

**PROGETTO DI RICERCA:**

**CARATTERIZZAZIONE MORFODINAMICA E DI TRASPORTO SOLIDO,  
IDRODINAMICA ED ECOLOGICA DELL'UNITÀ' FISIOGRAFICA CAPO  
LINARO CAPO D'ANZIO**



## Indice

|                                                                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introduzione.....</b>                                                                                          | <b>7</b>  |
| <b>2. Area di studio.....</b>                                                                                        | <b>10</b> |
| <b>3. Architettura del progetto e strategia del piano di campionamento.....</b>                                      | <b>13</b> |
| <b>4. Raccolta dati pregressi e predisposizione GIS, integrazione dei dati acquisiti nella piattaforma GIS .....</b> | <b>27</b> |
| 4.1. Raccolta dati disponibili all'interno dell'U.F. per la redazione del nuovo piano di monitoraggio .....          | 27        |
| 4.2. Predisposizione GIS .....                                                                                       | 27        |
| 4.3. Integrazione dati nella piattaforma GIS .....                                                                   | 27        |
| 4.4. Dati di input per i modelli numerici .....                                                                      | 29        |
| 4.4.1. <i>Analisi delle condizioni al contorno (batimetria, apporti fluviali e campo di vento)...</i>                | <i>29</i> |
| 4.4.2. <i>Analisi della Linea di riva da Copernicus e dati bibliografici .....</i>                                   | <i>29</i> |
| 4.4.3. <i>Analisi dati Copernicus service .....</i>                                                                  | <i>30</i> |
| <b>5. Oceanografia sperimentale.....</b>                                                                             | <b>31</b> |
| 5.1. Analisi del clima ondoso e delle correnti marine .....                                                          | 31        |
| 5.1.1. <i>Misure in continuo di onde e correnti con Radar X-Band.....</i>                                            | <i>32</i> |
| 5.1.2. <i>Misure di onde con boe fisse low-cost 'rilocabili' .....</i>                                               | <i>34</i> |
| 5.1.3. <i>Misure di correnti con ADCP .....</i>                                                                      | <i>35</i> |
| 5.1.4. <i>Campagne correntometriche con traccianti lagrangiani .....</i>                                             | <i>36</i> |

|                                                                                                                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5.2. Campagne di misura colonna d'acqua .....</b>                                                                                                                                                                       | <b>37</b> |
| <b>5.2.1. Misure con metodi tradizionali .....</b>                                                                                                                                                                         | <b>37</b> |
| <b>5.2.2. Studio dello stato trofico delle acque.....</b>                                                                                                                                                                  | <b>39</b> |
| <b>5.2.3. Stazione di monitoraggio ripetuta.....</b>                                                                                                                                                                       | <b>40</b> |
| <b>5.2.4. Integrazione delle misure con metodi innovativi autonomi .....</b>                                                                                                                                               | <b>41</b> |
| <b>5.3. Studio della distribuzione del solido sospeso, della biomassa fitoplanctonica e della CDOM lungo l'unità fisiografica attraverso osservazioni satellitari .....</b>                                                | <b>43</b> |
| <b>6. Studio della spiaggia sommersa, emersa e del rateo deposizionale .....</b>                                                                                                                                           | <b>46</b> |
| <b>6.1. Caratterizzazione della spiaggia sommersa.....</b>                                                                                                                                                                 | <b>46</b> |
| <b>6.1.1. Integrazione profili spiaggia sommersa area di Fiumicino per verifica dei modelli evento meteomarinico estremo .....</b>                                                                                         | <b>46</b> |
| <b>6.1.2. Profili della spiaggia sommersa lungo l'area estesa e area di Fiumicino per verifica dei modelli matematici e analisi delle aree soggette a erosione e/o deposizione anche attraverso veicoli autonomi .....</b> | <b>46</b> |
| <b>6.1.3. Campionamenti della spiaggia sommersa per calibrazione modelli e strumentazione automatica.....</b>                                                                                                              | <b>47</b> |
| <b>6.1.4. Campionamenti del sedimento per granulometrie in corrispondenza delle stazioni di benthos .....</b>                                                                                                              | <b>48</b> |
| <b>6.1.5. Campagne batimetriche multibeam area portuale .....</b>                                                                                                                                                          | <b>49</b> |
| <b>6.2. Caratterizzazione della spiaggia emersa.....</b>                                                                                                                                                                   | <b>50</b> |
| <b>6.2.1. Profili della spiaggia emersa.....</b>                                                                                                                                                                           | <b>50</b> |
| <b>6.2.2. Campionamenti della spiaggia emersa.....</b>                                                                                                                                                                     | <b>51</b> |
| <b>6.3. Studio del rateo di sedimentazione.....</b>                                                                                                                                                                        | <b>53</b> |

|                                                                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.4. Analisi dei sedimenti funzionale ad eventuali attività di movimentazione sedimenti .....                                                                  | 55        |
| 6.5. Analisi ecotossicologiche dei sedimenti.....                                                                                                              | 56        |
| <b>7. Caratterizzazione dei principali corsi d'acqua rilevanti ai fini della valutazione degli input fluviali.....</b>                                         | <b>58</b> |
| 7.1. Misure di alveo in prossimità della foce .....                                                                                                            | 58        |
| 7.2. Analisi degli apporti liquidi e solidi dei principali corsi d'acqua .....                                                                                 | 58        |
| <b>8. Studio del comparto biotico.....</b>                                                                                                                     | <b>60</b> |
| 8.1. Analisi delle comunità bentoniche .....                                                                                                                   | 60        |
| 8.2. Analisi del Benthos di fondo mobile attraverso campionamento standard .....                                                                               | 61        |
| 8.3. Analisi del Benthos di fondo mobile all'interno/esterno dell'area portuale attraverso campionamento standard.....                                         | 62        |
| 8.4. Analisi del Benthos di fondo duro attraverso metodi non distruttivi .....                                                                                 | 63        |
| 8.5. Analisi della Posidonia oceanica mediante metodi acustici e campionamenti in situ.....                                                                    | 64        |
| 8.6. Analisi delle variazioni quali-quantitative del pescato delle Marinerie locali .....                                                                      | 65        |
| <b>9. Marine Strategy Framework Directive .....</b>                                                                                                            | <b>67</b> |
| <b>10. Modelli numerici .....</b>                                                                                                                              | <b>69</b> |
| 10.1. Downscaling con modelli a scala regionale .....                                                                                                          | 71        |
| 10.2. Predisposizione dei modelli a scala di unità fisiografica .....                                                                                          | 71        |
| 10.3. Integrazione dei modelli nel Tevere .....                                                                                                                | 72        |
| 10.4. Predisposizione dei modelli operativi e catena operativa .....                                                                                           | 72        |
| 10.5. Simulazioni con modelli idrodinamici e di trasporto solido al fine di definire il corretto posizionamento delle stazioni di campionamento e misura ..... | 73        |

|                                                                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 10.6. Validazione dei modelli idrodinamici (onde e correnti) e di trasporto solido con i dati di raccolti in situ .....                                | 75        |
| 10.7. Modello operativo: simulazioni del trasporto solido per la valutazione delle zone soggette ad erosione e sedimentazione.....                     | 77        |
| 10.8. Modello operativo: simulazioni del materiale eventualmente dragato per la valutazione dei potenziali effetti indotti sull'ecosistema marino..... | 77        |
| 10.9. Predisposizione e simulazioni attraverso il modello di oil slick ed il modello di dispersione dei batteri.....                                   | 78        |
| <b>11. Studio della variazione della linea di riva a breve e a lungo termine.....</b>                                                                  | <b>80</b> |
| 11.1. Analisi storica della linea di riva e ricostruzione dei profili della spiaggia sommersa .....                                                    | 80        |
| 11.2. Predisposizione e simulazioni attraverso il modello per l'analisi dell'evoluzione della linea di riva e della spiaggia sommersa ed emersa.....   | 82        |
| <b>12. Opere di mitigazione.....</b>                                                                                                                   | <b>83</b> |
| <b>13. Analisi dell'impatto dovuto allo spostamento della SeaLine .....</b>                                                                            | <b>84</b> |
| <b>14. Analisi dati e reporting .....</b>                                                                                                              | <b>86</b> |
| <b>15. ALLEGATI.....</b>                                                                                                                               | <b>87</b> |
| 15.1. Descrizione Modelli .....                                                                                                                        | 87        |
| 15.1.1. Modello idrodinamico SHYFEM .....                                                                                                              | 87        |
| 15.1.2. Modello di moto ondoso WaveWatch3.....                                                                                                         | 92        |
| 15.1.3 Modello di trasporto del sedimento SEDTRANS05 .....                                                                                             | 93        |
| 15.1.4. Modello dell'evoluzione della linea di riva LITPACK.....                                                                                       | 95        |
| 15.1.5. Modello per la variazione del profilo di spiaggia XBeach.....                                                                                  | 99        |
| 15.1.6. Modello di dispersione degli idrocarburi MEDSLIK II.....                                                                                       | 101       |
| 15.1.7. Modello di dispersione dei batteri WASP/BFM.....                                                                                               | 103       |

|                |                                                                                                                                                                                                                               |            |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>15.2.</b>   | <b>Relazioni del Laboratorio di Oceanologia sperimentale ed Ecologia Marina (LOSEM) inerenti il porto di Fiumicino.....</b>                                                                                                   | <b>105</b> |
| <i>15.2.1.</i> | <i>Relazione per Autorità Portuale, REL-4.0-BM-0306-AP 30 marzo 2006 .....</i>                                                                                                                                                | <i>105</i> |
| <i>15.2.2.</i> | <i>Relazione per Modimar REL-5.0-MM-0607-MD 22 Giugno 2007 .....</i>                                                                                                                                                          | <i>106</i> |
| <i>15.3.3.</i> | <i>Relazione per Autorità Portuale, REL-6.0-BS-0707-AP 2 Luglio 2007 .....</i>                                                                                                                                                | <i>108</i> |
| <i>15.3.4.</i> | <i>Relazione per Autorità Portuale, Analisi preliminare degli effetti delle nuove opere costiere sul moto ondoso e sulla dinamica litoranea lungo il tratto di costa compreso tra Palo Laziale e Torvajonica (2014) .....</i> | <i>109</i> |
| <b>16.</b>     | <b>Bibliografia .....</b>                                                                                                                                                                                                     | <b>112</b> |

## 1. Introduzione

Il presente progetto si inquadra in un ampio sistema di osservazione, monitoraggio ed analisi dell'ambiente marino che risponde all'esigenza di armonizzare la salvaguardia degli ecosistemi marini con una corretta gestione e sviluppo degli usi delle aree costiere. La risposta dei sistemi naturali alle variazioni generate da specifici interventi sulla costa si sovrappongono alle variazioni indotte dai trend climatici e dalle modifiche territoriali (uso del suolo, interventi sugli alvei, industrie) che avvengono nei bacini afferenti generando una sovrapposizione di effetti che modulano l'evoluzione del tratto di mare ricevente e delle coste a differenti scale spaziali e temporali.

Per poter analizzare un sistema così complesso e separare il più correttamente possibile le variazioni indotte da un'opera rispetto all'evoluzione del sistema stesso è quindi fondamentale conoscere le caratteristiche fisiche e dinamiche dell'area oggetto di studio e l'attuale stato ambientale, attraverso anche un'approfondita analisi dei principali impatti e delle pressioni che influiscono sull'intera area e gli habitat presenti.

Questo progetto si pone l'obiettivo di studiare le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche dell'area compresa tra Capo Linaro e Capo d'Anzio, attraverso uno studio multidisciplinare che prevede l'integrazione di dati osservativi e modellistica numerica e di supportare lo sviluppo delle opere e la loro integrazione nell'area supportando la progettualità di interventi di prevenzione e mitigazione.

Le attività del progetto verranno svolte dalla Divisione OPA del CMCC, con il supporto scientifico e la partecipazione alle attività di ricerca di altri Enti e Istituti, quali: Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina (DEB) dell'Università degli studi della Tuscia, Scripps Institution of Oceanography UC San Diego, CNR, Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze dell'Università di Roma 3.

L'area è dominata dalla presenza del fiume Tevere che, essendo il principale corso d'acqua dell'Italia centrale, influenza in maniera significativa il bilancio sedimentario nell'area e la distribuzione delle biocenosi. La stessa area sarà interessata da una serie di attività legate alla realizzazione delle infrastrutture portuali connesse al 'Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino - I Lotto Funzionale'. Le opere previste saranno realizzate in fasi differenti e le attività descritte nel presente progetto saranno funzionali alla realizzazione del I Stralcio del I Lotto Funzionale.

Le opere ascritte al 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. Progetto I Stralcio del I Lotto Funzionale del Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino

Il progetto inoltre deve ottemperare 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.

Tiene conto inoltre delle osservazioni ISPRA di marzo 2015 (Osservazioni al documento "Nuovo porto commerciale di Fiumicino. progetto di monitoraggio dei comparti biotico, morfodinamico e di trasporto solido lungo l'unità fisiografica Capo Linaro - Capo d'Anzio" (rev. 1 del 7/2014).

Al fine quindi di redigere questo progetto in modo da analizzare l'evoluzione dell'ambiente marino nelle aree potenzialmente impattate, è stato predisposto un progetto preliminare (Fase 0), che include attività di campo e indagini a scala di Unità Fisiografica funzionali alla calibrazione dei modelli

numerici di simulazione per la realizzazione di scenari utili alla definizione delle attività di caratterizzazione e di monitoraggio che comprendesse le Fasi Ante Operam, Cantiere e Post Operam.

Le tempistiche delle opere hanno però accelerato la necessità di procedere con un Piano di Monitoraggio preliminare di seguito presentato, che sarà aggiornato e modificato in fieri sulla base delle risultanze della modellistica numerica.

Infine, il Piano di Monitoraggio è stato predisposto in modo tale da poter essere facilmente integrato e adattato nel momento in cui iniziassero la realizzazione del secondo lotto del primo stralcio.

## 2. Area di studio

L'area di studio comprende un tratto di costa lungo circa 100 km e si estende da Capo Linaro 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 cuspidè deltizia del Tevere che, con una lunghezza di 405 km e un bacino idrografico di 17375 km<sup>2</sup>, rappresenta il principale corso d'acqua dell'Italia centrale.

La presenza del fiume Tevere condiziona con il suo apporto di sedimenti (*fig. 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 (*fig. 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 peri-portuale, a livello preliminare sono state individuate quattro zone rappresentative tre in corrispondenza di aree costiere naturali: a nord Furbara e Passo Scurò, Castel Porziano a sud della foce del Tevere, una in corrispondenza della spiaggia di Fregene che, sebbene presenti un retrospiaggia fortemente antropizzato, costituisce un'area molto sensibile dal punto di vista della dinamica litoranea e dell'uso turistico; inoltre verranno analizzate l'area in prossimità del delta del fiume Tevere e le chiusure, a nord e a sud dell'unità fisiografica. Tali aree sono state successivamente utilizzate, come aree campione dove analizzare le eventuali variazioni ecologiche e geomorfologiche che potrebbero essere generate dalla realizzazione delle nuove opere della Darsena Pescherecci a Fiumicino; mentre tutte le informazioni utili ai fini dell'analisi del campo idrodinamico e della dispersione delle particelle fini e necessarie alla calibrazione dei modelli numerici saranno analizzate a scala di Unità fisiografica.

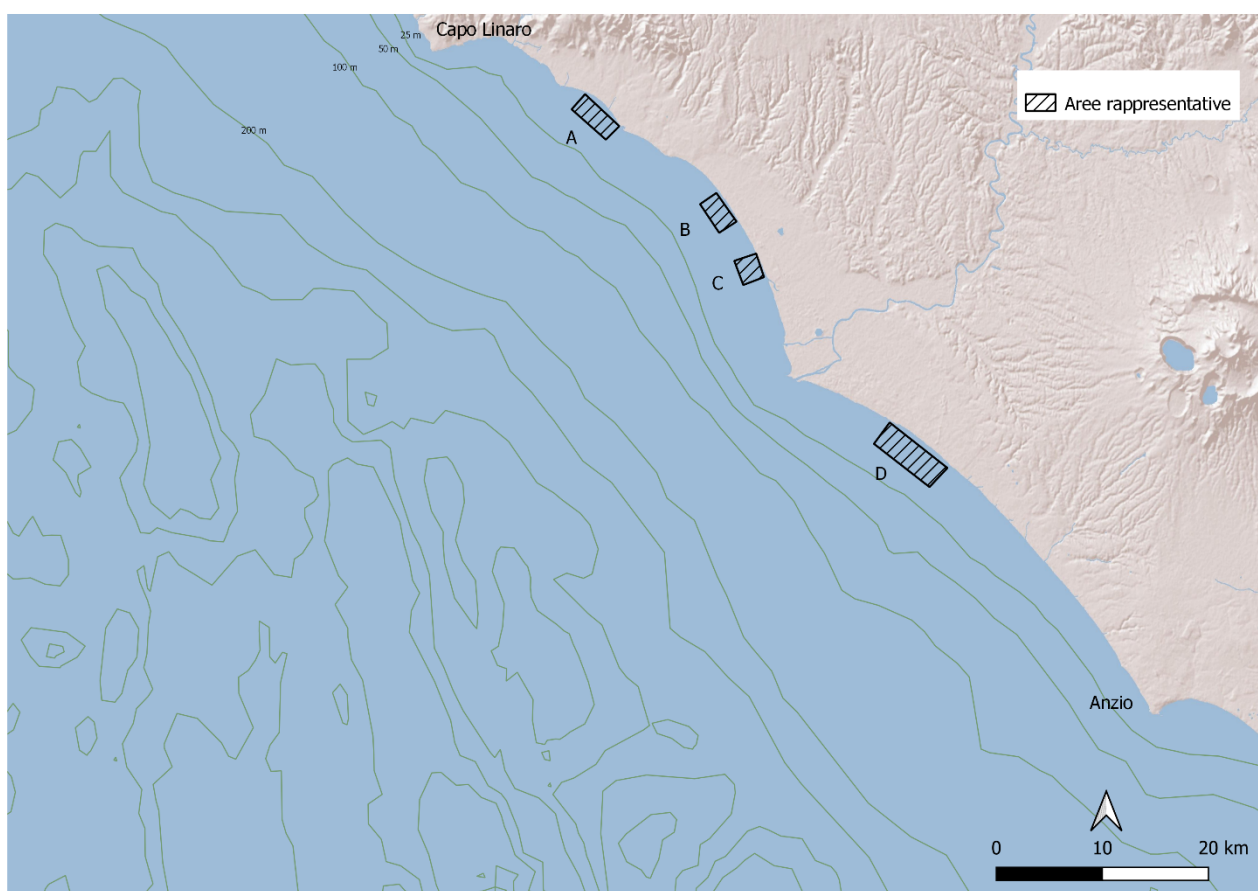


Figura 4. Unità Fisiografica Capo Linaro – Capo Anzio: aree costiere rappresentative presso Furbara (A), Passo Scurò (B), Fregene (C), Castel Porziano (D)

### **3. Architettura del progetto e strategia del piano di campionamento**

Come precedentemente introdotto, il progetto deve rispondere a due principali requisiti: alle prescrizioni del Decreto di Valutazione di Impatto Ambientale (V.I.A.) n. 7 del 16.02.2010 e all'integrazione, per quanto possibile, delle differenti attività legate allo studio dettagliato dell'ecosistema marino costiero nell'area oggetto delle prescrizioni, tenendo conto anche delle osservazioni ISPRA di marzo del 2015 al 'Progetto di monitoraggio dei comparti biotico morfodinamico e di trasporto solido lungo l'unità fisiografica Capo Linaro Capo d'Anzio' del luglio 2014.

