20	12/06/20
09/08/19	14/07/20	28/06/20
14/08/19	08/08/20	14/07/20
19/08/19	07/09/20	30/07/20
29/08/19	17/09/20	15/08/20
03/09/19	17/10/20	16/09/20
08/09/19	22/10/20	18/10/20
13/09/19	01/11/20	19/11/20
18/09/19	06/11/20	21/12/20
23/09/19	11/11/20	
28/09/19	21/11/20	
08/10/19	26/11/20	

13/10/19	11/12/20	
18/10/19	16/12/20	
23/10/19	21/12/20	
28/10/19	31/12/20	

Vengono riportati alcuni esempi di immagini elaborate con i diversi algoritmi.

30.07.2019

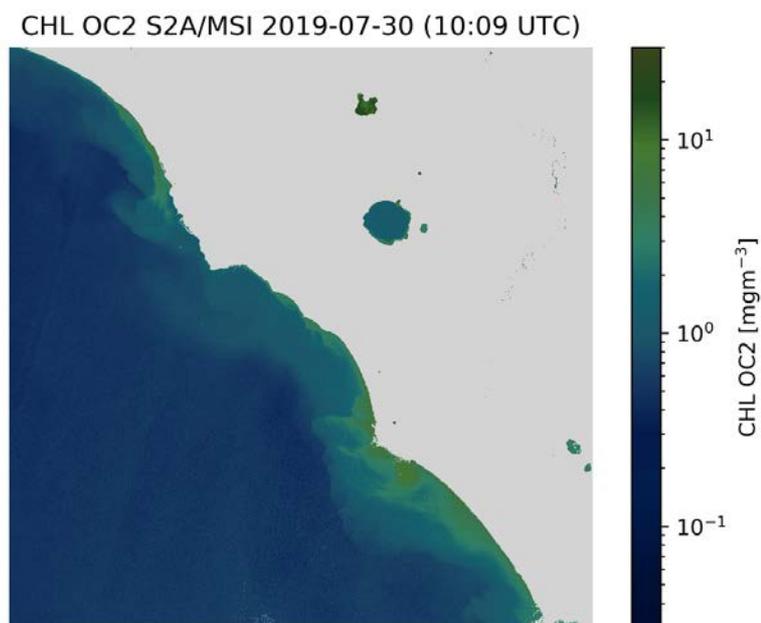


Figura 15 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algoritmo OC2

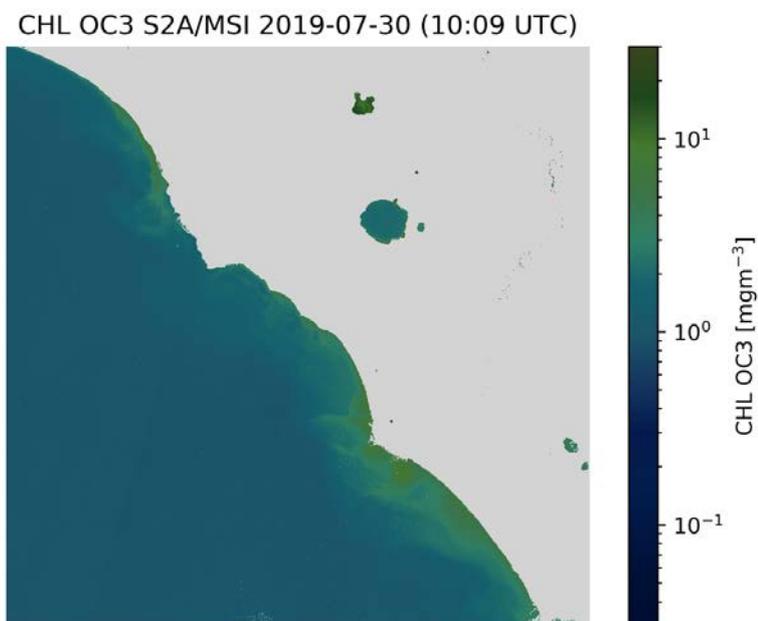


Figura 16 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algoritmo OC3

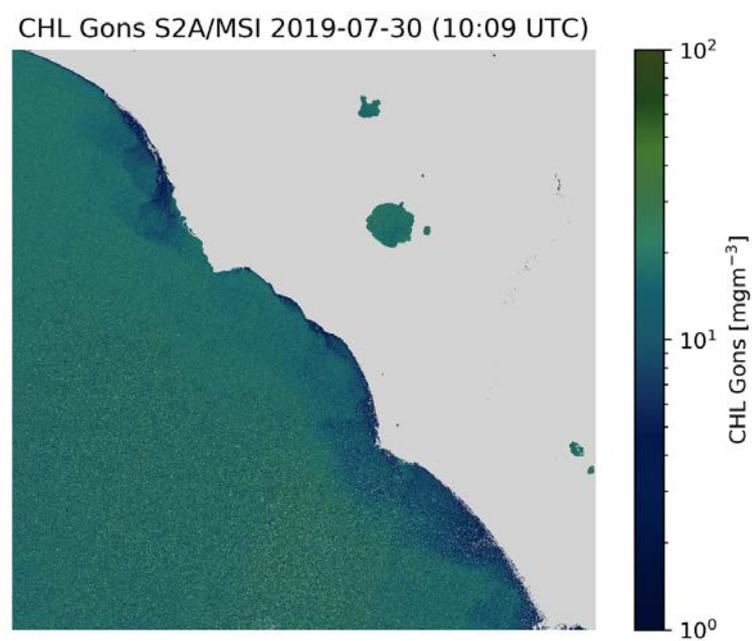


Figura 17 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algoritmo Gons 2002

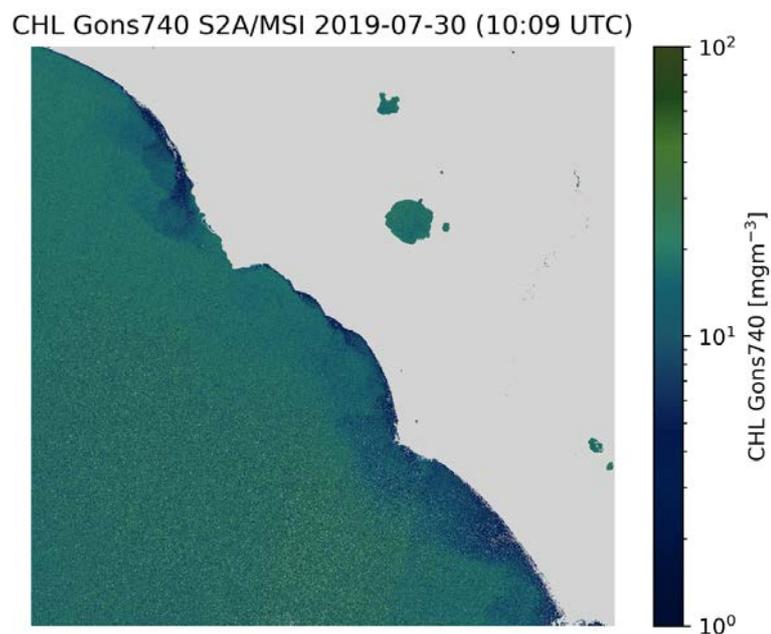


Figura 18 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algoritmo Gons 740

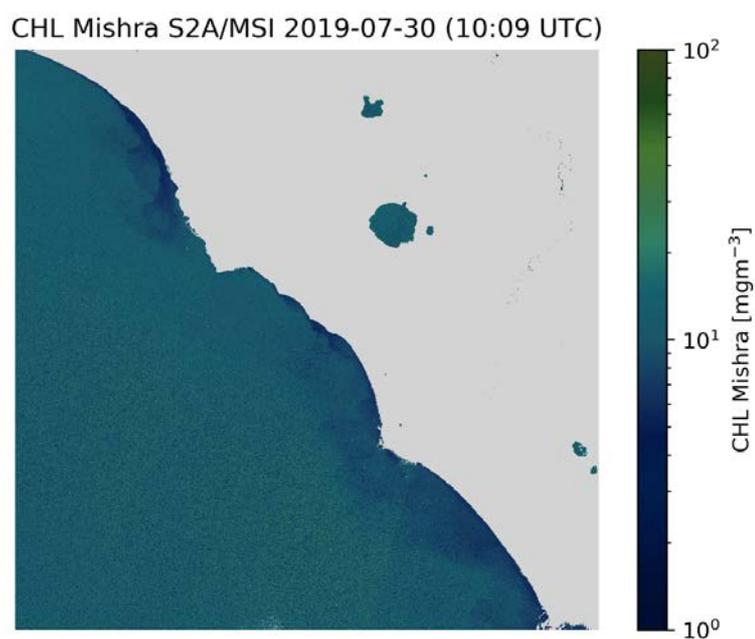


Figura 19 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algoritmo Mishra 2012

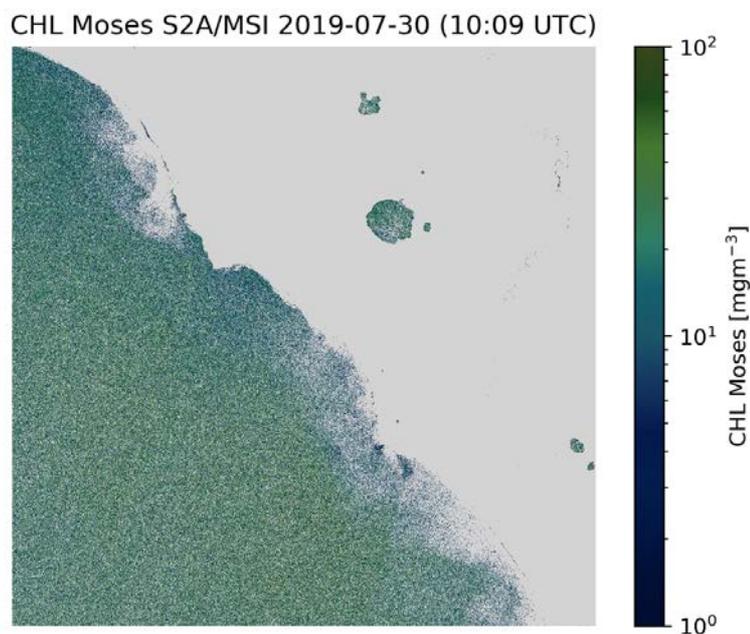


Figura 20 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algorithmo Moses 2012

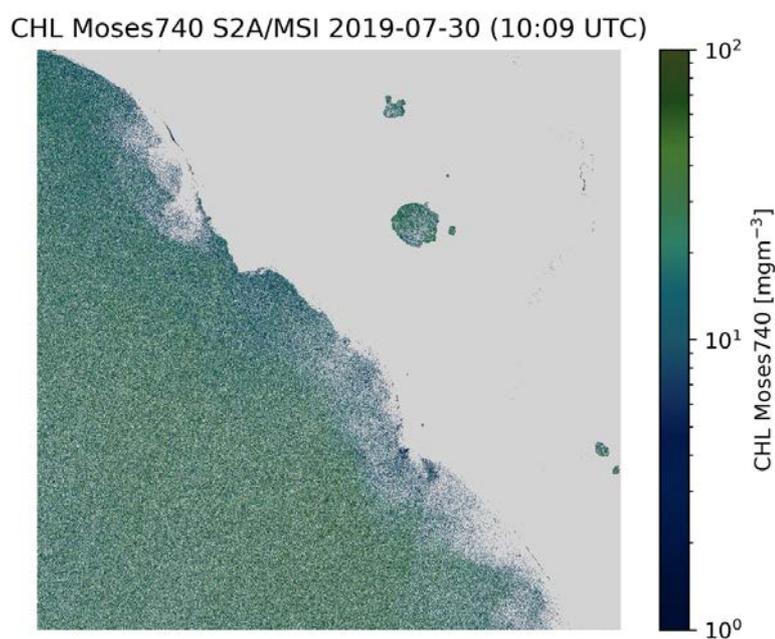


Figura 21 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algorithmo Moses740

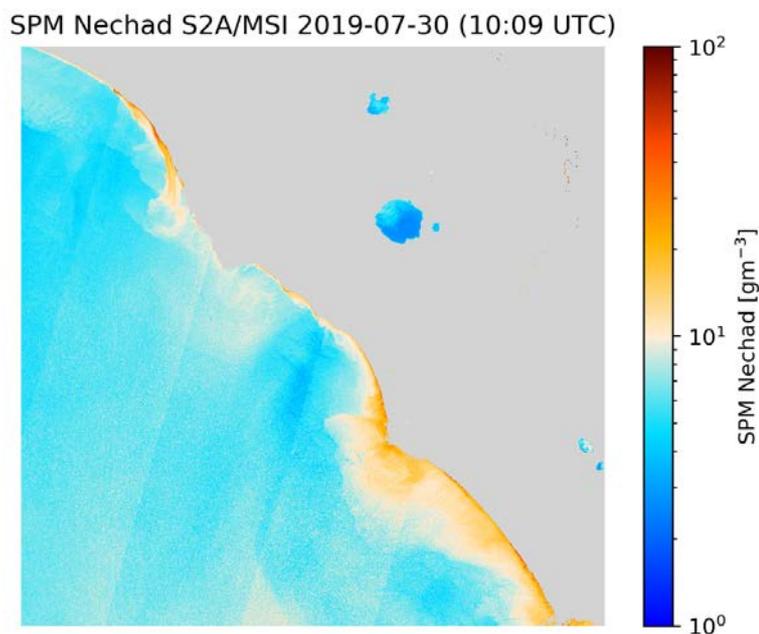


Figura 22 Mappa Sentinel 2A della distribuzione del solido sospeso con l'algoritmo Nechad FNU

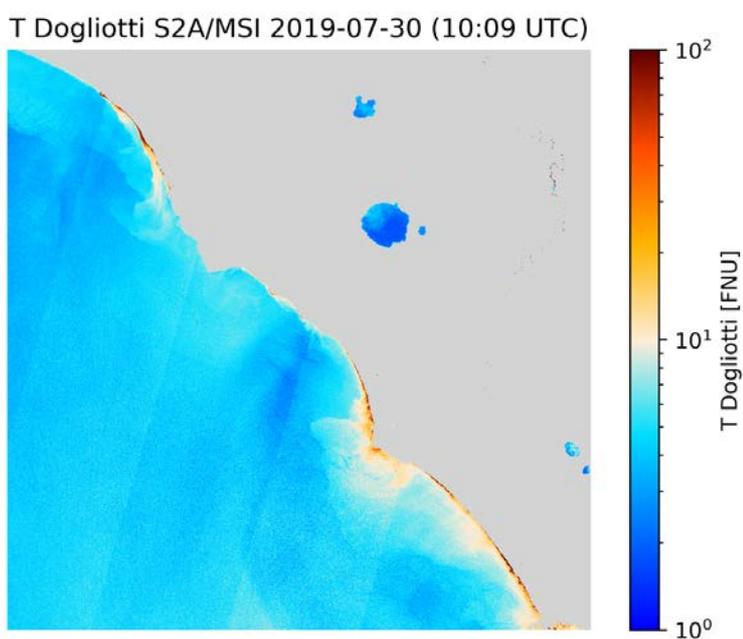


Figura 23 Mappa Sentinel 2A della distribuzione del solido sospeso con l'algoritmo Dogliotti 2015

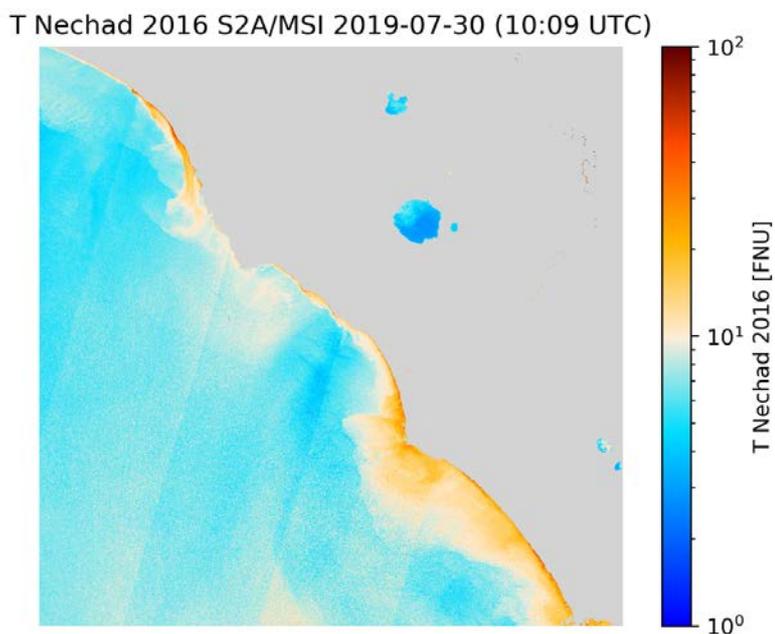


Figura 24 Mappa Sentinel 2A della distribuzione del solido sospeso con l’algoritmo Nechad 2016

11.12.2020

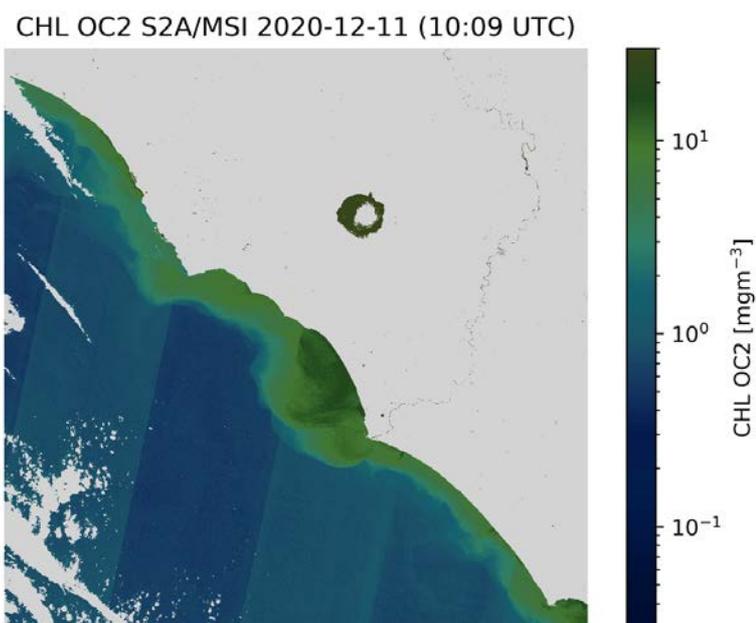


Figura 25 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l’algoritmo OC2

CHL OC3 S2A/MSI 2020-12-11 (10:09 UTC)

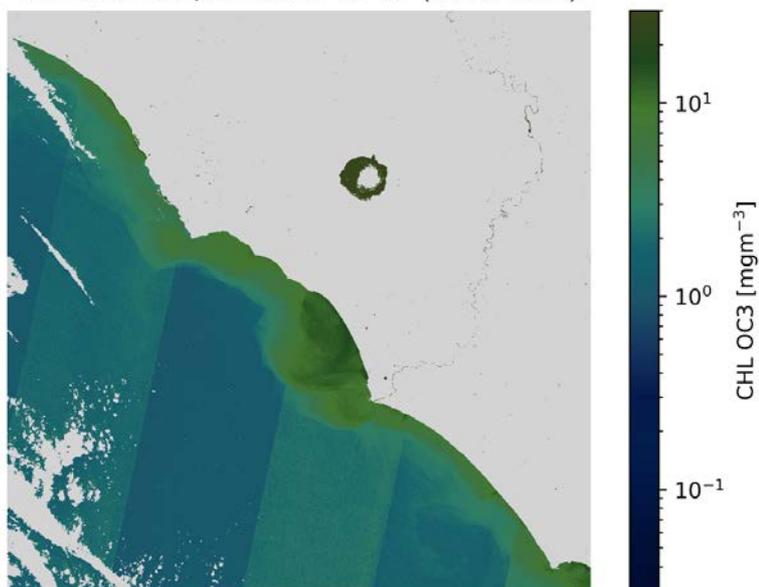


Figura 26 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l' algoritmo OC3

CHL Gons S2A/MSI 2020-12-11 (10:09 UTC)

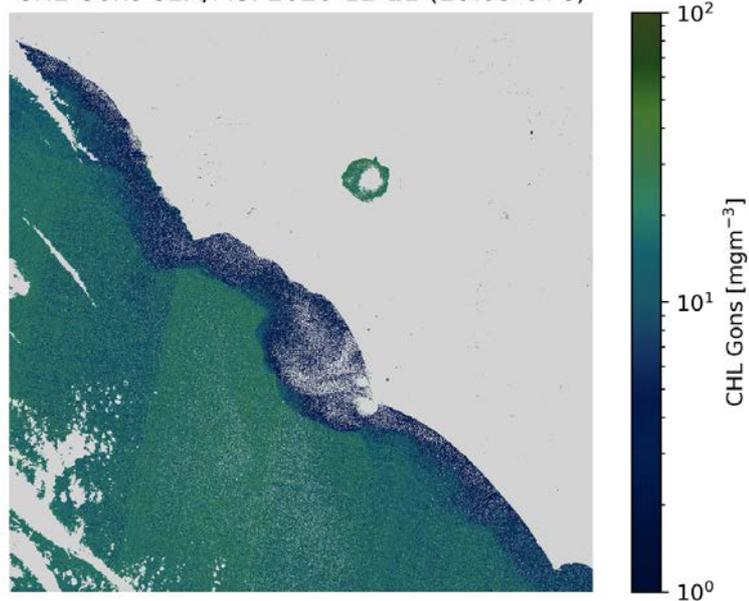


Figura 27 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l' algoritmo Gons 2002

CHL Gons740 S2A/MSI 2020-12-11 (10:09 UTC)

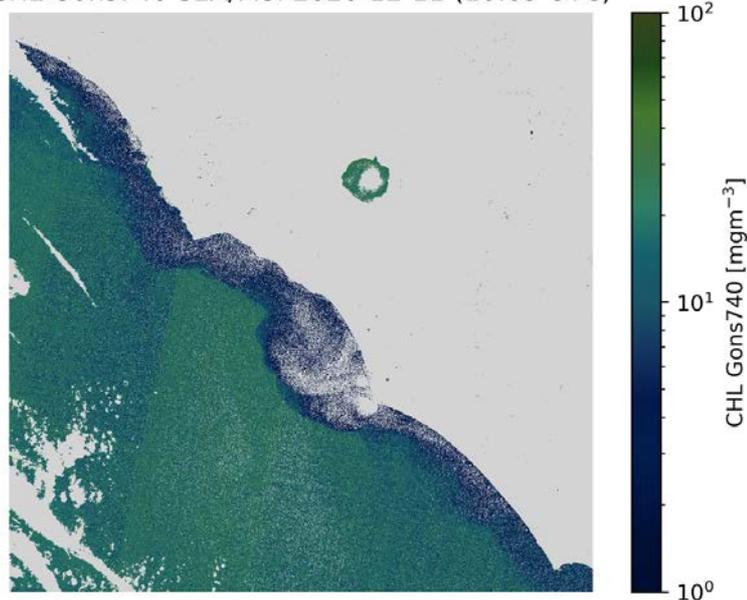


Figura 28 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algoritmo Gons740

CHL Mishra S2A/MSI 2020-12-11 (10:09 UTC)

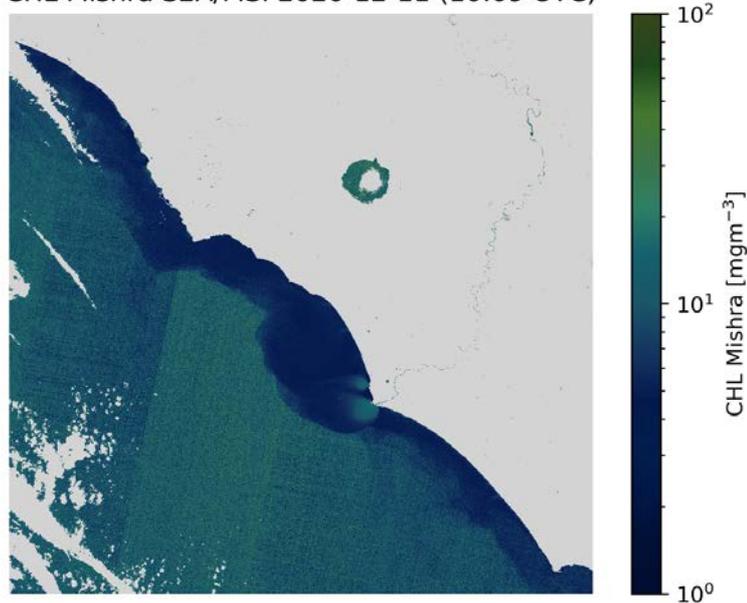


Figura 29 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algoritmo Mishra 2012

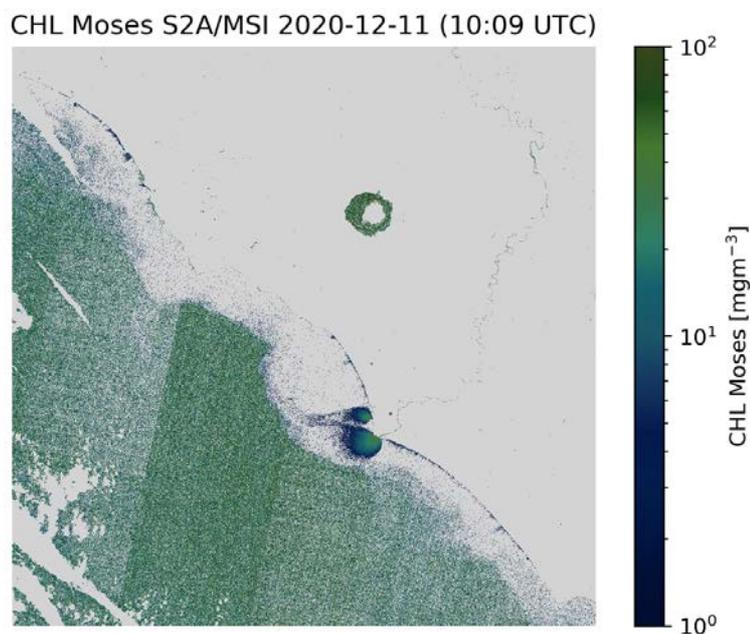


Figura 30 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algorithmo Moses 2012

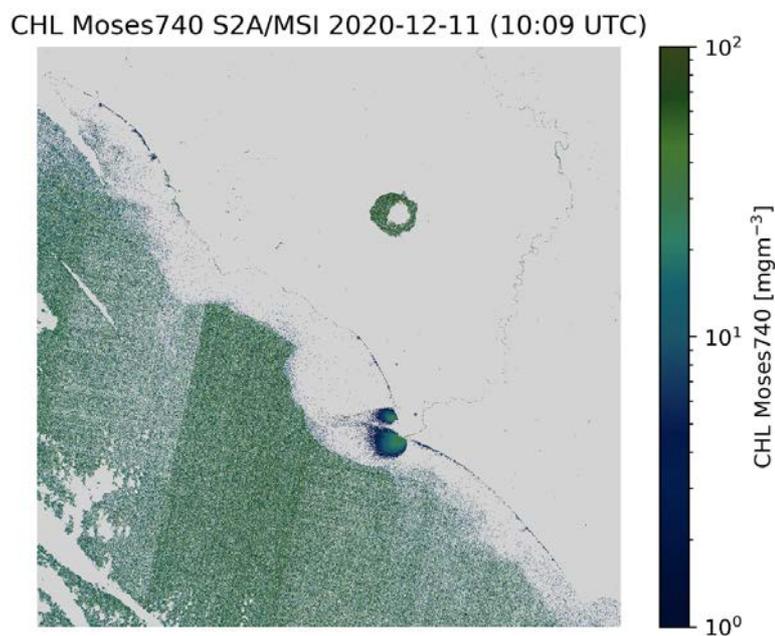


Figura 31 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algorithmo Moses740

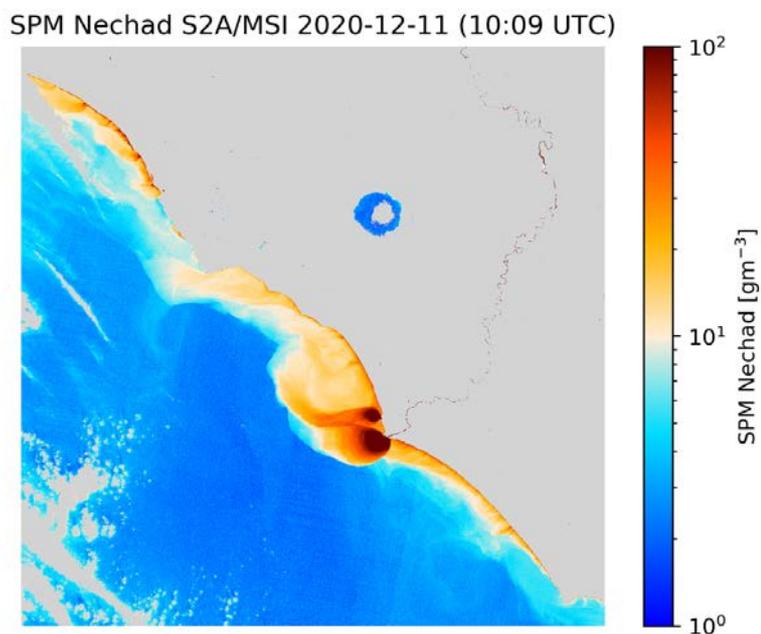


Figura 32 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algoritmo Nechad FNU

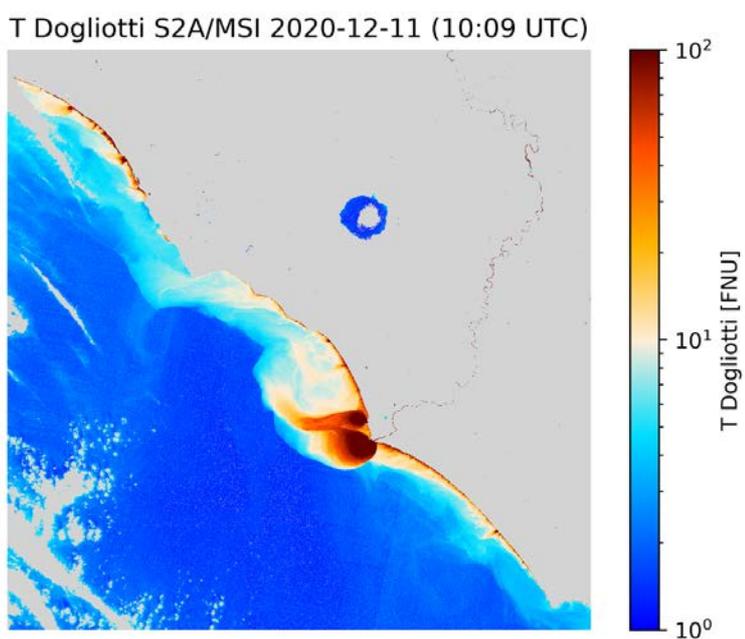


Figura 33 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algoritmo Dogliotti 2015