Come previsto nel punto 10, lettera h del Decreto di Valutazione di Impatto Ambientale (V.I.A.) n. 7 del 16.02.2010, il progetto predisposto prevede quindi differenti attività che consentiranno l'analisi dei potenziali impatti a scala di unità fisiografica per i due principali comparti investigati: "biotico" e "morfodinamico e di trasporto solido", tenendo in considerazione tutte le componenti biotiche e abiotiche comprese nelle matrici acqua, sedimento e benthos, 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.

Si articola in tre fasi distinte che corrispondono alle fasi previste dal Decreto di Valutazione di Impatto Ambientale (V.I.A.) n. 7 del 16.02.2010 e consentiranno di studiare lo stato dell'ambiente marino prima della realizzazione del porto, per un periodo di almeno due stagioni significative, di monitorare gli eventuali impatti e di proporre soluzioni di mitigazione durante la realizzazione delle opere e di monitorare e verificare gli eventuali impatti che si possono generare per almeno due anni dopo la realizzazione del porto.

Dal punto di vista tecnico-operativo il progetto costituirà un moderno sistema osservativo integrato che si sviluppa in tre componenti fondamentali: osservativa, informativa e la componente dei modelli numerici, che saranno interconnesse in modo che dati e risultati previsionali, per ciascuna specifica attività, saranno elaborati e resi disponibili, non solo attraverso relazioni tecnico-scientifiche, ma integrati e rappresentati attraverso piattaforma GIS per la realizzazione di carte tematiche dell'intera area con la possibilità di sovrapporre i risultati delle simulazioni ai risultati delle caratterizzazioni sperimentali, per valutare correttamente i potenziali effetti sugli ecosistemi, la morfologia costiera e gli usi.

L'uso di modelli numerici consentirà inoltre di prevedere differenti scenari evolutivi della linea di costa e di fornire quindi durante l'intero svolgersi delle attività un supporto alla individuazione e progettazione di interventi mitigativi.

Nell'analisi delle attività progettuali si è tenuto conto delle differenti caratteristiche delle attività sperimentali integrando, laddove possibile, le operazioni da effettuare in campo.

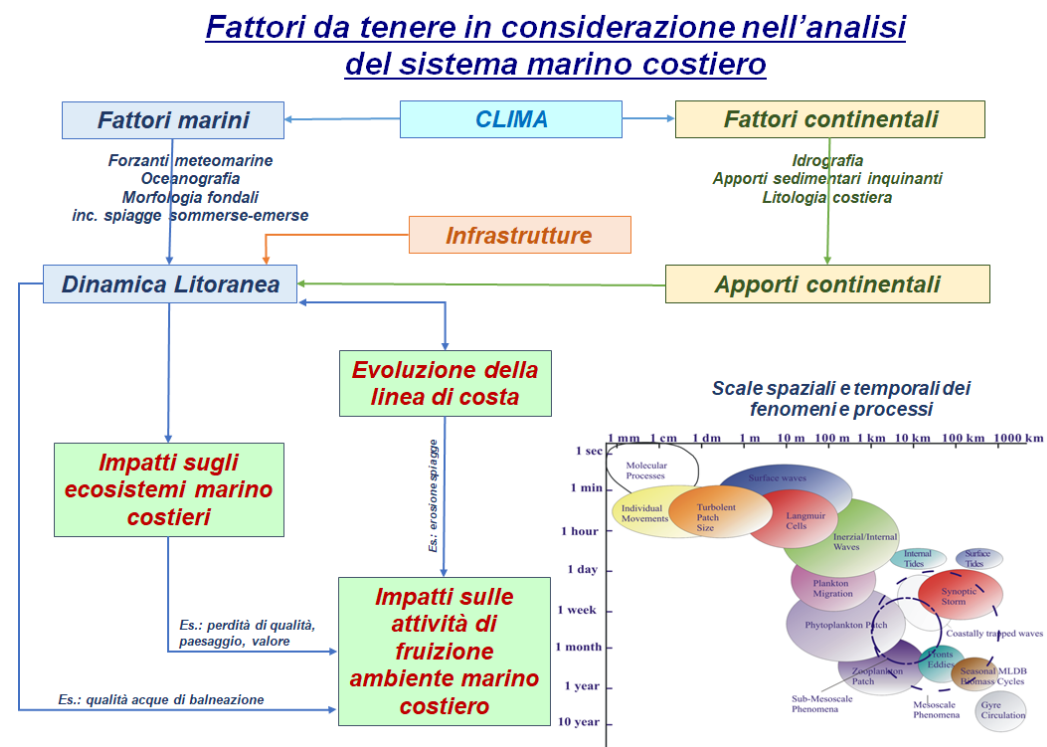


Diagramma 1. Schema logico del piano di monitoraggio

Al fine di valutare la consistenza delle eventuali alterazioni ai sistemi naturali generate dalla realizzazione del porto rispetto ai trend naturali, il progetto si basa quindi su una strategia che, prendendo in considerazione le scale spaziali e temporali delle differenti fenomenologie e delle loro variazioni, integra in un sistema osservativo avanzato, una gerarchia di modelli numerici, attività osservative e sperimentali, telerilevamento e analisi delle informazioni al contorno, con la creazione di un database e di una piattaforma GIS che permetteranno di organizzare e gestire il flusso delle informazioni e fornire adeguate cartografie tematiche.

Le attività sperimentali di progetto sono anticipate da una serie di simulazioni (Fase 0), già in corso di implementazione, che consentiranno di ottimizzare il piano di monitoraggio.

Tutte le attività sperimentali fondamentali per la predisposizione e la calibrazione dei modelli numerici vengono iniziate nella Fase 0, integrate e completate nella Fase 1, che si sovrappone temporalmente alla Fase 0.

Sempre nella Fase 1, al termine delle simulazioni previste nella Fase 0, verranno identificate e quantificate le attività di monitoraggio che si concentreranno sulle aree potenzialmente più soggette all'impatto generato dalla realizzazione delle opere.

Sempre durante la Fase 0 viene effettuata la rassegna e raccolta delle informazioni e dei dati pregressi, organizzata la struttura del DataBase e del GIS.

Inoltre, la Fase 0 vede la predisposizione del modello a scala regionale di onde e correnti innestato nel modello di circolazione generale a grande scala e in un modello delle foci fluviali del Tevere. Trattandosi di un modello ad elementi finiti 3D (Shyftem, vedi rel. Cap.) la griglia viene infittita molto sotto costa arrivando alla massima risoluzione nell'area del porto di Fiumicino e delle aree limitrofe e per gli alvei fluviali. Nella Fase 0 la componente di misura si limita all'essenziale con tre transetti oceanografici costa largo che delimitano l'area di studio a scala di unità fisiografica (ripetuti in due stagioni, stratificazione e mescolamento), il lancio di boe lagrangiane e alcuni campioni per la calibrazione dei dati satellitari; inoltre verranno effettuati (sempre in due stagioni) alcuni profili della spiaggia sommersa sulla cuspide deltizia del Tevere per calibrare le batimetrie dei modelli.

La scala spaziale dell'Unità Fisiografica Capo Linaro – Capo d'Anzio è di circa 100km, quella temporale minima di almeno 1 anno. Infatti, la presenza del Tevere al centro dell'Unità Fisiografica modula con un ritmo annuale il bilancio sedimentario, mentre le forzanti meteomarine ridistribuiscono i sedimenti mobilitandoli mediante le mareggiate più importanti e ridistribuendoli gradualmente in funzione delle dinamiche tipiche stagionali. Inoltre, anche se il trasporto sedimentario viene assolto prevalentemente dalle correnti litoranee innestate da onde e vento, queste correnti interagiscono con la circolazione a scala più grande che modula in maniera più forte il trasporto delle particelle più fini, alle quali si legano gli inquinanti, e dei nutrienti, entrambi interagenti con il biota.

È fondamentale quindi, ai fini di prevedere le modalità di trasporto delle sabbie e delle particelle più fini, una strategia temporale del progetto che preveda l'analisi delle dinamiche oceanografiche e sedimentarie costiere alle opportune scale spaziali e temporali e come queste si correlano alla dinamica a scala più grande. L'uso di un modello a griglia non strutturata innestato nel modello a

scala di bacino rappresenta allo stato attuale la migliore soluzione realizzabile. Inoltre, il modello scelto è già stato applicato in numerose casistiche dando risultati più che attendibili, e presenta già i moduli in grado di simulare le differenti grandezze che verranno studiate in questo progetto. La validazione dei modelli rappresenta un'azione importante ai fini di qualificare i risultati del modello nelle sue differenti applicazioni sia dal punto di vista oceanografico, che sedimentario e geomorfologico. Inoltre, la messa a punto del modello operativo consentirà di effettuare previsioni in tempo reale dei possibili impatti delle attività di cantiere, di potenziali oil spill e dell'insorgenza di potenziali fioriture algali.

Lo studio dell'impatto del nuovo porto sulla geomorfologia costiera necessita infine un approccio di analisi a lunga scala temporale. Mediante modelli della linea di riva è possibile analizzare l'avanzamento-arretramento della linea di costa e dei profili della spiaggia sommersa. La validazione di questi modelli può essere effettuata simulando una variazione di un periodo noto sufficiente a rappresentare una variazione a lungo periodo temporale: si analizza la situazione della linea di riva nel passato (1990), si simula con il modello l'evoluzione a partire dal 1990 ad oggi e si confrontano i risultati con la situazione attuale: questa analisi ci permetterà di validare il modello. Quindi si effettuano simulazioni a partire dalla situazione attuale sino ai prossimi 30 anni per valutare l'impatto sul sistema morfodinamico a medio e lungo periodo.

Il progetto si configura come un piano flessibile e modulare in modo da poter essere facilmente e rapidamente integrato e/o modificato sulla base della modellistica numerica.

Per questi motivi e al fine di ottemperare a quanto richiesto dal VIA, nella Fase 1 a partire dall'estate 2020, verranno poste in essere le seguenti attività (vedi Grafico 2.):

- integrazione delle attività sperimentali previste nella Fase 0 volte alla validazione dei modelli numerici, in particolare: misure oceanografiche di onde, correnti, caratteristiche della colonna d'acqua e misure sedimentologiche e di trasporto solido (inclusi apporti fluviali);
- integrazione delle attività sperimentali previste nella Fase 0 volte ad una analisi del comparto morfodinamico in due stagioni significative (estate e inverno) e dopo il primo evento meteomarinario significativo; studio delle portate liquide e solide del Tevere e dei principali corsi d'acqua affluenti, in periodo estivo (magra), invernale e durante una piena autunnale;

- studio della variazione della linea di riva a breve e a lungo termine mediante: analisi storica della linea di riva e ricostruzione dei profili spiaggia sommersa (a partire dal 1990) e successive modifiche mediante GIS; predisposizione e simulazioni attraverso il modello per analisi evoluzione linea di riva a breve e lungo periodo (bilancio sedimentario e X-beach);
- predisposizione del modello operativo e attività di validazione;
- studio del comparto morfodinamico; si rende necessario introdurre anche una serie di attività di caratterizzazione dopo il primo evento meteomarinico significativo, in quanto responsabili della rimodellazione più significativa della spiaggia sommersa ed emersa;
- caratterizzazione del comparto biotico e delle caratteristiche chimiche dei sedimenti ante operam;
- installazione di una piattaforma di misura dotata di ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), in una posizione da definire dopo le prime simulazioni, e di una boa ondometrica per periodi di tempo significativi; nel corso delle attività verranno introdotte piattaforme di misura autonome in modo da poter disporre di maggiori informazioni, ottimizzando il piano di campionamento senza aggravio dei costi;
- mediante il telerilevamento da satellite si potrà avere la visione sinottica di determinate grandezze quali clorofilla *a*, CDOM (Chlorophoric Dissolved Organic Matter), torbidità; inoltre si monitorerà l'evoluzione della linea di riva.

Il flusso delle attività di progetto della Fase 1 prevede una tempistica con inizio delle attività a luglio-agosto 2020 e termine delle attività ad agosto 2021, in tempo utile per la fase di cantiere.

A luglio-agosto del 2020 inizieranno tutte le attività che richiedono almeno due stagioni di misure e che andranno a integrare le attività iniziate nella Fase 0, in modo da ottimizzare lo sforzo di campionamento. Inoltre, nel 2020, verrà iniziato lo studio della evoluzione della linea di riva a medio e lungo termine che richiede una fase preparatoria di raccolta e digitalizzazione delle informazioni e dei dati pregressi non semplice. Entro luglio 2021 si avranno le prime analisi degli impatti nel medio e lungo periodo. Una volta validato il modello potranno essere effettuate simulazioni nel medio e lungo periodo considerando la realizzazione delle opere relative alle differenti fasi di sviluppo del porto.

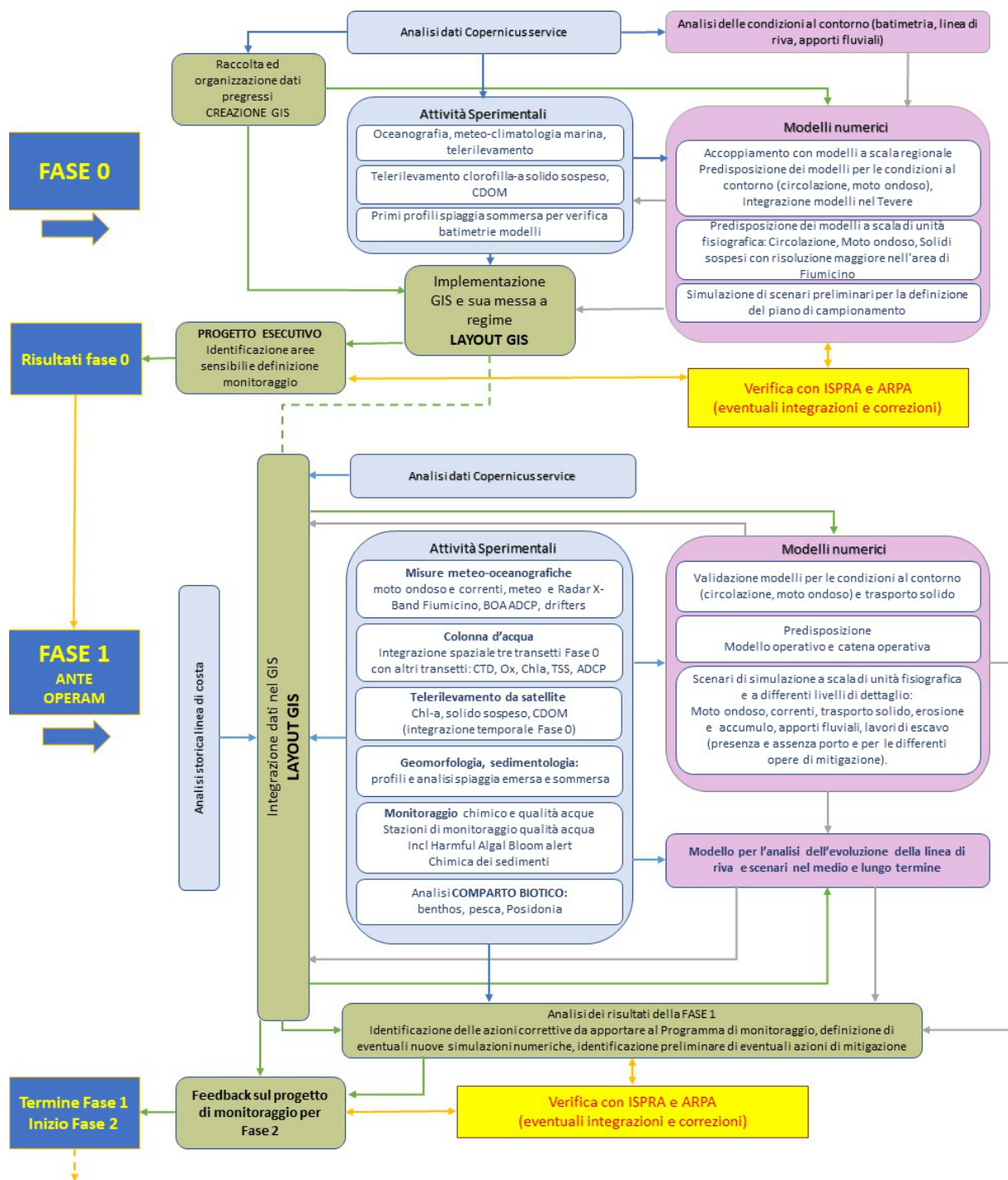


Diagramma 2. Schema delle interazioni fra le differenti attività di progetto relative alla Fase 0 ed alla Fase 1.

Per quanto attiene alla caratterizzazione del comparto biotico e della chimica dei sedimenti le attività saranno effettuate nel 2021, in particolare: mentre la strumentazione fissa di misura comincerà ad acquisire in primavera, la caratterizzazione biologica e chimica nell'estate 2021 prima dell'inizio dei

lavori e verrà ripetuta nella stessa stagione dopo la conclusione dei lavori. Sempre prima della fase di cantiere verrà effettuato una analisi quali-quantitativa del pescato delle marinerie locali.

Al termine della Fase 1, l'analisi dei risultati potrà orientare l'attività della Fase 2 (Cantiere, vedi Diagramma 3.).

L'installazione di strumentazione fissa (ADCP e boa ondometrica low cost, dotati anche di sensori per la misura CT e TSS), la predisposizione di una attività di misura sistematica in un punto fisso (dotata anche di strumentazione per la identificazione delle fioriture algali potenzialmente tossiche) inizieranno nella Fase 1 e proseguiranno per l'intera durata del progetto e in particolare durante le attività di escavo della fase di cantiere.

La fase 2 prevede il monitoraggio della dinamica (moto ondoso e correnti), della colonna d'acqua e dei profili della spiaggia emersa e sommersa e di tutte quelle grandezze che consentiranno di continuare ad affinare i modelli matematici. Inoltre, durante questa fase verranno implementati i modelli di Oil Spill e di dispersione batterica.

La messa a punto del modello operativo e l'assimilazione dei dati consentirà di produrre scenari in tempo reale e di effettuare previsioni, in modo da poter supportare l'attività di verifica e le eventuali azioni correttive. Il modello operativo ad esempio consentirà di prevedere come si disperderà la plume di sedimenti causata dalle operazioni di escavo e anche eventuali di altri fenomeni inquinanti.

Inoltre, nella stazione di misura ripetuta (la cui posizione è determinata anche dalla modellistica numerica) proseguiranno le misure sistematiche di qualità della colonna d'acqua, inclusa la fioritura di potenziali alghe tossiche, misure che assimilate nel modello operativo e integrate con il resto del sistema osservativo costituiranno un vero e proprio sistema di "early warning".

Mediante il modello operativo sarà infatti possibile prevedere con anticipo l'eventuale impatto di potenziali fioriture tossiche o di eventi inquinanti sul litorale, e quindi verrà messa a punto una procedura di allarme tramite la quale l'Autorità Portuale informerà tempestivamente ARPA e le Municipalità interessate del rischio da inquinamento.

Nel caso in cui, durante questa fase, a seguito delle attività di misura e delle simulazioni di scenari, si verificasse l'insorgenza di impatti non previsti o più estesi, dovuti alla realizzazione delle opere, che richiedano ulteriori azioni correttive e/o mitigatrici, verranno analizzate diverse ipotesi progettuali correttive volte a mitigare gli impatti dell'opera mediante "adeguate azioni da attuare in

corso d'opera e in fase di esercizio”. Ciascuna ipotesi progettuale, che andrà ad integrare quanto ipotizzato nel PRP, verrà analizzata mediante simulazioni di scenario dei modelli messi a punto.

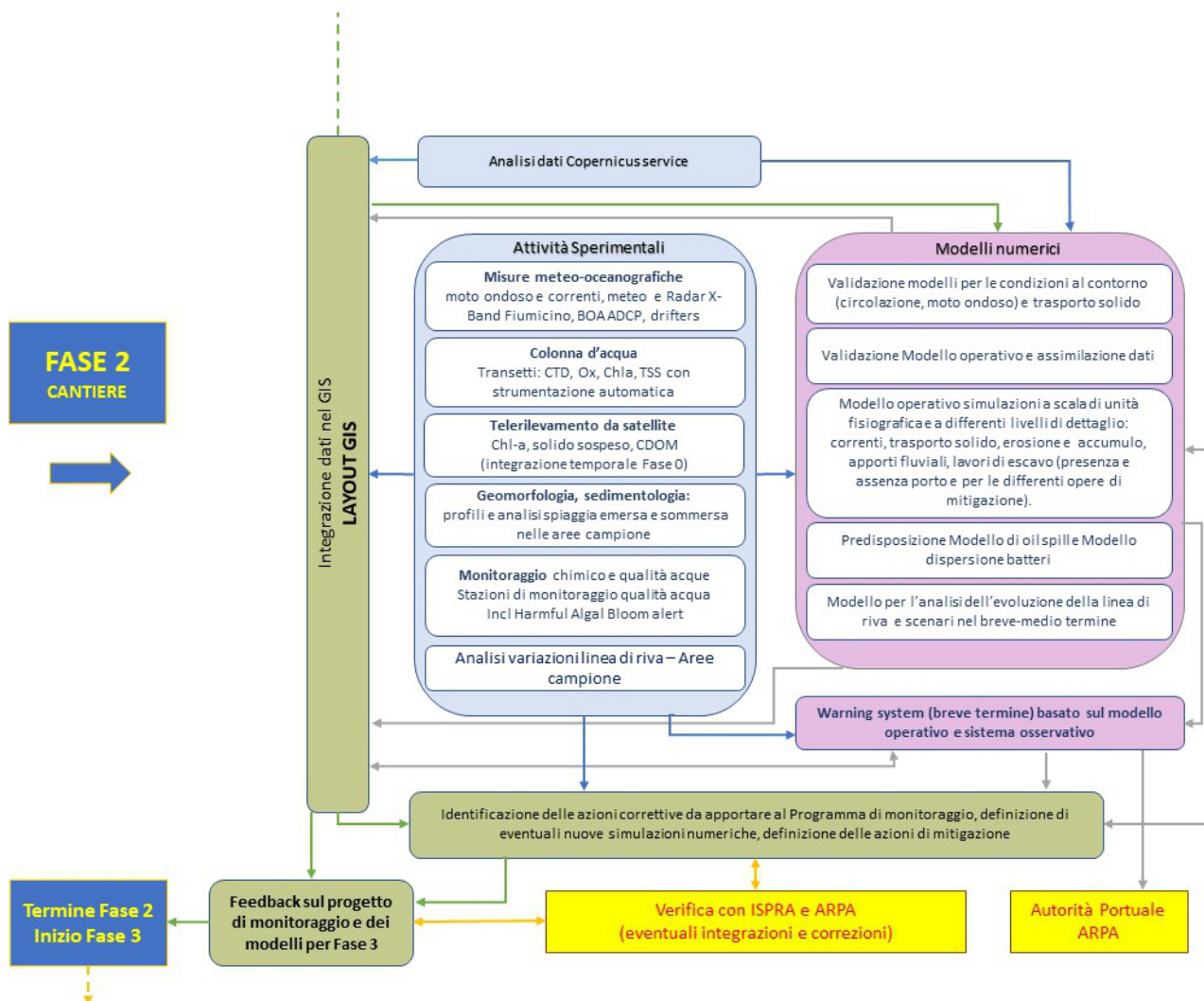


Diagramma 3. Schema delle interazioni fra le differenti attività di progetto relative alla Fase 2.

Durante la Fase 2 verranno impiegate avanzate piattaforme autonome per la misura della colonna d'acqua e del fondale. In questa maniera sarà possibile una massima flessibilità nel piano di campionamento che potrà essere adattato o esteso in qualsiasi momento in funzione della variabilità spazio-temporale delle dinamiche oceanografiche ed ecologiche.

Il controllo delle variazioni morfologiche della spiaggia verrà attuato sempre nelle località rappresentative dove si monitoreranno le variazioni dei profili della spiaggia sommersa ed emersa. A completamento di queste analisi si controlleranno anche le variazioni dei profili della spiaggia sommersa nell'area del delta del Tevere in modo da avere un riscontro delle variazioni indotte dallo spostamento delle sabbie della cuspidè deltizia e in profili distribuiti lungo l'unità fisiografica che serviranno per comprendere la variazione naturale dei profili di spiaggia sommersa.

Al termine della Fase 2, l'analisi dei risultati potrà orientare l'attività della Fase 3 (Post Operam).

La Fase 3 Post Operam prevede sostanzialmente il monitoraggio di tutte le componenti prese in considerazione durante la fase 1. Continueranno le misure di correnti e onde mediante una stazione ADCP, il Radar in banda X, il posizionamento di un ondometro low-cost, misure sistematiche in una stazione fissa e transetti CTD, clorofilla a, TSS mediante piattaforme autonome in modo da fornire i dati che serviranno per la validazione progressiva dei modelli numerici e per l'assimilazione nel modello operativo.

Il modello operativo consentirà inoltre di controllare la circolazione delle acque all'interno del bacino portuale, e di verificare la dispersione di sedimenti ed inquinanti nel caso di dragaggi, anche in emergenza; l'assimilazione dei dati delle stazioni fisse di misura e delle immagini satellitari lo portano ad essere un vero e proprio strumento operativo a supporto della gestione delle emergenze e del controllo ambientale.

Continueranno inoltre in un punto fisso le misure sistematiche di qualità della colonna d'acqua, inclusa la fioritura di potenziali alghe tossiche, misura assimilata nel modello operativo.

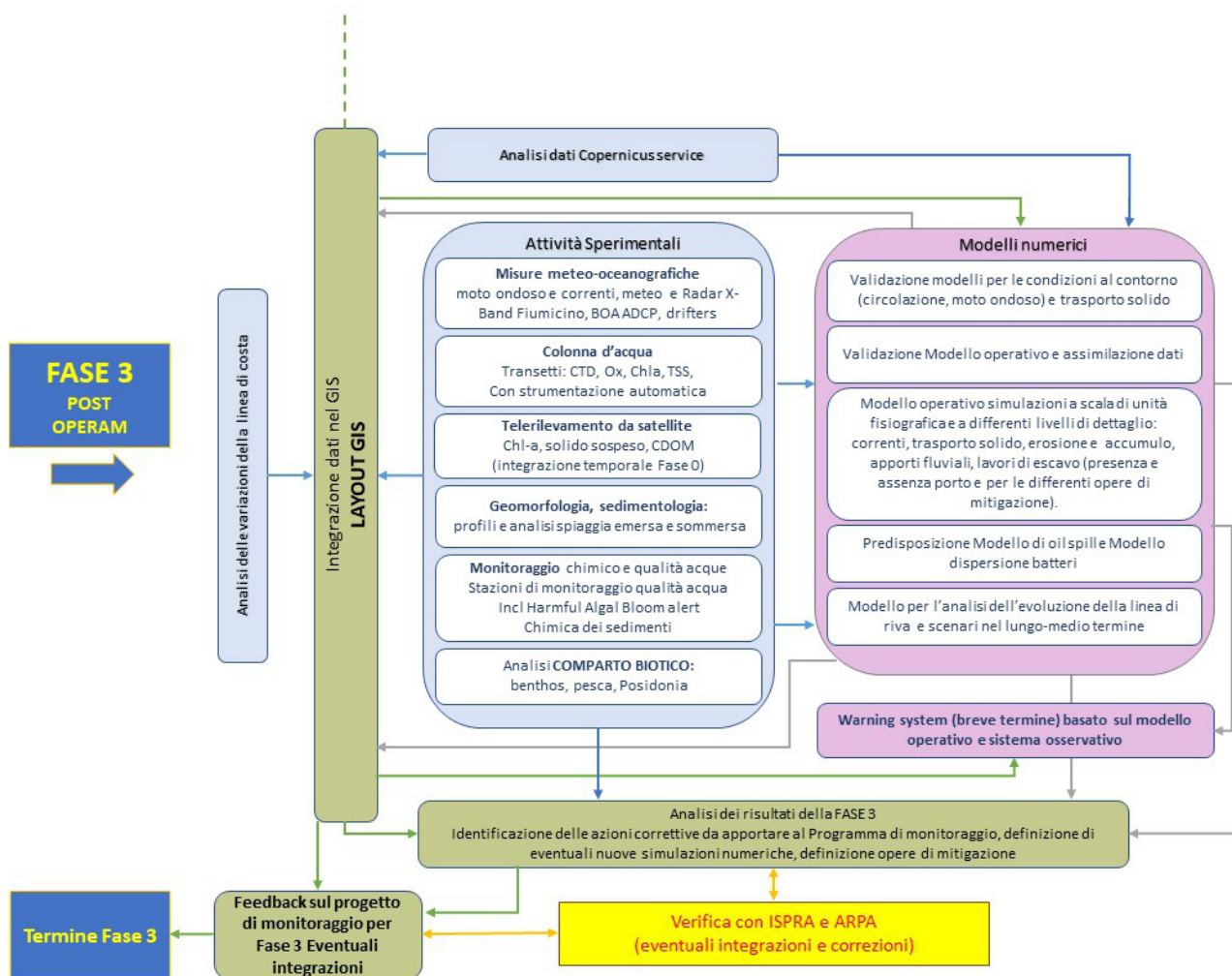


Diagramma 4. Schema delle interazioni fra le differenti attività di progetto relative alla Fase 3.

Al fine di redigere in via preliminare il piano di campionamento relativo al I Stralcio del I Lotto funzionale del nuovo porto di Fiumicino e di ottimizzare la selezione e il posizionamento dei punti di campionamento, di misura e delle stazioni di monitoraggio fisse, sono stati analizzati i dati meteorologici dell'ultimo anno ed è stata effettuata una prima analisi delle immagini satellitari disponibili nei diversi regimi di vento e piovosità. In questo modo è stato possibile vedere come le diverse condizioni dinamiche influenzano il trasporto solido, dando un primo contributo all'ottimizzazione del piano di campionamento. I punti di campionamento previsti dal presente progetto potranno essere rilocati sulla base dei risultati delle simulazioni dei modelli numerici ottenuti nell'ambito del progetto di ricerca 'Predisposizione delle attività di indagine per la realizzazione dello stralcio del I Lotto Funzionale del nuovo porto commerciale di Fiumicino' (Fase 0).

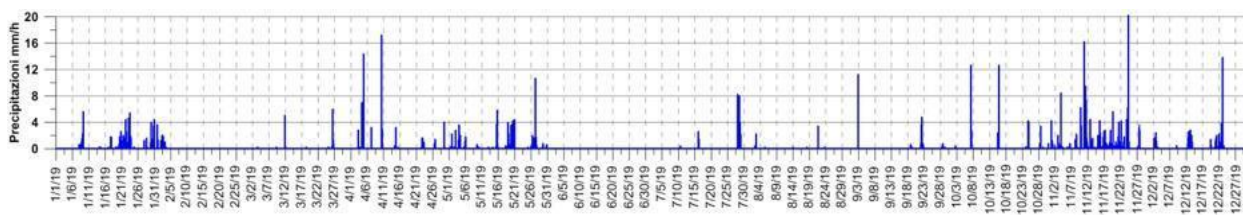


Figura 5. Dati 2019 di precipitazione stazione meteorologica di Fiumicino

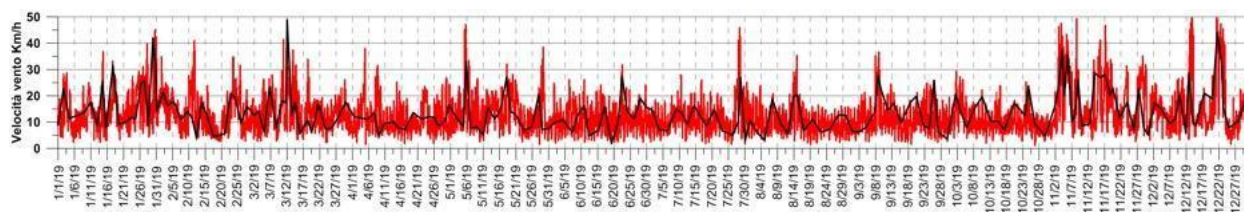


Figura 6. Dati 2019 di velocità del vento stazione meteorologica di Fiumicino

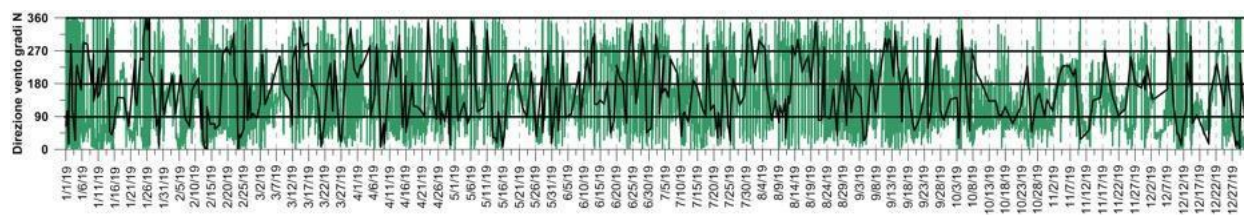


Figura 7. Dati 2019 di direzione del vento stazione meteorologica di Fiumicino



Figura 8. Immagine Sentinel Novembre 2019 Libeccio – Pioggia



Figura 9. Immagine Sentinel Aprile 2019 Tramontana



Figura 10. Immagine Sentinel Maggio 2019 Grecale/Tramontana



Figura 11. Immagine Sentinel Luglio 2019 Maestrone – post pioggia



Figura 12. Immagine Sentinel Ottobre 2019 Ponente

Dall'elaborazione di questi primi dati si evidenzia come i diversi regimi meteomarini presenti nell'area di studio influenzino la dinamica marina, dando particolare evidenza alla distribuzione della plume del fiume Tevere sia verso Nord che verso Sud. L'ampiezza dei processi connessi all'area oggetto di studio necessita quindi un monitoraggio esteso all'intera area, che consenta di caratterizzare la dinamica presente, gli impatti naturali e i potenziali impatti e variazioni dovuti alle opere antropiche.

Di seguito vengono presentate le attività che saranno effettuate nel corso del progetto.

#### **4. Raccolta dati pregressi e predisposizione GIS, integrazione dei dati acquisiti nella piattaforma GIS**

##### **4.1. Raccolta dati disponibili all'interno dell'U.F. per la redazione del nuovo piano di monitoraggio**

Per il progetto sarà predisposto un database per la catalogazione, analisi e utilizzo di dati pregressi relativi all'area dell'U.F. L'analisi dei dati pregressi riguarda sia la raccolta di pubblicazioni scientifiche internazionali con referaggio, sia report e letteratura grigia della Regione Lazio, ISPRA, ARPA e Università. Inoltre, saranno acquisite immagini telerilevate e cartografie digitali. Il database sarà strutturato con una suddivisione gerarchica delle matrici e dei comparti ambientali oggetto di indagine. L'estensione spaziale del database è relativa all'Unità Fisiografica (U.F.) Capo linaro – Capo Anzio. Il database 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 saranno esportabili in formato universale ASCII, importabile da qualsiasi altra piattaforma.