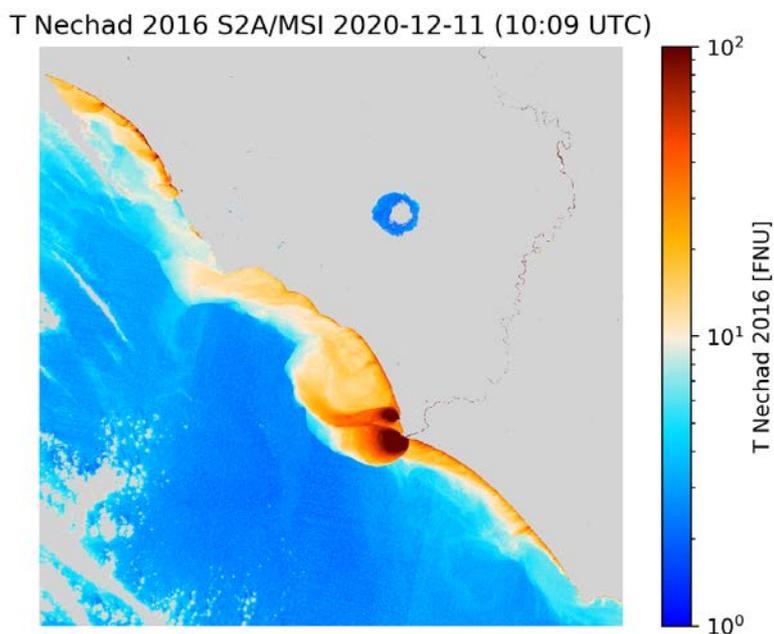


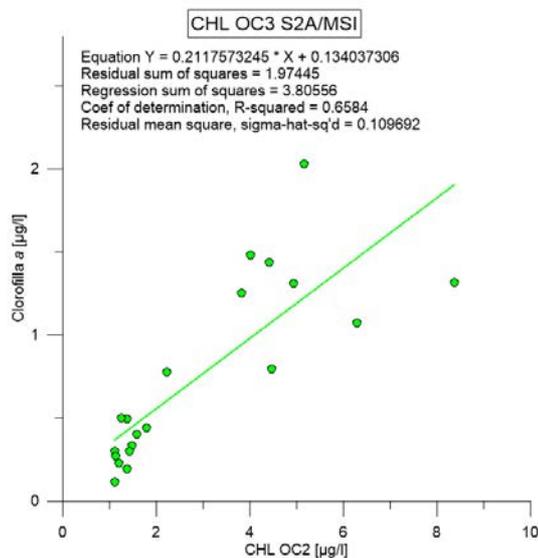
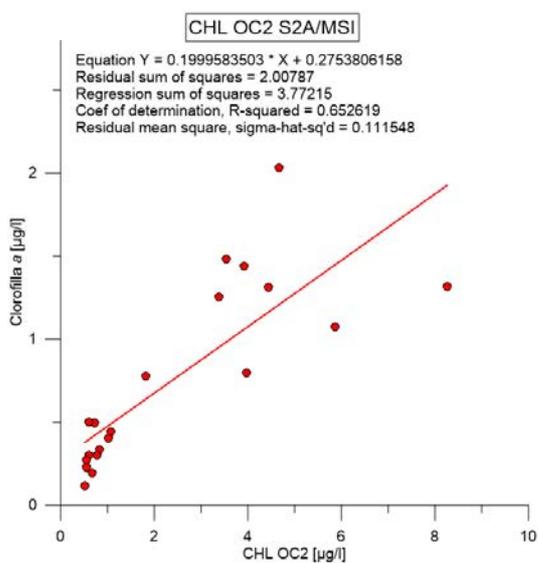
Figura 34 Mappa Sentinel 2A della distribuzione della clorofilla calcolata con l'algoritmo Nechad 2016

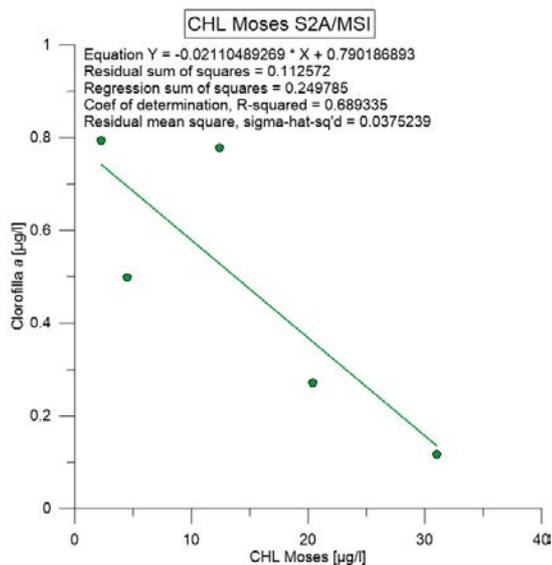
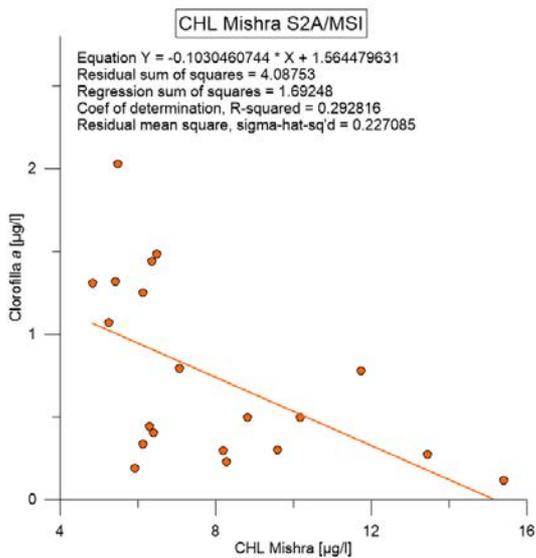
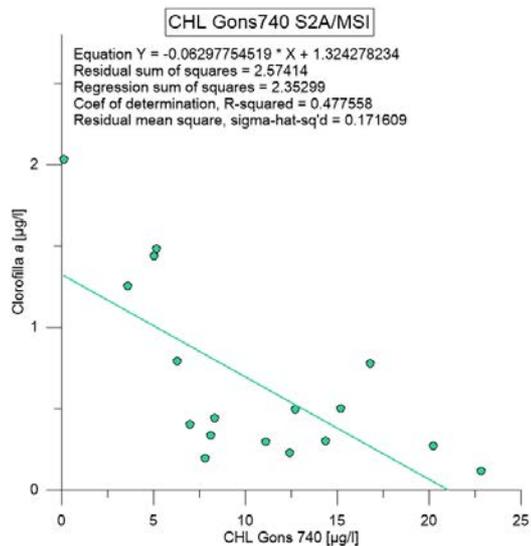
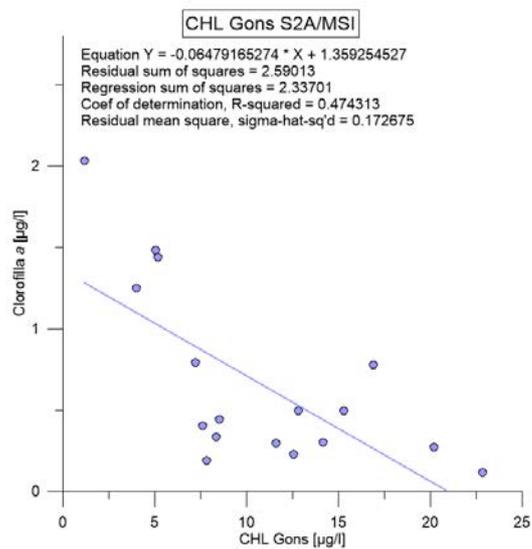
E' stato effettuato un primo confronto con i dati acquisiti in campo, sono stati quindi estratti dalle immagini satellitari i punti corrispondenti alle coordinate dei punti di campionamento dell'acqua e in cui sono stati analizzati clorofilla *a* e solido sospeso, al fine di costruire le rette di correlazione in funzione dei differenti algoritmi elaborati.

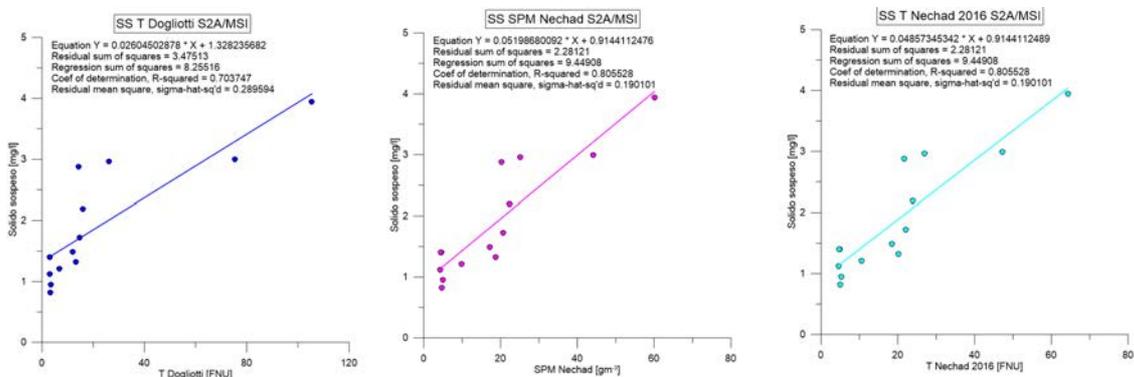
Di seguito vengono riportati i grafici e le rette di correlazione per Sentinel e Landsat, sia per la variabile clorofilla *a* che per il solido sospeso.

Sentinel

Di seguito vengono riportate le correlazioni tra i dati acquisiti in campo e i dati ottenuti dagli algoritmi applicati alle immagini satellitari Sentinel, con le relative rette di regressione.

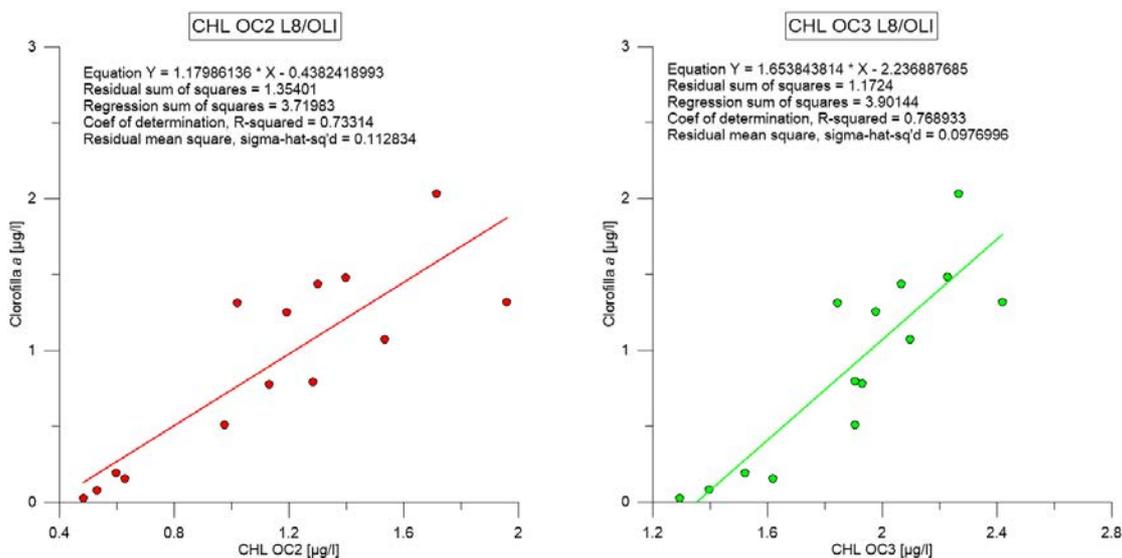


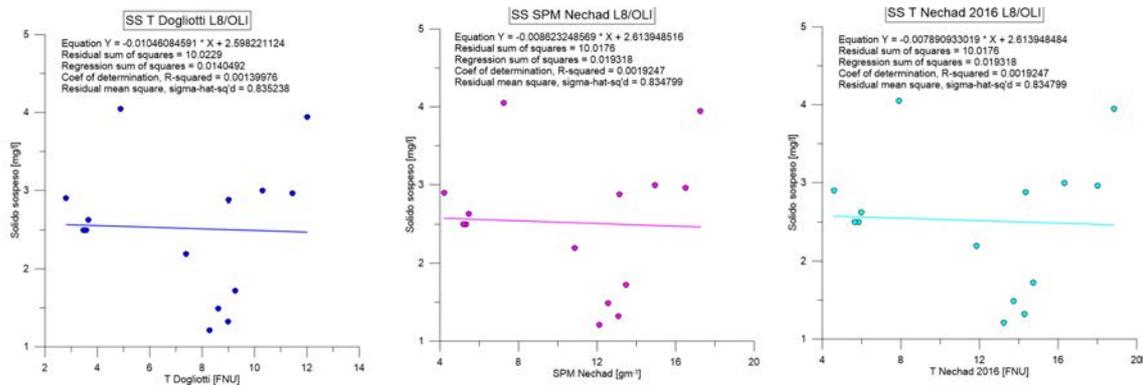




Landsat

Di seguito vengono riportate le correlazioni tra i dati acquisiti in campo e i dati ottenuti dagli algoritmi applicati alle immagini satellitari Landsat, con le relative rette di regressione.





I risultati ottenuti danno informazioni preliminari per la selezione dei migliori algoritmi da utilizzare nell'area oggetto di studio su entrambe le piattaforme satellitari. Da una prima analisi si vede che per quanto attiene la clorofilla *a*, sia per Sentinel che per Landsat, gli algoritmi che fittano meglio con i dati in situ sono OC2 e OC3, con una maggiore corrispondenza anche sull'ordine di grandezza delle concentrazioni nei dati di Landsat. Per quanto attiene invece il solido sospeso, i risultati migliori si ottengono dal confronto tra il Sentinel e i dati in situ, ma con ordini di grandezza molto più elevate rispetto alle concentrazioni ottenute dai campioni raccolti.

L'aumento dei dati a disposizione con cui confrontare gli algoritmi disponibili consentirà di migliorare e aumentare la correlazione.

4.5. Analisi della dinamica

L'acquisizione di dati relativa alla dinamica attraverso sistemi fissi e lagrangiani è di fondamentale importanza per poter valutare la circolazione costiera e monitorare le condizioni di corrente e moto ondoso nell'area oggetto di studio, nonché per acquisire dati fondamentali alla validazione dei modelli numerici. A tal fine sono stati acquisiti in diversi periodi dati di correnti e di onde attraverso sistemi di misura fissi, puntuali e



lagrangiani. Di seguito vengono riportati i principali risultati ottenuti attraverso le diverse piattaforme di misura.

4.5.1 Radar X-Band

Grazie alla collaborazione con il Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina (LOSEM-DEB) dell'Università degli Studi della Tuscia, a Dicembre 2020 è stato installato un sistema radar in banda X su una torre faro posta alle coordinate Lat. 41.232612 Long. 13.573088 (Figura 35), ad un'altezza di circa 15 slm.

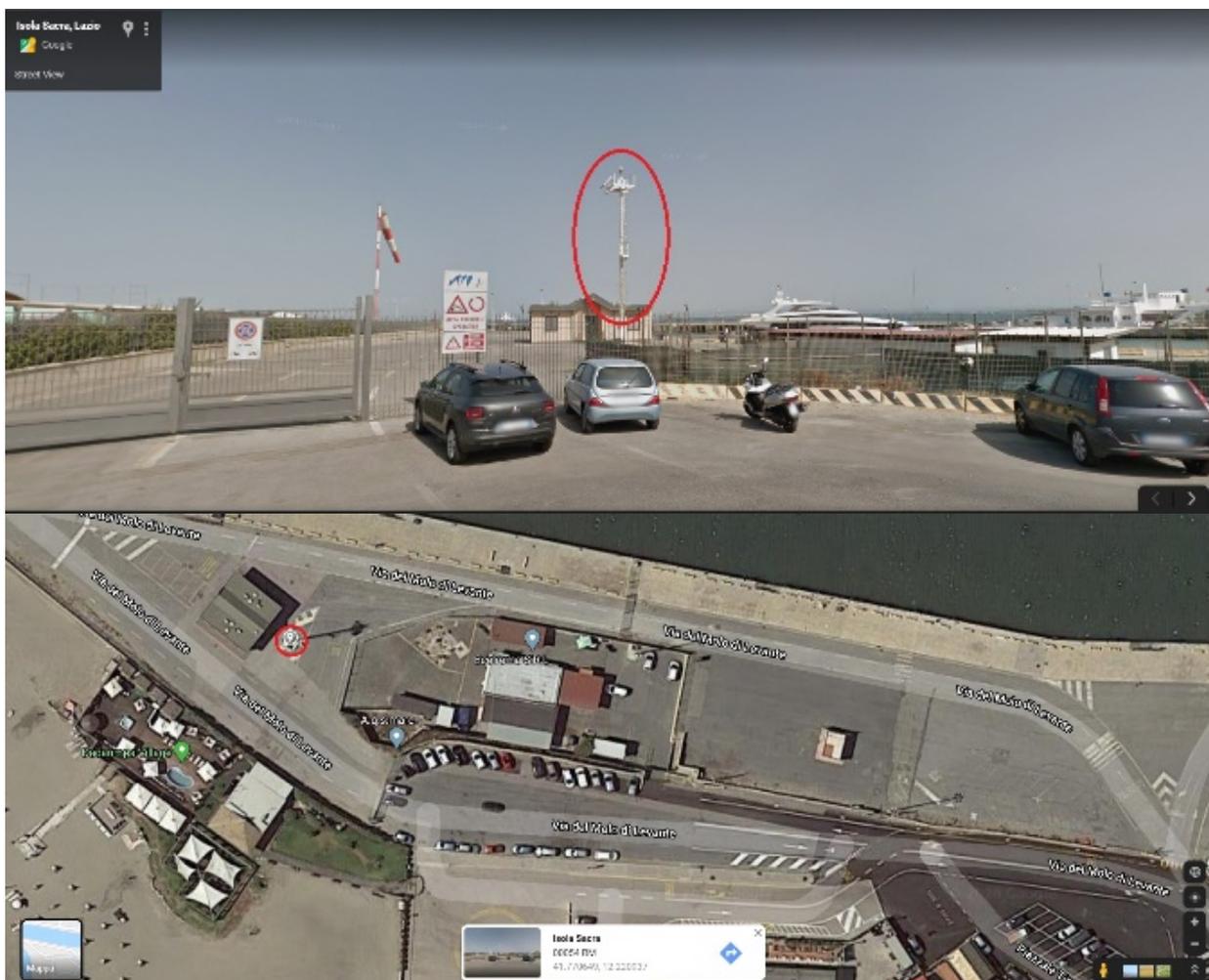


Figura 35 Ubicazione Torre faro

Il radar X-Band (Extendend AM broadcast band) utilizza un segmento della regione delle microonde radio dello spettro elettromagnetico; il sistema permette di misurare corrente e moto ondoso (spettro direzionale) attraverso la ricezione del backscatter delle microonde dovuto alla rugosità della superficie del mare, che è visualizzabile come un sea clutter in tutte le immagini radar X-Band. In particolare, la caratterizzazione dello stato del mare viene raggiunta attraverso il processamento del segnale elettromagnetico di backscatter riemesso dalla rugosità del mare per effetto della risonanza di Bragg (Nieto et al., 2004; Nieto et al., 2000). Questo rappresenta un segnale utile per essere

processato quando lo scopo è raggiungere una caratterizzazione dello stato del mare spazio-temporale. È necessaria una corposa analisi del dato per passare dall'immagine radar all'informazione spazio-temporale dello stato di mare (Serafino et al., 2010, 2012; Nieto et al., 2004).

L'installazione è stata autorizzata da parte del Ministero dello Sviluppo Economico, Direzione Generale per i Servizi di Comunicazione Elettronica, di Radiodiffusione e Postale (mise.A00_COM.REGISTRO UFFICIALE.U.0036138.17-07-2020) per quanto attiene l'uso delle frequenze, e ne è stata data comunicazione ufficiale ad ARPA Lazio.

Il sistema di misura copre l'area riportata in Figura 36, caratteristica che rappresenta un'evoluzione importante rispetto al punto singolo misurato dalle tradizionali boe ondometriche, in quanto consente di studiare la dinamica su una scala più ampia e con un dettaglio molto elevato. Inoltre, come visibile dall'immagine, è stato applicato un blanking di modo che la strumentazione non emetta verso terra.



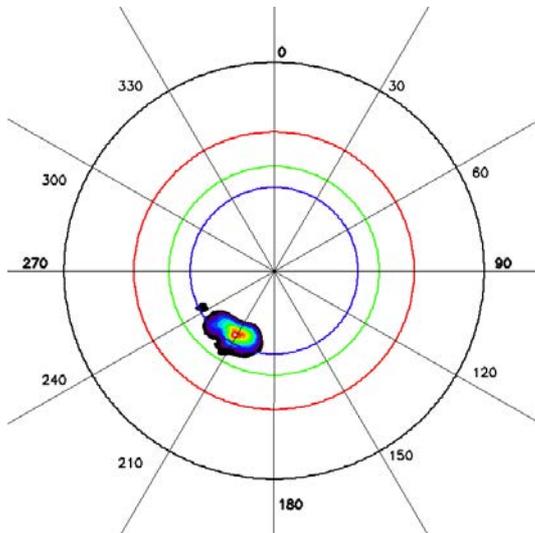
Figura 36 Area di misura del sistema radar X-Band



Dal momento dell'installazione sono state acquisite diverse mareggiate interessanti, che sono state utili anche alla validazione della modellistica numerica.

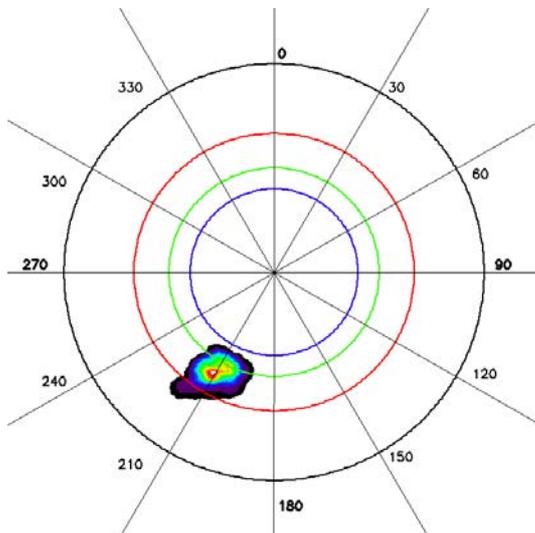
Di seguito alcuni dei dati acquisiti dal radar sia per direzione e altezza delle onde che per direzione e intensità delle correnti.

30.12.2020



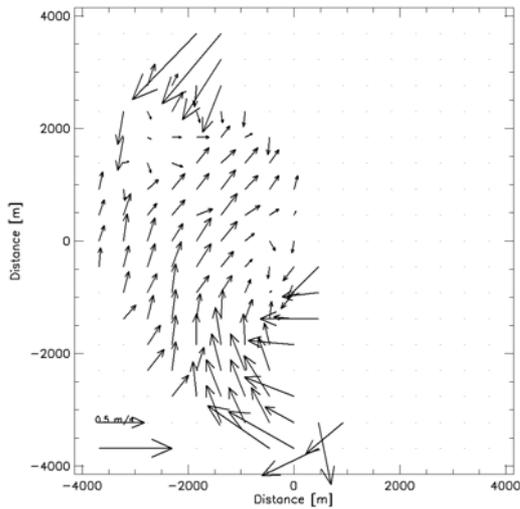
```

-----date-----
                28-12-2020   15:56
-----wavelength-----
Lambda=30m;   Lambda=70m;   Lambda=100m
-----sea state parameters-----
SNR level=MEDIUM
-----peak primary waves-----
Hs=2.2[m];           Dir=211[deg]
Tp=9.6[s];           Lambda=110[m]
Crrspeed=0.1[kn];    CurrDir=0[deg]
-----peak secondary waves-----
Tp=--[s];           Dir=--[deg]
Lambda=--[m]
-----average waves-----
Tp=8.5[s];           Dir=213[deg]
Lambda=106[m]        Dir_sp=13[deg]
  
```

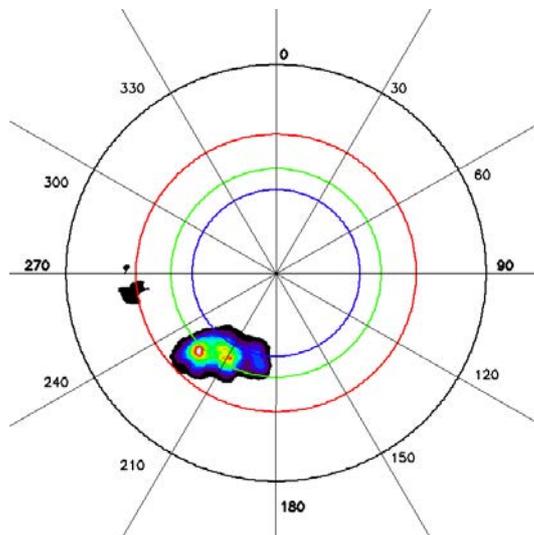


```

-----date-----
                30-12-2020   1:11
-----wavelength-----
Lambda=30m;   Lambda=70m;   Lambda=100m
-----sea state parameters-----
SNR level=MEDIUM
-----peak primary waves-----
Hs=0.7[m];           Dir=211[deg]
Tp=7.1[s];           Lambda=70[m]
Crrspeed=0.2[kn];    CurrDir=0[deg]
-----peak secondary waves-----
Tp=--[s];           Dir=--[deg]
Lambda=--[m]
-----average waves-----
Tp=7.0[s];           Dir=209[deg]
Lambda=73[m]         Dir_sp=16[deg]
  
```

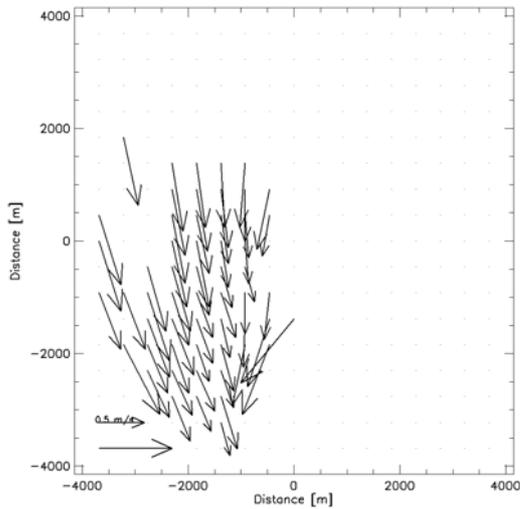


24.01.2021

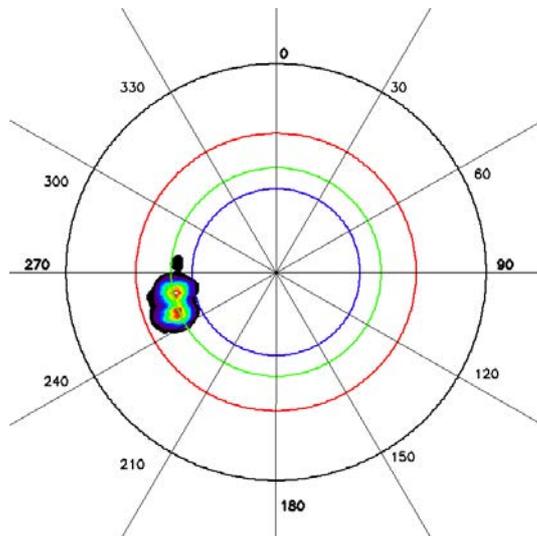


```

-----date-----
                24-1-2021   16:41
-----wavelength-----
Lambda=30m;   Lambda=70m;   Lambda=100m
-----sea state parameters-----
SNR level=MEDIUM
-----peak primary waves-----
Hs=1.1[m];           Dir=224[deg]
Tp=7.9[s];           Lambda=76[m]
Curspeed=0.6[kn];    CurrDir=0[deg]
-----peak secondary waves-----
Tp=--[s];           Dir=--[deg]
Lambda=--[m]
-----average waves-----
Tp=7.3[s];           Dir=222[deg]
Lambda=77[m]         Dir_sp=22[deg]
  
```



25.01.2021 8:29



```

-----date-----
                25-1-2021   8:29
-----wavelength-----
Lambda=30m;   Lambda=70m;   Lambda=100m
-----sea state parameters-----
SNR level=MEDIUM
-----peak primary waves-----
Hs=1.7[m];           Dir=257[deg]
Tp=7.6[s];           Lambda=82[m]
Currspeed=0.0[kn];   CurrDir=0[deg]
-----peak secondary waves-----
Tp=--[s];           Dir=--[deg]
Lambda=--[m]
-----average waves-----
Tp=7.3[s];           Dir=253[deg]
Lambda=77[m]         Dir_sp=9[deg]
  
```

4.5.2 ADCP

Al fine di acquisire dati relativi al profilo verticale di corrente (direzione ed intensità), funzionale alle attività di validazione dei modelli, sono state eseguite n. 3 campagne di misura utilizzando un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP, Sontek 500 kHz). Le tre campagne di misura sono state eseguite tra ottobre 2020 e dicembre 2020. Durante la prima campagna sperimentale sono state effettuate misure in tutte le stazioni, durante la seconda e la terza campagna sperimentale, il piano di campionamento è stato ridotto escludendo le stazioni A4, B4, C4, D4, E4, E1, E2, ed E3, a valle delle valutazioni modellistiche. In ogni stazione sono state eseguite misurazioni della durata di 5 minuti, acquisendo profili di intensità e direzione della corrente ogni 30 secondi.

I dati acquisiti sono stati successivamente elaborati, al fine di ottenere la distribuzione di intensità e direzione della corrente a diverse quote della colonna d'acqua.

Le figure 37, 38, e 39 riportano la distribuzione del campo di corrente (intensità e direzione) ad alcune quote selezionate, nelle tre diverse campagne di misura.

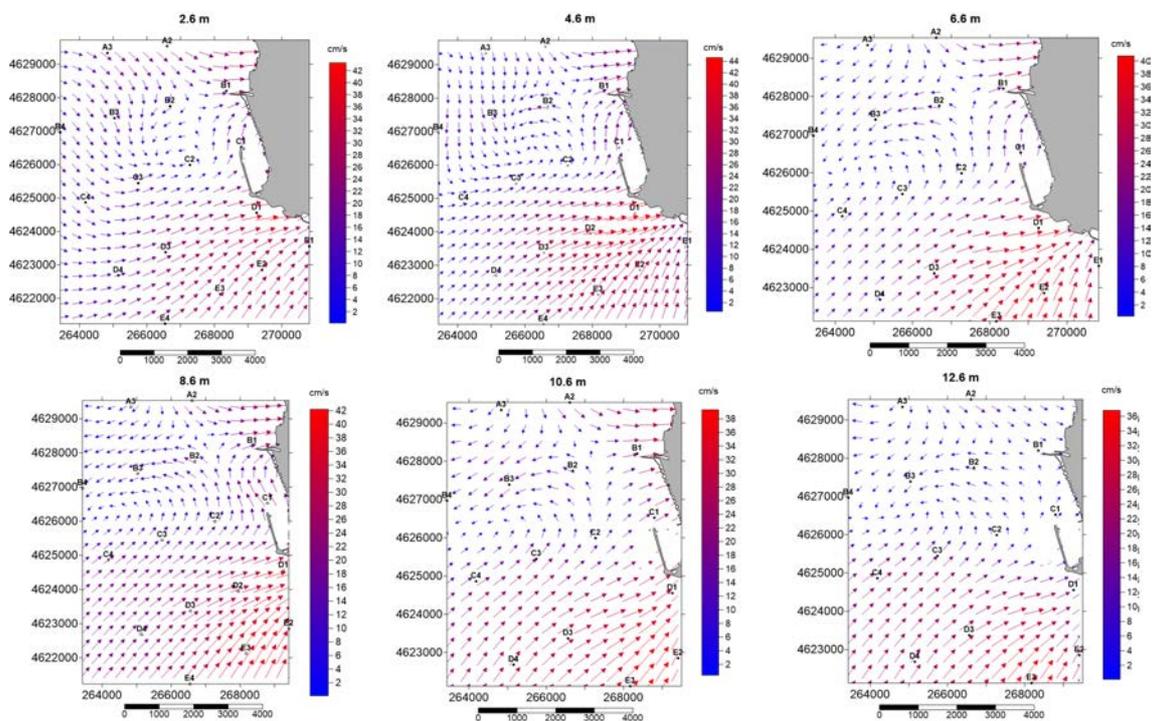


Figura 37 Intensità e direzione della corrente misurate durante la prima campagna di misura (UTM, WGS84).