L'attività sarà effettuata durante la Fase 0.

##### **4.2. Predisposizione GIS**

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. La componente Cartografica sarà prodotta compatibilmente con 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.

L'attività sarà effettuata durante la Fase 0.

##### **4.3. Integrazione dati nella piattaforma GIS**

Attraverso il database descritto nel sottoparagrafo “Raccolta dati disponibili all'interno dell'U.F. per la redazione del nuovo piano di monitoraggio” verranno creati layers che costituiranno la rappresentazione sinottica del GIS. I layers saranno costituiti dai dati provenienti dalla raccolta di cui sopra e dall'elaborazione dei dati acquisiti sperimentalmente. I layers saranno prodotti in due fasi

distinte. Nella prima fase saranno acquisiti i layers relativi alle caratteristiche topografiche generali dell'ambiente studiato. Successivamente, verranno elaborati ed integrati ulteriori layer ottenuti dall'elaborazione dei dati provenienti dalle attività sperimentali.

Attraverso l'utilizzo del GIS verrà implementata la *carta d'uso del mare* che potrà essere utilizzata per la generazione di scenari mirata all'analisi dei conflitti d'uso e degli impatti dell'opera portuale sul valore economico ecosistemico dell'area.

L'attività sarà effettuata durante tutte le fasi progettuali.

| ATTIVITA'                                                                                              | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                                                                     | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021) | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre<br>2020-Agosto 2021) | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto<br>2021 post risultati<br>modellistica fase 0) | FASE 2<br>(24 mesi) | FASE 3<br>(24 mesi) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Raccolta dati pregressi e predisposizione GIS<br>Integrazione dei dati acquisiti nella piattaforma GIS | Raccolta dati disponibili all'interno dell'U.F per la redazione del nuovo piano di monitoraggio |                               |                                                      |                                                                             |                     |                     |
|                                                                                                        | Predisposizione GIS                                                                             |                               |                                                      |                                                                             |                     |                     |
|                                                                                                        | Integrazione dati nella piattaforma GIS                                                         |                               |                                                      |                                                                             |                     |                     |

Tabella 1. Attività previste per la raccolta dati pregressi e predisposizione GIS e integrazione dei dati acquisiti nella piattaforma GIS

#### 4.4. Dati di input per i modelli numerici

Il modello idrodinamico e il modello 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.

##### 4.4.1. *Analisi delle condizioni al contorno (batimetria, apporti fluviali e campo di vento)*

La morfologia sommersa verrà ricavata dalla banca dati disponibile su Emodnet, la quale sarà integrata con i dati dei rilievi batimetrici acquisiti nell'area dell'Unità Fisiografica. Verranno effettuati alcuni profili della spiaggia sommersa e verranno utilizzati i rilievi batimetrici multibeam disponibili, al fine di validare i dati batimetrici acquisiti.

Gli inputs fluviali verranno ricavati dai 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). Il campo di vento verrà ricavato dai dataset del sistema ECMWF fornito al CMCC dall'Aeronautica Militare.

L'attività sarà effettuata durante la Fase 0.

##### 4.4.2. *Analisi della Linea di riva da Copernicus e dati bibliografici*

La linea di riva iniziale (Fase 0) inserita nel modello numerico a griglia non strutturata è quella prodotta da Copernicus integrata e modificata con altri dati bibliografici.

Al fine di migliorare la linea di riva del modello, nell'ottica di una migliore risoluzione delle simulazioni dei processi costieri, durante le fasi del monitoraggio Fase 0, Fase 2 e Fase3, sarà effettuato uno studio dell'evoluzione della linea di riva con cadenza annuale mediante analisi di immagini satellitari (e fotografie aeree laddove disponibili).

L'analisi della variazione della linea di riva e della topografia emersa della spiaggia consentiranno attraverso l'integrazione dei dati relativi alla spiaggia sommersa, di valutare i volumi di sedimento erosi e deposti utili alla determinazione del bilancio sedimentario dei litorali presi in esame.

Oltre alla dinamica del trasporto solido saranno presi in considerazione anche la presenza di ulteriori processi evolutivi delle aree costiere come l'eustatismo e la subsidenza.

Al fine di interpretare in maniera accurata la posizione della linea di costa verranno scelti degli indicatori come HWL (High Water Line) che basa la sua stima sull'ultimo evento di acqua alta e di conseguenza risulta facilmente distinguibile nelle foto aeree e nelle osservazioni satellitari o MHWL (Mean High Water Line) che si basa sull'intersezione della HWL con la topografia trasversale ottenuta mediante rilievi topografici e altimetrici sul campo.

#### 4.4.3. Analisi dati Copernicus service

I dati inerenti le correnti marine a mesoscala verranno ricavati dal modello NEMO del sistema Copernicus Marine Service. I dati di moto ondoso a mesoscala verranno ricavati dal modello WAM del sistema Copernicus Marine Service. L'attività sarà effettuata durante tutte le fasi del progetto.

| ATTIVITA'                            | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                                                         | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021) | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-Agosto 2021) | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021<br>post risultati modellistica fase 0) | FASE 2 (24 mesi) | FASE 3 (24 mesi) |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| Dati di input per i modelli numerici | Analisi delle condizioni al contorno (batimetria, apporti fluviali, campo di vento) |                               |                                                   |                                                                          |                  |                  |
|                                      | Analisi della Linea di riva (aggiornamento nei modelli)                             |                               |                                                   |                                                                          |                  |                  |
|                                      | Analisi dati Copernicus service                                                     |                               |                                                   |                                                                          |                  |                  |

Tabella 2. Attività previste per la raccolta dati di input per i modelli numerici

## **5. Oceanografia sperimentale**

### **5.1. Analisi del clima ondoso e delle correnti marine**

L'analisi di questi comparti risulta fondamentale per poter caratterizzare in maniera dettagliata l'area oggetto di studio e poter valutare le eventuali alterazioni a breve o lungo termine delle condizioni idrografiche che possono portare alla perdita di habitat di elevato valore naturalistico nonché alla perdita di aree di interesse socio-economico.

La stessa Marine Strategy include nel Descrittore 7 il monitoraggio delle 'condizioni idrografiche' come condizione fondamentale per il raggiungimento del GES, concorrendo anche alla valutazione di altri descrittori come la 'biodiversità', 'l'eutrofizzazione' e le 'reti trofiche'.

Risulta quindi di fondamentale importanza l'acquisizione di dati quanto più distribuiti nel tempo e nello spazio della dinamica e delle caratteristiche della colonna d'acqua in un'area in evoluzione per le nuove infrastrutture che saranno realizzate.

Il progetto prevede l'acquisizione di dati di onde e correnti attraverso sistemi fissi e lagrangiani durante le fasi ante, durante e post operam.

Le informazioni acquisite permetteranno di valutare la circolazione costiera e monitorare in continuo le condizioni di corrente e moto ondoso nell'area oggetto di studio, nonché di acquisire dati fondamentali alla validazione dei modelli matematici.

Saranno quindi acquisiti dati attraverso un sistema integrato costituito da Radar X-Band, stazioni di misura fisse per la misura di onde e correnti e campagne di misura delle correnti superficiali per mezzo di drifter.

I vantaggi ottenuti dal sistema radar sono sia di carattere scientifico, grazie all'elevata copertura spaziale che consente una migliore calibrazione dei modelli numerici, che di carattere logistico, in quanto installato a terra, fattore che riduce l'usura, i costi per le operazioni di manutenzione ed il rischio di danni da agenti esogeni. La presenza di stazioni di misura puntuale permetterà di calibrare e validare i dati di corrente superficiale e moto ondoso registrati dal sistema radar e di integrare le informazioni di corrente lungo la colonna d'acqua, fondamentali per gli studi relativi al trasporto solido. I drifter consentiranno di comparare i dati acquisiti dal radar delle correnti superficiali, ampliando l'area di indagine.

Il sistema di misura integrato e così progettato, permetterà un'osservazione sinottica ad alta risoluzione ed ampia copertura spaziale dei processi idrodinamici fondamentali che condizionano l'ambiente costiero, nonché una corretta validazione della modellistica matematica messa in campo. Di seguito vengono dettagliate le singole attività.

#### *5.1.1. Misure in continuo di onde e correnti con Radar X-Band*

Durante tutte le fasi del progetto saranno acquisiti in continuo i dati dello stato del mare in termini di correnti superficiali e onde attraverso un sistema radar X-Band installato sulla foce della Fiumara Piccola del fiume Tevere, con il supporto del Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina (LOSEM) del DEB dell'Università della Tuscia. Il sistema di misura coprirà l'area riportata in *figura 13*, caratteristica che rappresenta un'evoluzione importante rispetto al punto singolo misurato dalle tradizionali boe ondametriche, in quanto consente di studiare la dinamica su una scala più ampia e con un dettaglio molto elevato.

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. La velocità minima del vento per ottenere una misurazione ottimale dei parametri è di 3 m/s.

Il range di acquisizione del sistema a corto raggio dipende dall'altezza dell'installazione (Es. 15 m - 3.5 Km) con una risoluzione di 100 x 100 m.



Figura 13. Area di misura del sistema radar X-Band

In particolare, la caratterizzazione dello stato del mare viene raggiunta attraverso il processamento del segnale elettromagnetico di backscatter rimesso dalla rugosità del mare per effetto della risonanza di Bragg (Nieto et al., 2004; Nieto et al., 2000). A tal fine, risulta necessaria una dettagliata analisi statistica che consente di passare dall'immagine radar all'informazione spazio-temporale dello stato di mare (Serafino et al., 2010; Nieto et al., 2004). In questo modo, sarà possibile ottenere informazioni quali direzione d'onda, periodo, altezza e intensità e direzione delle correnti.

Questo sistema permetterà quindi di ottenere delle informazioni su direzione e intensità delle correnti litoranee direttamente influenzate dal moto ondoso (rip current e long-shore current) utili anche allo studio dell'evoluzione morfologica della spiaggia. Inoltre, le informazioni acquisite forniranno un importante strumento per calibrare i modelli di circolazione costiera, di propagazione del moto ondoso e particle tracking a più alta risoluzione, utili a definire la dispersione dei sedimenti durante le fasi di dragaggio e la dispersione del particolato sospeso trasportato dal Fiume Tevere situato a Sud dell'area in cui sorgerà la nuova struttura portuale.

### 5.1.2. Misure di onde con boe fisse low-cost 'rilocabili'

Al fine di comparare i dati acquisiti dagli altri sistemi di acquisizione dei dati ondametrici sarà installata una boa a basso costo, grazie alla collaborazione con LDL (Lagrangian Drifter Laboratory) dello Scripps Institution of Oceanography. Queste boe, che possono essere dotate anche di sensori integrativi (temperatura, conducibilità, pressione atmosferica e vento) saranno posizionate nell'area coperta dalle misure del radar, in modo da fare da punto di confronto con le misure acquisite dal radar X-Band, e successivamente nell'area esterna in modo da avere un punto di misura a largo utile per la validazione della modellistica numerica.

I dati saranno acquisiti in continuo per periodi definiti durante l'arco del progetto, durante le fasi ante, durante e post operam.

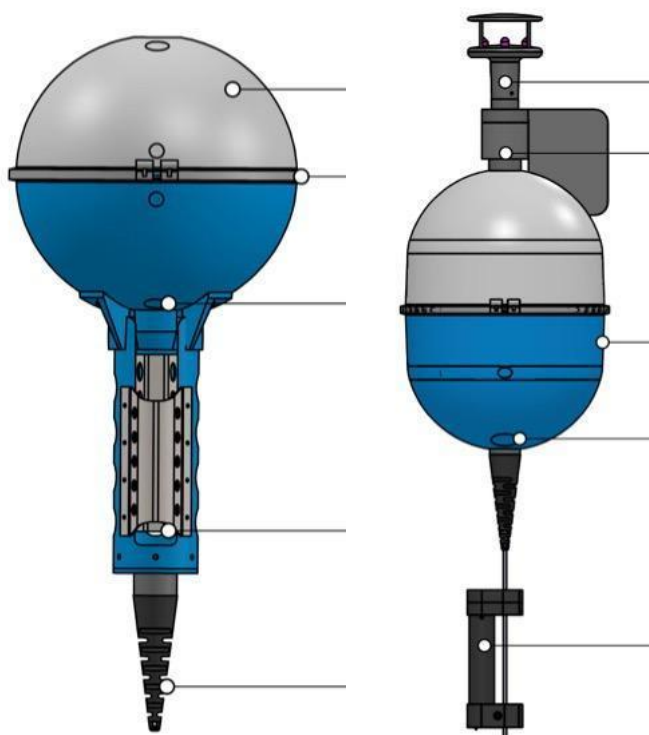


Figura 14. Esempi di boe ondametriche low-cost

### 5.1.3. Misure di correnti con ADCP

La Fase 1 vedrà l'installazione di un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) fisso al fine di acquisire dati di onde e integrare misure di correnti lungo la colonna d'acqua, fondamentali per la validazione dei modelli numerici lungo la colonna d'acqua. In particolare, l'ADCP consente di acquisire dati di moto ondoso attraverso 3 trasduttori acustici e un sensore strain-gauge di pressione, situato tra i trasduttori, che rilevando le variazioni prodotte dall'oscillazione della superficie dell'acqua permette di misurare lo spettro direzionale del moto ondoso con una accuratezza di 1 cm per l'altezza d'onda, 2° per la direzione d'onda e 0.1 sec per il periodo d'onda.

Il sistema sarà installato a circa 20m di profondità nel raggio di copertura del radar X-Band, su un mooring fissato sul fondo e lo strumento posizionato a circa 15 m dalla superficie, in modo che si evitino problematiche connesse alla ricopertura dello strumento da parte del sedimento di fondo.

I dati saranno acquisiti in continuo per periodi definiti durante l'arco del progetto, durante le fasi ante, durante e post operam.

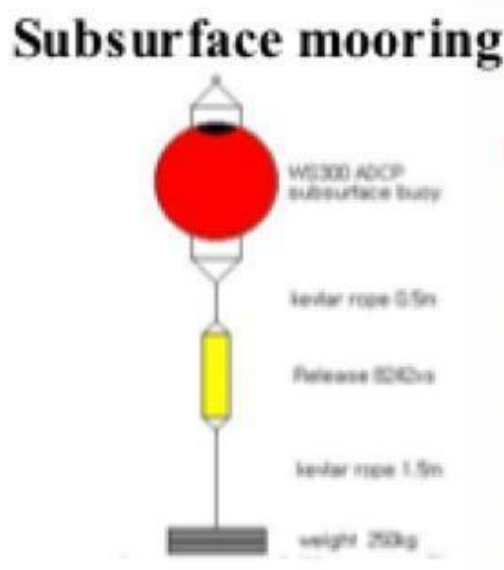


Figura 15. Mooring ADCP

L'utilizzo di questi sistemi permetterà l'intercalibrazione dei sistemi radar e la validazione dei modelli matematici di dinamica costituendo una fonte d'informazione importante per lo studio della

propagazione ondosa lungo il litorale.

#### *5.1.4. Campagne correntometriche con traccianti lagrangiani*

Gli strumenti lagrangiani, drifter, sono particolarmente adatti per studi di trasporto, in quanto danno informazioni dirette sul moto delle particelle d'acqua. Inoltre, consentono una stima diretta dei principali parametri che caratterizzano la dinamica superficiale e permettono soprattutto di monitorare vaste aree integrando così le misure acquisite dagli strumenti fissi.

Le campagne saranno effettuate durante le fasi ante, durante e post operam con la seguente frequenza e copertura areale:

- Fase 1: lancio di n.3 drifter durante n.1 campagna all'interno dell'alveo in prossimità della foce della Fiumara Piccola del fiume Tevere; lancio di n.3 drifter durante n.1 campagna nell'area esterna (in corrispondenza di eventi di morbida o piena; questo lancio integra quelli previsti nella Fase 0);
- Fase 2: lancio di n.3 drifter durante n.3 campagne nell'arco dei 24 mesi all'interno dell'alveo in prossimità della foce della Fiumara Piccola del fiume Tevere; lancio di n.3 drifter durante n.3 campagne nell'arco dei 24 mesi nell'area esterna;
- Fase 3: lancio di n.3 drifter durante n.3 campagne nell'arco dei 24 mesi all'interno dell'alveo in prossimità della foce della Fiumara Piccola del fiume Tevere; lancio di n.3 drifter durante n.3 campagne nell'arco dei 24 mesi nell'area esterna.



Figura 16. Drifter per lo studio delle correnti superficiali

| ATTIVITA'                          | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                             | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021)              | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-Agosto 2021)     | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021<br>post risultati modellistica fase 0) | FASE 2 (24 mesi)                                                                      | FASE 3 (24 mesi)                                                                      |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Misura delle onde e delle correnti | Radar X-Band inclusa elaborazione dati                  | IN CONTINUO                                |                                                       | IN CONTINUO                                                              |                                                                                       | IN CONTINUO                                                                           |
|                                    | Misure correntometriche e di onde attraverso ADCP fisso |                                            |                                                       | Installazione in periodi predefiniti                                     |                                                                                       | Installazione in periodi predefiniti (200gg/anno)                                     |
|                                    | Misure di onde con boe fisse low-cost 'rilocabili'      |                                            |                                                       |                                                                          | Installazione per periodi definiti per validazione modelli e intercalibrazione metodi | Installazione per periodi definiti per validazione modelli e intercalibrazione metodi |
|                                    | Misure con boe lagrangiane                              | n. 3 Drifter<br>n. 2 Campagne<br>n. 2 Aree | n. 3 Drifter<br>n. 1 Campagna mareggiata<br>n. 2 Aree |                                                                          |                                                                                       | n. 3 Drifter<br>n. 3 Campagne<br>n. 2 Aree                                            |

Tabella 3. Attività previste per il comparto dinamica

## 5.2. Campagne di misura colonna d'acqua

Lo studio delle variazioni dei parametri fisici, chimici e biologici della colonna d'acqua in ambiente costiero risulta molto complicato in quanto i fenomeni che avvengono in tale zona hanno scale spaziali e temporali molto ridotte e sono caratterizzati da un'elevata dinamica e variabilità. Risultano però fondamentali per la caratterizzazione dell'area oggetto di studio, nonché per l'implementazione della modellistica numerica dal punto di vista della validazione e dell'assimilazione nonché per l'integrazione spaziale dei dati acquisiti con le stazioni fisse.

### 5.2.1. Misure con metodi tradizionali

Nell'arco del progetto saranno effettuati una serie di transetti lungo tutta l'unità fisiografica, lungo i quali verranno effettuate una serie di stazioni, come successivamente dettagliato: in corrispondenza delle stazioni saranno effettuati profili lunga colonna d'acqua di temperatura, conducibilità (salinità, densità), ossigeno disciolto, fluorescenza della clorofilla *a*, solido sospeso. Lungo i transetti saranno prelevati dei campioni di acqua per l'analisi della clorofilla *a*, del solido sospeso e della sostanza organica disciolta cromoforica CDOM (Chromophoric Dissolved Organic Matter), che serviranno per la calibrazione dei sensori e per la validazione dei dati satellitari.

Le procedure che verranno adottate per l'analisi dei parametri sopra indicati sono conformi ai metodi standard ISO per il campionamento, la conservazione e l'analisi dei campioni di acqua di mare, alle

metodiche descritte nei Manuali e Linee Guida APAT/CNR IRSA n. 29/2003 e successivi aggiornamenti e nelle 'Metodologie Analitiche di Riferimento-Programma di Monitoraggio per il controllo dell'Ambiente marino costiero/Triennio 2001.2003', MATTM, ICRAM, Roma 2001 e successivi aggiornamenti. In particolare: i) l'analisi della concentrazione di clorofilla a per la stima della biomassa fotosintetica verrà effettuata secondo i metodi descritti nei Manuali e Linee Guida ISPRA 56/2010 "Metodologie di studio del Plancton marino" e nel metodo ISO 10260:1992 "Water Quality Measurement of Biochemical Parameters; Spectrometric Determination of the Chlorophyll a Concentration"; ii) i solidi sospesi verranno analizzati in accordo con le metodologie descritte in Strickland & Parsons (1972) "A practical handbook of seawater analysis" e nei Manuali e Linee Guida APAT/CNR IRSA n. 29/2003; iii) la sostanza organica disciolta cromoforica CDOM verrà analizzata secondo le metodologie riportate in Wurl (2009) "Practical guidelines for the analysis of seawater" e nei protocolli NASA "Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation" Volume (IV), Mitchell et al. (2003).

I dati raccolti durante le campagne di misura consentiranno 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 nel DM 260/10 del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare per la valutazione dell'Elemento di Qualità Biologica (EQB) Fitoplancton e degli elementi chimico-fisici a sostegno degli EQB.

In particolare, le attività si articoleranno nelle varie Fasi così come di seguito dettagliato:

- Fase 1: saranno effettuate n.10 stazioni lungo n.9 transetti durante n.2 campagne, totale campioni prelevati n.45 (ad integrazione di quanto previsto nella Fase 0);
- Fase 2: saranno effettuate n.10 stazioni lungo n.12 transetti durante n.2 campagne, totale campioni prelevati n.30;
- Fase 3: saranno effettuate n.10 stazioni lungo n.12 transetti durante n.2 campagne, totale campioni prelevati n.30.



Figura 17. Sonda multiparametrica

#### *5.2.2. Studio dello stato trofico delle acque*

Al fine di analizzare le condizioni trofiche dell'area di studio e di calcolare l'indice trofico TRIX, individuato dal D.Lgs. 152/06 e successivi aggiornamenti per definire lo stato di qualità delle acque marino costiere così come dal D.M. 260/10 per la classificazione del loro stato ecologico, durante le campagne per la caratterizzazione della colonna d'acqua verranno effettuati prelievi superficiali per l'analisi dei nutrienti totali e disciolti di azoto e fosforo in corrispondenza di n.6 stazioni, indicate in *figura 20*. Le metodiche analitiche che verranno utilizzate per l'analisi dei nutrienti sono quelle riportate nei Manuali e Linee Guida ISPRA 56/2010 "Metodologie di studio del Plancton marino".

In particolare, le attività si articoleranno nelle varie Fasi così come di seguito dettagliato:

- Fase 1: saranno effettuate n.6 stazioni durante n.2 campagne, totale campioni prelevati n.12;
- Fase 2: saranno effettuate n.6 stazioni durante n.2 campagne, totale campioni prelevati n.12;
- Fase 3: saranno effettuate n.6 stazioni durante n.2 campagne, totale campioni prelevati n.12.

### *5.2.3. Stazione di monitoraggio ripetuta*

Per poter valutare eventuali variazioni delle caratteristiche fisiche, chimiche e bio-ottiche della colonna d'acqua a breve termine nell'area limitrofa alle nuove opere, sarà selezionato un punto o transetto da ripetere con una frequenza opportuna, determinata dalle risultanze delle misure effettuate nelle prime fasi del progetto e dalla modellistica numerica. Lungo il transetto saranno effettuati mediante metodi tradizionali o tecnologie innovative (veicolo autonomo di superficie) profili per la misura di temperatura, conducibilità, ossigeno disciolto, pH, fluorescenza della clorofilla *a* e torbidità. Particolare rilievo sarà dato, attraverso l'uso di sensori fluorimetrici specifici per i diversi pigmenti fitoplanctonici, all'identificazione delle principali classi fitoplanctoniche nonché all'individuazione di eventuali fenomeni di fioritura di microalghe potenzialmente tossiche. Il superamento di limiti soglia costituirà il segnale di allarme a seguito del quale verrà comunicata la necessità di verificare l'individuazione delle specie fitoplanctoniche tossiche eventualmente presenti con un campionamento in sito, che sarà a cura di ARPA.

Nel corso del progetto verrà integrato il monitoraggio del rumore sottomarino, essendo incluso tra i descrittori della Marine Strategy, seguendo le linee guida prodotte con il supporto del TG Noise per il descrittore 11. L'Italia, attraverso la costruzione del Registro nazionale del rumore subacqueo, ha parzialmente implementato il criterio D11.1 (rumore impulsivo), e ha definito il programma di monitoraggio che porterà alla definizione dei livelli base per il criterio D11.2 (rumore continuo), in vista della definizione di valori soglia per il GES.

Coerentemente con il programma di monitoraggio definito dal sottogruppo tecnico, nell'ambito di questo progetto verrà previsto il monitoraggio del rumore continuo (criterio D11.2) con il duplice obiettivo di fornire da un lato, le informazioni richieste dalla MSFD e dall'altro, una panoramica del paesaggio sonoro di background nell'area di interesse del progetto da utilizzare come base per la valutazione di eventuali alterazioni dovute alla costruzione della nuova area portuale e ciò che questo comporta in termini, ad esempio, di variazione del traffico marittimo, da tempo riconosciuta essere una delle principali attività responsabile dell'immissione del rumore alle basse e medie frequenze.

Il monitoraggio del criterio D11.2 verrà effettuato integrando sulla piattaforma utilizzata un registratore acustico subacqueo programmabile dotato di scheda di acquisizione capace di acquisire fino a 384 kHz rendendo possibile la registrazione sia nel campo dei suoni che degli ultrasuoni. Il sistema di registrazione è equipaggiato con un idrofono a banda larga; sistema di acquisizione

programmabile sulla base di una tabella giornaliera ripetuta lungo le 24 ore; un clock interno per marcare le registrazioni in modo da identificare facilmente la data e l'ora degli eventi registrati.

In particolare, le attività si articoleranno nelle varie Fasi così come di seguito dettagliato:

- Fase 1: saranno effettuate n.20 stazioni/transetti prima dell'inizio delle attività;
- Fase 2: saranno effettuate n.80 stazioni/transetti nel corso delle attività di cantiere;
- Fase 3: saranno effettuate n.60 stazioni/transetti durante la fase di esercizio.

#### *5.2.4. Integrazione delle misure con metodi innovativi autonomi*

Negli ultimi anni lo studio degli ecosistemi marini ha visto l'avvento di nuove tecnologie che permettono di acquisire dati in maniera sempre più efficace e dettagliata. Le piattaforme di misura sono diventate sempre più autonome e performanti, consentendo monitoraggi a lungo termine e 'cost-effective'.

Tra queste il glider rappresenta un'importante evoluzione, essendo una potente piattaforma di rilevamento autonoma progettata per raccogliere profili lungo la colonna d'acqua con una copertura spazio-temporale molto ampia (migliaia di km e da settimane a mesi di resistenza).

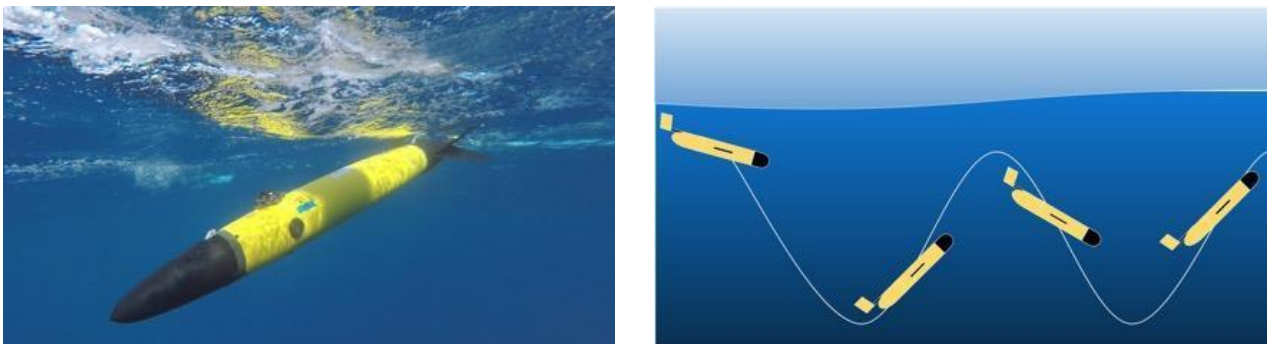


Figura 18. Piattaforma Glider tipo e simulazione delle traiettorie effettuate in colonna d'acqua

I glider sono alianti sottomarini, privi di sistema di propulsione, che si muovono in virtù della sola variazione del loro assetto seguendo traiettorie a dente di sega. Si spostano dalla superficie fino a un massimo di 1000 m di profondità, lungo rotte programmabili e modificabili attraverso la comunicazione satellitare bidirezionale. Queste piattaforme sono in grado di percorrere lunghe distanze su rotte programmate e di trasmettere i dati a terra ad intervalli programmabili e stanno radicalmente modificando le metodologie di indagine nell'ambiente marino, aprendo nuovi scenari e

possibilità di ricerca inimmaginabili fino a pochi anni fa. Durante questo progetto i metodi tradizionali per la raccolta dei dati lungo la colonna d'acqua saranno integrati dai dati acquisiti con il glider, che sarà equipaggiato con sensori per la misura di temperatura, conducibilità (salinità, densità), ossigeno disciolto, fluorescenza della clorofilla  $a$ , torbidità.

Altra piattaforma innovativa che sarà utilizzata è un Autonomous Surface Vehicle, che permetterà di integrare le misure in colonna d'acqua da veicoli autonomi nelle aree costiere. E' una piattaforma con grande capacità di carico utile, in soli 1,7 metri di lunghezza: il veicolo e la sua strumentazione di bordo sono monitorati e comandati da remoto, oppure operano in modalità completamente autonoma.

Questo permetterà di ottimizzare i piani di campionamento.

In particolare, nelle Fase 2 e nella Fase 3 queste tecnologie, una volta calibrate, sostituiranno le metodologie tradizionali, migliorando così la capacità di caratterizzazione delle aree oggetto di studio, nonché i costi.



Figura 19. Veicolo autonomo di superficie

La strategia complessiva messa in campo per lo studio della dinamica e la caratterizzazione della colonna d'acqua vede l'integrazione di metodologie diverse al fine di poter analizzare in dettaglio i processi che interessano l'area di studio, identificare le eventuali variazioni nello spazio e nel tempo e supportare la modellistica numerica nella simulazione e previsione dei diversi scenari. Di seguito si riporta la mappa con la collocazione delle stazioni fisse di misura e dei transetti in cui saranno acquisiti i dati durante il progetto. La profondità alla quale si spingerà lo studio della colonna d'acqua è di 200 m; in questo modo si garantisce la copertura della circolazione litoranea e delle acque costiere e l'innesto delle stesse nella circolazione a scala regionale, analizzando anche la dinamica della plume del Tevere e la sua interazione con le acque costiere. I transetti consentiranno di rappresentare

l'elevata variabilità spazio-temporale costa largo, e la loro assimilazione nei modelli matematici, di rappresentarne l'evoluzione ad una adeguata risoluzione spaziale. Questo permetterà di comprendere la distribuzione dei sedimenti nella parte costiera e prevederne la loro interazione con la spiaggia sommersa ed emersa.

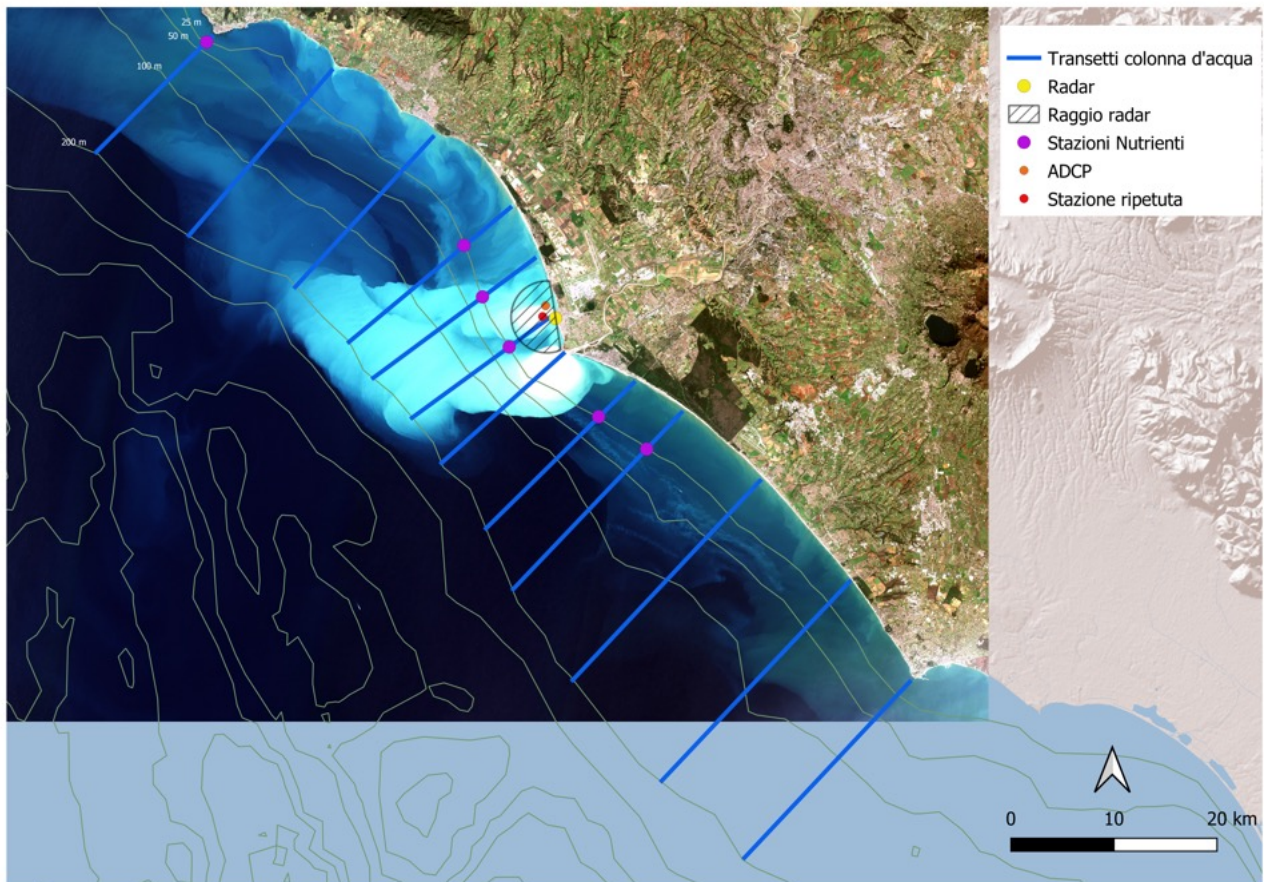


Figura 20. Piano di caratterizzazione della dinamica e della colonna d'acqua

### 5.3. Studio della distribuzione del solido sospeso, della biomassa fitoplanctonica e della CDOM lungo l'unità fisiografica attraverso osservazioni satellitari

Durante le attività di progetto verranno acquisite le immagini satellitari per l'elaborazione delle mappe superficiali di clorofilla *a*, solido sospeso e CDOM, ove disponibili. Le mappe acquisite saranno confrontate con i risultati delle analisi dei campioni d'acqua raccolti durante le campagne oceanografiche.

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, clorofilla *a* e CDOM.

Per quanto i dati remoti rimangano 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.

I dati satellitari sono liberamente accessibili dai siti della NASA [ocean.color.gsfc.nasa.gov](http://ocean.color.gsfc.nasa.gov) (per il dato MODIS) e <http://glovis.usgs.gov> (per il dato Landsat8 e Sentinel); 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.