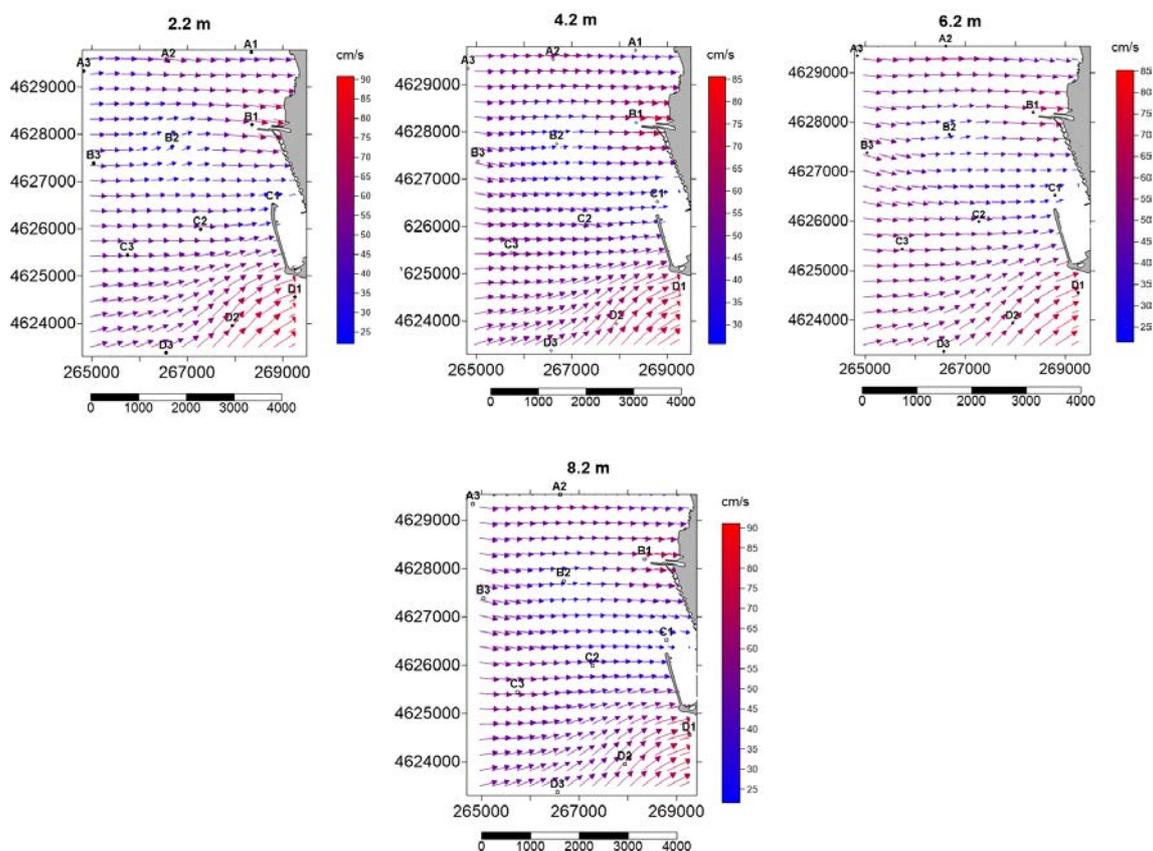


Figura 38 Intensità e direzione della corrente misurate durante la seconda campagna di misura (UTM, WGS84).

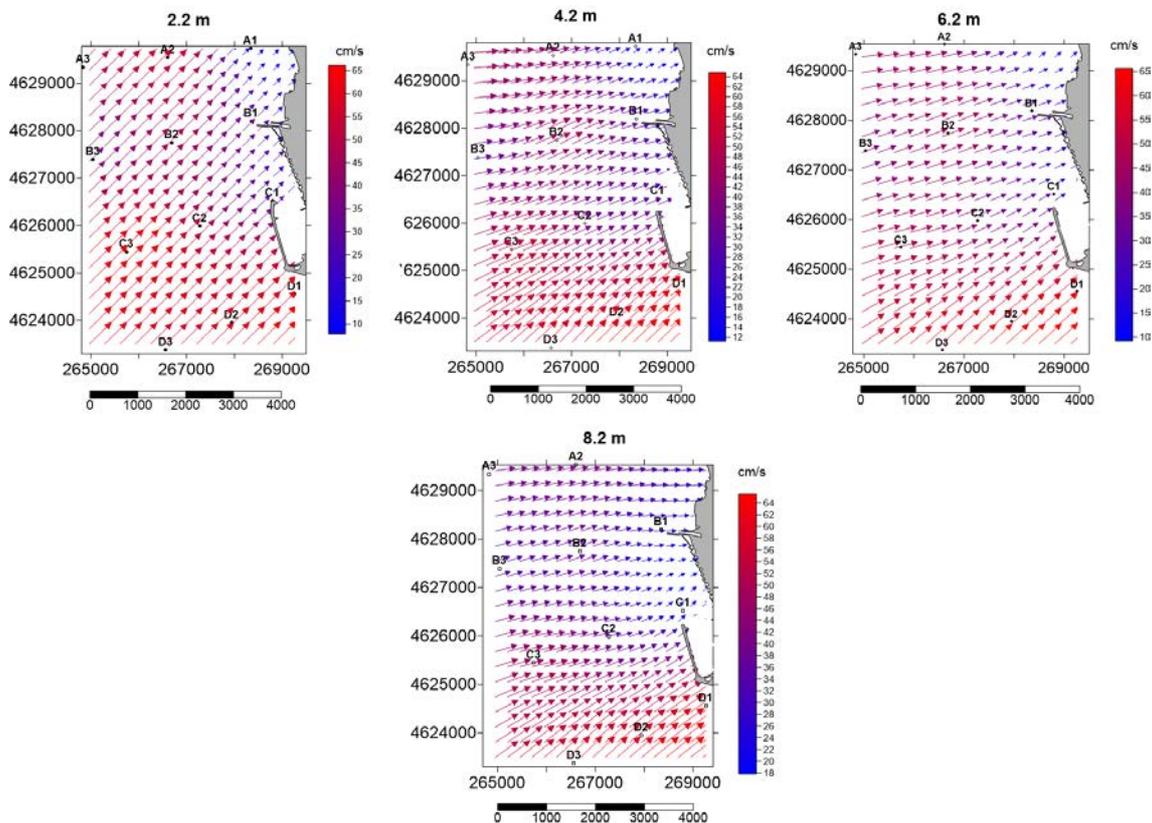


Figura 39 Intensità e direzione della corrente misurate durante la terza campagna di misura (UTM, WGS84).

In generale, i dati acquisiti in tutte e tre le campagne di misura mostrano la prevalenza di correnti provenienti dal terzo quadrante con intensità variabili. Durante la prima campagna di misura è stato misurato un massimo di intensità di corrente pari a 44 cm/s; durante la seconda campagna di misura è stato misurato un massimo di intensità di corrente pari a 90 cm/s; durante la terza campagna di misura è stato misurato un massimo di intensità di corrente pari a 65 cm/s. E' da notare come i transetti D (siti di campionamento D1, D2, D3, D4) ed E (siti di campionamento E1, E2, E3, E4) sono quelli dove è stata misurata l'intensità di corrente maggiore, in tutte e tre le campagne di misura.

4.5.3 Drifter

Durante il periodo di progetto sono stati fatti una serie di lanci dalle foci di Fiumara Grande e Fiumara Piccola e dalle aree esterne.



Figura 40 Esempio di lancio di drifter

Questa attività ha consentito di acquisire dati utili alla validazione dei modelli di corrente. Di seguito vengono rappresentate le traiettorie effettuate dai drifter nei diversi lanci.

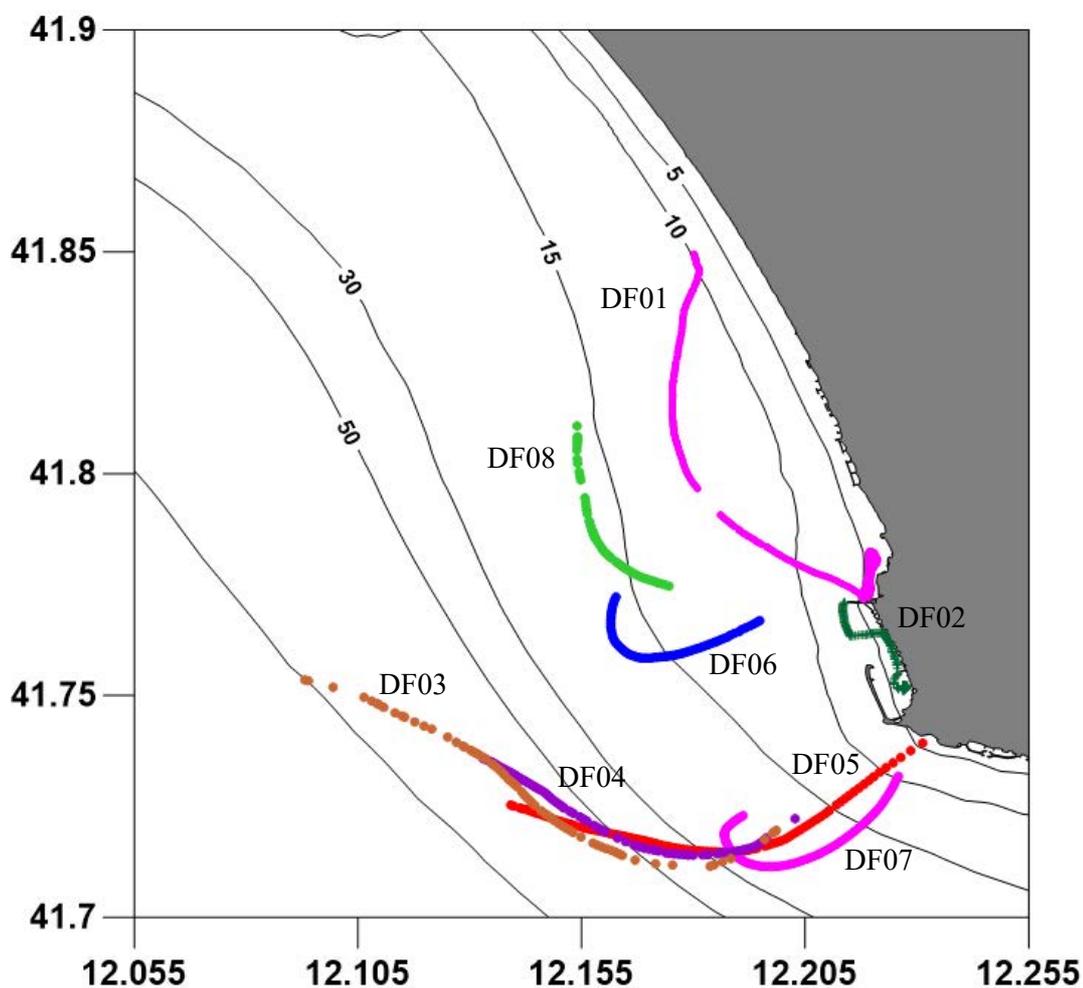


Figura 41 Rappresentazione delle traiettorie seguite dai drifter

I drifter sono stati lanciati nei seguenti giorni:

- DF01 17.02.2021
- DF02 17.02.2021
- DF03 17.02.2021
- DF04 17.02.2021
- DF05 17.02.2021

- DF06 03.03.2021
- DF07 03.03.2021
- DF08 05.03.2021

Come è possibile notare, nella quasi totalità dei casi le correnti hanno spostato i drifter verso Nord, ma prima di andare in questa direzione, si dirigono nella parte a largo in quanto risentono della spinta dovuta al flusso del Tevere.

L'acquisizione di questi dati ha consentito di effettuare un primo confronto con i risultati dei modelli di corrente, che necessita per una migliore validazione dell'acquisizione di ulteriori dati.

4.6. Caratterizzazione della spiaggia sommersa

Al fine di acquisire dati utili all'implementazione e alla validazione dei modelli numerici, sono state effettuate delle campagne per la caratterizzazione della spiaggia sommersa. In particolare, sono stati acquisiti una serie di dati utili ad analizzare le variazioni dei profili della spiaggia sommersa e le caratteristiche granulometriche come di seguito descritto.

4.6.1 Profili della spiaggia sommersa

Sono state effettuate n.2 campagne di misura finalizzate all'analisi dei profili di spiaggia sommersa nell'area di Fiumicino.

Nel dettaglio, come previsto dal cronoprogramma delle attività, sono state effettuate: una campagna estiva (Agosto 2020) ed una campagna invernale (Gennaio 2021). Per ciascuna delle due campagne sono stati acquisiti i tracciati lungo n.5 transetti, compresi tra le profondità di 5 m e 35 m, per un totale di n.10 transetti. I profili della spiaggia sommersa sono stati effettuati utilizzando un sistema di misura Kongsberg EA 400 Single beam hydrographic echo sounder equipaggiato con sonar 710kHz. Il sistema di misura è composto da sistema di posizionamento superficiale (GPS), sistema di acquisizione ed elaborazione dati, ecoscandaglio idrografico. L'ubicazione dei transetti è riportata in Figura 42.

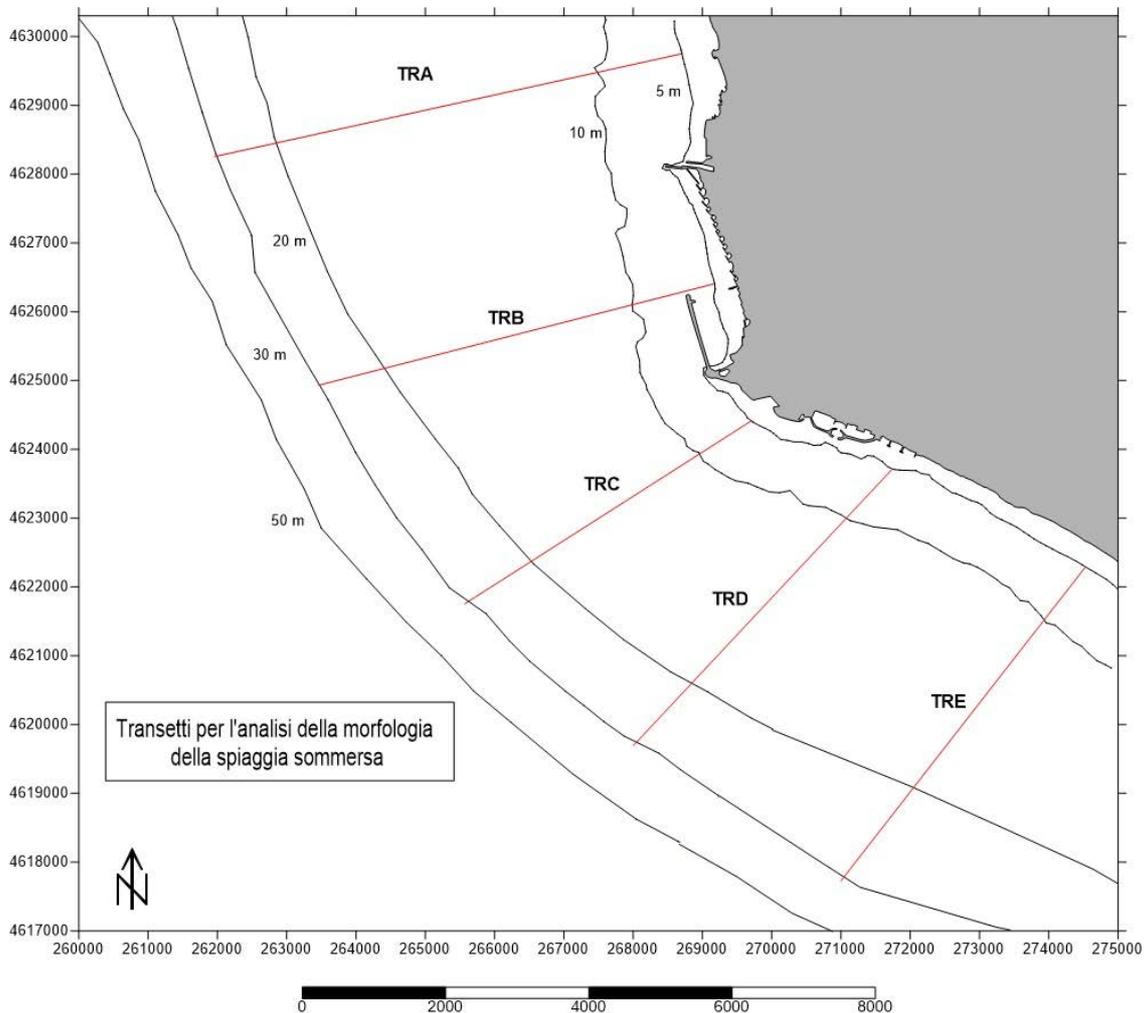


Figura 42 Ubicazione dei transetti per l'indagine della morfologia della spiaggia sommersa (UTM, WGS84).

I dati acquisiti sono stati elaborati considerando l'effetto del rollio e del beccheggio dell'imbarcazione durante le acquisizioni (Pitch and Roll) ed è stato considerato l'effetto della marea, utilizzando i dati disponibili acquisiti dai due mareografi più vicini facenti parte della rete mareografica nazionale (Civitavecchia e Anzio).

In Figura 43 sono riportati in sovrapposizione i profili morfologici acquisiti durante le due stagioni. I profili sono rappresentati in funzione della distanza progressiva da costa.

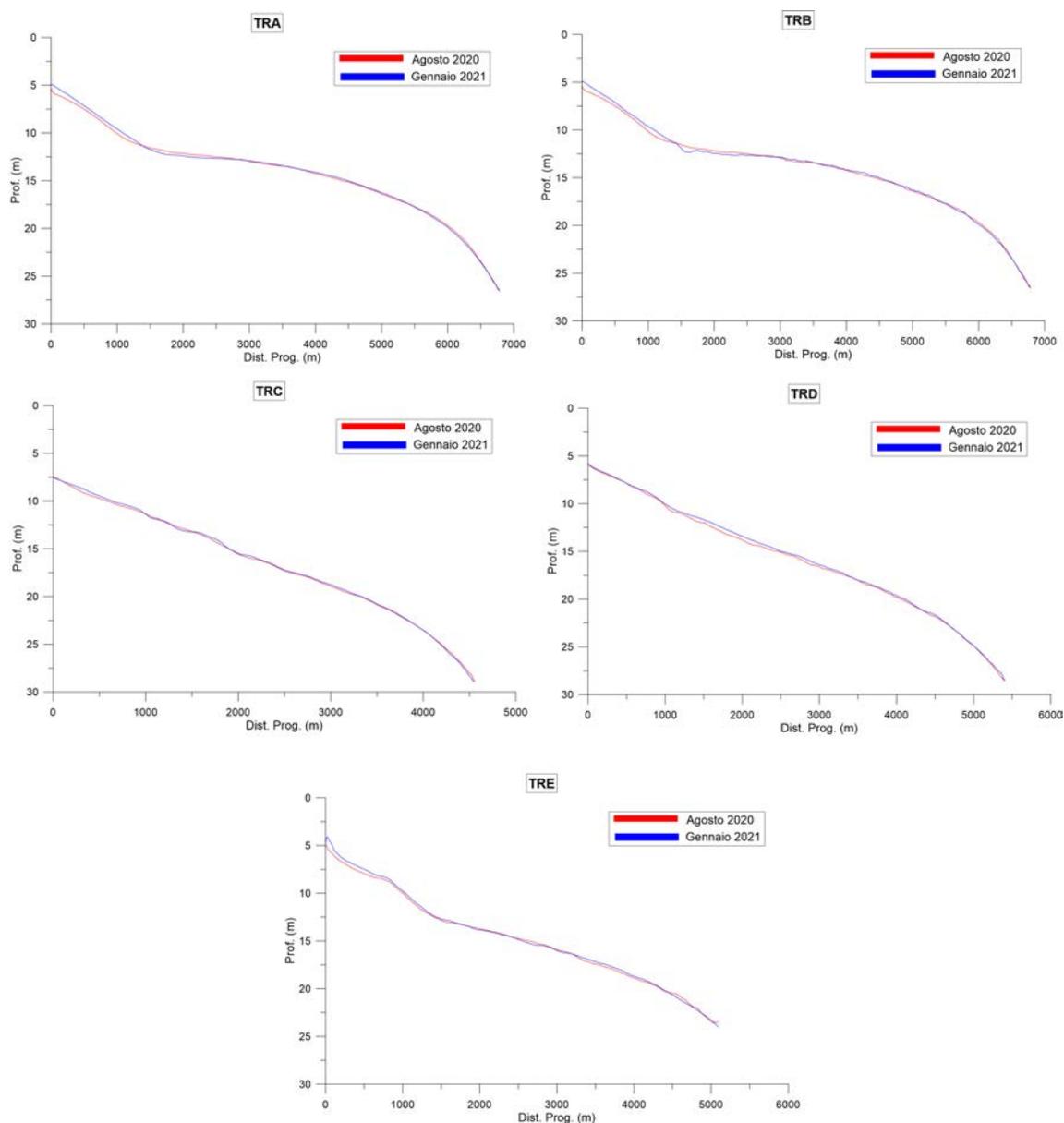


Figura 43 Profili morfologici acquisiti durante le due campagne di misura.

Nei profili riportati in Figura 43 sono visibili le barre o depressioni del fondale, indicatori della tipologia di movimentazione dei sedimenti e quindi del clima di trasporto dell'area di studio. In generale, in tutti i transetti, ad eccezione del transetto TRC, sono evidenti variazioni morfologiche situate tra i 5 m e i 15 m di profondità. I

transetti TRA (a Nord di Fiumicino) e TRB (Fiumicino) mostrano la presenza di variazioni morfologiche Estate – Inverno importanti, tra le profondità dei 5 m e dei 13 m. TRC (Fiumara grande) non mostra variazioni morfologiche Estate – Inverno importanti. TRD (a Sud della Foce del Tevere) mostra evidenti variazioni morfologiche comprese tra le profondità di 10 m e 15 m. TRE (Ostia) mostra variazioni morfologiche esclusivamente a profondità comprese tra 5 m e 10 m.

4.6.2 Campionamenti della spiaggia sommersa

Congiuntamente alle due campagne di misura di morfologia della spiaggia sommersa, al fine di mantenere la medesima stagionalità, sono stati effettuati i campioni di sedimento superficiale previsti nel cronoprogramma delle attività ante operam. Nel dettaglio, in ogni transetto sono stati prelevati campioni di sedimento superficiale alle profondità di 2 m, 5 m e 10 m (Figura 44), per un totale di 30 campioni.

Il campionamento dei sedimenti superficiali è stato effettuato attraverso un campionatore a gravità, come riportato nel Decreto 15 luglio 2016, n. 173 (ex art 109, comma 2 del D.lgs 152/06) “Regolamento recante modalità e criteri tecnici per l'autorizzazione all'immersione in mare dei materiali di escavo di fondali marini”. I campioni sono stati analizzati dal punto di vista granulometrico. In particolare, sono state ricavate le abbondanze percentuali di ghiaie ($x > 2000 \mu\text{m}$), sabbie ($2000 \mu\text{m} < x < 63 \mu\text{m}$) e fanghi ($x < 63 \mu\text{m}$), ed è stata effettuata l'analisi della frazione sabbiosa ($2000 \mu\text{m} < x < 63 \mu\text{m}$) mediante setacciatura meccanica. Nel dettaglio, sono state eseguite due repliche analitiche per ogni campione, per un totale di 60 analisi granulometriche.

Nell'allegato X al presente documento vengono riportate le curve granulometriche cumulate della frazione sabbiosa di ogni campione, ed una scheda comprensiva di statistica (Folk and Ward, 1957), ricavata utilizzando il software open source Gradistat (Blott and Pye, 2001).

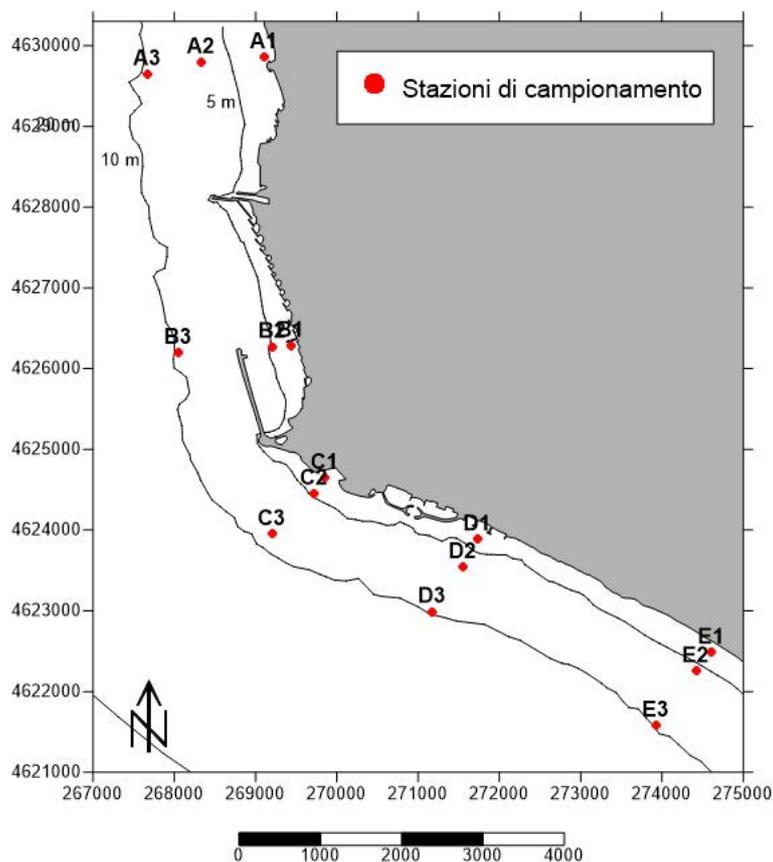


Figura 44 Ubicazione delle stazioni di campionamento dei sedimenti superficiali (UTM, WGS84).

In Tabella 6a e 6b sono riportate le percentuali medie di ghiaie ($x > 2000 \mu\text{m}$), sabbie ($2000 \mu\text{m} < x < 63 \mu\text{m}$) e fanghi ($x < 63 \mu\text{m}$) dei campioni di sedimento prelevati nei 15 siti di campionamento, sia per quanto riguarda la stagione estiva (Agosto 2020) sia per la stagione invernale (Gennaio 2021).

Stazioni	A1		A2		A3	
	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.
Ghiaie	0.27	0.03	0.18	0.02	0.31	0.13
Sabbie	99.59	0.03	99.19	0.26	95.73	1.45
Fanghi	0.14	0.06	0.63	0.28	3.95	1.33
	B1		B2		B3	
	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.
Ghiaie	0.26	0.17	0.26	0.03	0.01	0.02
Sabbie	99.68	0.23	98.63	0.12	99.96	0.01
Fanghi	0.06	0.06	1.11	0.15	0.03	0.02
	C1		C2		C3	
	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.
Ghiaie	0.12	0.06	0.43	0.17	0.51	0.12
Sabbie	99.83	0.06	99.54	0.18	97.71	0.37
Fanghi	0.05	0.00	0.02	0.01	1.78	0.49
	D1		D2		D3	
	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.
Ghiaie	1.27	0.31	0.03	0.04	0.02	0.03
Sabbie	98.68	0.28	92.85	0.26	99.97	0.03
Fanghi	0.05	0.03	7.12	0.31	0.01	0.00
	E1		E2		E3	
	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.
Ghiaie	0.66	0.57	0.53	0.55	0.07	0.04
Sabbie	99.32	0.54	99.03	0.47	99.09	0.02
Fanghi	0.02	0.02	0.45	0.08	0.84	0.06

Tabella 6a Percentuali medie e deviazioni standard di ghiaie, sabbie e fanghi dei campioni prelevati durante la stagione estiva (Agosto 2020).

Stazioni	A1		A2		A3	
	% media	Dev.st	% media	Dev.st	% media	Dev.st
Ghiaie	0.35	0.02	0.00	0.01	0.05	0.00
Sabbie	99.36	0.08	95.46	0.71	96.94	0.59
Fanghi	0.29	0.06	4.54	0.70	3.01	0.58
	B1		B2		B3	
	% media	Dev.st	% media	Dev.st	% media	Dev.st
Ghiaie	0.21	0.14	0.01	0.02	0.00	0.00
Sabbie	99.58	0.25	97.57	0.48	75.73	5.25
Fanghi	0.21	0.10	2.41	0.50	24.27	5.25
	C1		C2		C3	
	% media	Dev.st	% media	Dev.st	% media	Dev.st
Ghiaie	0.06	0.04	0.22	0.01	0.37	0.04
Sabbie	96.13	0.51	97.79	0.01	98.39	0.02
Fanghi	3.81	0.55	2.00	0.02	1.24	0.05
	D1		D2		D3	
	% media	Dev.st	% media	Dev.st	% media	Dev.st
Ghiaie	0.05	0.00	2.38	1.17	3.29	0.37
Sabbie	99.14	0.17	93.90	0.80	96.21	0.26
Fanghi	0.81	0.18	3.72	0.36	0.50	0.11
	E1		E2		E3	
	% media	Dev.st	% media	Dev.st	% media	Dev.st
Ghiaie	0.15	0.04	0.81	0.54	0.07	0.03
Sabbie	99.81	0.09	98.35	0.35	98.56	0.25
Fanghi	0.04	0.05	0.83	0.19	1.37	0.29

Tabella 6b Percentuali medie e deviazioni standard di ghiaie, sabbie e fanghi dei campioni prelevati

durante la stagione invernale (Gennaio 2021).

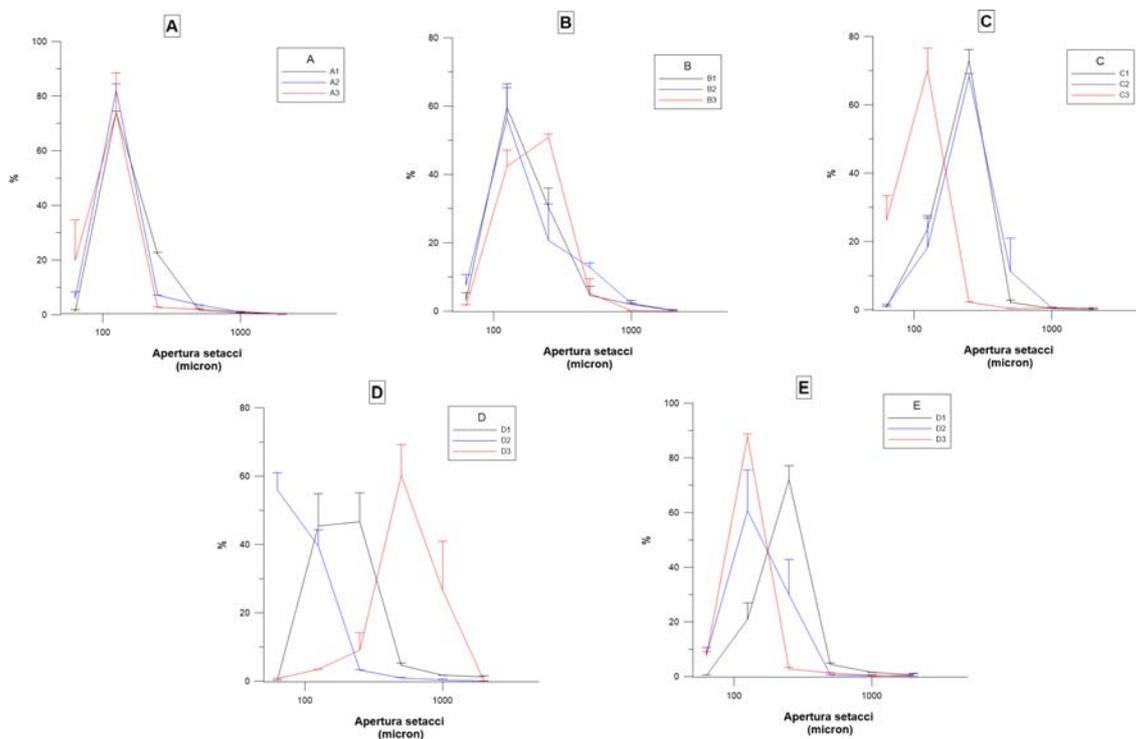


Figura 45 Curve di frequenza relativa dei campioni prelevati durante la stagione estiva (Agosto 2020).

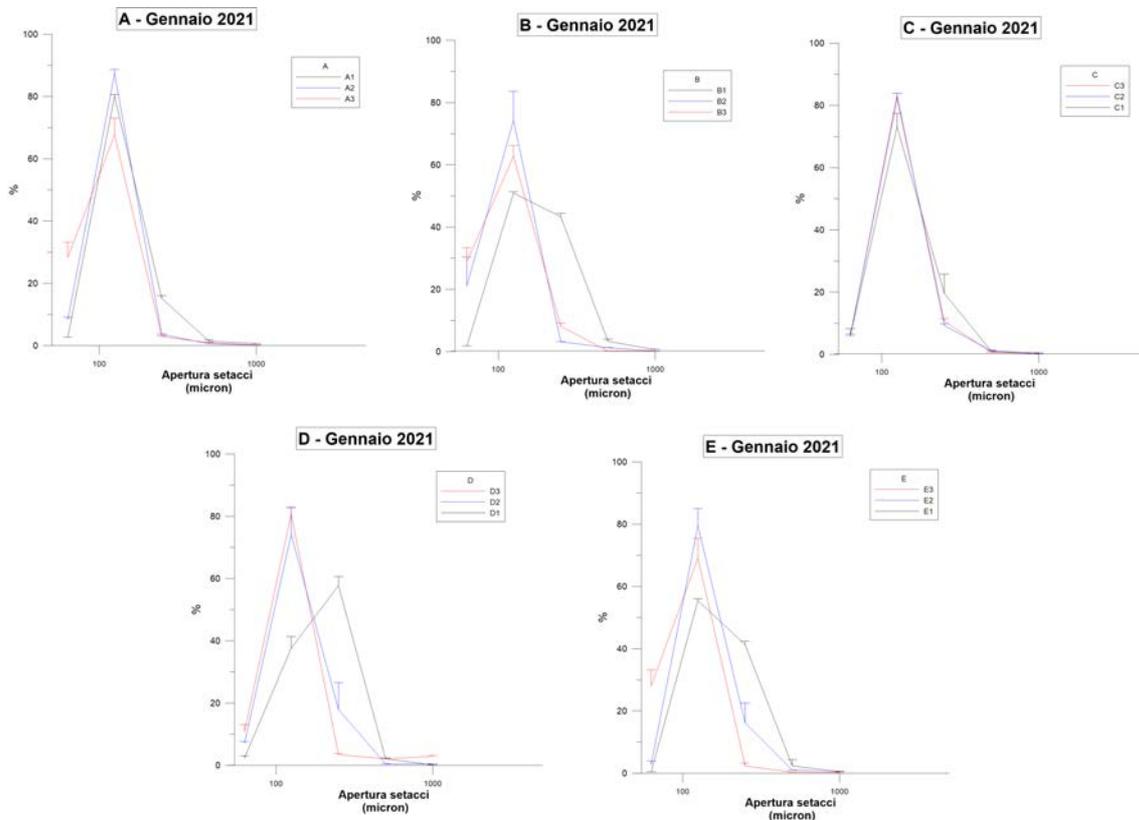


Figura 46 Curve di frequenza relativa dei campioni prelevati durante la stagione invernale (Gennaio 2021).

In Fig 45 e Figura 46 sono riportate le curve di frequenza relativa delle due campagne di campionamento. I campioni analizzati relativi alla campagna estiva (Agosto 2020) (Tabella 6a) mostrano la predominanza di sabbie in tutti i siti di campionamento (percentuale di sabbie maggiore del 90 %). Il sito di campionamento D2 ha mostrato la maggiore percentuale di fanghi (7.12 %) mentre il sito di campionamento D1 ha mostrato la maggior percentuale di ghiaie (1.27 %).

Analogamente, anche durante la campagna invernale (Gennaio 2021) (Tabella 6b) i sedimenti recuperati nei quindici siti di campionamento sono risultati essere composti maggiormente da sabbie (percentuale di sabbie maggiore del 90 %), ad eccezione del sedimento recuperato nel sito di campionamento B3 (percentuale di sabbia 75.73 %) nel

quale è stata riscontrata la percentuale maggiore di fanghi (24.27 %). Il sito di campionamento D3 ha mostrato la maggior percentuale di ghiaie (3.29 %).

Analizzando le curve di frequenza relativa delle sabbie dei campioni prelevati durante la stagione estiva (Agosto 2020) (Figura 45) si osserva che i campioni prelevati lungo il transetto C (C1, C2 e C3) (ubicato nei pressi di Fiumara grande) e i campioni prelevati lungo il transetto E (E1, E2, E3) (Ostia) sono gli unici dove è presente una diminuzione di granulometria tra le stazioni più a costa (2 m e 5 m) e quelle situate alla profondità di 10 m. I campioni prelevati alle tre diverse quote (2 m, 5 m, 10 m) lungo i transetti A, B e D non mostrano l'andamento suddetto.

Le curve di frequenza relativa delle sabbie dei campioni prelevati durante la stagione invernale (Gennaio 2021) (Figura 46) mostrano un andamento coerente con la dinamica caratteristica della stagione. Non sono evidenti particolari differenze nella moda dei campioni prelevati alle tre diverse quote (2 m, 5 m, 10 m) nei cinque transetti, ad eccezione del transetto, a testimoniare un generale mescolamento indotto dagli eventi meteorologici più intensi durante il periodo invernale.

4.7. Modelli a scala regionale e di dettaglio

In questa attività sono stati predisposti e utilizzati i modelli numerici necessari a definire le principali caratteristiche ambientali del mare. Nello specifico è previsto l'utilizzo di una componente idrodinamica (correnti, livello del mare e traccianti attivi), di una di moto ondoso (altezza significativa, periodo e direzione delle onde) e di una di trasporto del sedimento (cambiamento della morfologia sommersa e concentrazione del sedimento in sospensione).

4.7.1 Descrizione dei modelli numerici

Modello idrodinamico SHYFEM

Il modello idrodinamico implementato sarà SHYFEM (Shallow water HYdrodynamics Finite Element Model) (Umgiesser et Al. 2004) utilizzato in modalità tridimensionale e baroclinica, come già implementato con successo e in modo previsionale nelle zone costiere e nelle aree portuali della Puglia. Il modello è basato su un approccio a elementi finiti di tipo a griglia non strutturata riconfigurabile che avrà una risoluzione variabile, dell'ordine di 1 km in mare aperto in modo da potersi annidare su modelli a scala di bacino del sistema Copernicus Marine Service- CMEMS, raggiungendo 50 m sulla linea di costa e di 15 m nella zona portuale e periportuale di Fiumicino. La risoluzione verticale ha griglia non uniforme caratterizzata da 70 livelli.

Il modello risolve le equazioni primitive, integrate verticalmente su ogni livello. La diffusione orizzontale, il gradiente di pressione e l'avvezione baroclinica nell'equazione del momento sono trattati in modo esplicito. La forza di Coriolis e il gradiente di pressione barotropica nell'equazione del momento e il termine divergenza nella equazione di continuità sono trattati in modo semi-implicito. I termini di stress verticale e il termine di attrito al fondo sono trattati in implicito per ragioni di stabilità. La caratteristica fondamentale del metodo semi-implicito è che unisce i vantaggi di uno schema implicito, incondizionata stabilità per ogni passo temporale scelto, con quelli dello schema esplicito, quali la riduzione della matrice di risoluzione.

Per il calcolo della diffusività verticale e viscosità è stato utilizzato uno schema di chiusura turbolenza. Questo schema è un adattamento del modulo k- ϵ del modello GOTM (General Ocean Turbulence Model) descritto in Burchard e Petersen (1999). Le velocità sono calcolate al centro di ogni elemento, mentre il livello temperatura e salinità è calcolato nei nodi della griglia. Verticalmente il modello descrive la colonna d'acqua tramite livelli Z di diverso spessore. La maggior parte delle variabili sono

calcolate al centro di ogni strato, mentre i termini di stress e le velocità verticali sono risolti alle interfacce tra gli strati.

Le equazioni, integrate in ogni livello, sono:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial U_l}{\partial y} - fV_l = -gh_l \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho' dz + \\ - \frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_x^{top(l)} - \tau_x^{bottom(l)}) + A_H \left(\frac{\partial^2 U_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_l}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial V_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial V_l}{\partial y} + fU_l = -gh_l \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho' dz + \\ - \frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_y^{top(l)} - \tau_y^{bottom(l)}) + A_H \left(\frac{\partial^2 V_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_l}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sum_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + \sum_l \frac{\partial V_l}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

dove:

l = livello verticale,

(U_l, V_l) = trasporti orizzontali in ogni livello (velocità integrate),

f = parametro di Coriolis,

p_a = pressione atmosferica,

g = accelerazione gravitazionale,

ζ = livello del mare,

ρ_0 = densità media del mare,

$\rho = \rho_0 + \rho$ = densità del mare,

τ = stress interni alla superficie e al fondo di ogni strato,

h_l = spessore dello strato

H_l = profondità del fondo dello strato l ,

A_H = viscosità orizzontale.

$$\tau_x^{surface} = c_D \rho_a w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad \tau_y^{surface} = c_D \rho_a w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad (4)$$

$$\tau_x^{bottom} = c_B \rho_0 u_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \quad \tau_y^{bottom} = c_B \rho_0 v_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \quad (5)$$

dove:

c_D = coefficiente di attrito del vento,

c_B = coefficiente di attrito al fondo,

ρ_a = densità dell'aria,

(w_x, w_y) = componenti del vento,

(u_L, v_L) = velocità dell'acqua nell'ultimo livello.

Per comprendere la capacità di rimescolamento del sistema e l'evoluzione della salinità, della temperatura dell'acqua o di un qualsivoglia tracciante, è stato studiato il comportamento di una sostanza conservativa disciolta in acqua. In un punto qualsiasi del sistema l'evoluzione della concentrazione S di un tracciante conservativo è calcolabile applicando il principio di conservazione della massa (Umgiesser, 1997):

$$\frac{\partial S_l}{\partial t} + \frac{\partial u_l S_l}{\partial x} + \frac{\partial v_l S_l}{\partial y} + \frac{\partial w_l S_l}{\partial z} = \nu_h \left(\frac{\partial^2 S_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S_l}{\partial y^2} \right) + \nu_{v,l} \frac{\partial^2 S_l}{\partial z^2} + F \quad (6)$$

dove:

S_l = concentrazione nello strato l ,

ν_h e $\nu_{v,l}$ = coefficienti di diffusione orizzontale e verticale (calcolati dal modello k-E di chiusura della turbolenza),

F = sorgenti esterne.

La temperatura dell'acqua di un bacino varia nello spazio e nel tempo; questo indica che il calore fornito dalla radiazione solare viene assorbito, trasportato dalle correnti e scambiato con l'atmosfera per mezzo di diversi processi, come evaporazione e convezione.

La variazione della temperatura dell'acqua nel tempo è data dall'equazione 6 e gli scambi di calore con l'atmosfera sono contenuti nel termine sorgente $\phi = Q/C$ (Zampato et al., 1998). C è la capacità termica del volume V di fluido considerato con:

$$C = c\rho V$$

$c=4183$ [J/kg K] calore specifico e $\rho=1000.52$ [kg/m³] densità dell'acqua. Q è il flusso di calore per unità di tempo in W/m² scambiato tra l'atmosfera e mare attraverso la superficie marina, che si può scindere nella somma di quattro termini:

$$Q = Q_s + Q_b + Q_e + Q_h$$

I quattro contributi rappresentano altrettanti processi fisici:

- Q_s è il flusso di energia solare attraverso la superficie del mare (short-wave radiation). Q_s presenta un'elevata variabilità giornaliera e stagionale: i suoi valori dipendono da lunghezza del giorno, elevazione del sole, assorbimento da parte dell'atmosfera, copertura nuvolosa, riflessione alla superficie;
- Q_b è il flusso netto di calore tra atmosfera e mare, in base alla legge di Stefan-Boltzmann (long-wave radiation): è dato dalla differenza tra il flusso di energia irraggiato dalla superficie, a temperatura T_s , proporzionale a T_s^4 dalla legge di Stefan, e il flusso ricevuto dall'atmosfera, a temperatura T_a , proporzionale a T_a^4 . Q_b non presenta notevoli variazioni giornaliere o stagionali, né forti variazioni con la latitudine;

- Q_e è il flusso di calore scambiato con l'atmosfera attraverso i processi di evaporazione e condensazione: è proporzionale al gradiente della concentrazione di vapore acqueo sopra la superficie del mare alla velocità del vento W ;
- Q_h è il flusso di calore scambiato con l'atmosfera per conduzione e convezione. Questo termine è proporzionale al gradiente di temperatura nello strato atmosferico sopra la superficie del mare e come Q_e dipende dalla velocità del vento W , che è intesa come scala per l'effetto della turbolenza.

Modello di moto ondoso WaveWatch III

Per riprodurre il moto ondoso verso costa verrà utilizzato il modello “Wave Watch III” (WWIII) che è in grado di seguire lo stesso approccio della modellistica idrodinamica, ovvero (i) creazione di modelli a griglia non strutturata, e (ii) annidamento in modelli di scala di bacino del sistema “Copernicus Marine Service”.

WWIII è un modello d'onda di terza generazione sviluppato da NOAA/NCEP, e segue il modello fisico WAM Cycle4 (Gunther et al., 1993). WWIII differisce dai suoi predecessori in diversi punti come: le equazioni generali, la struttura del modello, i metodi numerici e le parametrizzazioni fisiche. Inoltre, WWIII si sta evolvendo da un modello a onde in un framework di modellazione a onde, che consente un facile sviluppo di ulteriori approcci fisici e numerici. Esso risolve l'equazione di "random phasespectral action density balance" per il numero d'onda e la direzione spettrale. L'assunzione implicita di questa equazione è che le proprietà del mezzo (profondità e corrente dell'acqua) nonché il campo d'onda stesso variano su scale temporali e spaziali che sono molto più grandi delle scale di variazione di una singola onda. Il modello ha alcune opzioni relative al termine sorgente in caso di acque estremamente basse ("surf zone"), nonché gli elementi “wet”/“dry” della griglia di calcolo. Le equazioni del modello WWIII includono rifrazione e tensione del campo d'onda dovuto alle variazioni temporali e spaziali della profondità media dell'acqua e della corrente media (maree, surge, ecc.).Le parametrizzazioni dei processi fisici includono la crescita e il

decadimento delle onde dovuti alle azioni del vento, interazioni di risonanza non lineari, dissipazione ("whitecapping"), attrito del fondo, "scattering" del fondo, "surf-break" (ovvero, rottura indotta in profondità) e "scattering" dovuto a interazioni sul fondo dell'onda. La propagazione delle onde è considerata lineare, pertanto i pertinenti effetti non lineari come le interazioni di risonanza sono inclusi nei termini sorgente. WWIII utilizza una griglia regolarmente distanziata (non è necessario che gli incrementi di latitudine e longitudine siano uguali), di tipo cartesiana e non strutturata. Il modello d'onda WWIII può essere forzato con campi scalari di vento, copertura del ghiaccio, differenza di temperatura aria-mare e correnti e inizializzato con spettri di altezza, periodo e direzione significativi ai "boundaries". Lo spettro delle onde sarà discretizzato in 24 direzioni e 30 frequenze a partire da 0.035 Hz (nell'oceano Atlantico) a 0.0417 Hz (nel Mar Mediterraneo), con il 10% di incremento su ciascun asse.

Modello morfologico XBEACH

XBeach è un modello 2DH ("depth averaged"), in grado di simulare il comportamento di una spiaggia soggetta ad eventi intensi di mareggiata, includendo i fenomeni di erosione della duna, inondazione e formazione di brecce. Il campo di utilizzo di tale modello morfologico è circoscritto in particolare alla scala temporale degli eventi di mareggiata, che in pochi giorni possono causare ingenti fenomeni erosivi della spiaggia. Il suo utilizzo è quindi limitato a scale spaziali relativamente piccole e ad intervalli temporali di breve/medio periodo (giorni/mesi). Il modello è in grado di risolvere coppie di equazioni orizzontali 2D legate ai fenomeni di propagazione dell'onda, di flusso, di trasporto sedimentario e di variazione del fondale, imponendo condizioni al contorno di onde variabili (spettrali) e di flusso. XBeach tiene conto della variazione temporale dell'altezza d'onda e quindi è in grado di risolvere il moto legato alle "long-wave", generato da tale variazione. Il moto dell'azione ondosa per le onde corte viene modellato mediante l'equazione:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = - \frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma}$$

Dove A è l'azione ondosa, c_x , c_y e c_θ sono le velocità di propagazione nello spazio orizzontale e nello spazio direzionale, D_v è la dissipazione legata alla vegetazione e σ la frequenza dell'onda. La formulazione per il calcolo della dissipazione legata al frangimento dell'onda, D_w , può essere scelta tra cinque diverse formulazioni implementate all'interno del software, mentre la dissipazione legata al fondale D_f è calcolata mediante l'equazione:

$$D_f = \frac{2}{3} \rho f_w \left(\frac{\pi H_{rms}}{T_{m01} \sin kh} \right)$$

dove ρ è la densità dell'acqua, f_w è il coefficiente di attrito al fondo e H_{rms} è l'altezza d'onda quadratica media. Nella formula, T_{m01} rappresenta il periodo medio dell'onda definito dai momenti di ordine zero e uno dello spettro, k è il numero d'onda e h è la profondità.

XBeach considera l'energia delle onde come mediata sulla loro lunghezza e quindi non è in grado di simulare la forma dell'onda. Tuttavia, quando le onde si propagano dal largo verso riva la loro forma si modifica gradualmente a causa della combinazione dei processi di "shoaling", frangimento e non-linearità. All'interno del modello l'effetto dell'asimmetria e della distorsione dell'onda viene considerato all'interno della equazione di avvezione-diffusione mediante il calcolo della velocità.

La formulazione per il trasporto sedimentario è quella definita da Soulsby-van Rijn (Soulsby, 1997; van Rijn, 1985) mentre la concentrazione di equilibrio è calcolata come segue:

$$c_{eq} = \max \left(\min \left(c_{eq,b}, \frac{1}{2} C_{max} \right) + \min \left(c_{eq,s}, \frac{1}{2} C_{max} \right), 0 \right)$$

Il sistema di coordinate su cui si basa il modello è caratterizzato dall'asse delle ascisse con orientamento verso la costa e l'asse delle ordinate orientato lungo riva. Il modello utilizza una griglia di calcolo sfalsata, nella quale alcune variabili vengono definite al centro delle celle e altre sulle loro interfacce. XBeach permette di utilizzare una griglia con distanze tra i punti variabili in entrambe le direzioni. Il modello può essere utilizzato in modalità idrostatica e non idrostatica; nel primo caso, la variazione dell'ampiezza delle onde corte viene risolta in maniera separata dalle onde lunghe, dalle correnti e dalle variazioni morfologiche mentre nel secondo caso, tali processi vengono risolti includendo l'azione delle onde corte, a discapito del maggiore costo computazionale. Inoltre, XBeach può essere utilizzato in modalità mono-dimensionale (1D) e bidimensionale (2D). Nel primo caso il dominio spaziale è limitato al singolo transetto perpendicolare a riva, mentre nel secondo è possibile eseguire simulazioni su aree costiere più estese. Nella modalità stazionaria, la forzante ondosa è considerata costante e il frangimento d'onda è calcolato con la formula di Baldock (1998) e Janssen & Battjes (2007). Questa modalità, al contrario della precedente, è più adatta a simulazioni di lungo periodo e a eventi di moderata intensità. La scelta tra le due diverse modalità dipende, in particolare, dallo scopo dell'analisi, in riferimento ai fenomeni da studiare e al compromesso che si vuole raggiungere tra il costo computazionale del modello e la precisione richiesta nei risultati. La modalità stazionaria, avendo un segnale d'onda con altezza significativa costante, è quella che richiede il minor costo computazionale. Per questo motivo in questa prima fase, visto il lungo periodo da simulare, il modello è stato implementato con questa versione. Per maggiori dettagli sulle formulazioni del modello XBeach, si faccia riferimento a Roelvink *et al.*, 2009.

Modello di dispersione del sedimento dragato PTM

Il PTM (“Particle Tracking Module”) è un modello lagrangiano di trasporto sviluppato dal CIRP (“Coastal Inlets Research Program”) e dal DOER (“Dredging Operations and

Environmental Research Program”) ad opera della “U.S. Army Engineer Research and Development Center”.

L'approccio lagrangiano implica la modellazione attraverso la discretizzazione del sedimento in un numero finito di particelle che seguono il trasporto indotto dal campo idrodinamico di base. L'approccio lagrangiano è particolarmente indicato per la simulazione del trasporto a partire da una sorgente definita; ogni particella, nel modello, rappresenta una determinata massa di sedimento (e non una determinata particella o granulometria di sedimento).

Il campo del flusso idrodinamico rappresenta la condizione di “input” fondamentale per il PTM e, nel caso del presente lavoro, gli scenari precedentemente esposti sono stati utilizzati come condizione di flusso per la simulazione del trasporto in funzione dell'individuazione di due classi granulometriche indicative del tipo di sedimento sversato.

Il PTM è in grado di girare utilizzando un sistema di coordinate cartesiane.

Le capacità del PTM includono:

- campo idrodinamico di “input” (attraverso l'interpolazione delle condizioni del flusso con la posizione di una data particella);
- mobilità (determinazione della mobilità di una data particella nelle condizioni idrodinamiche definite);
- traiettorie (determinazione della traiettoria di una determinata particella assumendo ininfluenza l'inerzia della particella stessa).

Tali risultati possono essere ottenuti scegliendo tra tre differenti tipi di approcci: 2D, Q3D e 3D.

La rappresentazione 2D fornisce una valutazione preliminare del moto e del trasporto di una determinata particella applicabile quando non c'è interazione sedimentaria significativa tra la natura del fondale e le particelle prodotte dalla sorgente definita.

La rappresentazione Q3D si fonda sull'unione nell'utilizzo di funzioni empiriche del trasporto di particolato e l'applicazione delle funzioni relative ai fenomeni di avvezione,

precipitazione e dispersione per riprodurre alcuni dei fenomeni fondamentali del caso del trasporto in forma tridimensionale. Vengono presi in considerazione alcune caratteristiche di tipo stocastico nel trasporto di particelle; i movimenti orizzontali delle particelle sono determinati a partire dall'elevazione delle stesse rispetto al fondo, in considerazione di fenomeni di mescolamento, deposizione e reimmissione. La posizione verticale delle particelle nel Q3D viene utilizzata per la determinazione dell'evoluzione dei moti orizzontali tenendo conto di fattori quali la velocità di caduta in funzione della granulometria e della dispersione.

4.7.2 Messa a punto dei modelli numerici

Modello Shyfer

Il modello SHYFEM è stato utilizzato in modalità tridimensionale e baroclina, come già implementato con successo e in modo previsionale nelle zone costiere e nelle aree portuali della Puglia. Il modello calcola campi tridimensionali della velocità delle correnti marine, del livello del mare rispetto alla superficie di riferimento, della temperatura e della salinità. Esso risolve le equazioni primitive, integrate verticalmente su ogni livello. La diffusione orizzontale, il gradiente di pressione e l'avvezione baroclina nell'equazione del momento sono trattati in modo esplicito. La forza di Coriolis e il gradiente di pressione barotropica nell'equazione del momento e il termine divergenza nella equazione di continuità sono trattati in modo semi-implicito. I termini di stress verticale e il termine di attrito al fondo sono trattati in implicito per ragioni di stabilità. La caratteristica fondamentale del metodo semi-implicito è che unisce i vantaggi di uno schema implicito, incondizionata stabilità per ogni passotemporale scelto, con quelli dello schema esplicito, quali la riduzione della matrice di risoluzione. Per il calcolo della diffusività verticale e viscosità è stato utilizzato uno schema di chiusura turbolenza. Questo schema è un adattamento del modulo k- ϵ del modello GOTM (General Ocean Turbulence Model) descritto in Burchard e Petersen (1999). Le

velocità sono calcolate al centro di ogni elemento, mentre il livello temperatura e salinità è calcolato nei nodi della griglia. Verticalmente il modello descrive la colonna d'acqua tramite livelli Z di diverso spessore. La maggior parte delle variabili sono calcolate al centro di ogni strato, mentre i termini di stress e le velocità verticali sono risolti alle interfacce tra gli strati.

Il dominio del modello Shyftem si estende da Civitavecchia a nord a Torre Astura a sud e comprende l'unità fisiografica Capo Linaro-Capo Anzio che costituisce l'area di studio del presente progetto. La linea di costa è stata ricavata utilizzando immagini satellitari ad alta risoluzione relativi alla stessa stagione, integrate con quella più aggiornata (sempre nella stessa stagione delle immagini satellitari) presente nel dataset di Open Stree Map. Il dominio si estende a largo fino alla batimetria dei - 1000 m che si trovano a circa 35 km di distanza dalla costa. In seguito, è stato costruito un nuovo dominio di calcolo dove è stata integrata la configurazione del primo stralcio del nuovo porto di Fiumicino, al fine di simulare l'effetto della nuova opera sulla dinamica costiera e per valutare le differenze con la situazione ante operam. La morfologia sommersa è stata riprodotta utilizzando i rilievi di dettaglio forniti dall'Autorità di Sistema Portuale nella zona in cui verrà realizzata la nuova opera, a cui sono stati integrati i dati disponibili nella piattaforma Emodnet. Il dominio è costituito da una griglia orizzontale agli elementi finiti con risoluzione variabile da 3000 m in mare aperto a 50/100 m lungo la costa dell'unità fisiografica e con infittimenti maggiori fino a 20 m a nord di Fiumara Piccola, dove verrà realizzato il primo stralcio del nuovo Porto di Fiumicino (Figura 47). Gli strati della griglia verticale hanno uno spessore non uniforme, con una risoluzione che diminuisce con l'aumentare della profondità (1 m nella zona superficiale fino a 20 m di spessore negli strati profondi).

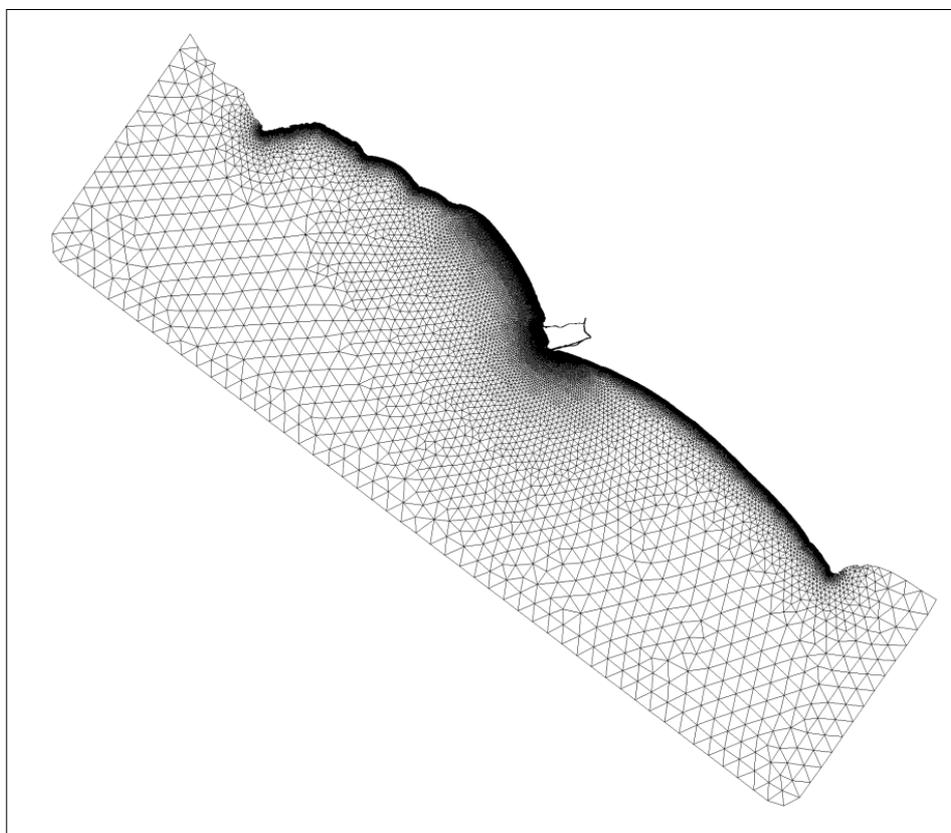


Figura 47 griglia di calcolo del modello Shyferm

Il modello Shyferm è inizializzato e annidato nel sistema Copernicus, forzato alle condizioni al contorno da MFS e da OTPS (OSU Tidal Prediction Software, codice in grado di fornire il segnale di marea) e forzato alla superficie dai campi di ECMWF.

L'input fluviale è stato aggiunto nella simulazione idrodinamica del modello Shyferm utilizzando i dati di portata liquida forniti dall'Ufficio Idrografico della Regione Lazio, che detiene diverse stazioni di rilevamento lungo tutto il percorso del fiume Tevere.

Quelle scelte per questo studio sono la stazione di Ripetta per quanto riguarda la portata liquida e la stazione di Capo Due Rami per quanto concerne il livello idrometrico. I dati sono stati inseriti direttamente all'interno del modello con una frequenza oraria.

Sono state analizzate due diverse configurazioni per stabilire quale delle due fornisce risultati migliori:

- 1) CONF1 : immissione di dati di portata liquida, temperatura e salinità a monte del punto di intersezione dei due rami del fiume Tevere (in prossimità di Capo due Rami);
- 2) CONF2: immissione diretta nella zona delle foci di Fiumara Piccola e Fiumara Grande inserendo differenti valori di portata liquida calcolata sulla base dei più recenti riferimenti bibliografici (la portata di Fiumara Piccola è di 1/5 rispetto a quella di Fiumara Grande).

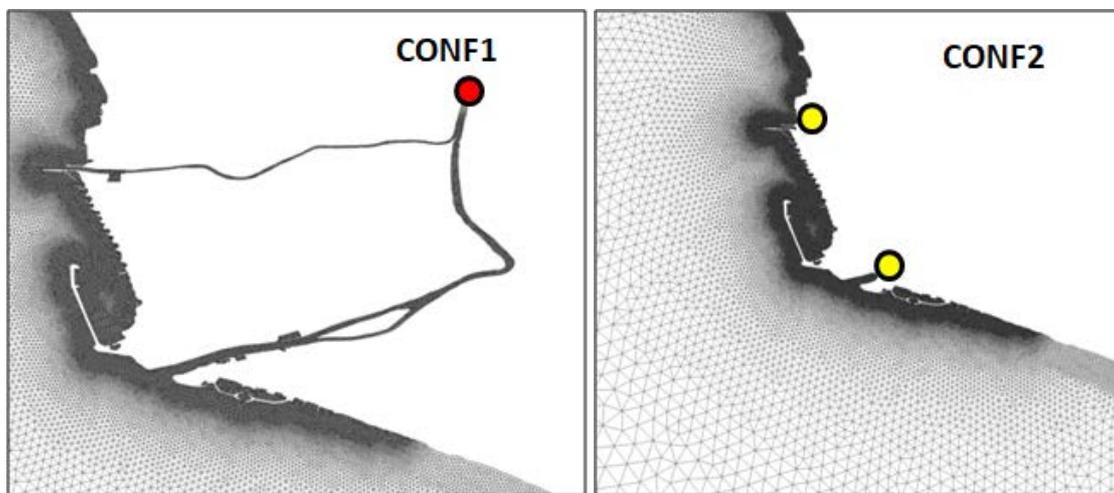


Figura 48 configurazioni utilizzate nel modello Shyft per riprodurre l'input fluviale del fiume Tevere

Per validare il modello sono stati utilizzati dati di temperatura e salinità acquisiti lungo profili verticali in regime di mescolamento e stratificazione, e misure lagrangiane fornite dai drifter per analizzare la risposta del campo di velocità superficiale. A tal fine il modello ha simulato i periodi in cui sono state effettuate tali misure.

Una volta scelta la configurazione ottimale e aver validato i risultati, il modello Shyft è stato utilizzato per riprodurre le condizioni idrodinamiche che sono intercorse tra il 2018 e il 2019 all'interno dell'area di studio. I risultati delle simulazioni sono stati poi impiegati per analizzare la distribuzione mensile e stagionale della temperatura, salinità e della corrente marina.

Modello Wave Watch III

Il modello Wave Watch III consiste in un modello d'onda di terza generazione sviluppato da NOAA/NCEP, e segue il modello fisico WAM Cycle4 (Gunther et al. 1993). Il modello è in grado di calcolare i principali parametri del moto ondoso, come altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media, in ogni punto del dominio di calcolo. Esso risolve l'equazione di "random phasespectral action density balance" per il numero d'onda e la direzione spettrale. Il modello ha alcune opzioni relative al termine sorgente in caso di acque estremamente basse ("surf zone"), nonché gli elementi wet/dry della griglia di calcolo. Le equazioni del modello WWIII includono rifrazione e tensione del campo d'onda dovuto alle variazioni temporali e spaziali della profondità media dell'acqua e della corrente media (maree, surge, ecc.). Le parametrizzazioni dei processi fisici includono la crescita e il decadimento delle onde dovuti alle azioni del vento, interazioni di risonanza non lineari, dissipazione ("whitecapping"), attrito del fondo, scattering del fondo, surf-break (ovvero, rottura indotta in profondità) e scattering dovuto a interazioni sul fondo dell'onda. La propagazione delle onde è considerata lineare, pertanto i pertinenti effetti non lineari come le interazioni di risonanza sono inclusi nei termini sorgente.

Così come il modello Shyferm, anche Wave Watch III utilizza la griglia agli elementi finiti riportata in Figura 47 ed è inizializzato e annidato nel sistema Copernicus. In particolare, è forzato alle condizioni al contorno dal modello WAM applicato sull'intero bacino del mar Mediterraneo e forzato alla superficie dai campi di ECMWF.