Il processamento dei dati avviene attraverso software specifici per la correzione atmosferiche l'elaborazione delle riflettanze attraverso cui vengono elaborati i prodotti oggetto dello studio.

| ATTIVITA'                                                             | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                                                                                                                                                                                                                              | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021)                                 | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-Agosto 2021)                                                      | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021 post risultati modellistica fase 0)                                                                              | FASE 2 (24 mesi)                                                                                                                                   | FASE 3 (24 mesi)                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Campagne di misura colonna d'acqua                                    | Misure colonna d'acqua (pressione, temperatura, conducibilità, ossigeno disciolto, fluorescenza della clorofilla a, torbidità) mediante metodi tradizionali e strumentazione autonoma (Glider-Veicolo Superficiale)                                      | n. 2 Campagne.<br>3 Transetti<br>(n. 10 stazioni a transetto) |                                                                                                        |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                    |
|                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                               | Integrazione colonna d'acqua Fase 0<br>n. 2 Campagne<br>n. 9 Transetti<br>(n. 10 stazioni a transetto) |                                                                                                                                                    | n. 2 Campagne<br>n. 12 Transetti<br>(n. 10 stazioni a transetto)                                                                                   | n. 2 Campagne<br>n. 12 Transetti (n. 10 stazioni a transetto)                                                                                      |
|                                                                       | Raccolta e analisi campioni di acqua per la calibrazione dei sensori e delle immagini satellitari (clorofilla, solido sospeso, CDOM)                                                                                                                     | n. 2 Campagne<br>tot n. 60 campioni                           | n. 2 Campagne<br>tot n. 45 campioni                                                                    |                                                                                                                                                    | n. 2 Campagne<br>tot n. 30 campioni                                                                                                                | n. 2 Campagne<br>tot n. 30 campioni                                                                                                                |
| Qualità dell'acqua                                                    | Raccolta campioni di acqua per l'analisi dei nutrienti                                                                                                                                                                                                   |                                                               | n. 2 Campagne<br>n. 12 campioni totali (5+1 bianco)                                                    |                                                                                                                                                    | n. 2 Campagne<br>n. 12 campioni totali (5+1 bianco)                                                                                                | n. 2 Campagne<br>n. 12 campioni totali (5+1 bianco)                                                                                                |
|                                                                       | Caratterizzazione dell'acqua marina mediante stazione fissa                                                                                                                                                                                              |                                                               |                                                                                                        | n. 20 stazioni<br>punto fisso                                                                                                                      | n. 80 stazioni<br>punto fisso                                                                                                                      | n. 60 stazioni<br>punto fisso                                                                                                                      |
|                                                                       | Predisposizione di una stazione fissa dotata di strumentazione innovativa HAB (il fitoplancton sarà campionato solo a seguito di allarme da specie tossiche rilevato dalla strumentazione automatica)<br>Campionamenti ed analisi saranno a cura di ARPA |                                                               |                                                                                                        | Installazione in periodi predefiniti<br>Mediante il sistema di warning si comunicano ad Arpa le situazioni anomale<br>Campionamento a cura di ARPA | Installazione in periodi predefiniti<br>Mediante il sistema di warning si comunicano ad Arpa le situazioni anomale<br>Campionamento a cura di ARPA | Installazione in periodi predefiniti<br>Mediante il sistema di warning si comunicano ad Arpa le situazioni anomale<br>Campionamento a cura di ARPA |
| Studio della distribuzione di Sospeso, Clorofilla e CDOM da satellite | Elaborazione di immagini satellitari ad alta risoluzione dell'andamento superficiale di clorofilla, solido sospeso e CDOM                                                                                                                                | IN CONTINUO<br>(in funzione dei passaggi dei satelliti)       |                                                                                                        | IN CONTINUO<br>(in funzione dei passaggi dei satelliti)                                                                                            |                                                                                                                                                    | IN CONTINUO<br>(in funzione dei passaggi dei satelliti)                                                                                            |

Tabella 4. Attività previste per il comparto colonna d'acqua

## **6. Studio della spiaggia sommersa, emersa e del rateo deposizionale**

### **6.1. Caratterizzazione della spiaggia sommersa**

Al fine di acquisire dati utili all'implementazione dei modelli matematici, verranno effettuate campagne per analizzare i profili della spiaggia sommersa nell'area di Fiumicino. I dati ricavati dalle suddette campagne di misura saranno utilizzati nelle simulazioni numeriche.

L'attività sarà effettuata durante la Fase 0, integrata durante la successiva Fase 1. L'insieme delle campagne sarà replicato durante le Fasi 2 e 3, come di seguito dettagliato.

I profili della spiaggia sommersa saranno effettuati utilizzando un sistema di misura *single beam* con una frequenza di lavoro 50/200 kHz e ridotti angoli di apertura del segnale acustico, che garantisce un rilievo sufficientemente accurato del fondale e/o lo Structure Scan 3d 455/800 kHz. Il sistema di misura sarà composto da sistema di posizionamento superficiale (GPS), sistema di acquisizione ed elaborazione dati, ecoscandaglio idrografico. Le operazioni di rilievo della spiaggia sommersa, al fine di avere la massima accuratezza, saranno effettuate prendendo in considerazione la correzione dell'effetto di marea.

#### ***6.1.1. Integrazione profili spiaggia sommersa area di Fiumicino per verifica dei modelli evento meteomarinò estremo***

Durante la Fase 1 (Ottobre-Dicembre 2020), le indagini descritte nel paragrafo "Primi profili spiaggia sommersa area di Fiumicino per verifica modelli" verranno ripetute al fine di acquisire informazioni relative ai possibili cambiamenti della morfologia sommersa successivamente al primo evento meteomarinò di elevata intensità, in modo da avere i profili estivi, invernali e post mareggiata. Nel dettaglio, verrà effettuata una campagna di misura durante la quale verranno effettuate analisi *in situ* lungo gli stessi n.5 transetti, fino alla batimetrica dei 35 metri.

#### ***6.1.2. Profili della spiaggia sommersa lungo l'area estesa e area di Fiumicino per verifica dei modelli matematici e analisi delle aree soggette a erosione e/o deposizione anche attraverso veicoli autonomi***

Verranno effettuati profili della spiaggia sommersa all'interno dell'Unità Fisiografica di riferimento, tra la linea di riva e la batimetrica dei 25 metri, in particolare nelle aree sensibili identificate dagli studi preliminari da satellite, relative alla assenza di strutture antropiche costiere, ai risultati

preliminari della modellistica e alla valenza naturale delle aree su base bibliografica. Si privilegeranno le zone di mare prospicienti le aree rappresentative (figura 4) dove verranno effettuati i profili della spiaggia emersa.

Queste attività di progetto saranno effettuate anche mediante l'utilizzo di un veicolo autonomo innovativo, che consentirà di aumentare il dettaglio e ottimizzare il campionamento. Il veicolo autonomo di superficie sarà equipaggiato con un ecoscandaglio *single beam* di precisione, sistema di posizionamento, sistema di acquisizione ed elaborazione dati. Le indagini verranno effettuate in condizioni di mare calmo e possibilmente in assenza di vento, percorrendo i transetti a velocità bassa e costante.

Le indagini verranno effettuate nelle fasi progettuali Fase 1, Fase 2 e Fase 3. Nel dettaglio:

- Fase 1 (Luglio - Agosto 2020, Ottobre 2020, Dicembre 2020 – Gennaio 2021) - Verranno effettuate n.3 campagne di misura durante le quali verranno effettuati rilievi *in situ* lungo n.8 transetti (che integrano i n.5 transetti effettuati in Fase 0), per un totale di n.24 transetti. Le suddette campagne di misura verranno effettuate in due stagioni significative e successivamente ad un evento meteomarinico estremo.
- Fase 2 (Luglio - Agosto 2022, Ottobre 2022, Dicembre 2022 - Gennaio 2023) - Verranno effettuate n.3 campagne di misura durante le quali verranno effettuati rilievi *in situ* lungo n.13 transetti, per un totale di n.39 transetti. Le suddette campagne di misura verranno effettuate rispettivamente in due stagioni significative e successivamente ad un evento meteomarinico estremo.
- Fase 3 (Luglio - Agosto 2024, Ottobre 2024, Dicembre 2024 - Gennaio 2025) - Verranno effettuate n.3 campagne di misura durante le quali verranno effettuati rilievi *in situ* lungo n.13 transetti, per un totale di n.39 transetti. Le suddette campagne di misura verranno effettuate rispettivamente in due stagioni significative e successivamente ad un evento meteomarinico estremo.

#### **6.1.3. Campionamenti della spiaggia sommersa per calibrazione modelli e strumentazione automatica**

Al fine di acquisire dati utili per la calibrazione dei modelli matematici e della strumentazione automatica, verranno effettuati campionamenti della spiaggia sommersa lungo n.5 transetti situati in

prossimità dell'area di Fiumicino, descritti nel paragrafo “Primi profili spiaggia sommersa area di Fiumicino per verifica modelli”. Nel dettaglio, verranno effettuate n.2 campagne di campionamento, durante le quali verranno prelevati campioni di sedimento superficiale alle profondità di 2, 5 e 10 m lungo n.5 transetti, per un totale di n.30 campioni. Il campionamento dei sedimenti superficiali verrà effettuato con campionatori 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”. L'attività verrà effettuata durante la Fase 1 (Luglio/Agosto 2020; Dicembre 2020-Gennaio 2020). I campioni saranno analizzati dal punto di vista granulometrico, in particolare, verranno analizzate la frazione grossolana (> di 63 micron) e la frazione fine (< 63 micron) mediante *setacciatura meccanica* e *analisi strumentale* (ad esempio granulometria laser).

Nel corso del progetto la presente attività potrà essere integrata con il monitoraggio delle microplastiche associate al sedimento, ad ulteriore supporto della raccolta dati della Marine Strategy, in particolare del Descrittore 10 *marine litter*.

#### **6.1.4. Campionamenti del sedimento per granulometrie in corrispondenza delle stazioni di benthos**

In concomitanza delle indagini di caratterizzazione delle biocenosi bentoniche di fondo mobile, verranno integrati i campionamenti di spiaggia sommersa con stazioni ubicate alle batimetriche di 2, 5, 10, 20, e 30 m. Il campionamento dei sedimenti superficiali verrà effettuato con campionatori 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 verranno sottoposti ad analisi granulometrica. In particolare, verranno analizzate la frazione grossolana (> di 63 micron) e la frazione fine (< 63 micron) mediante *setacciatura meccanica* e *analisi strumentale* (ad esempio granulometria laser). L'attività verrà effettuata nella Fase 1 e nella Fase 3. L'ubicazione dei siti di campionamento è riportata nel paragrafo “Campagne comunità bentoniche”. Nel dettaglio:

- Fase 1 (Luglio - Agosto 2021) - Verrà effettuata n.1 campagna durante la quale verranno presi in considerazione n.5 transetti, nei quali verranno effettuati n.5 campioni (profondità di 2, 5, 10, 20, 30 m), per un totale di 25 campioni. I campioni prelevati saranno analizzati dal punto di vista granulometrico.

- Fase 3 (Luglio - Agosto 2025) - Verrà effettuata n.1 campagna durante la quale verranno presi in considerazione n.5 transetti, nei quali verranno effettuati n.5 campioni (profondità di 2, 5, 10, 20, 30 m), per un totale di n.25 campioni. I campioni prelevati saranno analizzati dal punto di vista granulometrico.

#### 6.1.5. Campagne batimetriche multibeam area portuale

Le indagini effettuate nell'area oggetto di studio dall'Autorità Portuale nel corso del progetto saranno rese disponibili e utilizzate per integrare quanto raccolto durante le attività di ricerca previste.

| ATTIVITA'                                                     | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                                                                                                                                                    | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021)                         | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-<br>Agosto 2021)                                                                                                        | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto<br>2021 post risultati<br>modellistica fase 0)                               | FASE 2<br>(24 mesi)                                                                                                        | FASE 3<br>(24 mesi)                                                                                                           |                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Analisi dei profili e<br>sedimenti della<br>spiaggia sommersa | Profili spiaggia sommersa area Fiumicino per verifica batimetrie modelli                                                                                                       | n.2 campagne<br>n. 5 transetti<br>tot n. 10 transetti |                                                                                                                                                              |                                                                                                           | Spiaggia sommersa:<br>N.3 campagne<br>(stagioni inverno,<br>estate ed evento<br>estremo) x 5<br>transetti=<br>15 transetti | Spiaggia sommersa:<br>N.3 campagne<br>(stagioni<br>inverno, estate<br>ed evento<br>estremo) x 5<br>transetti=<br>15 transetti |                                                                                                                   |
|                                                               | Integrazione profili spiaggia sommersa area di Fiumicino Fase 0 dopo evento estremo                                                                                            |                                                       | Spiaggia sommersa: N.1 campagna<br>(Evento estremo)<br>x 5 transetti= 5 transetti                                                                            |                                                                                                           |                                                                                                                            |                                                                                                                               |                                                                                                                   |
|                                                               | Profili della spiaggia sommersa lungo l'area estesa per verifica modelli matematici e analisi delle aree soggette a erosione e/o deposizione anche attraverso veicoli autonomi |                                                       | Integrazione profili con N.2 campagne<br>(stagioni inverno ed estate) x 8 transetti=16 transetti                                                             | Integrazione profili con N.1 campagna x 8 transetti                                                       | Campagna integrativa nelle aree chiave identificate dai modelli                                                            | Spiaggia sommersa:<br>N.3 campagne<br>(stagioni inverno, estate ed evento estremo) x 8 transetti=<br>24 transetti             | Spiaggia sommersa:<br>N.3 campagne<br>(stagioni inverno, estate ed evento estremo) x 8 transetti=<br>24 transetti |
|                                                               | Campionamenti della spiaggia sommersa per calibrazione modelli e strumentazione automatica                                                                                     |                                                       | Campionamento nell'area di Fiumicino lungo i 5 transetti (vedi fase 0) per granulometria: N.2 campagne x 5 transetti x 3 profondità (2,5,10 m) = 30 campioni | Integrazione profili con N.1 campagna x 8 transetti                                                       |                                                                                                                            |                                                                                                                               |                                                                                                                   |
|                                                               | Campionamenti del sedimento per granulometrie in corrispondenza delle stazioni di benthos                                                                                      |                                                       |                                                                                                                                                              | Spiaggia sommersa, granulometria: N.1 campagna x 5 transetti x 5 profondità (2, 5,10,20,30m)= 25 campioni |                                                                                                                            |                                                                                                                               | Spiaggia sommersa, granulometria: N.1 campagna x 5 transetti x 5 profondità (2, 5,10,20,30m)= 25 campioni         |
|                                                               | Campagne batimetriche multibeam area portuale (a cura Autorità Portuale)                                                                                                       |                                                       |                                                                                                                                                              | AUTORITA' PORTUALE                                                                                        |                                                                                                                            |                                                                                                                               | AUTORITA' PORTUALE                                                                                                |

Tabella 5. Analisi dei profili e sedimenti della spiaggia sommersa

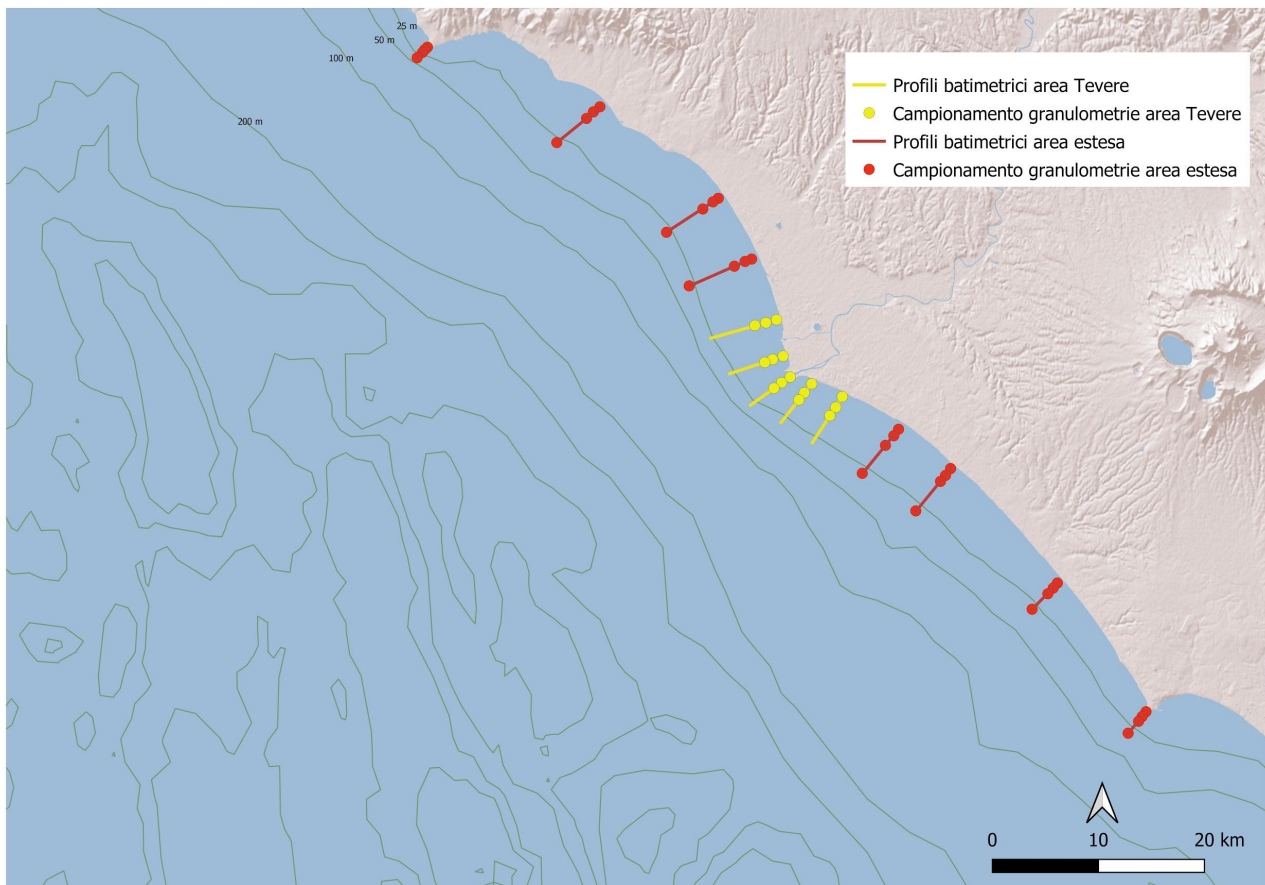


Figura 21. Ubicazione dei transetti e dei siti di campionamento “Analisi dei profili e sedimenti della spiaggia sommersa”

## 6.2. Caratterizzazione della spiaggia emersa

### 6.2.1. Profili della spiaggia emersa

La spiaggia emersa è un elemento soggetto ad elevata variabilità intra annuale, in quanto risente dei processi idrodinamici, indotti dal moto ondoso e del vento, che avvengono lungo l'intero sistema costiero che si estende dalla retroduna fino al limite verso mare della spiaggia sommersa. Essendo un sistema estremamente volubile il suo monitoraggio risulta essere un fattore fondamentale per la corretta analisi del bilancio sedimentario delle spiagge, necessariamente collegato all'analisi morfobatimetrica della spiaggia sommersa.