Il modello Wave Watch III è stato utilizzato per riprodurre le condizioni di moto ondoso che sono intercorse tra il 2018 e il 2019 all'interno dell'area di studio. I risultati delle simulazioni sono state poi utilizzate per analizzare la distribuzione mensile e stagionale dell'altezza d'onda significativa e della direzione media nella zona di interesse.

Modello XBEACH

Il dominio del modello si estende sulla stessa area del modello SHYFEM e copre tutta l'unità fisiografica. Il dominio è suddiviso in una griglia regolare rettangolare di celle con una risoluzione orizzontale di 30 metri in entrambi le direzioni orizzontali, con l'asse delle ascisse ordinato verso costa e quello delle ordinate orientato verso la riva. La griglia presenta quindi 500 celle nella direzione trasversale alla linea di costa e 3650 nella direzione longitudinale per un totale di 1825000 celle. Il modello è stato runnato con fattore morfologico pari a 10 al fine di ridurre i costi computazionali, suddividendo comunque i vari periodi di simulazione in modo da tenere in conto che il feedback tra forzante idrodinamica e la risposta della morfologia non vari eccessivamente durante i periodi simulati.

A tal proposito, con l'intento di simulare tutto un anno, è stata condotta una caratterizzazione del moto ondoso, suddivisa per direzioni e classi di altezza significativa dell'onda, per determinare quali fossero gli eventi con maggiore frequenza e con maggiore impatto sulla distribuzione dei sedimenti. Per caratterizzare il moto ondoso, sono stati utilizzati i diagrammi polare delle onde basati sul modello CMEMS (13 anni di rianalisi 2007-2019) e WW3 qui sviluppato (anno di simulazione 2018). È stata effettuata un'analisi di sensitività al fine di valutare quali altezze d'onda e direzione producessero variazioni morfologiche, individuando i periodi autunnale e invernale come quelli più intensi.

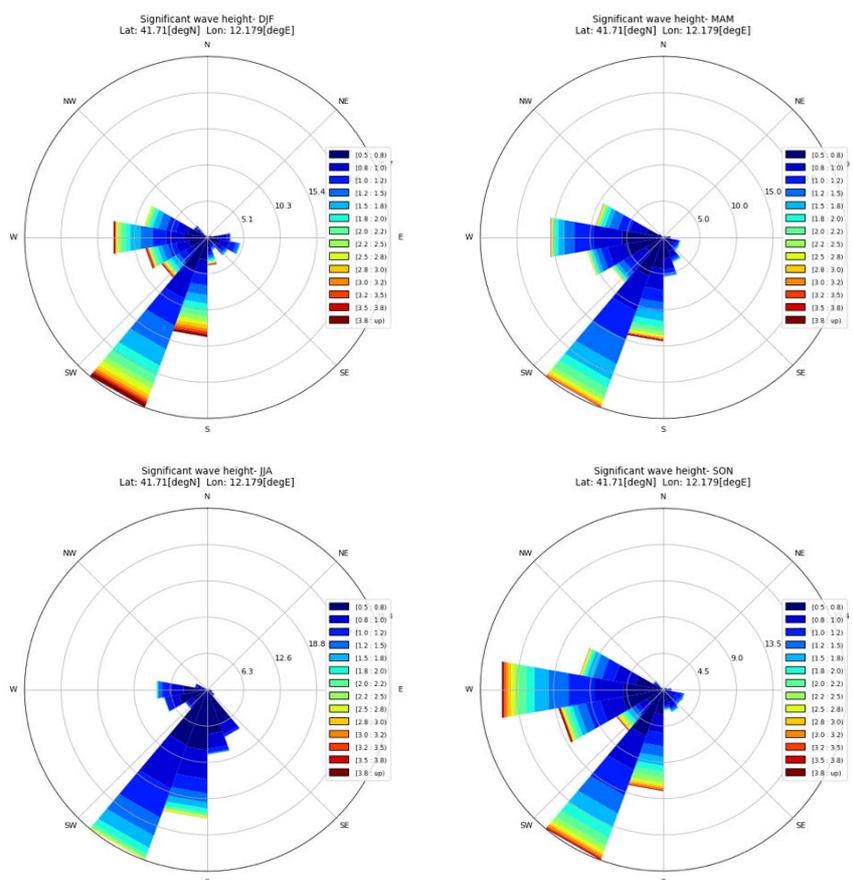


Figura 49 Diagrammi polari del clima ondoso a largo del paraggio di Fiumicino per il periodo 2007-2019 da Copernicus. In alto a destra: Inverno (DJF), in alto a sinistra Primavera (MAM), in basso a destra Estate (JJA) e in basso a sinistra Autunno (SON).

La forzante del livello marino è stata rappresentata selezionando un periodo di 6 ore e un andamento del livello semplificato ricavando statisticamente dei valori di riferimento dalle simulazioni con il modello SHYFEM per il periodo 2018-2019.

Nella griglia, tutti i nodi all'interno della linea di costa sono stati definiti come non erodibili, in modo da evitare che il modello andasse a simulare erosione sui bracci dei porti o in presenza di moli e banchine.

Per simulare l'apporto di materiale solido dal Tevere, è stato preso come riferimento un volume di sedimenti destinato al budget delle spiagge pari a 3.650.000 m³. Questo volume, suddiviso all'80% nella foce a sud e il restante nella foce a nord, è stato incluso

nell'approccio modellistico andando ad incrementare la batimetria di un'aliquota distribuita su una superficie che rappresentasse l'area di deposito dei sedimenti fluviali. Queste aree sono evidenziate in rosso in Figura 50.



Figura 50 Aree di deposito evidenziate in rosso per la foce nord e sud del Tevere

Considerate le due aree, rispettivamente di 12000 m² a nord e 150000 m² a sud, l'incremento di batimetria risulta pari a 1,5 m e 1,08 m nella foce a nord e nella foce a sud rispettivamente. Questo incremento è stato distribuito su delle aliquote costanti all'inizio di ciascuna tranche di simulazioni. Inoltre, per simulare l'apporto fluviale dell'anno precedente, nella prima simulazione è stato aggiunto un ulteriore incremento di batimetria pari al 50% del totale di un anno.

Per definire la granulometria del modello, è stato scelto un D50 pari a 0.1 mm e un D90 pari a 0.2 mm.

Modello PTM

Il PTM (“*Particle Tracking Module*”) è un modello lagrangiano di trasporto sviluppato dal CIRP (“*Coastal Inlets Research Program*”) e dal DOER (“*Dredging Operations and Environmental Research Program*”) ad opera della “*U.S. Army Engineer Research and Development Center*”.

L'approccio lagrangiano implica la modellazione attraverso la discretizzazione del sedimento in un numero finito di particelle che seguono il trasporto indotto dal campo idrodinamico di base. L'approccio lagrangiano è particolarmente indicato per la simulazione del trasporto a partire da una sorgente definita; ogni particella, nel modello, rappresenta una determinata massa di sedimento avente una densità e range granulometrico definito dal d50 (espressa in mm) e dalla deviazione standard (espressa in unità phi).

Il campo idrodinamico è il risultato combinato della forzante vento, onda e variazioni di densità dell'acqua di mare e viene inserita in input nel modello PTM utilizzando i risultati di modelli idrodinamici e di moto ondoso.

Il PTM sfrutta un sistema di coordinate cartesiane per calcolare:

- grandezze lagrangiane come la traiettoria delle particelle, il loro stato (se in sospensione o sul fondo), la mobilità, ecc.;
- grandezze euleriane come la morfologia sommersa, il rateo di trasporto del sedimento, lo stress al fondo, ecc.;

Tali risultati possono essere ottenuti scegliendo tra tre differenti tipi di approcci: 2D, Q3D e 3D.

Nel caso di studio, il PTM è stato applicato nel dominio di calcolo utilizzato dal modello Shyftem in quanto considera il campo idrodinamico calcolato da quest'ultimo nel periodo 2018-2019. . La corrente indotta dalle onde viene invece calcolata dal modello STWAVE applicato lungo il tratto di costa compreso tra Capo Linaro e Capo d'Anzio che utilizza una griglia di calcolo regolare (differenze finite) con una risoluzione costante di 50 m. Gli input del modello vengono forniti con cadenza

giornaliera utilizzando i risultati del modello Wave Watch III in un punto del boundary esterno di STWAVE. I risultati di STWAVE vengono poi passati al modello PTM sotto forma di indice di frangimento (breaker index) e parametri rappresentativi del moto ondoso (altezza d'onda significativa, direzione media e periodo di picco).

Le attività di dragaggio sono state riprodotte utilizzando una sorgente di sedimento lineare in corrispondenza delle zone in cui verrà realizzata la Diga di Sopraflutto e la Banchina Sud, la Diga di Sottoflutto e la Banchina Nord ed in cui sarà approfondito il fondale del bacino portuale alla quota di progetto – 6.00 m s.l.m.m (Figura 51).



Figura 51 Il poligono più grande in trasparenza rappresenta Diga di Sopraflutto e la Banchina Sud mentre quello più piccolo in alto indica la Diga di Sottoflutto e la Banchina Nord. Tra le due banchine sarà realizzato l'approfondimento del fondale del bacino portuale alla quota di progetto – 6.00 m s.l.m.m.

L'approfondimento del fondale del bacino portuale alla quota di progetto – 6.00 m s.l.m.m. comporterà la movimentazione di circa 37870 m³ di sedimenti marini. L'escavo sotto le opere foranee e dei banchinamenti (della profondità di 2 m dal fondale) comporterà la rimozione dei seguenti quantitativi di materiali:

- 60001 m³ di sedimenti marini, dalla porzione di fondale destinata alla realizzazione della Diga di Sopraflutto e della Banchina Sud;
- 28070 m³ di sedimenti marini dalla porzione di fondale presso cui saranno realizzati la Diga di Sottoflutto e la Banchina Nord.

La frazione di sedimento che è stata simulata dal modello PTM è quella inferiore a 74 µm che viene utilizzata nelle formulazioni su base tabellare (Metodo TGU, Nakai (1978); Metodo Resuspension Factor, Hayes e Wu (2001)) per calcolare la massa di sedimento risospeso durante le operazioni di dragaggio. Tali formulazioni sono indicate per la stima del termine sorgente nel manuale ISPRA "La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere". Per calcolare la quantità di tale frazione all'interno del materiale che sarà movimentato dalle attività di dragaggio sono stati utilizzati i dati granulometrici dei rilievi effettuati tra il 2013 e il 2014 per la caratterizzazione dei fondali nell'area interessata dalla realizzazione delle opere. Dai risultati emerge che la frazione fine dragata per la realizzazione della Diga di Sopraflutto e la Banchina Sud è di circa 9120 m³, quella per la costruzione della Diga di Sottoflutto e la Banchina Nord ammonta a 3860 m³, mentre l'approfondimento a - 6.00 m s.l.m.m comporterà la risospensione di 5300 m³ di materiale fine. Per riprodurre la movimentazione di un ampio intervallo di classi granulometriche della frazione fine è stato considerato un diametro mediano di 25 µm e una deviazione standard di 1 phi. Nelle simulazioni del modello PTM, è stata inoltre ipotizzata una densità del sedimento pari a 2650 kg/m³. La quantità effettivamente mobilitata dal fondo e la durata del rilascio di sedimento dalle due fonti è stata stimata tenendo conto dell'utilizzo della draga idraulica (così come comunicato per le vie brevi dal Committente) che produce un rilascio del 5% del materiale fine dragato (Pennekamp et al., 1996; John et al., 2000) ed ha un tasso di produttività pari a 9000 m³/giorno (Feola et al., 2016). Di conseguenza il dragaggio per la realizzazione della nuova opera avrà una durata complessiva di circa 14 giorni. Per definire la dispersione del materiale dragato proveniente dalle sorgenti lineari, che riproducono le tre fasi del dragaggio, sono state considerate complessivamente 7168 particelle aventi ciascuna una

massa pari a 86.74 kg. Dato che su comunicazione del Committente le operazioni di dragaggio sono state programmate tra l'autunno del 2021 e l'inverno 2022, la dispersione del sedimento dragato è stata analizzata in due distinti scenari che riproducono le condizioni meteomarine un mese autunnale e di uno invernale nel periodo 2018-2019.

Al fine di discriminare gli effetti prodotti dalle attività di dragaggio rispetto a quelle provenienti da altre sorgenti, sono state effettuate anche simulazioni in cui viene considerato il rilascio di sedimento dalle foci di Fiumara Piccola e Fiumara Grande in quanto apportano una grande quantità di materiale fine e si trovano nelle vicinanze dell'area in cui verrà realizzata la nuova opera. Per confrontare i risultati con quelli prodotti dalle simulazioni del dragaggio, sono stati riprodotti gli stessi scenari meteomarini in cui è stato considerato il rilascio di sedimento con le stesse caratteristiche (classi granulometriche e densità) di quello dragato. La quantità di sedimento fine sversata in prossimità delle due foci è stata calcolata con la formulazione di Van Rijn a partire dai dati orari di portata liquida messi a disposizione dal Servizio Idrografico della Protezione Civile della Regione Lazio per il periodo 2018-2019. In media la quantità di materiale fine sversato nel periodo autunnale è di circa 110 ton/giorno, mentre in inverno è stato considerato uno scarico di circa 215 ton/giorno. Così come per la portata liquida, è stato assunto che l'80 % del materiale fine viene sversato dalla foce di Fiumara Grande mentre il 20 % dalla foce di Fiumara Piccola. Il numero delle particelle e la massa associata a ciascuna di esse è la stessa di quella utilizzata nelle simulazioni che riproducono il dragaggio.

4.7.3 Validazione e risultati dei modelli numerici

Modello Shyferm

I risultati del modello Shyferm sono stati inizialmente confrontati con i risultati del modello MFS per verificare che le modalità con cui vengono fornite le condizioni

iniziali e al contorno siano corrette. Per effettuare il confronto è stato considerato un punto a largo di Fiumicino, denominato OP, dove sono stati costruiti diagrammi polari che definiscono la direzione e l'intensità della corrente superficiale su base annuale e stagionale.



Figura 52 punto utilizzato per confronto con i risultati del modello MFS

In figura 52 si può vedere come la direzione della corrente marina predominante dell'area di studio sia da Sud-Est verso Nord-Ovest e che il modello Shyfer, per entrambe le configurazioni implementate, fornisce risultati molto simili ad MFS sia in termini di intensità che direzione.

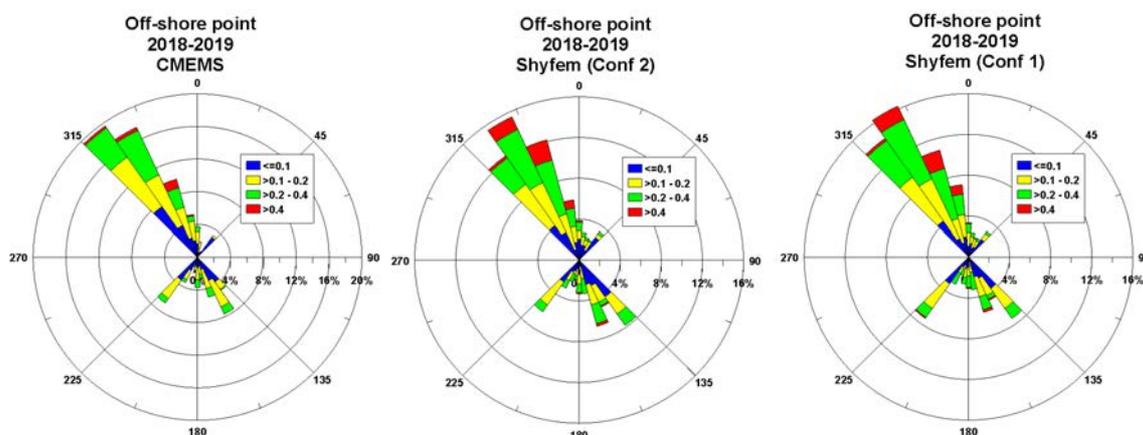


Figura 53 diagrammi polari delle correnti marine calcolate con il modello MFS e con le due diverse configurazioni del modello Shyferm

Al fine di riprodurre l'effetto del fiume Tevere sulla distribuzione di salinità e temperatura all'interno dell'area di studio, sono state utilizzate due diverse configurazioni della griglia di calcolo del modello Shyferm che prevedono l'input fluviale nella zona a monte della ramificazione (immagine a sinistra di Fig. 54) e direttamente in corrispondenza delle foci di Fiumara Piccola e Fiumara Grande (immagine a destra di Fig. 54). In quest'ultimo caso i dati di portata liquida sono stati ripartiti inserendo il 20 % del valore alla foce di Fiumara Piccola e l'80% in prossimità di Fiumara Grande (Mikhailova et al. 1999).

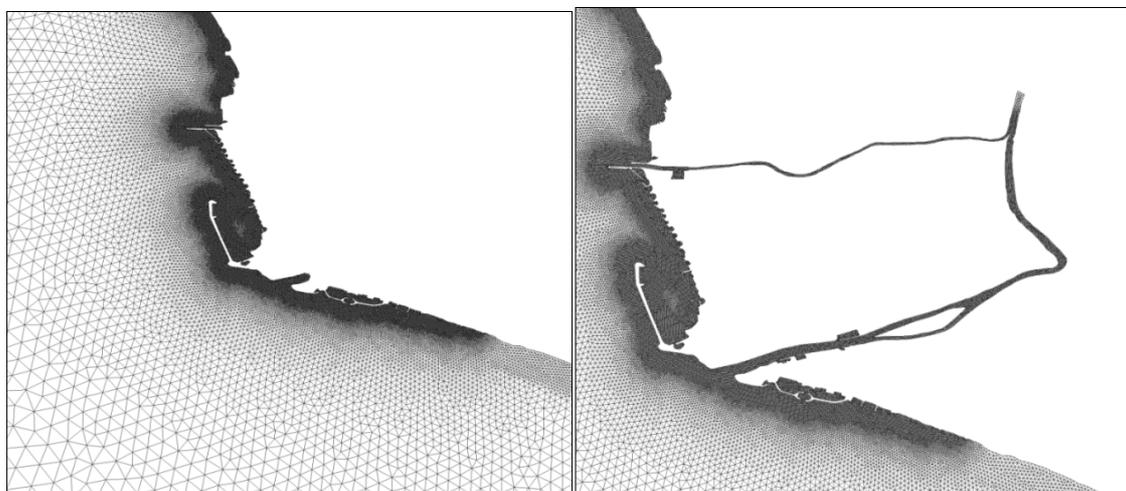


Figura 54 configurazioni della griglia di calcolo del modello Shyftem nella zona della foce del Tevere. A sinistra l'input del fiume viene ripartito tra le foci di Fiumara Piccola e Fiumara Grande (CONF1), a destra i dati di portata vengono immessi a monte della ramificazione (CONF2)

Per analizzare quali delle due configurazioni riproduce meglio le variazioni di temperatura e salinità, sono stati utilizzati 30 profili effettuati tra i mesi di Giugno e Agosto del 2019 nel punto FC03 posizionato a circa 500 m a nord della foce di Fiumara Piccola (Figura 55). Tali profili sono stati effettuati con la sonda multiparametrica Idronaut fino ad una profondità di circa 5 m.

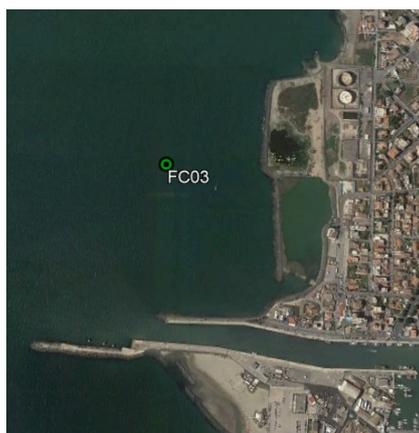


Figura 55 Punto in cui sono stati effettuati i campionamenti con la sonda multiparametrica nel periodo di Giugno-Agosto 2019

I risultati dimostrano che la CONF2 riesce a riprodurre con maggiore accuratezza le variazioni di temperatura e salinità rispetto alla CONF1 (Figure 56 e 57) in quanto i valori di BIAS e RMSE sono più vicino allo 0.

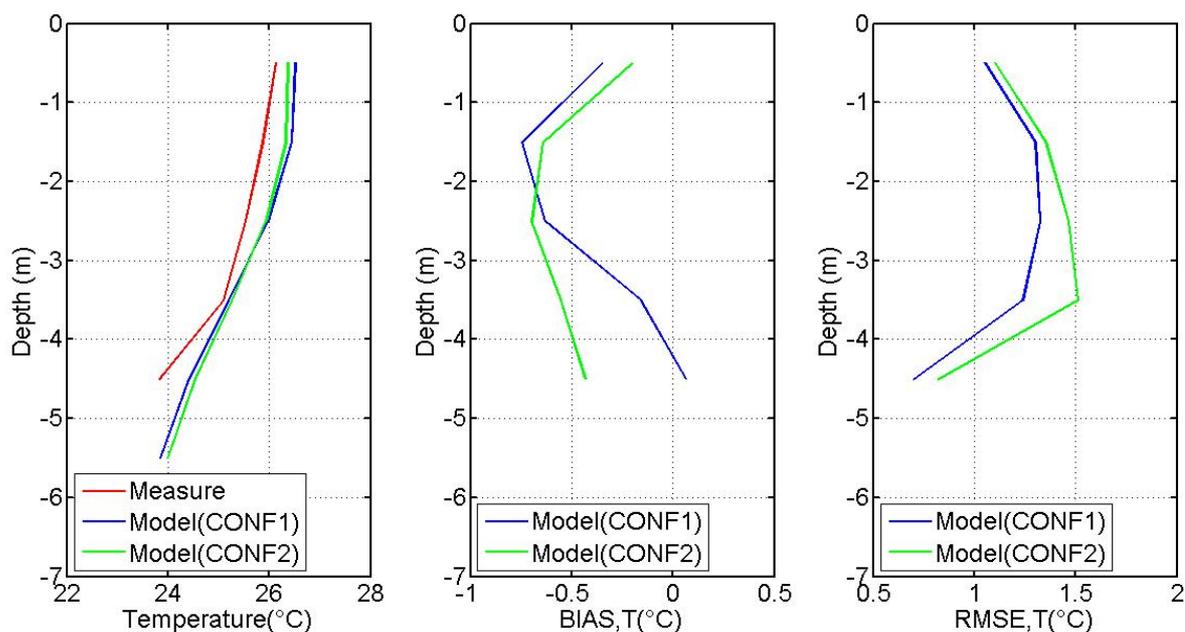


Figura 56 profilo di temperatura media misurata e modellata (grafico a sinistra), profili di BIAS (figura centrale) e RMSE (figura a destra) ottenuti confrontando la temperatura calcolata dalla CONF1 e CONF2 con quella misurata.

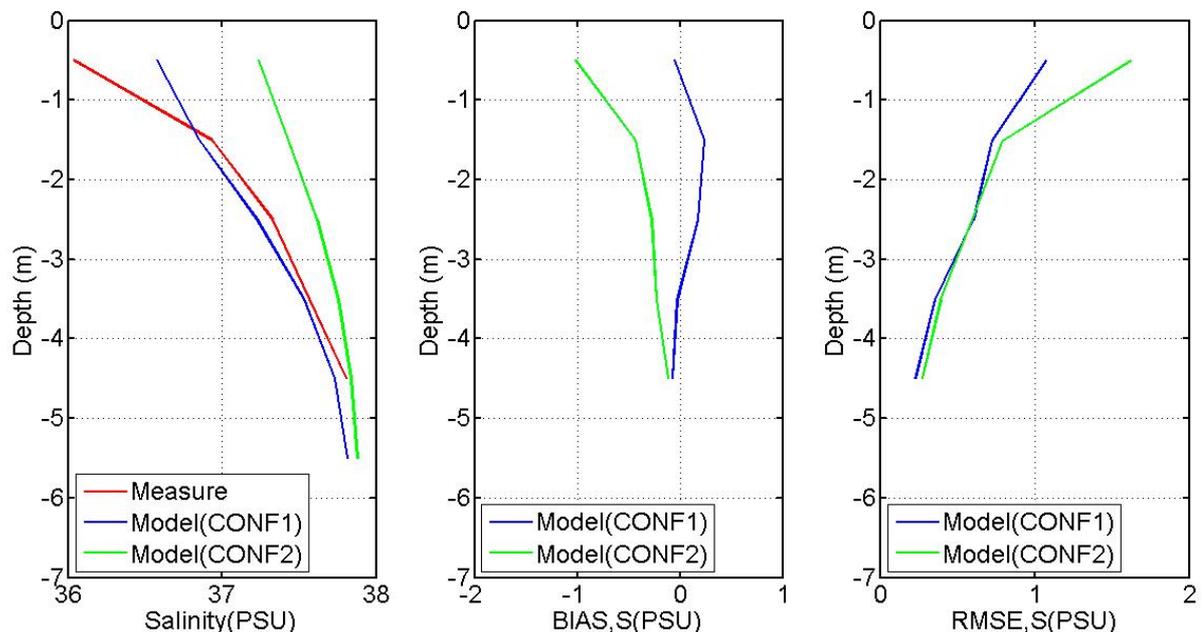


Figura 57 profilo di salinità media misurata e modellata (grafico a sinistra), profili di BIAS (figura centrale) e RMSE (figura a destra) ottenuti confrontando la salinità calcolata dalla CONF1 e CONF2 con quella misurata

Alla luce dei risultati ottenuti in questa fase del progetto è stata scelta la CONF2 quale quella più adatta per riprodurre l'effetto del fiume Tevere all'interno dell'area di studio. Tale configurazione verrà quindi di seguito utilizzata per la validazione del modello Shyft e, successivamente, per produrre i primi risultati del campo idrodinamico tridimensionale che verrà fornito in input al modello morfodinamico XBeach e di trasporto del sedimento dragato PTM.

In prima analisi per valutare l'affidabilità del modello sull'intera unità fisiografica è stata confrontata la temperatura superficiale calcolata dal modello Shyft con quella rilevata da satellite nel periodo compreso tra il 2018 e il 2019. Il risultato evidenzia che esiste una stretta relazione tra i dati satellitari SST prodotti da Copernicus (SST_MED_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_004) e del modello nel periodo invernale in cui la temperatura dell'acqua superficiale è molto bassa, mentre c'è una maggiore discrepanza durante il resto dell'anno ed in particolare nel periodo estivo (Figura 58).

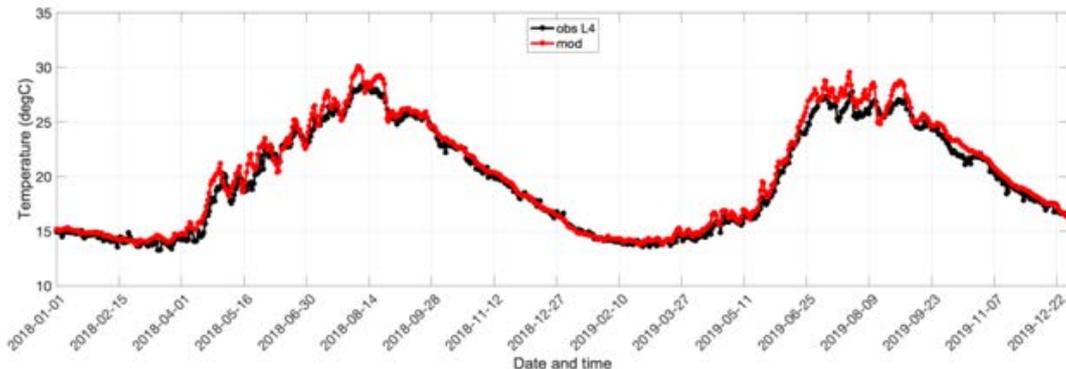


Figura 58 confronto tra la temperatura misurata da satellite (nero) e quella calcolata da Shyferm (rosso)

La performance del modello è stata esaminata nel dettaglio confrontando l'andamento verticale di temperatura e salinità con quello acquisito nel corso di due campagne di misura in cui è stata valutata la distribuzione delle due variabili in regime di stratificazione ed in regime di mescolamento. La descrizione del piano di campionamento e della strumentazione utilizzata sono riportati nel paragrafo 4.3. Anche in questo caso per valutare l'attendibilità del modello Shyferm nel riprodurre la variazione verticale di temperatura e salinità sono stati utilizzati i valori di BIAS e RMSE. In regime di stratificazione c'è una maggiore discrepanza negli strati superficiali ed in prossimità del termoclino mentre in profondità la differenza tra i dati calcolati e quelli misurati diminuisce (soprattutto per quanto riguarda la temperatura). In condizioni di mescolamento le discrepanze nei valori di temperatura e salinità sono più alte di quelli registrati in regime di stratificazione. Le maggiori differenze sono presenti negli strati superficiali mentre nella parte profonda il modello riproduce meglio la dinamica delle masse d'acqua (soprattutto per quanto riguarda la salinità).

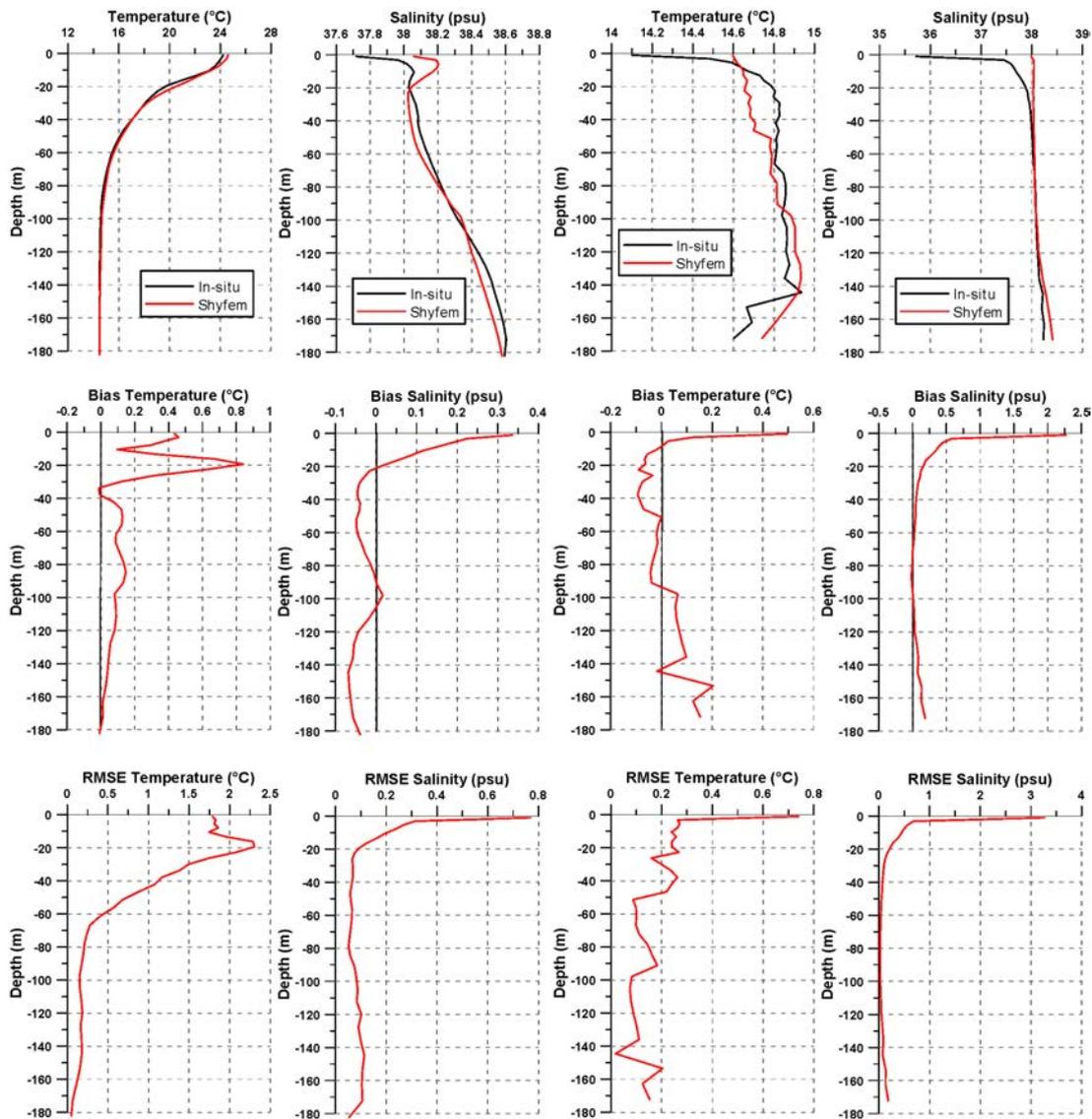


Figura 59 nei grafici a sinistra vengono riportati i risultati della validazione in regime di stratificazione (profili medi, BIAS e RMSE per temperatura e salinità), mentre a destra sono riportati i risultati in condizioni di mescolamento (profili medi, BIAS e RMSE per temperatura e salinità).

Per valutare l'attendibilità del modello Shyferm nel riprodurre il campo di velocità delle correnti marine superficiali sono stati utilizzati i dati raccolti da 5 boe lagrangiane lanciate tra il 16 Febbraio e il 5 Marzo del 2021.

I risultati preliminari del confronto con le traiettorie calcolate utilizzando le correnti superficiali del modello mettono in evidenza come ci sia una discordanza già in prossimità del punto di rilascio. Infatti, il modello produce uno spostamento della corrente verso nord mentre i drifter, prima di andare in questa direzione, si dirigono nella parte a largo in quanto risentono della spinta dovuta al flusso del Tevere.

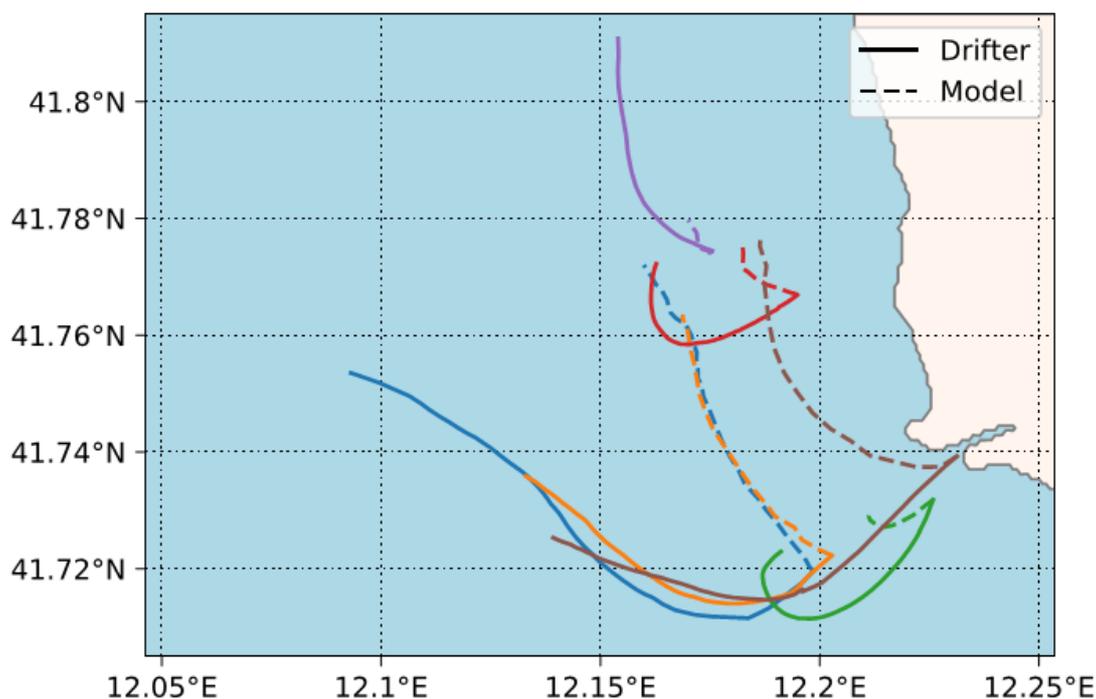


Figura 60 comparazione tra le traiettorie dei drifter (linea piena) e quelle calcolate dal modello (linea tratteggiata).

Le cause delle discrepanze tra dati modellati e quelli misurati saranno analizzate con maggior dettaglio nelle successive fasi progettuali in cui è previsto l'acquisizione di un maggior numero di dati attraverso l'estensione dei piani di campionamento previsti nella Fase 0, il lancio di altre boe lagrangiane e l'utilizzo di stazioni fisse di monitoraggio nella zona di Fiumicino per la misura della corrente marina. Per limitare tale differenza si provvederà a modificare alcune caratteristiche del modello come la geometria della

griglia, la ricostruzione nell'alveo fluviale, i valori delle portate fluviali nelle due foci, schemi numerici e parametri del modello.

I risultati delle simulazioni relative al periodo 2018 e 2019 sono stati analizzati sull'intera unità fisiografica al fine di determinare la media mensile e quella stagionale della temperatura, salinità e velocità delle correnti marine. Di seguito vengono riportate le mappe superficiali che definiscono l'andamento delle variabili oggetto di studio nel corso delle quattro stagioni.

Le stagioni sono definite secondo convenzione oceanografica, riportata qui di seguito:

- Inverno (DJF): mesi di Dicembre, Gennaio e Febbraio
- Primavera (MAM): mesi di Marzo, Aprile e Maggio
- Estate (JJA): mesi di Giugno, Luglio e Agosto
- Autunno (SON): mesi di Settembre, Ottobre e Novembre

Per quanto riguarda la temperatura, nei mesi invernali il modello evidenzia un gradiente ben definito tra le acque costiere più fredde e quelle di largo più calde; mentre in corrispondenza delle foci fluviali la temperatura superficiale del mare è di pochi gradi inferiore a quella dell'ambiente circostante. Il gradiente costa largo tende diminuire di intensità nella stagione primaverile con valori di temperatura che tendono ad essere leggermente più elevati nella parte a nord nei mesi di Aprile e Maggio. In estate l'acqua si riscalda raggiungendo i massimi valori annuali pari a circa 28 °C nel mese di Agosto. Si instaura di nuovo un gradiente costa-largo in cui con presenza di acqua più fredda nell'intervallo di profondità tra i -2 e i -20 m. La temperatura dell'acqua superficiale rimane elevata anche nel periodo autunnale con variazioni costa largo più contenute rispetto al periodo precedente.

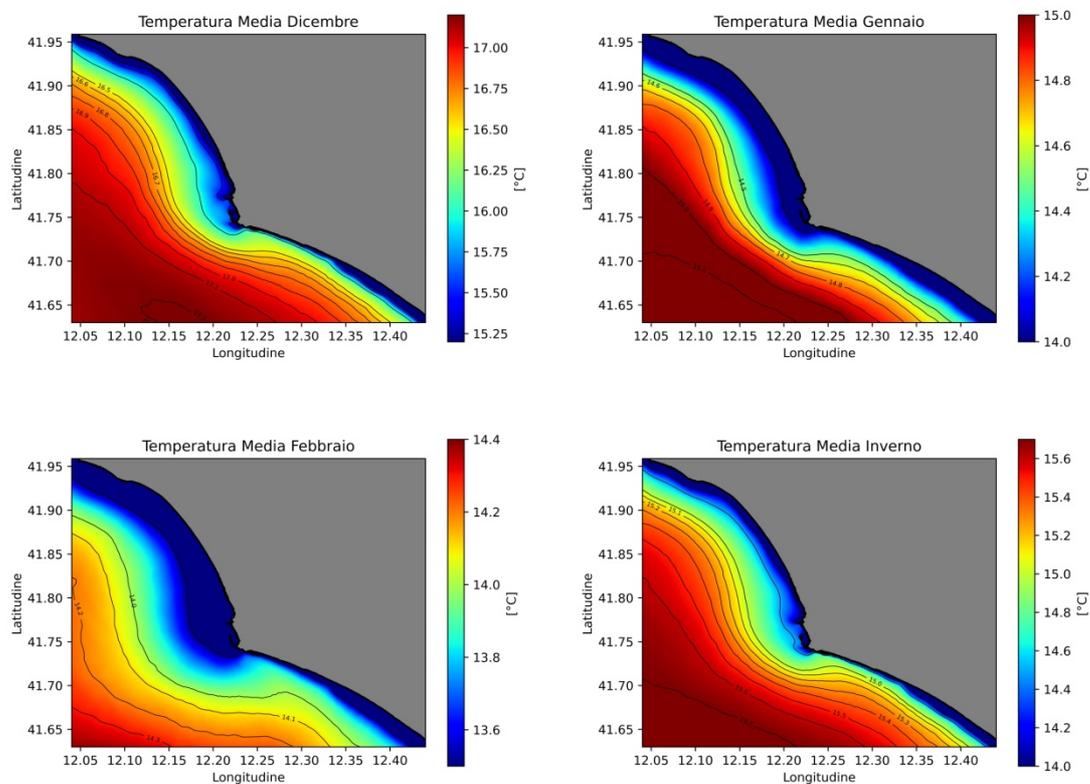


Figura 61 Distribuzione di temperatura nei mesi invernali

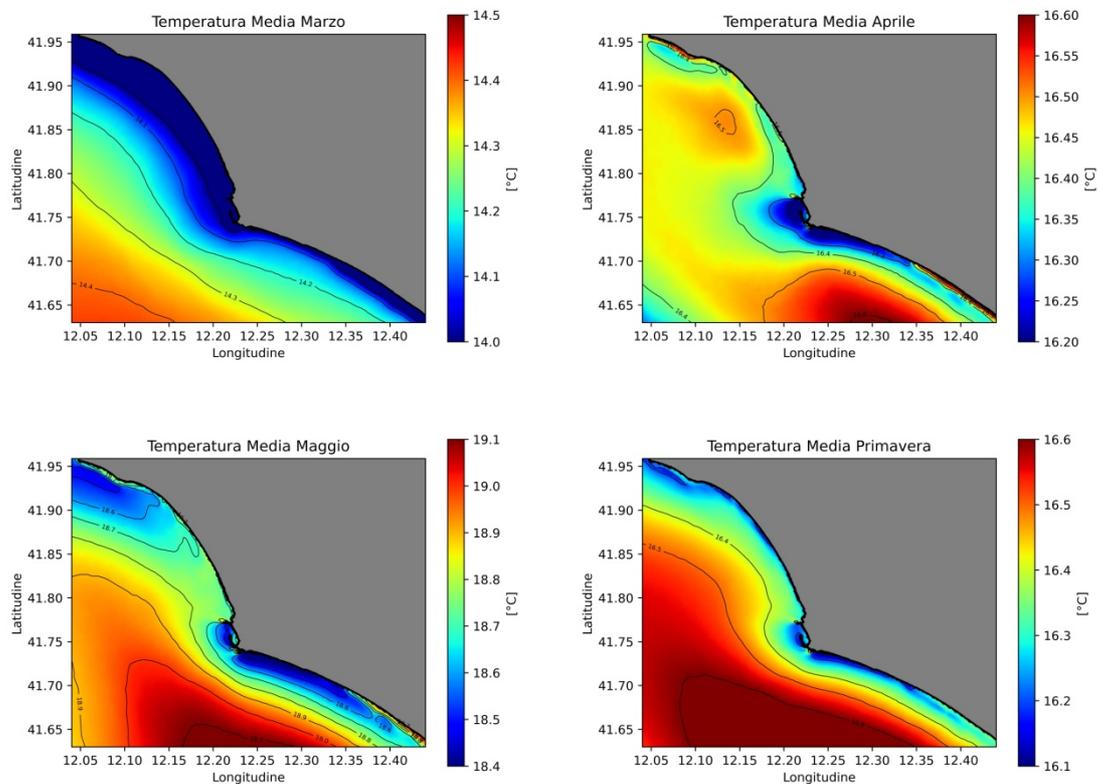


Figura 62 Distribuzione di temperatura nei mesi primaverili

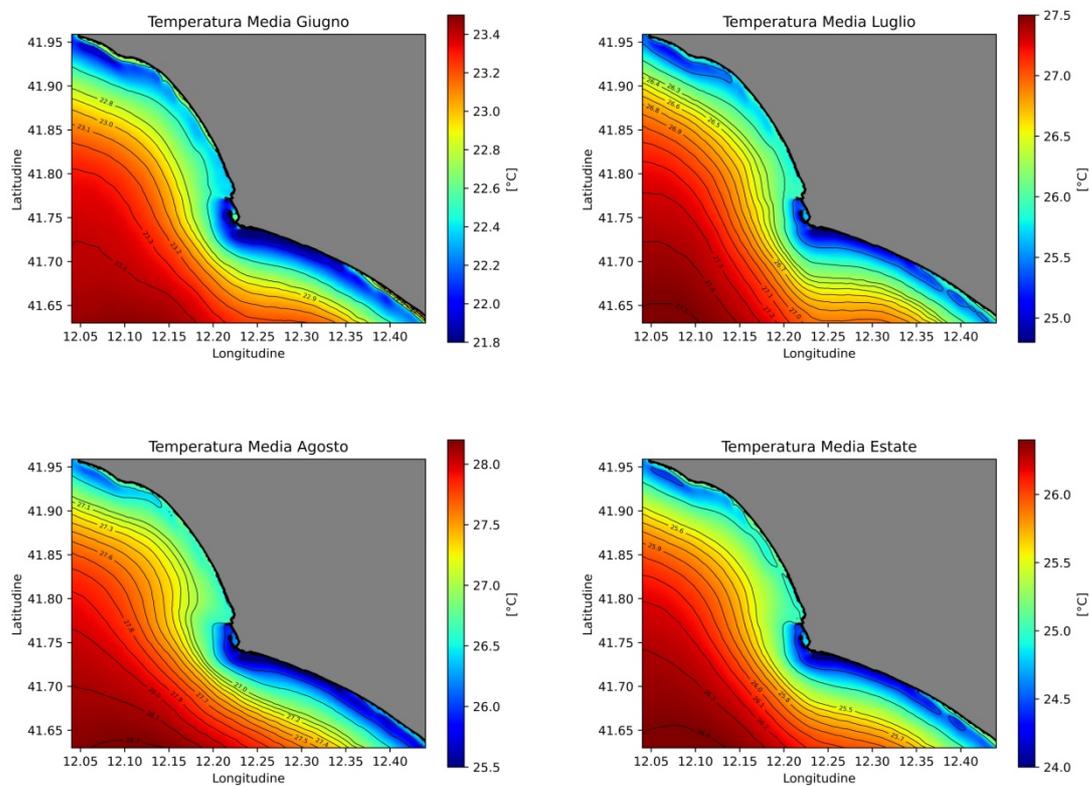


Figura 63 Distribuzione di temperatura nei mesi estivi

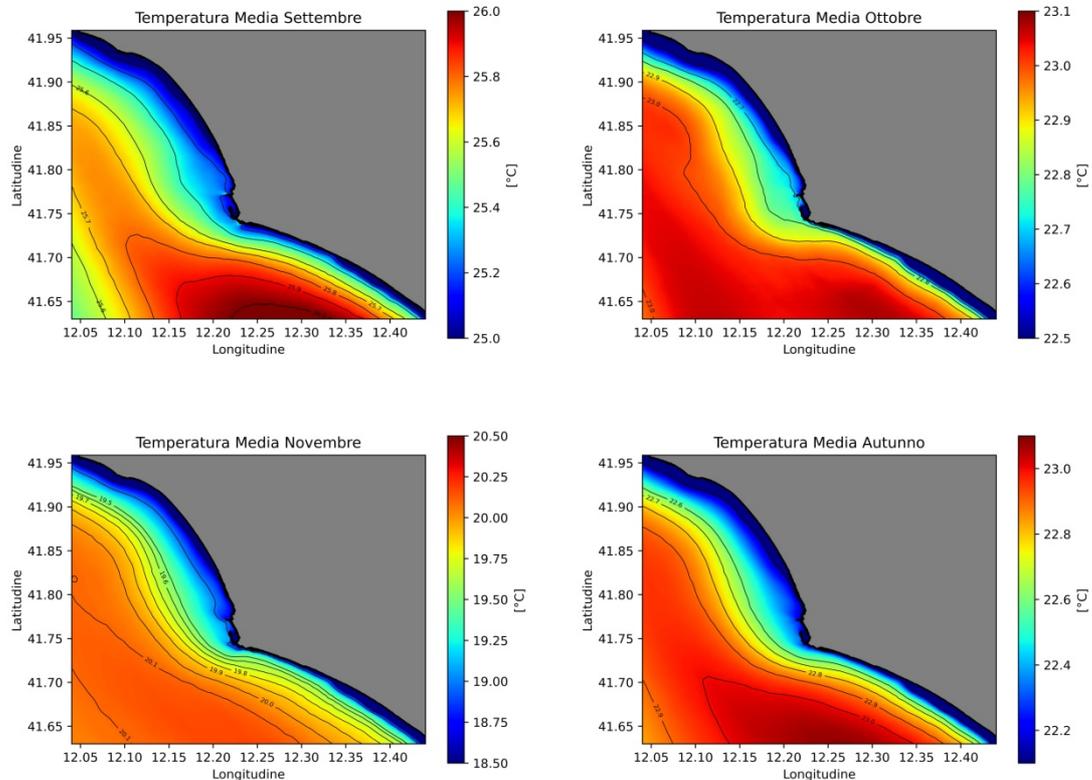


Figura 64 Distribuzione di temperatura nei mesi autunnali

Così come per la temperatura anche la salinità in inverno mostra un gradiente costa largo con acque più salate nella zona off-shore e più dolci in prossimità della linea di riva. Nel periodo invernale l'effetto dei corsi d'acqua è visibile nella parte a nord con un'estensione massima nel mese di Dicembre. L'estensione della plume aumenta nel periodo primaverile andando ad interessare la parte a nord dell'area di studio. Nella stagione estiva l'effetto del Tevere rimane confinato nell'intorno delle due foci, mentre nel periodo autunnale la plume interessa la zona costiera a nord dell'area di studio fino all'altezza delle secche di Macchiatonda.

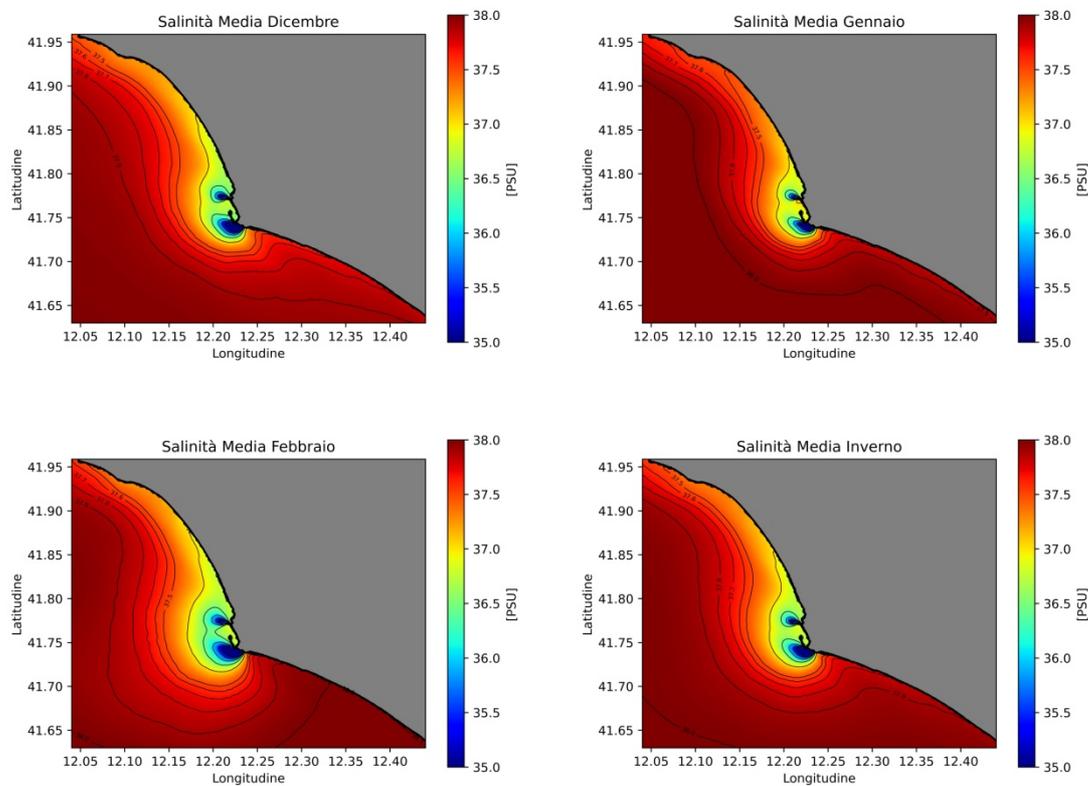


Figura 65 Distribuzione di salinità nei mesi invernali

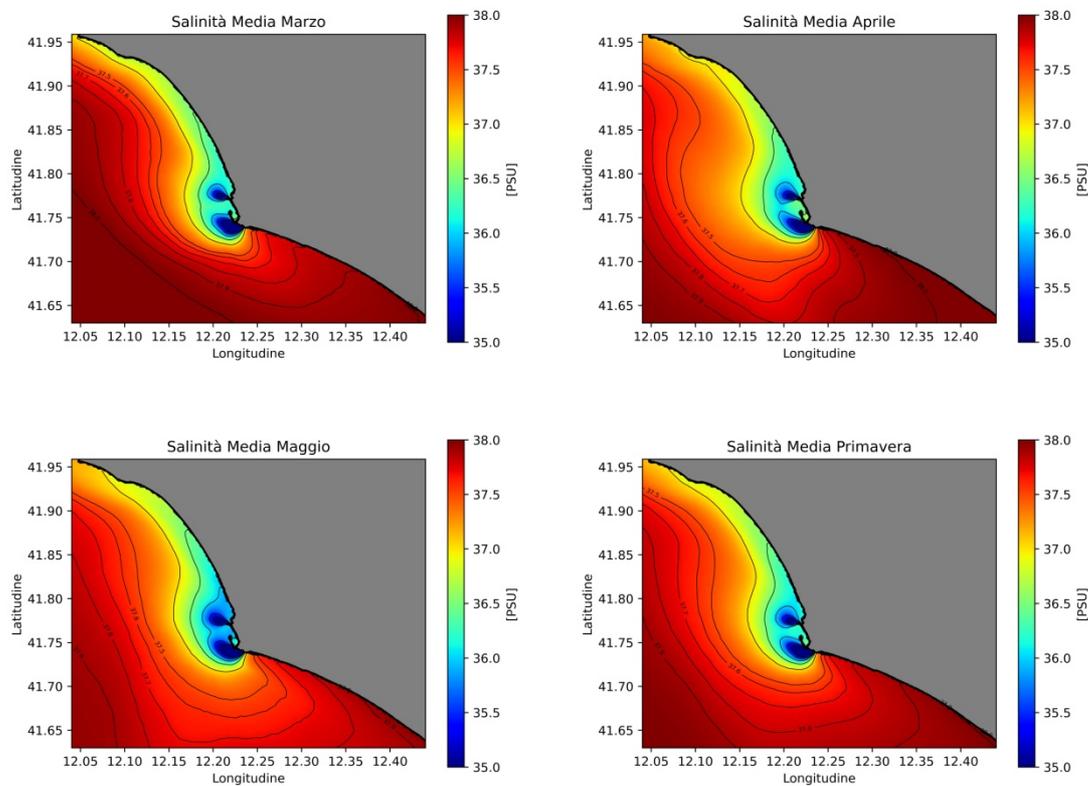


Figura 66 Distribuzione di salinità nei mesi primaverili

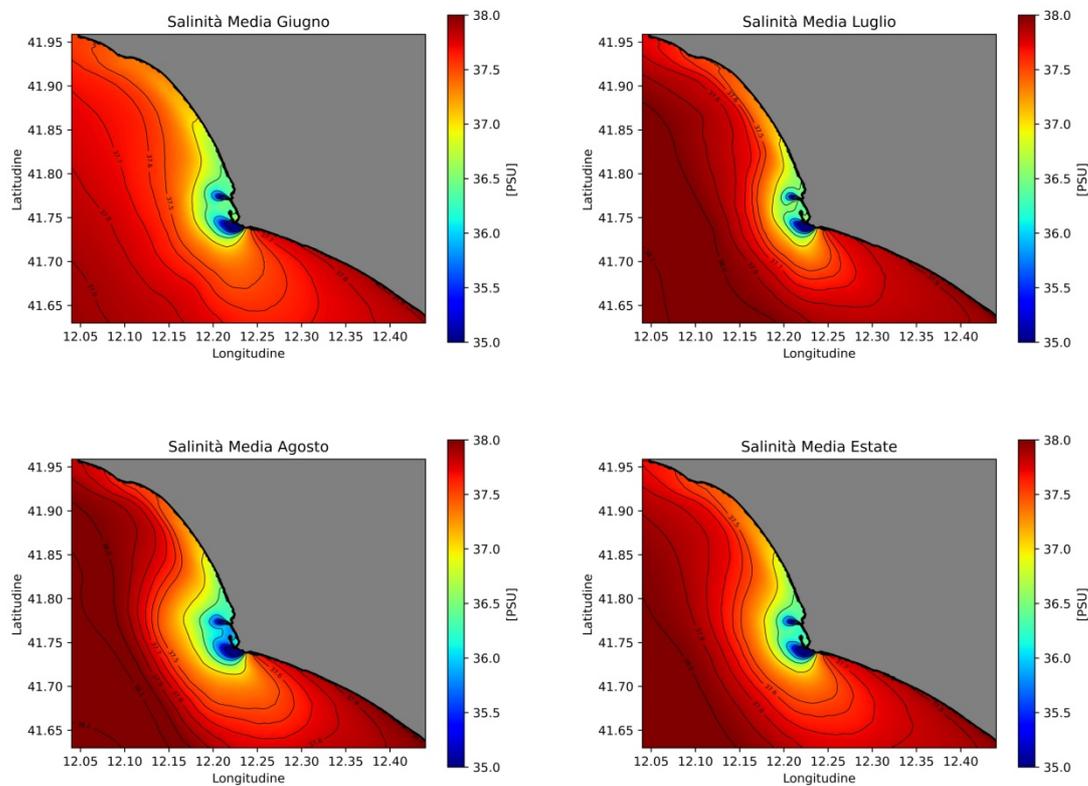


Figura 67 Distribuzione di salinità nei mesi estivi

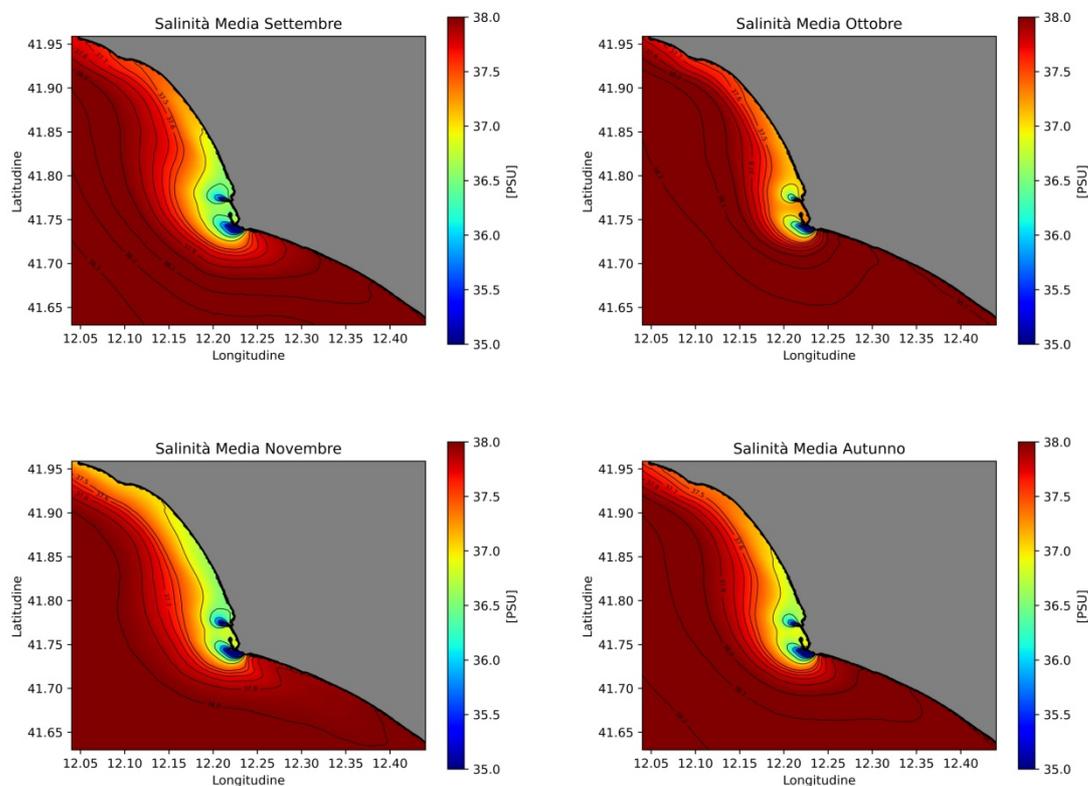


Figura 68 Distribuzione di salinità nei mesi autunnali

Nel periodo invernale la corrente marina è diretta verso nord con una maggiore intensificazione a largo, soprattutto nel mese di Dicembre, ed in corrispondenza dei due corsi d'acqua (Fiumara Piccola e Fiumara Grande). Fa eccezione Gennaio in cui la corrente risulta parzialmente diretta verso sud con la presenza di un vortice anticiclonico nella parte costiera a nord dell'area di studio. In primavera la corrente è diretta verso nord con valori di velocità più elevati in corrispondenza delle foci fluviali e nella parte costiera settentrionale dell'area di studio (soprattutto nel mese di Marzo). La dinamica delle masse d'acqua superficiali nel periodo estivo è caratterizzata dalla presenza di vortici costieri nella parte a nord, mentre nella zona a largo le correnti marine sono dirette verso sud. In autunno si verifica un cambiamento della direzione delle velocità,

da sud a nord, ed un aumento dell'intensità che viene registrata principalmente nel mese di Novembre.