I rilievi verranno effettuati mediante l'utilizzo di DGPS per una corretta e precisa geolocalizzazione della linea di riva. L'elevazione del terreno per indagare la morfologia della spiaggia emersa verrà effettuata mediante un Real-Time Kinematic (RTK) DGPS.

I rilievi verranno effettuati in un massimo di 4 aree di spiaggia, comprese tra Palidoro e Castel Fusano, con particolare riferimento ad arenili che conservano caratteristiche di naturalità (ad esempio la presenza di ambiente dunale e un basso grado di urbanizzazione). Le indagini verranno effettuate nei periodi invernali, estivi e post mareggiata, nelle fasi progettuali Fase 1, Fase 2 e Fase 3. Nel dettaglio:

- Fase 1 (Ottobre 2020, Dicembre 2020-Gennaio 2021, Giugno-Luglio 2021) - Verranno effettuati n.2 rilevamenti in un massimo di 4 aree, in tre stagioni significative, per un massimo di n.24 rilevamenti.
- Fase 2 (Giugno-Luglio 2022, Ottobre 2022, Dicembre 2022–Gennaio 2023) - Verranno effettuati n.2 rilevamenti in un massimo di 4 aree, in tre stagioni significative, per un massimo di n.24 rilevamenti.
- Fase 3 (Giugno-Luglio 2024, Ottobre 2024, Dicembre 2024-Gennaio 2025) - Verranno effettuati n.2 rilevamenti in un massimo di 4 aree, in tre stagioni significative, per un massimo di n.24 rilevamenti.

#### **6.2.2. Campionamenti della spiaggia emersa**

In corrispondenza di ogni area di spiaggia emersa scelta per l'indagine, verranno effettuati transetti perpendicolari alla linea di riva, lungo i quali verranno prelevati manualmente campioni di sedimento. I campioni verranno successivamente sottoposti ad analisi granulometrica. In particolare, verrà analizzata la frazione grossolana (> di 63 micron) mediante *setacciatura meccanica*. I campionamenti di sedimento lungo la spiaggia emersa verranno effettuati durante la fase progettuale Fase 1 e Fase 3. Nel dettaglio:

- Fase 1 (Ottobre 2020, Dicembre 2020-Gennaio 2021, Giugno-Luglio 2021) - Verranno effettuate n.3 campagne di campionamento in un massimo di 4 aree. In ogni area verranno effettuati n.2 transetti, nei quali verranno prelevati n.3 campioni di sedimento, per un totale di n.72 campioni.

- Fase 2 (Giugno-Luglio 2022, Ottobre 2022, Dicembre 2022–Gennaio 2023) - Verranno effettuate n.3 campagne di campionamento in un massimo di 4 aree. In ogni area verranno effettuati n.2 transetti, nei quali verranno prelevati n.3 campioni di sedimento, per un totale di n.72 campioni.
- Fase 3 (Giugno-Luglio 2024, Ottobre 2024, Dicembre 2024-Gennaio 2025) - Verranno effettuate n.3 campagne di campionamento in un massimo di 4 aree. In ogni area verranno effettuati n.2 transetti, nei quali verranno prelevati n.3 campioni di sedimento, per un totale di n.72 campioni.

| ATTIVITA'                                             | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'         | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021) | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-Agosto 2021)                                                  |                                                                                                    | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021 post risultati modellistica fase 0) | FASE 2 (24 mesi)                                                                                                    | FASE 3 (24 mesi)                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Analisi dei profili e sedimenti della spiaggia emersa | Profili spiaggia emersa             |                               | Spiaggia emersa: N.2 rilevamenti per area (max 4 aree) x 1 stagione = 8 rilevamenti                | Spiaggia emersa: N.2 rilevamenti per area (max 4 aree) x 2 stagioni = 16 rilevamenti               | Campagna integrativa nelle aree chiave identificate dai modelli       | Spiaggia emersa: N.2 rilevamenti per area (max 4 aree) x 3 stagioni = 24 rilevamenti                                | Spiaggia emersa: N.2 rilevamenti per area (max 4 aree) per 3 stagioni= 24 rilevamenti                               |
|                                                       | Campionamenti della spiaggia emersa |                               | Spiaggia emersa, granulometria: N.1 campagna x max 4 aree x 2 transetti x 3 campioni = 24 campioni | Spiaggia emersa, granulometria: N.2 campagne x max 4 aree x 2 transetti x 3 campioni = 48 campioni |                                                                       | Spiaggia emersa, granulometria: N.3 campagne (inverno-estate) x max 4 aree x 2 transetti x 3 campioni = 72 campioni | Spiaggia emersa, granulometria: N.3 campagne (inverno-estate) x max 4 aree x 2 transetti x 3 campioni = 72 campioni |

Tabella 6. Analisi dei profili e sedimenti della spiaggia emersa

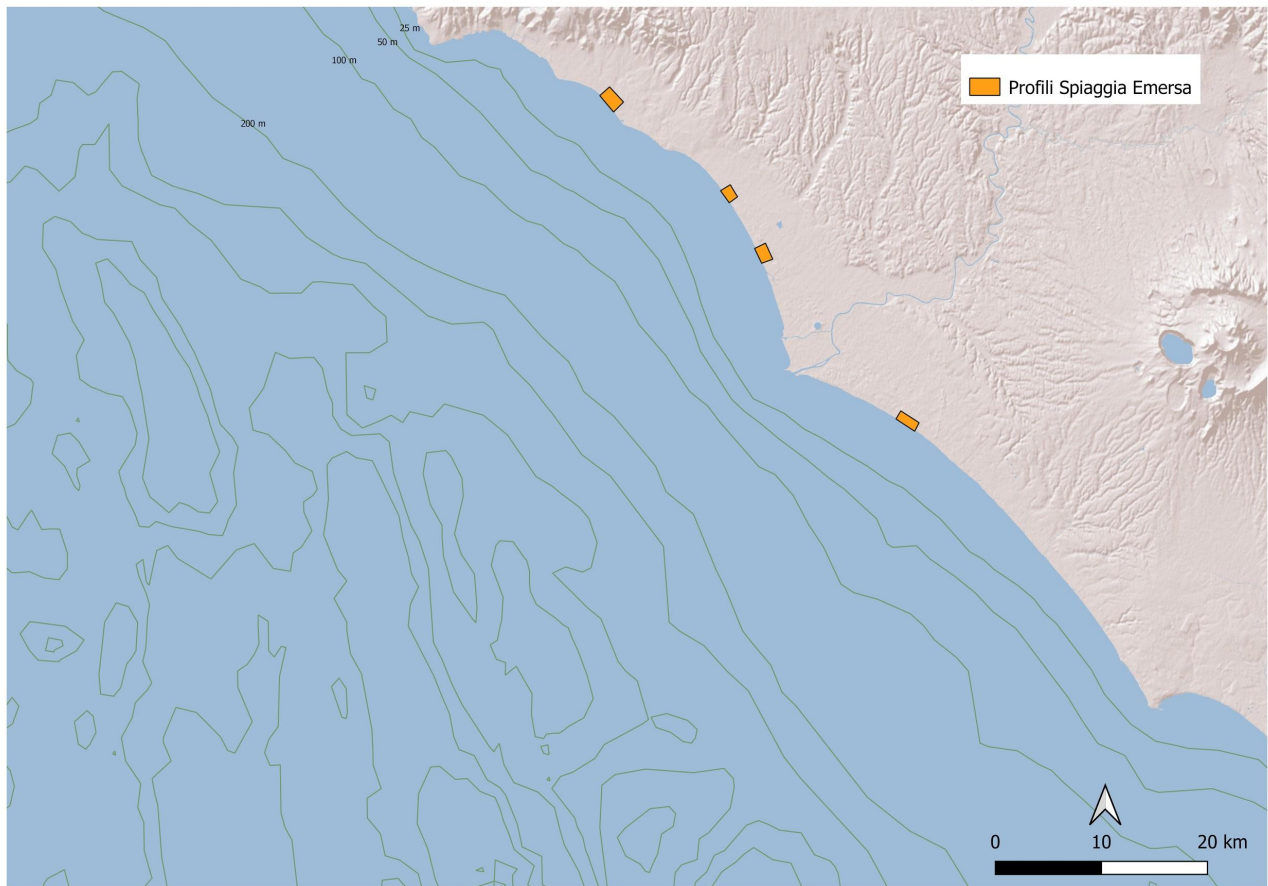


Figura 22. Ubicazione arenili per l'analisi dei profili e sedimenti della spiaggia emersa

### 6.3. Studio del rateo di sedimentazione

Al fine di dettagliare maggiormente la dinamica deposizionale dell'area interessata dagli apporti continentali del fiume Tevere, sarò effettuato n.1 carotaggio in corrispondenza della batimetrica dei 50 m nell'area di delta.

I risultati relativi alla geocronologia e ai tassi deposizionali ottenuti tramite analisi del  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{137}\text{Cs}$  verranno utilizzati per l'ottimizzazione degli scenari modellistici relativi alla dinamica sedimentaria nel lungo periodo in quanto questo metodo consente di ottenere un rateo di sedimentazione a medio e lungo termine quasi assoluto. Questo dato è di particolare rilevanza per il modello che simula l'andamento della linea di riva in quanto, in pratica, si basa sul bilancio sedimentario.

L'attività verrà eseguita durante le fasi progettuali Fase 1 e Fase 3. Nel dettaglio:

- Fase 1 (Luglio-Agosto 2021) – Verrà effettuato n.1 carotaggio alla profondità di 50 m, dal quale verranno ricavati n.10 strati da sottoporre ad analisi.
- Fase 3 (Luglio-Agosto 2025) – Verrà effettuato n.1 carotaggio alla profondità di 50 m, dal quale verranno ricavati n.10 strati da sottoporre ad analisi.

| ATTIVITA'                          | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                                                                                                         | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021) | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-Agosto 2021) | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021<br>post risultati modellistica fase 0) | FASE 2<br>(24 mesi) | FASE 3<br>(24 mesi)                  |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Studio del rateo di sedimentazione | Verranno effettuati dei carotaggi al fine di analizzare, attraverso analisi di radiodatazione, il rateo deposizionale dei sedimenti |                               |                                                   | 1 carotaggio x 10 strati = 30 strati                                     |                     | 1 carotaggio x 10 strati = 30 strati |

Tabella 7. Studio del rateo di sedimentazione

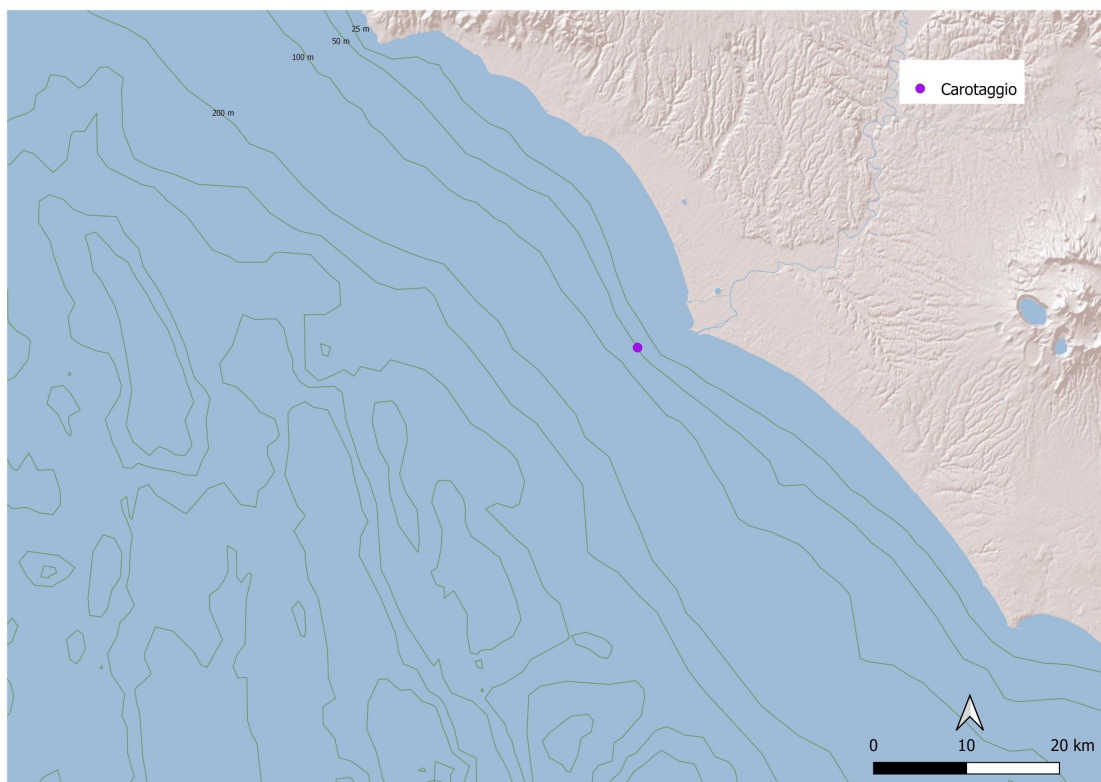


Figura 23. Ubicazione del sito per lo studio del rateo di sedimentazione

#### 6.4. Analisi dei sedimenti funzionale ad eventuali attività di movimentazione sedimenti

In concomitanza con le indagini di caratterizzazione delle biocenosi bentoniche di fondo mobile, verranno effettuati campionamenti di sedimento superficiale alle profondità di 2, 5, 10, 20 e 30 m. Il campionamento verrà effettuato con campionatori 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 una volta prelevati saranno conservati per poi essere sottoposti ad analisi chimica. In particolare, gli elementi presi in considerazione saranno quelli i cui risultati hanno superato i valori limite di riferimento (LCB e LCL elaborati da ISPRA su base locale da Onorati et al. 2012), come riportato nella Relazione Tecnica Sintetica "Caratterizzazione ambientale dei sedimenti del porto canale di Fiumicino", redatta nel 2015 dall'Università di Siena, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, e nello specifico: As, Cu, Ni, Pb, Zn, Al, Antracene, PCB.

L'attività sarà effettuata durante le fasi progettuali Fase 1 e Fase 3. Nel dettaglio:

- Fase 1 (Luglio-Agosto 2021) - Verrà effettuata n.1 campagna durante la quale verranno presi in considerazione n.5 transetti, nei quali verranno effettuati 5 campioni (profondità di 2, 5, 10, 20, 30 m), per un totale di n. 25 campioni.
- Fase 3 (Luglio-Agosto 2025) - Verrà effettuata n.1 campagna durante la quale verranno presi in considerazione n.5 transetti, nei quali verranno effettuati 5 campioni (profondità di 2, 5, 10, 20, 30 m), per un totale di n.25 campioni.

L'analisi dei metalli verrà eseguita utilizzando i metodi EPA 3051A 2007 ed EPA 6010D 2014. L'analisi degli idrocarburi leggeri (Antracene) verrà eseguita secondo i metodi EPA 5035A/2002 ed EPA 8015D/2003. L'analisi dei congeneri di PCB seguirà i metodi EPA 3550C 2007 ed EPA 8270D 2014. I dati raccolti durante le campagne costituiranno un set di dati utile a soddisfare le disposizioni del D.M. 260/10 per la valutazione dello Stato Chimico. Infatti, le concentrazioni ottenute dall'analisi dei sedimenti verranno poi analizzate facendo riferimento a quanto riportato nel Dec. 8 novembre 2010, n. 260, Regolamento recante i criteri tecnici per la classificazione dello stato dei corpi idrici superficiali, per la modifica delle norme tecniche del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale, predisposto ai sensi dell'articolo 75, comma 3, del medesimo decreto legislativo.

## 6.5. Analisi ecotossicologiche dei sedimenti

Per ottenere un quadro completo sulla qualità dei sedimenti dell'area, in caso venissero effettuate attività di dragaggio, non previste nel presente progetto, saranno effettuati saggi ecotossicologici su alcuni dei campioni prelevati durante l'attività descritta nel paragrafo “Verranno effettuate analisi chimiche dei sedimenti come bianco in corrispondenza delle stazioni di benthos”, come previsto dal Decreto 15 Luglio 2016 n. 173. L'attività sarà effettuata durante le fasi progettuali Fase 1 e Fase 3. Nel dettaglio:

- Fase 1 (Luglio-Agosto 2021) – in caso di dragaggio sarà effettuata l'analisi ecotossicologica di n. 1 campione prelevato in due transetti, per un totale di n.2 campioni.
- Fase 3 (Luglio-Agosto 2025) – in caso di dragaggio sarà effettuata l'analisi ecotossicologica di n.1 campione prelevato in due transetti, per un totale di n.2 campioni.