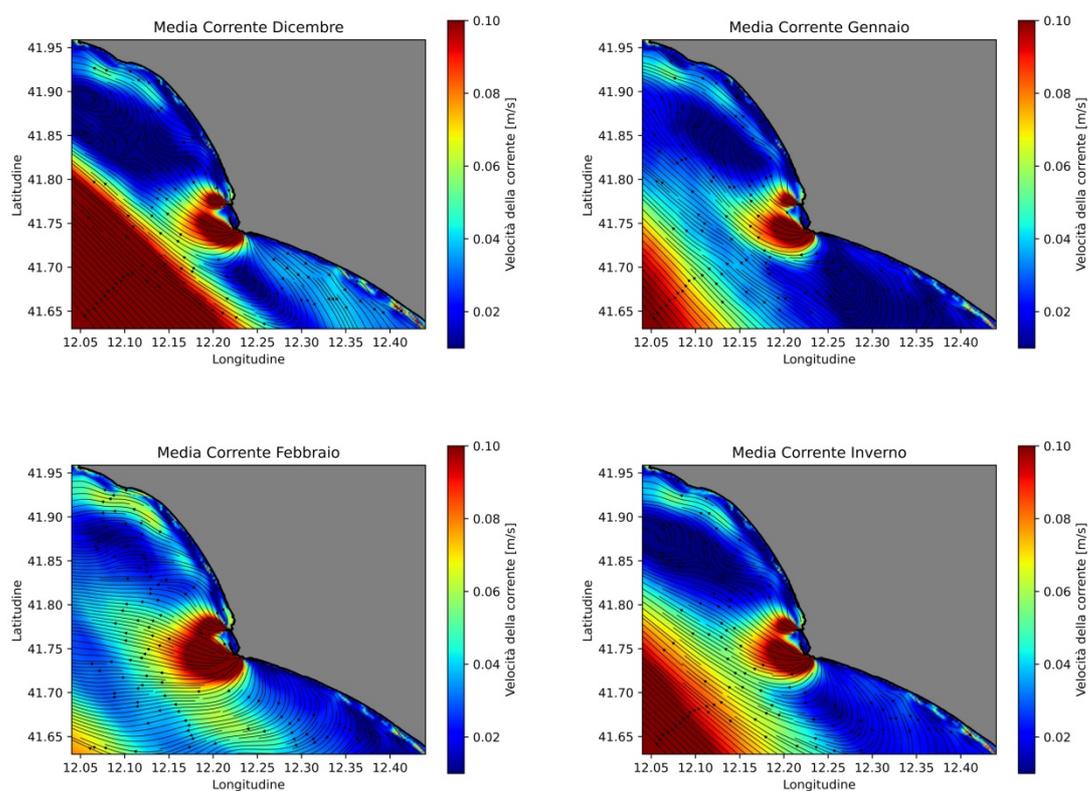


Figura 69 Distribuzione di corrente marina nei mesi invernali

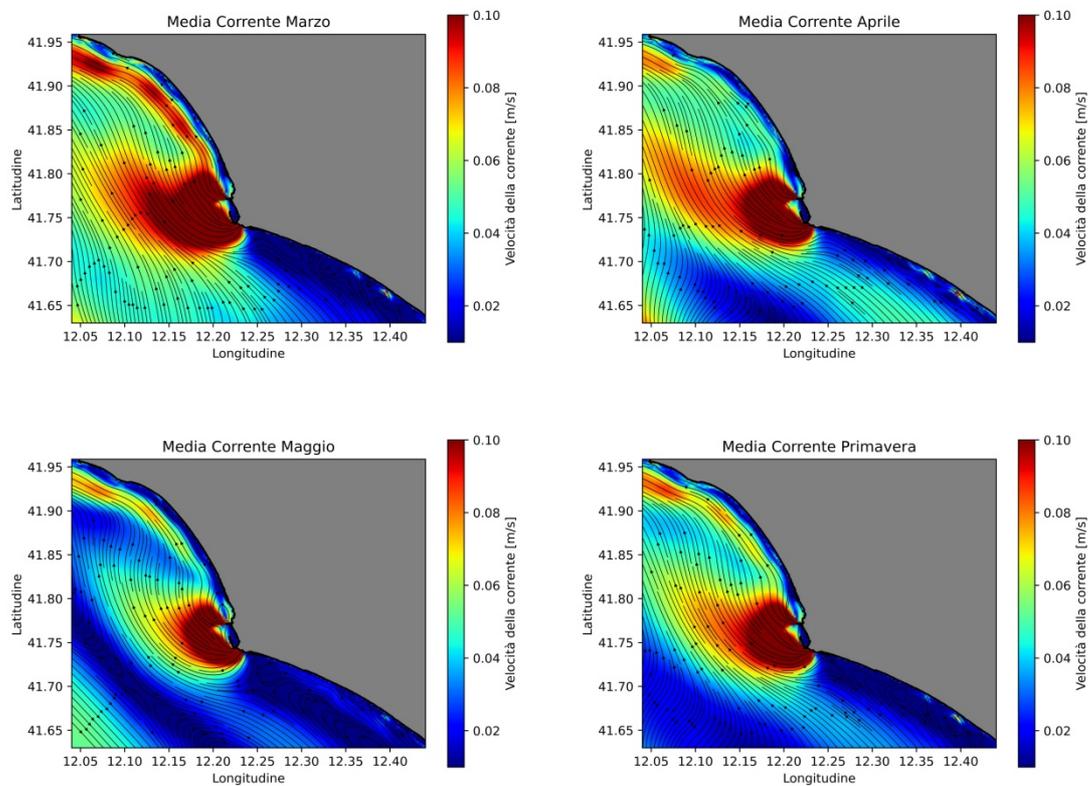


Figura 70 Distribuzione di corrente marina nei mesi primaverili

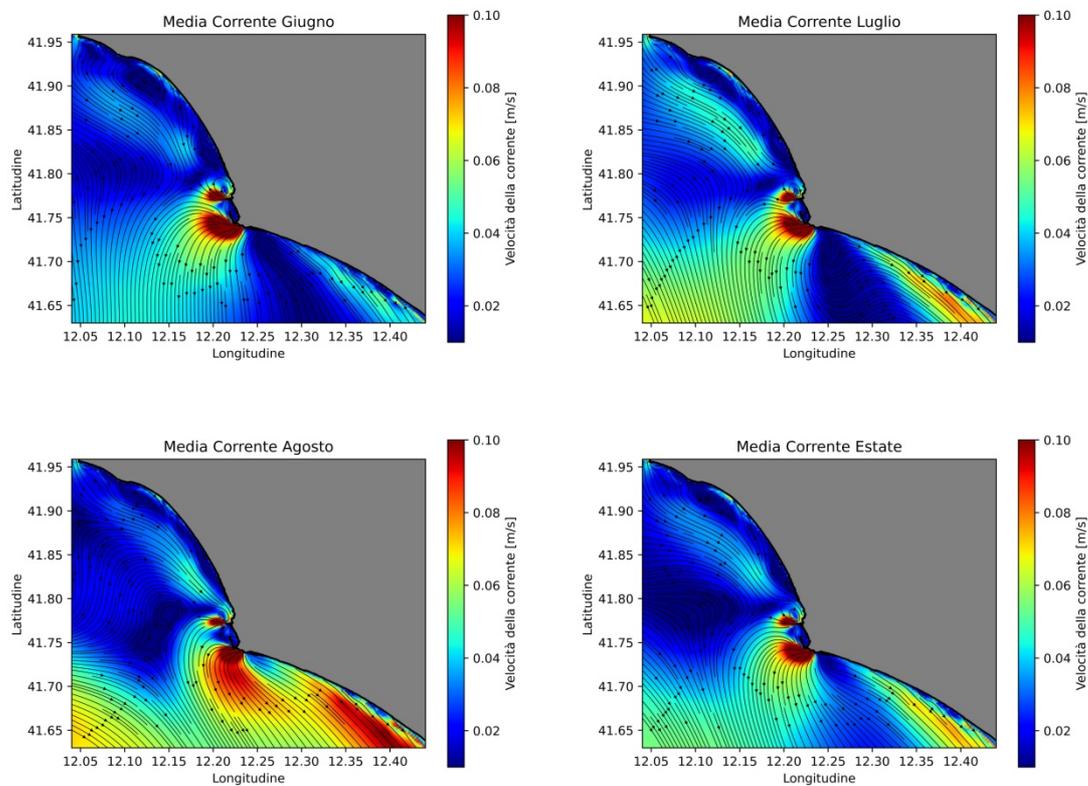


Figura 71 Distribuzione di corrente marina nei mesi estivi

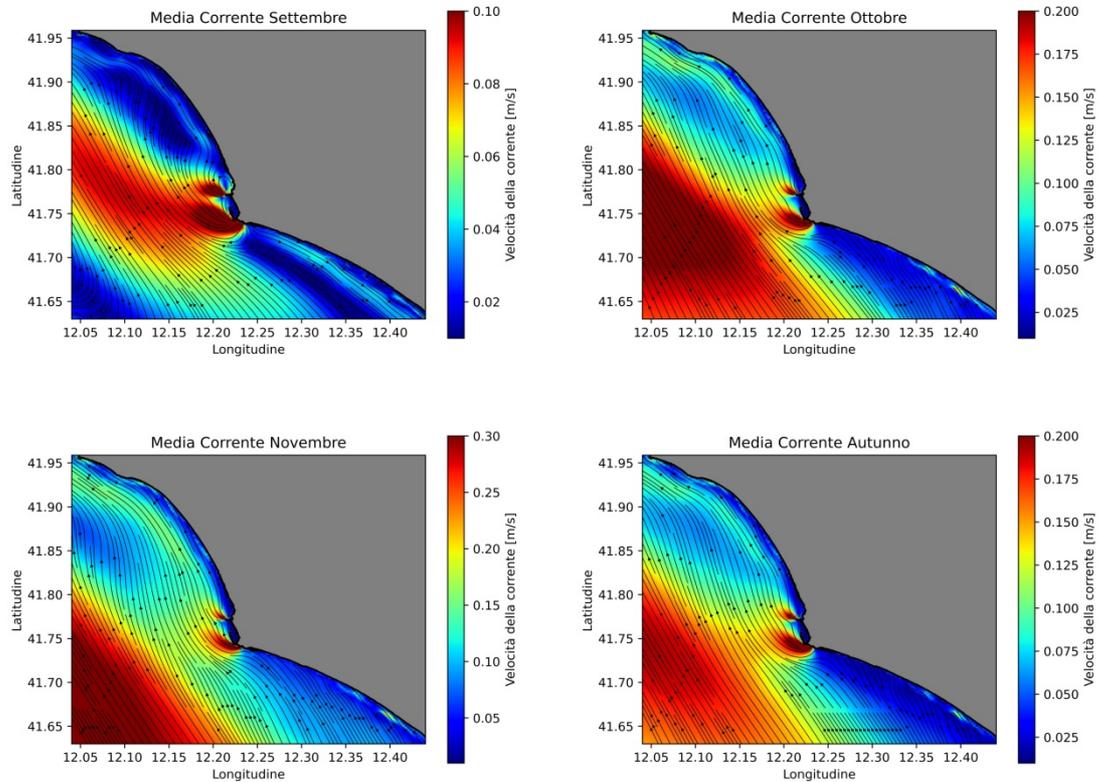


Figura 72 Distribuzione di corrente marina nei mesi autunnali

Per analizzare gli effetti indotti dalla presenza delle nuove opere portuali sulla distribuzione di temperatura, salinità e correnti marine, vengono di seguito riportate le mappe superficiali delle suddette variabili relativamente al periodo invernale.

L'antemurale esterno del nuovo porto produce uno spostamento della plume di Fiumara Piccola verso il largo con un aumento del gradiente di temperatura dalla costa verso il largo ed una diminuzione dei valori di salinità della zona costiera.

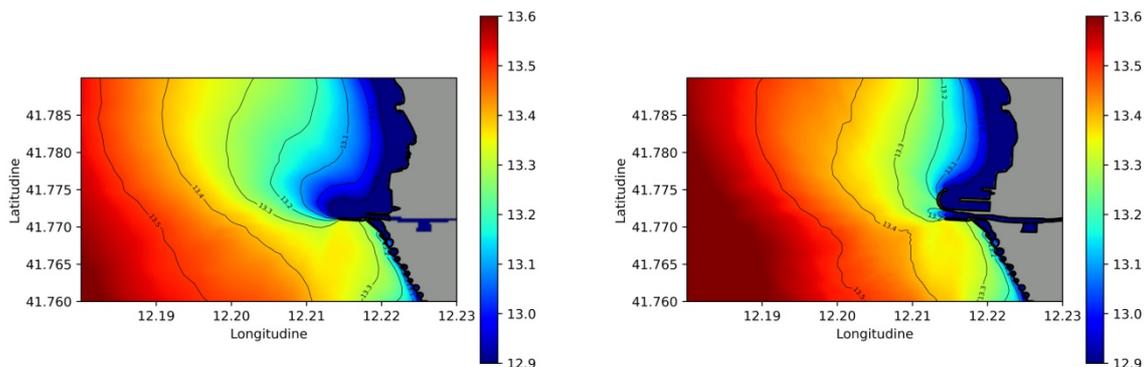


Figura 73 Mappa della temperatura superficiale in assenza (immagine a sinistra) e presenza (immagine a destra) delle nuove opere portuali.

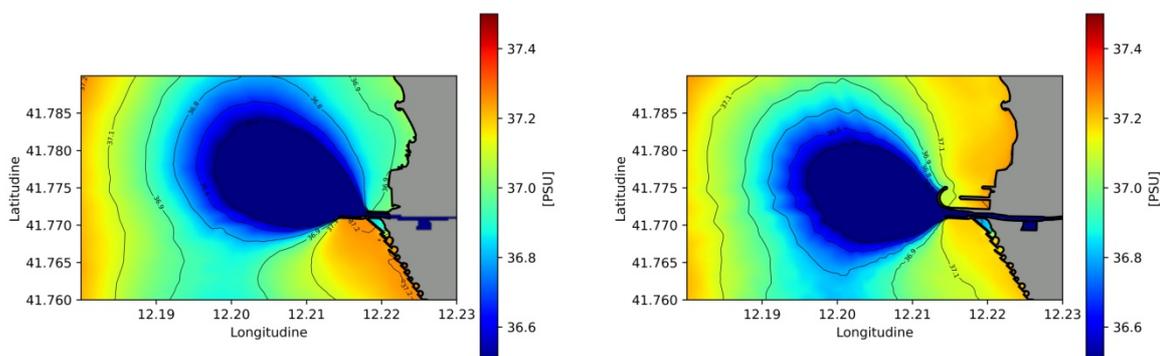


Figura 74 Mappa della salinità superficiale in assenza (immagine a sinistra) e presenza (immagine a destra) delle nuove opere portuali.

La nuova opera modifica leggermente la dinamica delle correnti marine nella parte a nord di Fiumara Piccola in quanto tende a modificare la posizione e le dimensioni del vortice antiorario che si viene a formare in questa zona. Si passa da una forma stretta e allungata con alte velocità della zona costiera ad una struttura più larga con il centro spostato di pochi km verso nord.

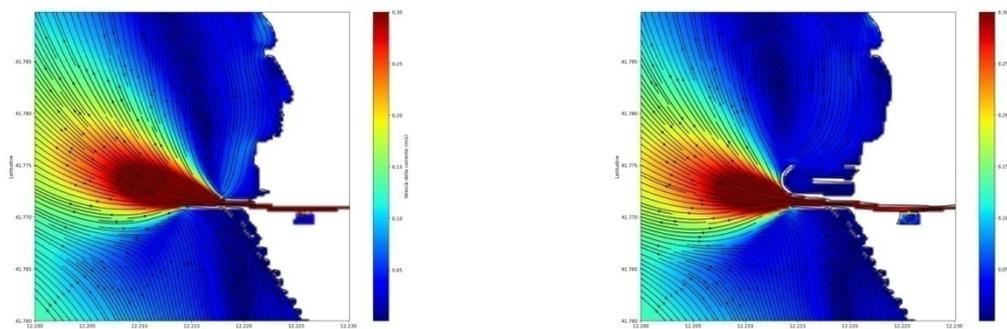


Figura 75 Mappa della corrente marina superficiale in assenza (immagine a sinistra) e presenza (immagine a destra) delle nuove opere portuali.

Modello Wave Watch III

L'output numerico di altezza significativa e direzione media d'onda fornito dal modello Wave Watch III è stato utilizzato per descrivere il clima ondoso per l'anno 2018. L'analisi è stata condotta considerando il punto di coordinate 41.71N, 12.179E a largo di Fiumicino, dove sono stati costruiti diagrammi polari che definiscono la direzione e l'altezza significativa delle onde su base annuale (Figura 76) e stagionale (Figura 77).

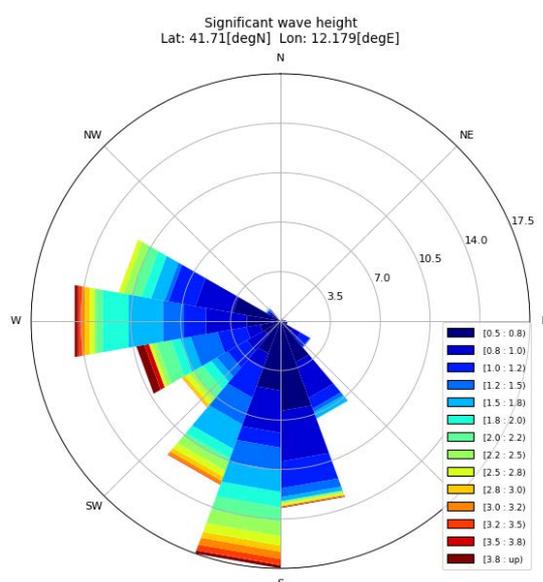


Figura 76 Diagramma polare del clima ondoso per l'anno 2018 a largo di Fiumicino

La figura 76 mostra come, su scala annuale, le onde nel punto selezionato abbiano una direzione quasi esclusivamente appartenente al terzo quadrante. La direzione prevalente (circa 30%) delle onde è orientata da Sud-Sud Ovest, con onde che superano i 3.5 m in Hs. Il settore che invece mostra più frequenti mareggiate con Hs oltre i 3.8 m è quello da Ovest-Sud Ovest.

La Figura 77 analizza su scala stagionale il clima ondoso dell'anno 2018 a largo di Fiumicino. Così come per i risultati del modello Shyfer, le stagioni sono definite secondo convenzione oceanografica, riportata qui di seguito:

- Inverno (DJF): mesi di Dicembre, Gennaio e Febbraio
- Primavera (MAM): mesi di Marzo, Aprile e Maggio
- Estate (JJA): mesi di Giugno, Luglio e Agosto
- Autunno (SON): mesi di Settembre, Ottobre e Novembre

Durante l'inverno, lo spettro direzionale delle onde nel punto selezionato, è quasi esclusivamente proveniente da Sud- Sud Ovest (>50%), con oltre il 20% di eventi con $H_s > 2m$. In questa stagione, si verificano eventi con $H_s > 3.8m$.

La primavera ha uno spettro direzionale d'onda con ampiezza di circa 135 gradi, e prevalenza del settore Ovest (circa 19%). L'altezza significativa non supera mai i 3m, ed eventi con $H_s > 2m$ si verificano con una frequenza del 10% circa.

L'estate è la stagione in cui si evidenziano le minori altezze significative dell'anno, con $H_s < 1.5m$ nell'95% dei casi. In questa stagione il 60% delle onde ha provenienza da Sud.

Durante l'autunno, lo spettro direzionale aumenta nuovamente in ampiezza, con circa il 40% delle onde provenienti da Ovest. In questa stagione si verificano gli eventi con le maggiori H_s dell'anno, infatti, circa il 5% di questi presenta $H_s > 3.5m$. Il settore compreso tra 250-280 gradi ha mostrato le maggiori H_s per l'anno in esame.

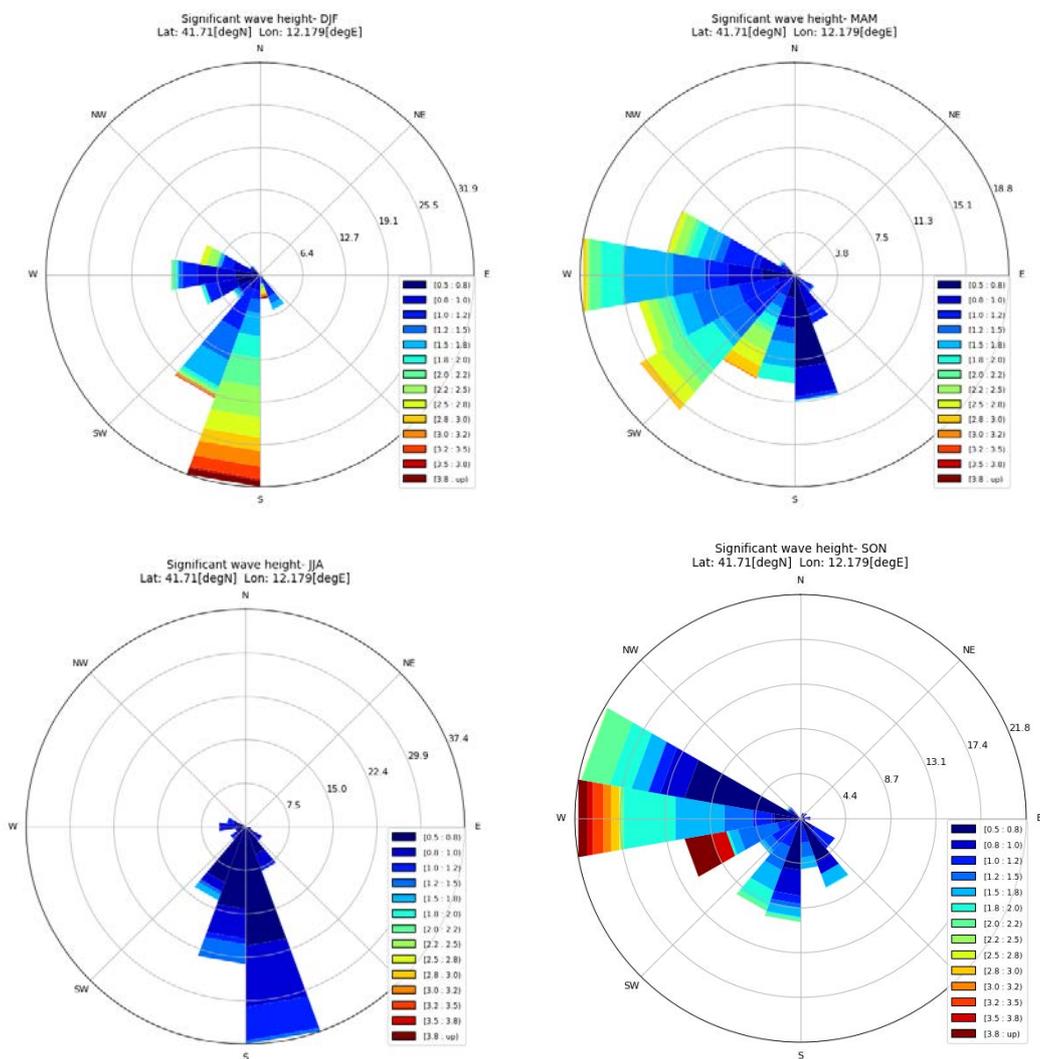


Figura 77 Diagrammi polari del clima ondoso stagionale a largo di Fiumicino per l'anno 2018

La figura 78 mostra l'altezza significativa d'onda e direzioni medie per l'anno 2018 ad ingrandimenti differenti.

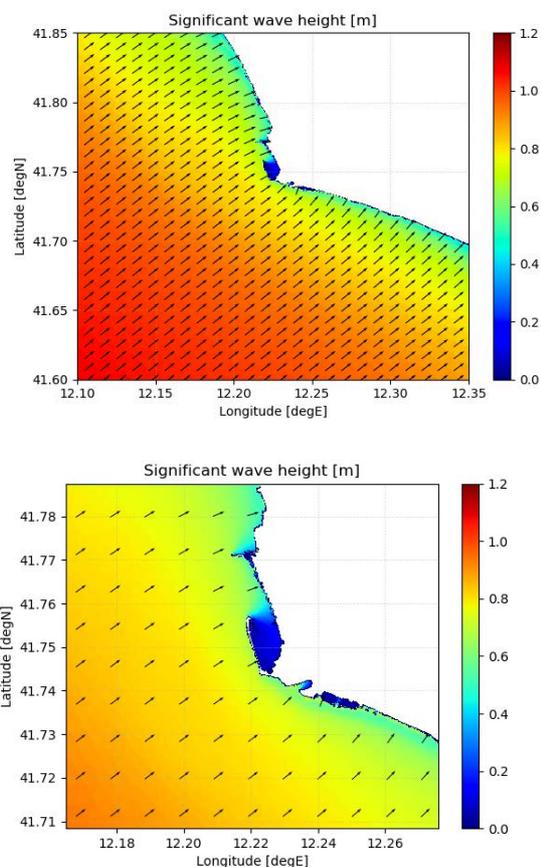


Figura 78 Mappe medie annuali (anno 2018) di altezza significativa d'onda e direzione

L'attendibilità con cui il modello riproduce la propagazione dell'onda verso costa è stata valutata preliminarmente confrontando l'output del WWIII (Hs e direzione) con i dati acquisiti dal Radar X band nei periodi 28-30/12/2020 e 23-24/01/2021 (Figura 78). Poiché le osservazioni non interessavano il periodo simulato per la descrizione del clima ondoso nel paraggio di Fiumicino, è stato necessario estendere la simulazione fino al Gennaio 2021.

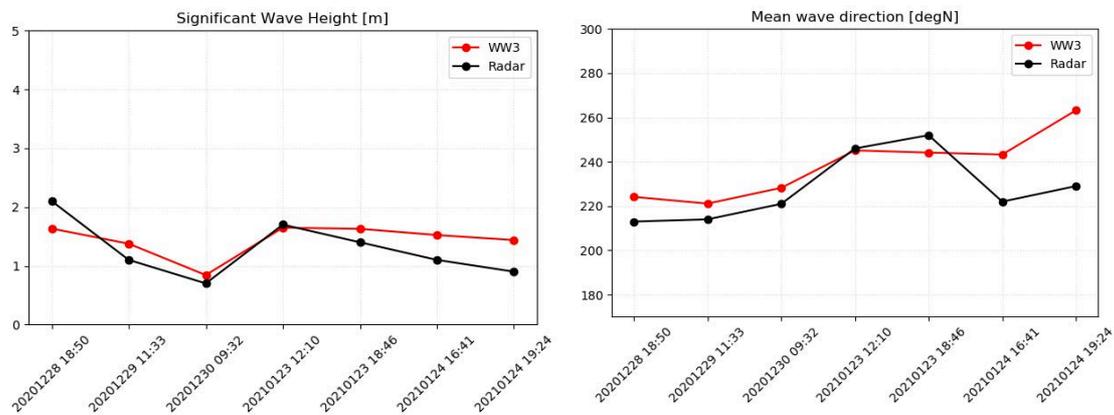


Figura 79 Comparazione output numerico (rosso) con osservazioni radar (nero) per l'area prospiciente il molo di Levante. A destra, valutazione della direzione media dell'onda, a sinistra valutazione dell'altezza significativa d'onda

Il risultato della comparazione evidenzia che esiste una buona correlazione tra i dati osservativi e del modello. La quantificazione media dello scarto tra osservazione e simulazione è di circa 15cm per l'altezza significativa, mentre per la direzione è di circa 11 gradi.

Modello XBEACH

I risultati mostrano le variazioni morfologiche della spiaggia sommersa nella zona di studio tra la fine e l'inizio di tutto il periodo simulato. Le mappe seguenti esprimono le variazioni in metri, dove le zone in colore rosso mostrano un incremento nelle variazioni morfologiche del fondale, mentre quelle a colori freddi una diminuzione. Figura 80 mostra l'intera zona di interesse, dove si nota che per la metà a sud del porto è presente una maggiore dinamicità del sedimento con maggior spostamento di sedimento, rispetto a quella a nord.

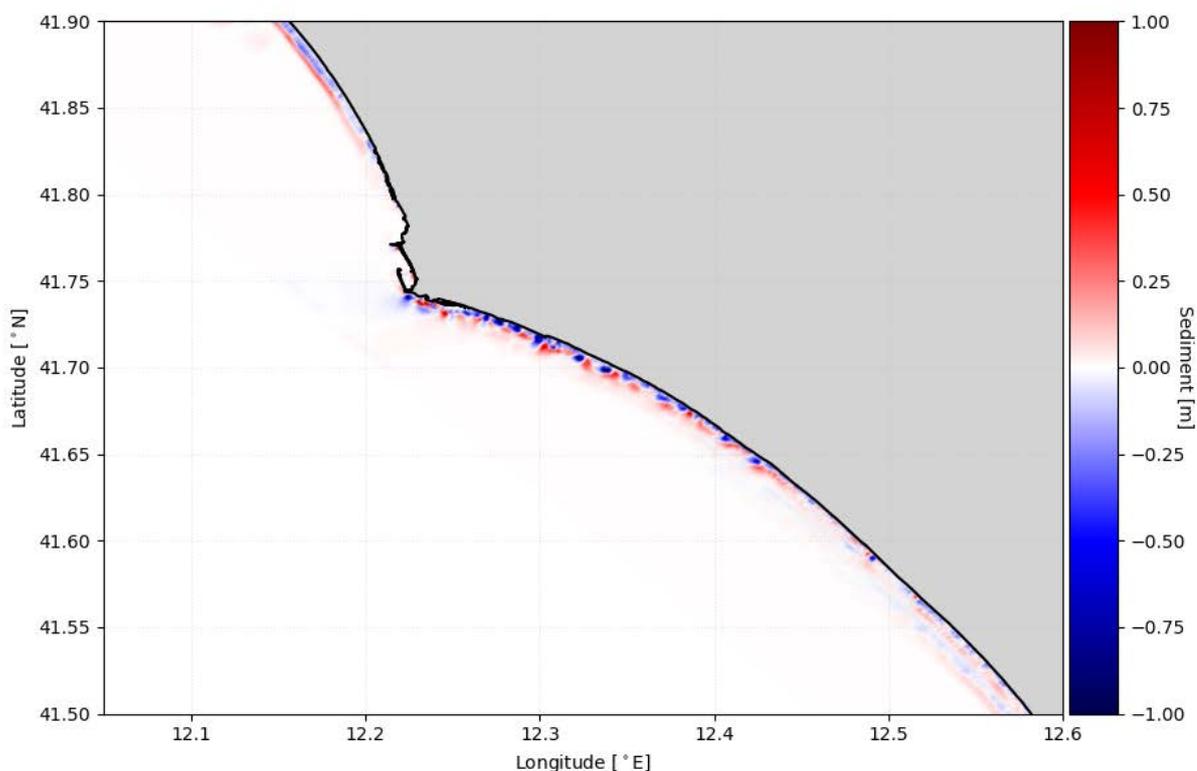


Figura 80 Variazioni morfologiche del fondale, espresse in metri, tra la fine e l'inizio del periodo invernale simulato su tutto il dominio dell'unità fisiografica (a), sulla meta superiore (b) e inferiore (c) del dominio.

Andando ad analizzare la dinamica dei sedimenti alla foce sud del Tevere (Figura 80), si distinguono, all'interno della zona iniziale di deposito del sedimento fluviale (tratteggiato), due zone con comportamenti distinti. Una prima parte più a nord, dove si ha una maggiore presenza di rosso, dove il sedimento ha una maggiore difficoltà a venire trasportato dalle onde, ed una parte con più erosione del deposito fluviale più a sud, indicata dalla presenza di colori più freddi. Ciò potrebbe essere spiegato dalla presenza del braccio del porto a nord della foce, che riduce l'effetto delle onde in arrivo da NordOvest nelle zone più vicine al braccio.

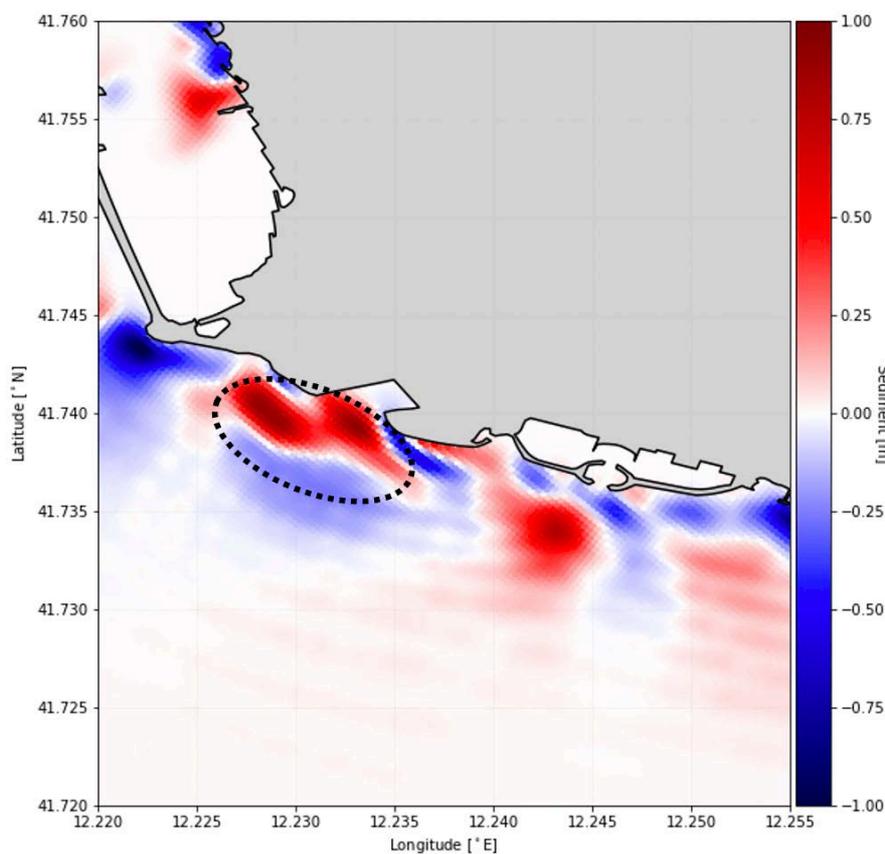


Figura 81 Variazioni morfologiche della spiaggia sommersa, espresse in metri, tra la fine e l'inizio del periodo invernale simulato nei pressi della foce del Tevere. In nero è evidenziata la zona di maggiore accumulo di sedimenti nei pressi della foce del fiume.

Infine, sono stati comparati i risultati delle simulazioni con e senza espansione portuale, riportati in Figura 82. Come si può notare, il nuovo braccio comporta una zona di particolare erosione alla testa, mentre a nord del braccio si nota una zona di deposito.

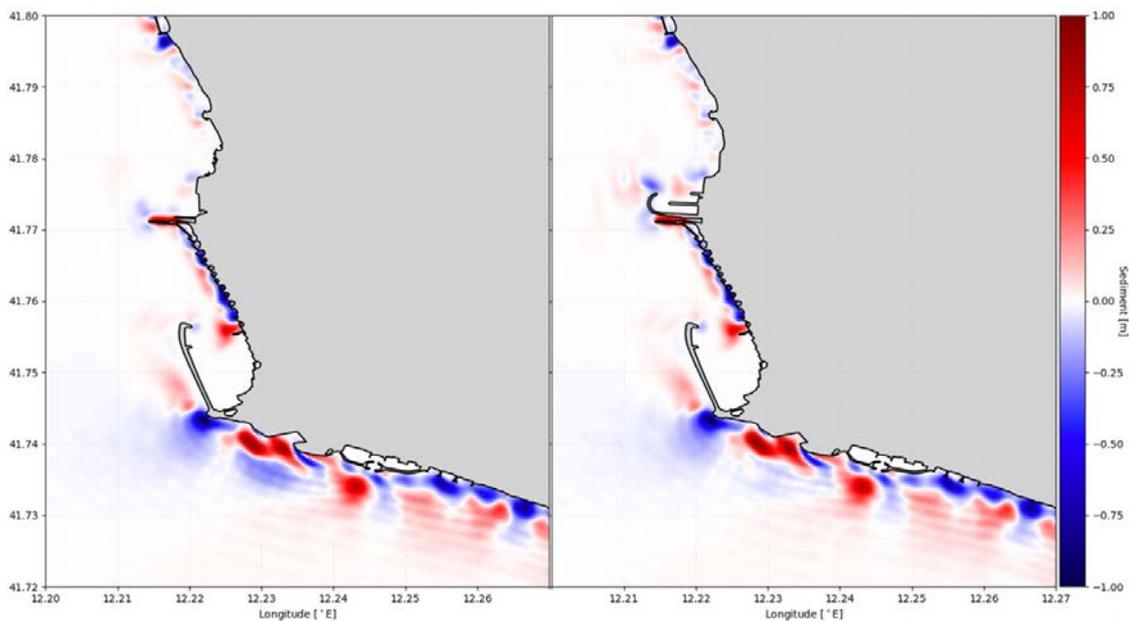


Figura 82 Variazioni morfologiche della spiaggia sommersa, espresse in metri, tra la fine e l'inizio del periodo invernale simulato nei pressi del porto di Fiumicino senza la presenza del nuovo braccio (sinistra) e con il nuovo braccio (destra)

Le variazioni morfologiche indotte dalla nuova opera si notano soprattutto nei pressi della stessa. Appena a nord della testa della nuova struttura si ha la maggiore erosione per un valore di all'incirca 30-40 cm, con invece un accumulo di 10-15 cm nell'area subito a sud-ovest. Questo accumulo si verifica a causa della struttura, che va a ridurre drasticamente il moto ondoso e le correnti a fondo e di conseguenza rappresenta una diga per i sedimenti. Un'altra area di accumulo di sedimenti dovuta alla presenza della nuova struttura si trova a nord-est della stessa, con valori di incremento del fondale di 15-20 cm. Questo accumulo può derivare dalle variazioni di correnti ondose che hanno generato la notevole erosione alla testa del nuovo porto. Una volta diminuite queste correnti nella zona più vicino a costa, dal momento che la struttura va a schermare le onde in arrivo da sud-ovest e ovest, il materiale sabbioso deposita.

È opportuno anche notare la maggior sedimentazione nei pressi della foce nord del Tevere. Ciò può essere spiegato dall'effetto di schermo della nuova struttura che porta a

coprire la zona della foce da una buona parte dell'energia ondosa in arrivo da nord-ovest, che avrebbe altrimenti trasportato quel sedimento.

Le altre aree di erosione e deposizione evidenziate indicano gli effetti sulle correnti longitudinali della nuova struttura. Tuttavia, essendo i loro valori di variazione molto piccoli, inferiori alla decina di centimetri, sarebbe approssimativo cercare un fenomeno di tendenza.

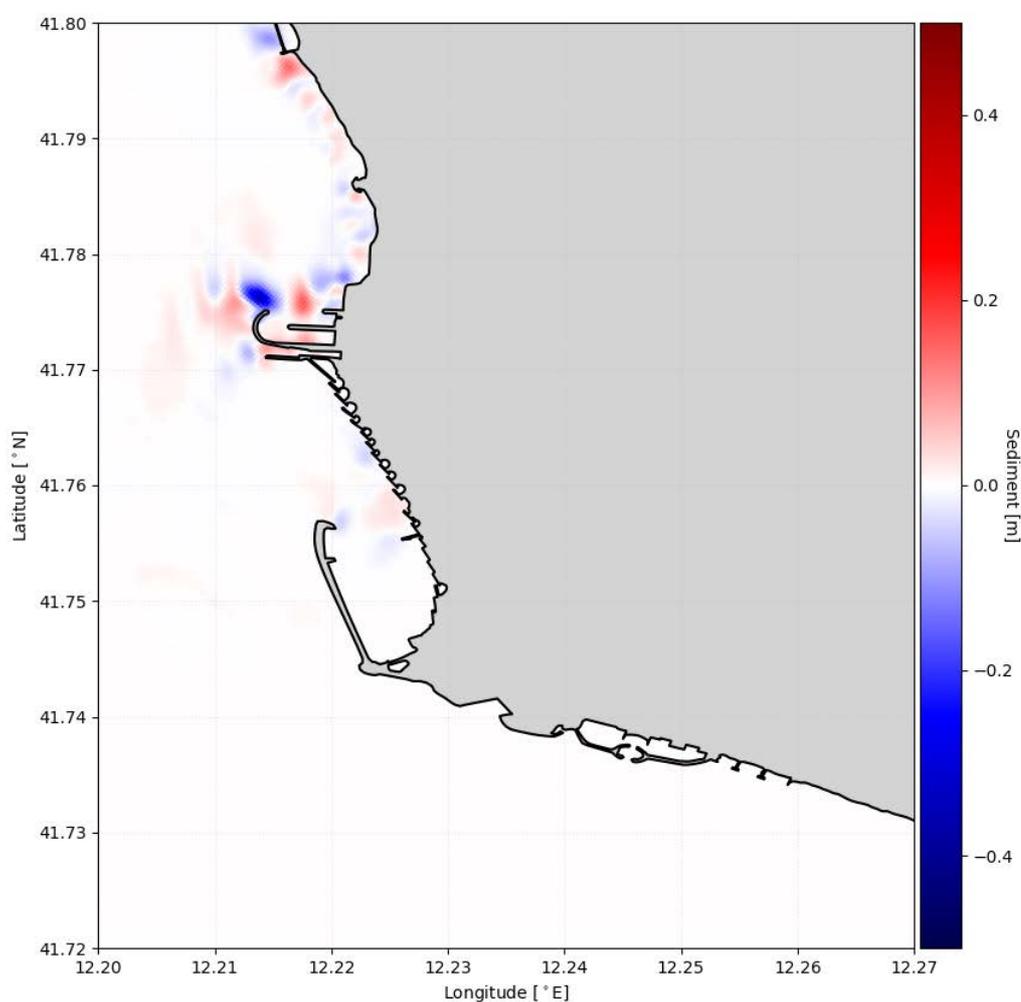


Figura 83 Differenze tra le variazioni finali, simulate con e senza nuova espansione portuale

Il modello XBeach è stato validato utilizzando un profilo della spiaggia sommersa acquisito lungo transetti costa-largo, localizzato nella zona in cui sarà realizzato il nuovo porto (Figura 84). Le misurazioni sono state effettuate in un intervallo di profondità dai -20 m fino a -5 m. La valutazione è stata fatta quindi utilizzando un modello 1D di XBeach che riprendesse le coordinate dei punti di misurazione e che avesse le stesse caratteristiche numeriche e di calcolo del modello 2D. Le misurazioni sono state prese in due periodi, ad Agosto 2020 ed infine a Dicembre 2020, per verificare le variazioni indotte dalle mareggiate autunnali. Le simulazioni sono state quindi condotte con tipologia di onda presa dalla caratterizzazione ondosa del periodo autunnale, condotta con la stessa metodologia indicata nella Sezione 4.7.2 *Modello morfologico X-BEACH*.

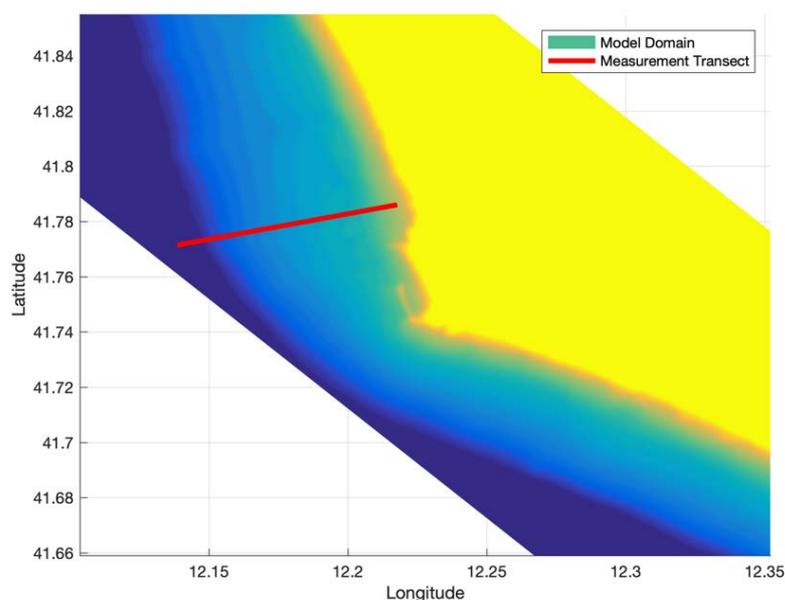


Figura 84 Localizzazione del transetto utilizzato per calibrare il modello XBeach

Il confronto fra le simulazioni e i dati acquisiti in situ (Fig. 84) ha permesso di osservare come il modello sia riuscito, nella parte del profilo compresa tra -5 e -7 m di profondità,

a riprodurre qualitativamente la tendenza alla deposizione dei sedimenti, evidenziata dalle misure.

Va precisato che allo stato attuale, il modello non riesce a riprodurre le variazioni del fondale nelle zone più a largo (profondità maggiori di -7 m), mentre è in grado di simulare la dinamica dei sedimenti a basse profondità (0 – 5 m) dove non sono stati ancora acquisiti dati morfologici. Ciò rende necessaria una seconda fase di validazione dove verranno analizzati i parametri che consentono di simulare le variazioni del fondale a profondità maggiori di - 7m e in cui verrà confrontato il profilo anche a profondità inferiori a - 5 m e sulla spiaggia emersa.

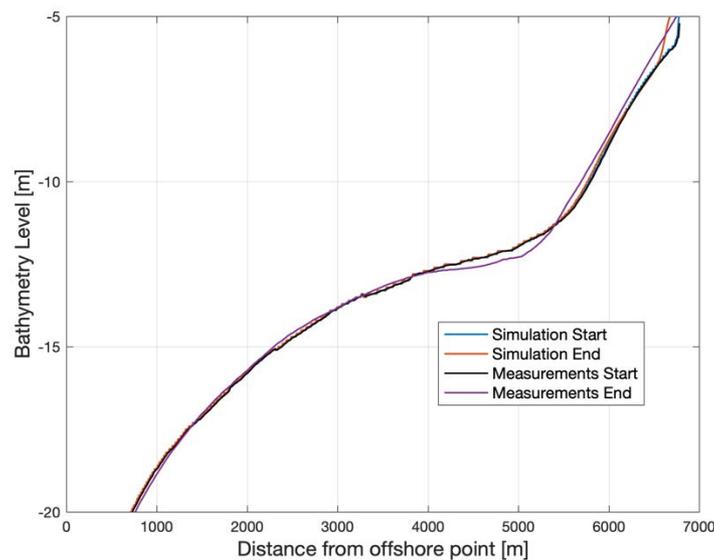


Figura 85 Confronto fra misurazioni effettuate ad Agosto e Dicembre e le variazioni iniziale e finale simulate dal Modello XBeach 1D

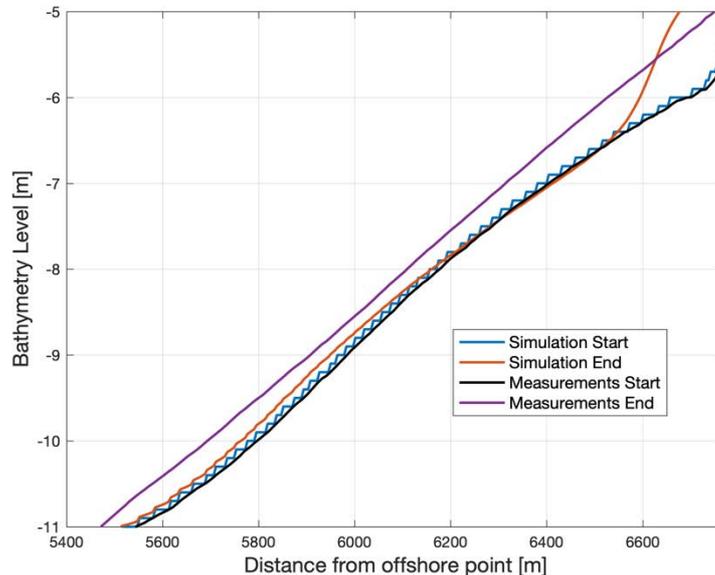


Figura 86 Zoom del confronto fra misurazioni effettuate ad Agosto e Dicembre e le variazioni iniziale e finale simulate dal Modello XBeach 1D

Modello PTM

Il modello PTM ha permesso di stimare l'accumulo e la concentrazione dei sedimenti fini in sospensione che vengono rilasciati dalle attività di dragaggio (Fig 87 e 89) e dalle due foci fluviali (Fig 88 e 90). Dato che l'obiettivo è quello di mettere in evidenza il contributo del materiale dragato rispetto a quello proveniente da altre fonti presenti nell'area di studio, il rilascio di materiale proveniente dal dragaggio e dalle foci fluviali è stato analizzato in due distinte simulazioni. Per rendere possibile il confronto tra queste è stato fornito in input sedimento con le stesse caratteristiche (D50 e deviazione standard). La dispersione del materiale fine viene simulato considerando le condizioni idrodinamiche (vento e moto ondoso) di un mese tipico autunnale e di uno tipico invernale. I due periodi sono stati scelti in quanto sono quelli in cui sono state schedate le attività di dragaggio.

La dispersione del materiale dragato provoca un aumento di torbidità nella parte a nord dell'area di studio sia nella condizione autunnale che in quella invernale. Nel primo caso l'area con elevati valori di concentrazione del sedimento fine in sospensione si estende fino alle Secche di Macchiatonda mentre nel secondo caso la plume percorre pochi km arrivando fino a Passoscuro.

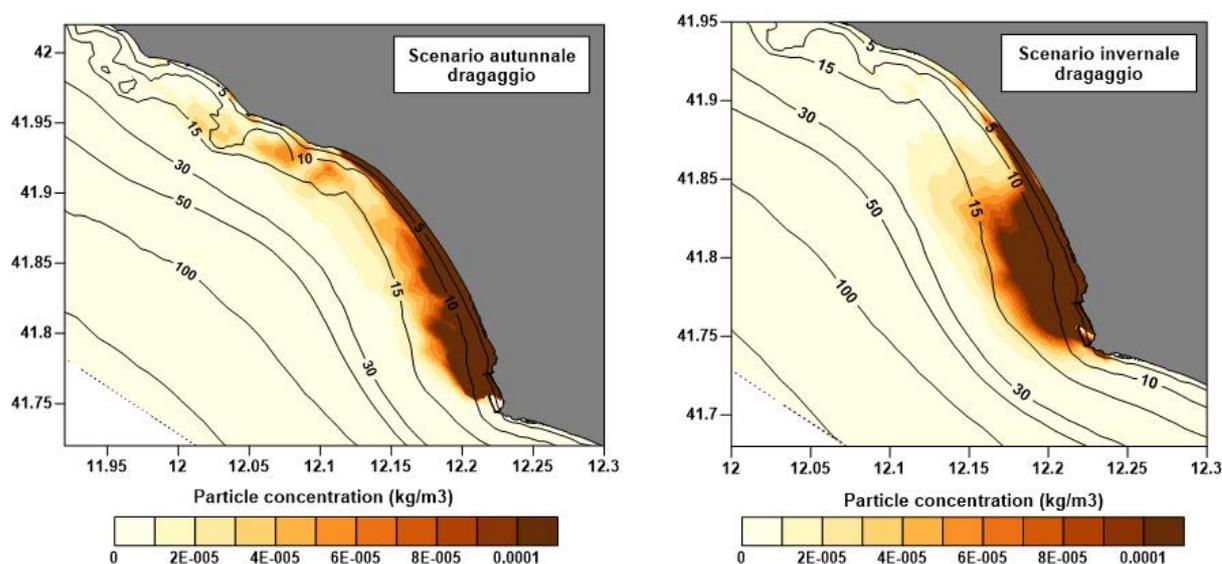


Figura 87 distribuzione del materiale fine in sospensione proveniente dalle attività di dragaggio nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).

La concentrazione di sedimento fine proveniente dalle foci fluviali caratterizza una larga area che raggiunge la sua massima estensione nella condizione autunnale andando da Torvaanica alle Secche di Macchiatonda e ricoprendo quasi totalmente l'area con elevata torbidità definita dallo scenario di dragaggio. Nello scenario invernale la concentrazione del sedimento in sospensione è, in gran parte dell'area di sovrapposizione, molto più elevato rispetto allo scenario in cui viene riprodotto il dragaggio.

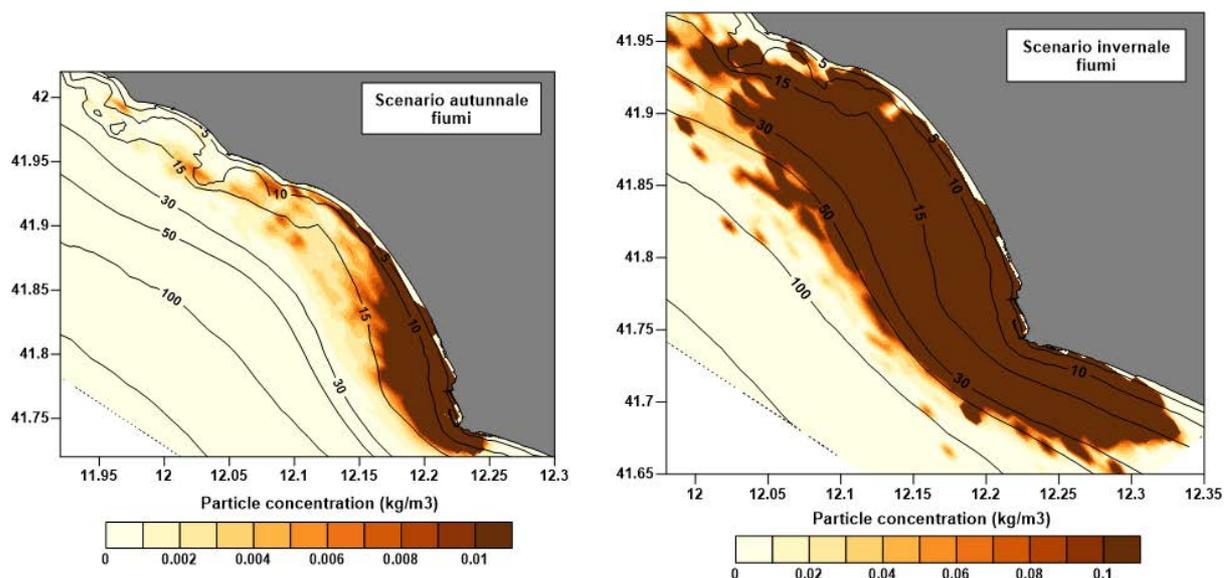


Figura 88 distribuzione del materiale fine in sospensione proveniente dalle foci fluviali nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).

Le particelle provenienti dalle attività di dragaggio si accumulano lungo la zona costiera a nord della sorgente in entrambe le condizioni simulate. Nello scenario autunnale sono presenti zone di accumulo tra le secche di Macchiatonda mentre in quello invernale si viene a formare un'estesa area di deposizione tra i 10 e 15 m di profondità nella zona antistante Fregene.

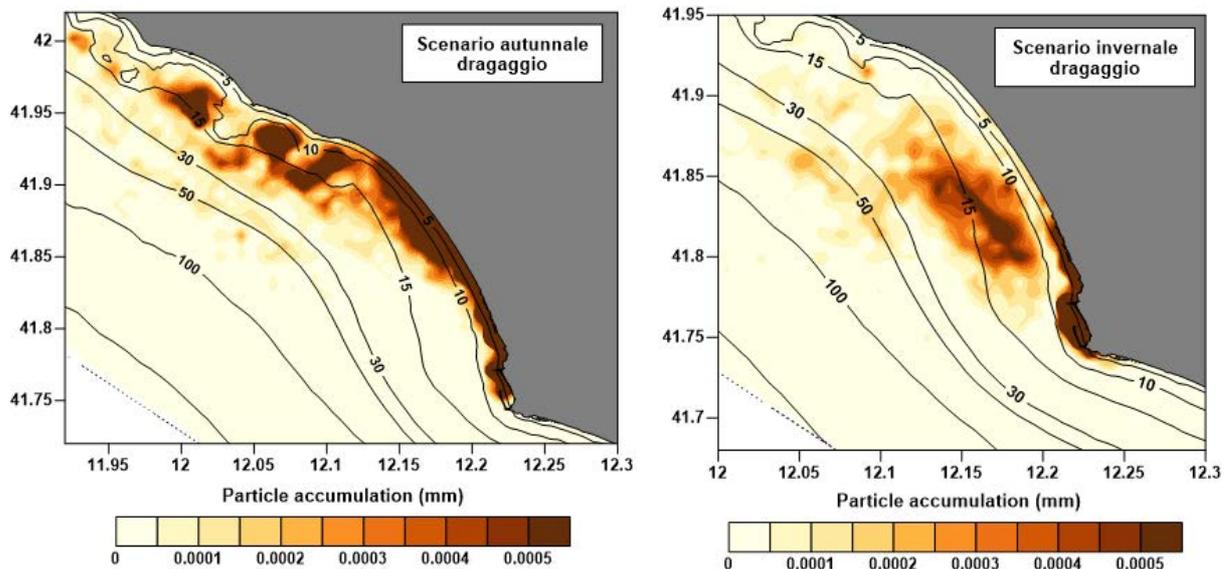


Figura 89 zone di accumulo del sedimento fine proveniente dalle attività di dragaggio nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).

La dispersione del materiale fine proveniente dai fiumi deposita principalmente in una vasta area che si estende da Torvaianica a Fregene e fino ad una profondità di 100 m. Parte del materiale sedimenta anche nella parte a nord dell'area di studio, nelle aree adiacenti alle secche di Macchiatonda. La deposizione del materiale fluviale nella condizione invernale produce un innalzamento che risulta essere circa un ordine di grandezza superiore a quello prodotto dalle attività di dragaggio.

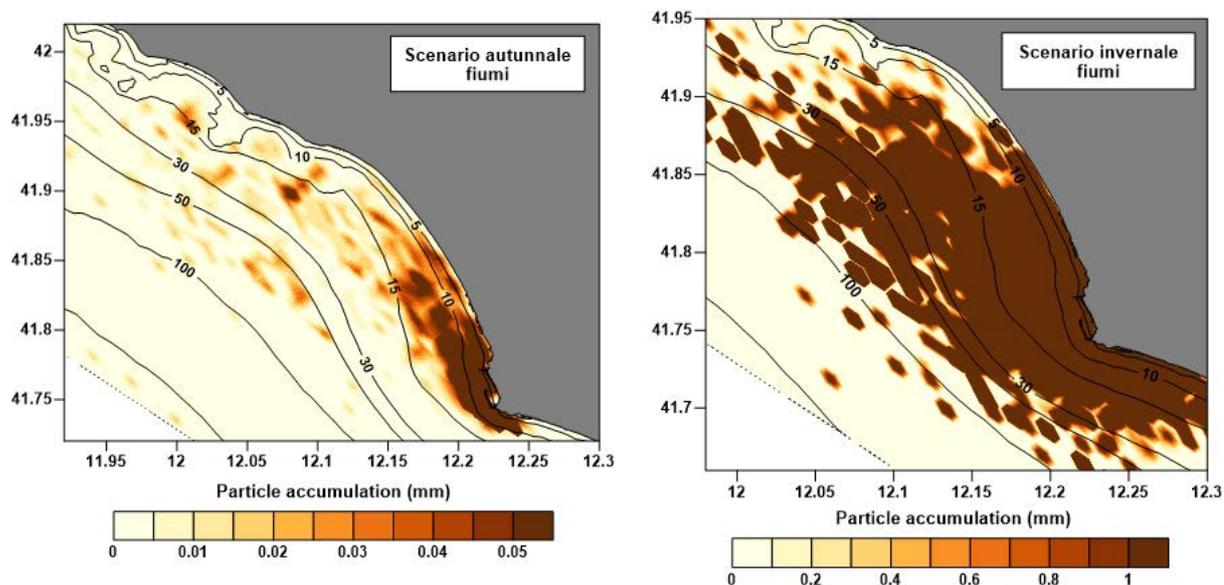


Figura 90 zone di accumulo del sedimento fine proveniente dalle foci fluviali nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).

5. ATTIVITÀ DI RICERCA SCIENTIFICA PER LA DIVULGAZIONE DEI RISULTATI DERIVANTI DAL PRESENTE PROGETTO

Le attività di ricerca sperimentale sviluppate durante le fasi del progetto verranno indirizzate alla divulgazione scientifica.

Durante gli ultimi mesi di attività si produrranno ulteriori analisi dati finalizzate alla produzione scientifica. Il progetto di ricerca posto in essere infatti integra una serie di attività e di collaborazioni con diversi Istituti Scientifici, con lo scopo di produrre risultati divulgabili attraverso pubblicazioni, convegni e seminari nei quali l'accordo quadro in essere tra il CMCC e l'Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Centro Settentrionale verrà espressamente citato.

I dati raccolti nel corso delle diverse attività di ricerca saranno quindi presentati in differenti ambiti scientifici: congressi nazionali ed internazionali; pubblicazioni scientifiche internazionali referate. Le iscrizioni ai convegni, nonché le pubblicazioni su riviste open access verranno finanziate dal CMCC. I dati raccolti potranno essere inoltre oggetto di tesi di laurea triennale, magistrale e di dottorato.

6. ALLEGATI

- Allegato 1: Immagini Satellitari elaborate per Solido Sospeso e Clorofilla *a* 2019-2020
- Allegato 2: Schede Granulometrie Agosto 2020
- Allegato 3: Schede Granulometrie Gennaio 2021

BIBLIOGRAFIA

APAT, Irsa-Cnr. Metodi analitici per le acque. Manuali e linee guida, 2003, 29: 2003.

Blott, S.J. and Pye, K. (2001) GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1237-1248.

Borge J. C. N. and C. Guedes Soares, "Analysis of directional wave fields using X-band navigation radar," *Coastal Eng.*, vol. 40, no. 4, pp. 375–391, Jul. 2000.

Bonamano, S., Scanu, S., Peviani, M.A., Marcelli, M., 2009. Hydrodynamic and littoral transport study of new Port of Fiumicino (Lazio region, Italy). *International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2009*.

Bonamano, S., Scanu, S., Peviani, M.A., Marcelli, M., 2007. Porto di Fiumicino. Progetto di variante al Piano Regolatore Portuale 2004. Studio dell'interazione fra il nuovo porto di Fiumicino e la dinamica litoranea. REL-5.0-MM-0607-MD

Borge J. C. N., R. G. Rodriguez, K. Hessner, and I. P. Gonzales, "Inversion of marine radar images for surface wave analysis," *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 21, no. 8, pp. 1291–1300, Aug. 2004.

- Burchard, H., Petersen, O., 1999. Models of turbulence in the marine environment – a comparative study of two equation turbulence models. *J. Mar. Syst.* 21, 29–53.
- Castagna, A., Simis, S., Dierssen, H., Vanhellefont, Q., Sabbe, K., Vyverman, W., submitted. Extending Landsat 8: Retrieval of an orange contra-band for inland water quality applications, manuscript submitted for publication.
- Dogliotti, A., Gossn, J., Vanhellefont, Q., Ruddick, K., 2018. Detecting and quantifying a massive invasion of floating aquatic plants in the río de la plata turbid waters using high spatial resolution ocean color imagery. *Remote Sensing* 10 (7), 1140.
- Dogliotti, A. I., Ruddick, K., Nechad, B., Doxaran, D., Knaeps, E., 2015. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment* 156, 157–168.
- Gons, H. J., Rijkeboer, M., Ruddick, K. G., 2002. A chlorophyll-retrieval algorithm for satellite imagery (medium resolution imaging spectrometer) of inland and coastal waters. *Journal of Plankton Research* 24 (9), 947–951.
- Ferrarin, C., Umgiesser, G., Cucco, A., Hsu, T. W., Roland, A., Amos, C. L., 2008. Development and validation of a finite element morphological model for shallow water basins. *Coastal Engineering*, 55(9), 716-731.
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3-26.
- Grant, W.D., Madsen, O.S., 1986. The continental shelf bottom boundary layer. *Annual Review of Fluid Mechanics* 18, 265–305.
- Gunther, H., Hasselmann, H., Janssen, P., 1993. The WAM model cycle 4. DKRZ report n.4.
- International Organization for Standardization (ISO). 5667-9:1992 Water quality — Sampling — Part 9: Guidance on sampling from marine waters. ISO: Geneva, Switzerland, 1992.

International Organization for Standardization (ISO). 10260:1992 Water Quality Measurement of Biochemical Parameters Spectrometric Determination of the Chlorophyll a Concentration; ISO: Geneva, Switzerland, 1992.

Lazzara L., Bianchi F., Massi L., Ribera D'Alcalà M. (2010). Pigmenti clorofilliani per la stima della biomassa fototrofa. Manuali e Linee guida ISPRA 56/2010. Metodologie di studio del plancton marino. ISBN 978-88-448-0427-5. pp.365-377.

Lee, Z., Carder, K. L., Arnone, R. A., 2002. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics* 41 (27), 5755–5772.

Mishra, S., Mishra, D. R., 2012. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment* 117, 394–406.

Moses, W. J., Gitelson, A. A., Berdnikov, S., Saprygin, V., Povazhnyi, V., 2012. Operational MERIS-based NIR-red algorithms for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters—The Azov Sea case study. *Remote Sensing of Environment* 121, 118–124.

Nechad, B., Ruddick, K., Neukermans, G., 2009. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters. In: *SPIE Europe Remote Sensing*. International Society for Optics and Photonics, pp. 74730H–74730H.

Nechad, B., Ruddick, K., Park, Y., 2010. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment* 114 (4), 854–866.

Marcelli, M., Scanu S., Bonamano, S., Piermattei, V., 2008. Caratterizzazione batimetrica, della colonna d'acqua e correntometrica di due siti marini ubicati nell'area prospiciente il porto canale di Fiumicino: relazione tecnica finale e valutazione delle ricerche effettuate. REL-11.0-MET-0608-ICR

Marcelli, M., Scanu, S., Frattarelli, F. M., Mancini, E., & Carli, F. M. (2018). A benthic zonation system as a fundamental tool for natural capital assessment in a marine environment: A case study in the Northern Tyrrhenian Sea, Italy. *Sustainability*, 10(10), 3786.

Metodologie analitiche di riferimento. Programma di monitoraggio per il controllo dell'ambiente marino-costiero (triennio 2001–2003). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio—ICRAM. Lo Studio Editoriale srl, Roma (2001).

Neumeier, U., Ferrarin, C., Amos, C.L., Umgiesser, G., Li, M.Z., 2008. Sedtrans05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters. *Comput. Geosci.* 34, 1223–1242.

Ruddick, K. G., De Cauwer, V., Park, Y.-J., Moore, G., 2006. Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters. *Limnol. Oceanogr* 51 (2), 1167–1179.

Serafino F., C. Lugni, and F. Soldovieri, “A novel strategy for the surface current determination from marine X-band radar data,” *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 7, no. 2, pp. 231–235, Apr. 2010.

Strickland, J.D.H., T.R. Parsons. (1972). A practical handbook of seawater analysis. *Fish. Res. Board Can. Bull.* 167, 2nd ed.

Tolman, H. L., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14. Technical note, MMAB Contribution, 276, 220.

Umgiesser, G., Canu, D.M., Cucco, A., Solidoro, C., 2004. A finite element model for the Venice lagoon: development, set up, calibration and validation. *J. Mar. Syst.* 51, 123–145.

Umgiesser, G., 1997. Modelling the Venice Lagoon. *Inter. J. Salt Lake Res.* 6, 175–199

Zampato, L., Umgiesser, G., Peron, F., 1998. Sviluppo di un modello di scambio termico all'interfaccia acqua-aria nella Laguna di Venezia. Technical Report 221. ISDGM/CNR. Venice. Pp. 33

Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2015). Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8. *Remote Sensing of Environment*, 161, 89-106.