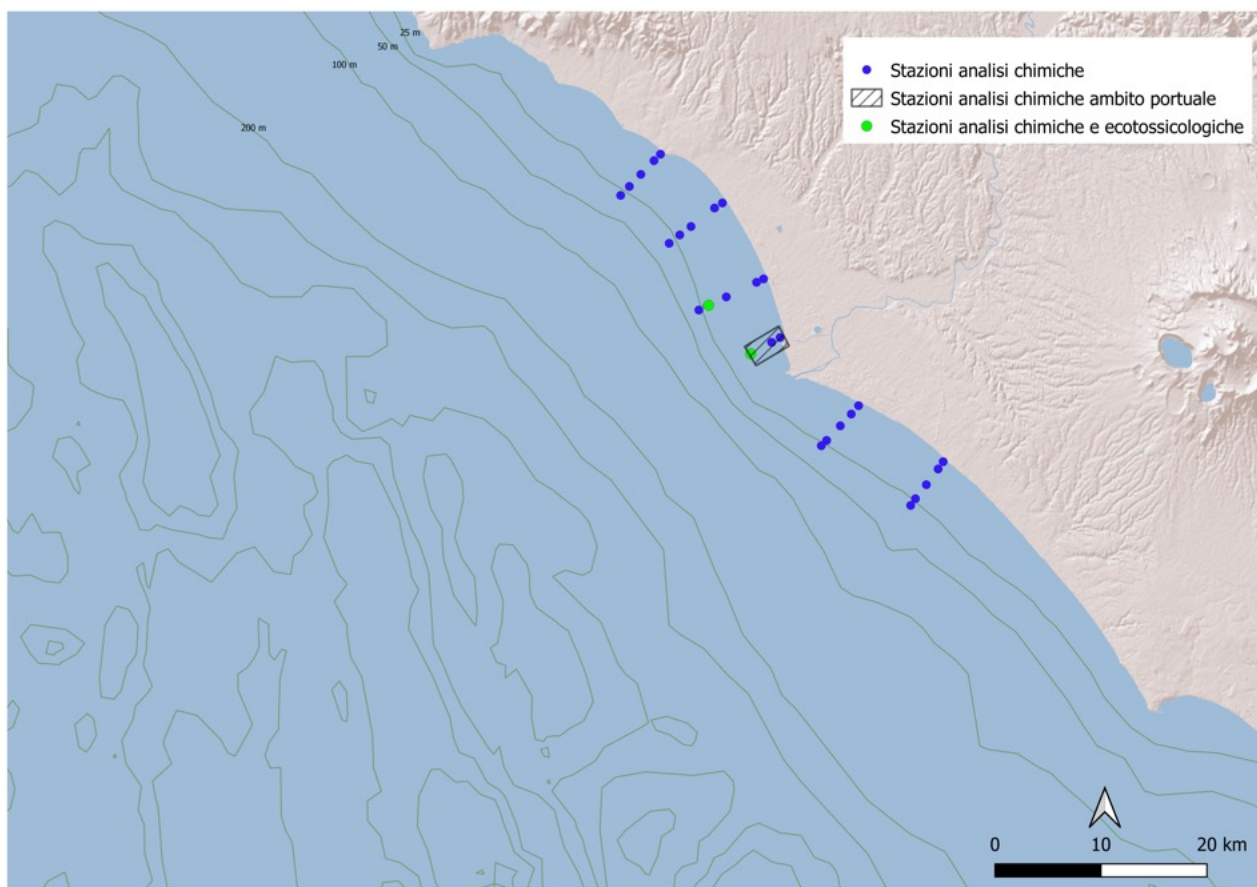


Figura 24. Ubicazione dei siti di campionamento per l'analisi chimica ed ecotossicologica dei sedimenti in caso di dragaggio

| ATTIVITA'                                                                          | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                                                                                 | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021) | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-<br>Agosto 2021) | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021<br>post risultati modellistica<br>fase 0) | FASE 2 (24 mesi)                                                                             | FASE 3 (24 mesi)                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Analisi dei sedimenti funzionale ad eventuali attività di movimentazione sedimenti | Verranno effettuate analisi chimiche dei sedimenti come bianco in corrispondenza delle stazioni di benthos. |                               |                                                       |                                                                             | Campioni chimica: N.1 campagna x 5 transetti x 5 profondità (2, 5, 10, 20, 30m)= 25 campioni | Campioni chimica: N.1 campagna x 6 transetti x 6 profondità (2, 5, 10, 20, 30 e 50m)= 36 campioni |
|                                                                                    | In caso di dragaggio si prevedono analisi ecotossicologiche dei sedimenti                                   |                               |                                                       |                                                                             | Ecotossicologia: 1 campione x 2 transetti= 2 campioni                                        | Ecotossicologia: 1 campione x 2 transetti= 2 campioni                                             |

Tabella 8. Analisi dei sedimenti superficiali funzionale ad eventuali attività di movimentazione sedimenti

## **7. Caratterizzazione dei principali corsi d'acqua rilevanti ai fini della valutazione degli input fluviali**

### **7.1. Misure di alveo in prossimità della foce**

L'analisi del trasporto fluviale avverrà principalmente mediante un approccio diretto basato su campagne di misure sul campo relative a: (a) misura dell'ampiezza dell'alveo nel tratto fluviale precedente allo sbocco in mare; (b) misura idrometrica; (c) misure della velocità della corrente fluviale nella sezione di misura idrometrica. Le indagini verranno effettuate durante i periodi sia di magra sia di portata media dei corsi d'acqua al fine di ottenere informazioni relative a diverse condizioni di portata. Le misure di alveo in prossimità della foce dei corsi d'acqua verrà effettuata durante le fasi progettuali Fase 1 e Fase 3. Nel dettaglio:

- Fase 1 (Luglio - Agosto 2020, Ottobre 2022 - Dicembre 2020/Gennaio2021) – Verranno effettuate indagini in prossimità delle foci di n.4 corsi d'acqua in due periodi, rispettivamente in condizioni di magra e di piena.
- Fase 3 (Luglio - Agosto 2024, Ottobre 2024 - Dicembre 2024/Gennaio2025) – Verranno effettuate indagini in prossimità delle foci di n.4 corsi d'acqua in due periodi, rispettivamente in condizioni di magra e di piena.

### **7.2. Analisi degli apporti liquidi e solidi dei principali corsi d'acqua**

Verranno caratterizzati gli apporti fluviali liquidi e solidi dei corsi d'acqua indagati. attraverso un approccio indiretto basato su formulazioni teorico-empiriche geomorfologiche, idrologiche e idrauliche. Inoltre, verranno effettuati campionamenti di sedimento superficiale delle foci fluviali dei corsi d'acqua considerati durante i periodi sia di magra sia di portata media. I sedimenti campionati verranno analizzati dal punto di vista granulometrico. In particolare, verranno analizzate la frazione grossolana ( $> 63$  micron) e la frazione fine ( $< 63$  micron) mediante setacciatura meccanica e analisi strumentale (ad esempio granulometria laser). La caratterizzazione dei corsi d'acqua verrà effettuata durante le fasi progettuali Fase 1 e Fase 3. Nel dettaglio:

- Fase 1 (Luglio - Agosto 2020, Ottobre 2022 - Dicembre 2020-Gennaio2021) – Verranno effettuate indagini in prossimità delle foci di n. 4 corsi d'acqua, corrispondenti a n.5 foci, in tre periodi, considerando anche condizioni di magra e di piena, per un totale di n.15 campioni di sedimento.

- Fase 3 (Luglio - Agosto 2024, Ottobre 2024 - Dicembre 2024-Gennaio 2025) – Verranno effettuate indagini in prossimità delle foci di n.4 corsi d'acqua, corrispondenti a n.5 foci, in due periodi, considerando anche condizioni di magra e di piena, per un totale di n.10 campioni di sedimento.

| ATTIVITA'                                                                                               | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                                         | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021) | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-<br>Agosto 2021)      | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021<br>post risultati modellistica<br>fase 0) | FASE 2 (24 mesi) | FASE 3 (24 mesi)                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------|
| Caratterizzazione dei principali corsi d'acqua rilevanti ai fini della valutazione degli input fluviali | Misure di alveo in prossimità della foce                            |                               | Morfologia (ampiezza, profondità) dell'alveo x 2 periodi   |                                                                             |                  | Morfologia (ampiezza, profondità) dell'alveo x 2 periodi   |
|                                                                                                         | Analisi degli apporti liquidi e solidi dei principali corsi d'acqua |                               | 5 Foci (4 Fiumi) x 2 periodi (magra e piena) = 10 campioni |                                                                             |                  | 5 Foci (4 Fiumi) x 2 periodi (magra e piena) = 10 campioni |

Tabella 9. Analisi degli apporti liquidi e solidi dei principali corsi d'acqua

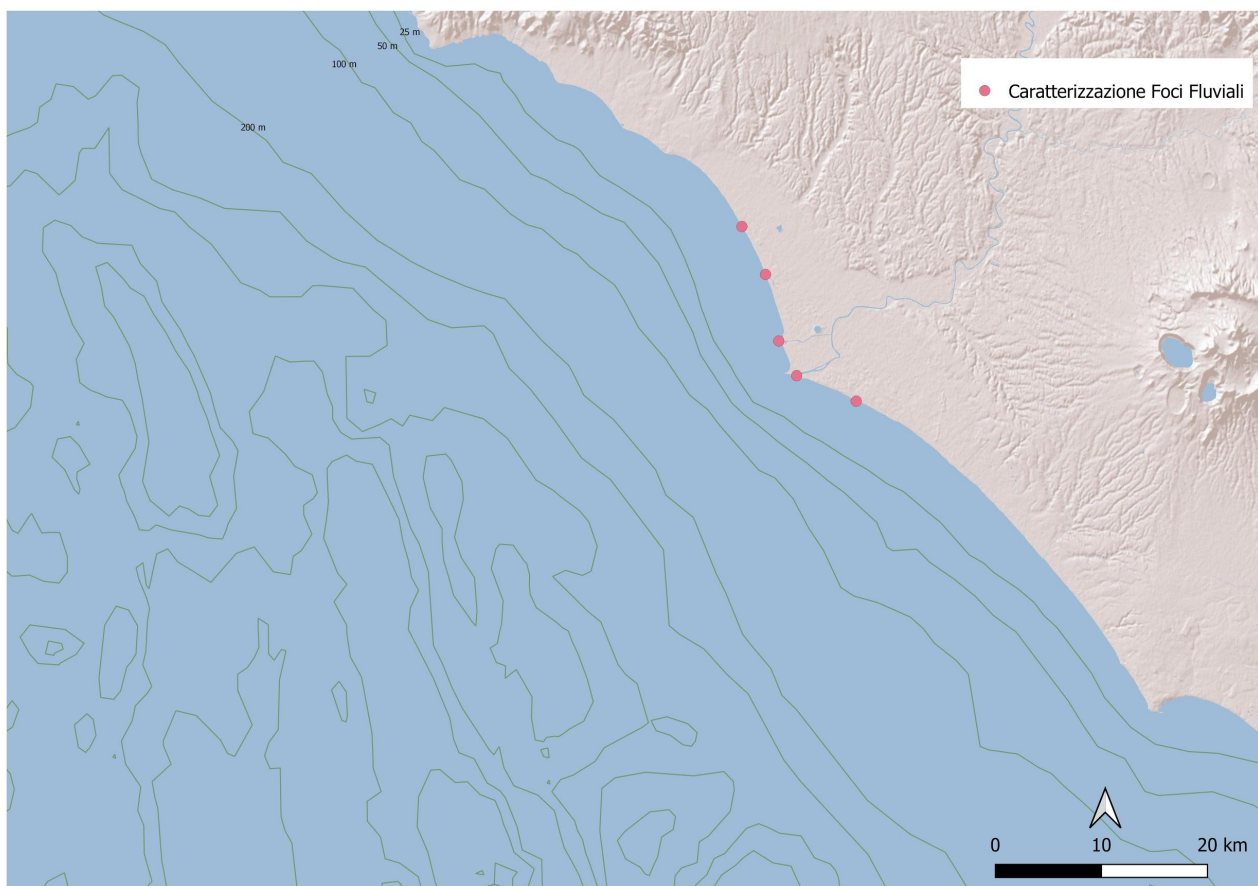


Figura 25. Ubicazione delle foci fluviali per l'analisi degli apporti liquidi e solidi

## **8. Studio del comparto biotico**

### **8.1. Analisi delle comunità bentoniche**

Nell'ambiente marino, le comunità bentoniche comprendono l'insieme degli organismi animali e vegetali che popolano il fondo e che sono ad esso strettamente legati. I numerosi fattori abiotici e l'elevato numero di specie animali e vegetali creano una straordinaria diversificazione dell'ambiente, spesso difficile da analizzare schematizzare ma di enorme importanza nella comprensione della qualità delle acque marine costiere.

Le comunità bentoniche, rivestono un ruolo fondamentale nella caratterizzazione e nella funzionalità degli ecosistemi marini costieri, in quanto, per le loro caratteristiche di persistenza, costituiscono delle vere e proprie memorie biologiche capaci di integrare nel tempo eventi distinti (Pearson T.H., Rosenberg R., 1978). Inoltre, rappresentano uno dei passaggi coinvolti nel ciclo dei nutrienti, partecipando allo scambio di sostanze tra sedimenti e colonna d'acqua. L'estrema eterogeneità trofico-funzionale delle specie che compongono tali comunità e la presenza di cicli vitali complessi fa dello studio della comunità macrozoobentonica di fondo mobile e duro un prezioso strumento di valutazione dell'integrità ecosistemica, sia da un punto quantitativo che qualitativo.

Per le acque marine costiere l'utilizzo di parametri e indici biologici per studi di qualità ha avuto negli ultimi anni un notevole sviluppo. L'approccio biologico infatti consente di ottenere risposte integrate nel tempo e di rilevare anche le minime modificazioni della qualità delle acque grazie all'utilizzo di descrittori diretti (es. Bioindicatori).

Per tali motivi, lo studio delle biocenosi bentoniche, se impiegato nelle indagini di impatto ambientale ed in interventi di gestione e risanamento, può fornire informazioni utili alla comprensione dell'ecosistema e del suo funzionamento e può essere usato come chiave di lettura dei cambiamenti e dei danni, sia diretti che indiretti, subiti dall'ambiente marino. Tali popolamenti, infatti, grazie ad un turnover assai più lento di quello dei popolamenti planctonici, hanno la capacità di memorizzare una più lunga serie di eventi ambientali e possono, perciò, fornire informazioni relative a perturbazioni pregresse.

Lo studio degli organismi che vivono a stretto contatto con il fondo possono quindi essere considerati uno strumento analitico, sia per la definizione dello stato ambientale, sia per la raccolta di dati e

informazioni utili alla conservazione e alla gestione di aree che hanno subito modificazioni ed impatto antropico, come nel caso in questione.

Poichè il Fiume Tevere è il principale vettore di sedimento nell'area di studio è necessario analizzare l'eventuale influenza delle opere sulla variazione delle comunità bentoniche estraendo la componente di stress dovuta agli apporti fluviali, valutando come qualsiasi modificazione del percorso del flusso di sedimento, e della sua composizione potrà portare ad un'alterazione delle comunità bentoniche ad esso associate (Fresi et al. 1982).

Si rende quindi necessario un esame della comunità accurata e ripetuta, infatti i campionamenti effettuati nelle stesse stagioni (ante e post operam) consentiranno di ricavare una serie di dati, necessaria a descrivere e valutare gli effetti che ha l'opera di costruzione del porto sulle comunità nel tempo e nello spazio. Inoltre, si cercherà di valutare, grazie all'ausilio dei modelli matematici, l'impatto, sulle comunità bentoniche, degli afflussi sedimentari prodotti dalle operazioni di escavo per la realizzazione delle opere portuali.

Il piano di campionamento ha lo scopo di analizzare le comunità bentoniche che caratterizzano l'unità fisiografica compresa tra Capo Lino e Capo D'Anzio ed è stato strutturato in modo da comprendere differenti tipologie di substrato come fondi mobili, fondi duri e coralligeno, praterie di *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile, 1813.

Il posizionamento delle stazioni di campionamento e il loro numero sarà predisposto sulla base dei risultati delle simulazioni numeriche della Fase0 utili ad evidenziare aree in grado di rappresentare significativamente possibili alterazioni nella struttura delle comunità bentoniche dovute alla realizzazione delle opere. Inoltre, il campionamento di maggior dettaglio delle aree "sensibili" sarà utile in futuro per determinare i cambiamenti a lungo termine che potranno avvenire nelle zoocenosi potenzialmente più impattate dall'opera.

## **8.2. Analisi del Benthos di fondo mobile attraverso campionamento standard**

Al fine di analizzare le differenti biocenosi bentoniche che caratterizzano l'U.F. saranno effettuati n.5 transetti costa largo tra loro equidistanti (n.3 a Nord e n.2 a Sud rispetto all'opera di costruzione del Porto); il transetto di chiusura a nord sarà situato in corrispondenza delle Secche di Torre Flavia mentre a sud in area limitrofa alle Secche di Tor Paterno. Ogni transetto comprenderà n.5 punti di

campionamento posizionati a profondità fisse di 2, 5, 10, 20 e 30 m per un totale di n.25 punti di prelievo ed analisi, le operazioni di campionamento verranno effettuate nel corso di n.1 Campagna (n.2 transetti ad uscita imbarcazione).

Come previsto dalla normativa vigente e ai sensi del Dlgs 152/2006 e del Dlgs 260/2010 i campionamenti saranno eseguiti attraverso l'utilizzo di Benna Van Veen standard da 18 litri effettuando 3 sottocampioni per un totale di 54 litri; per ogni sottocampione sarà verificato che lo strumento abbia lavorato in condizioni ottimali e che non ci sia stata fuoriuscita di sedimento, come descritto anche nel documento tecnico "Analisi delle comunità bentoniche di fondi mobili in ambiente marino" pubblicato e aggiornato dall'ISPRA. I campioni così raccolti saranno setacciati mediante maglia standard da 1mm, verranno stoccati in etanolo 75% ed in laboratorio saranno effettuate le operazioni di sorting e identificazione tassonomica.

I risultati ottenuti dall'analisi dei campioni consentirà di elaborare l'indice AMBI (ATZI's Marine Biotic Index), uno degli indici più usati in Europa negli ultimi anni, il cui valore, m-AMBI, varia tra 0 ed 1 e corrisponde al Rapporto di Qualità Ecologica (RQE) richiesto dalla Direttiva 2000/60/CEE. Questo indice 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 dall'Arpa Lazio

Il posizionamento e il numero dei punti di campionamento potranno variare anche in base alle simulazioni nei modelli di dispersione del materiale utili ad evidenziare le zone di maggior accumulo dei sedimenti.

### **8.3. Analisi del Benthos di fondo mobile all'interno/esterno dell'area portuale attraverso campionamento standard**

Al fine di ottenere una scala di indagine di dettaglio (strettamente locale) e di evidenziare la presenza di variazioni quali quantitative nelle comunità bentoniche associate ai substrati mobili presenti nell'area di costruzione, sono stati predisposti 3 punti di campionamento all'interno dell'area interessata dai lavori. I 3 punti di campionamento verranno posizionati a 2, 5 e 10 m e verranno effettuati in una singola campagna mediante l'utilizzo di Benna Van Veen standard da 18 litri, per un totale di 3 sottocampioni a punto di prelievo, come previsto dalla normativa vigente e ai sensi del Dlgs 152/2006 e del Dlgs 260/2010 e descritto anche nel documento tecnico "Analisi delle comunità bentoniche di fondi mobili in ambiente marino" pubblicato e aggiornato dall'ISPRA.

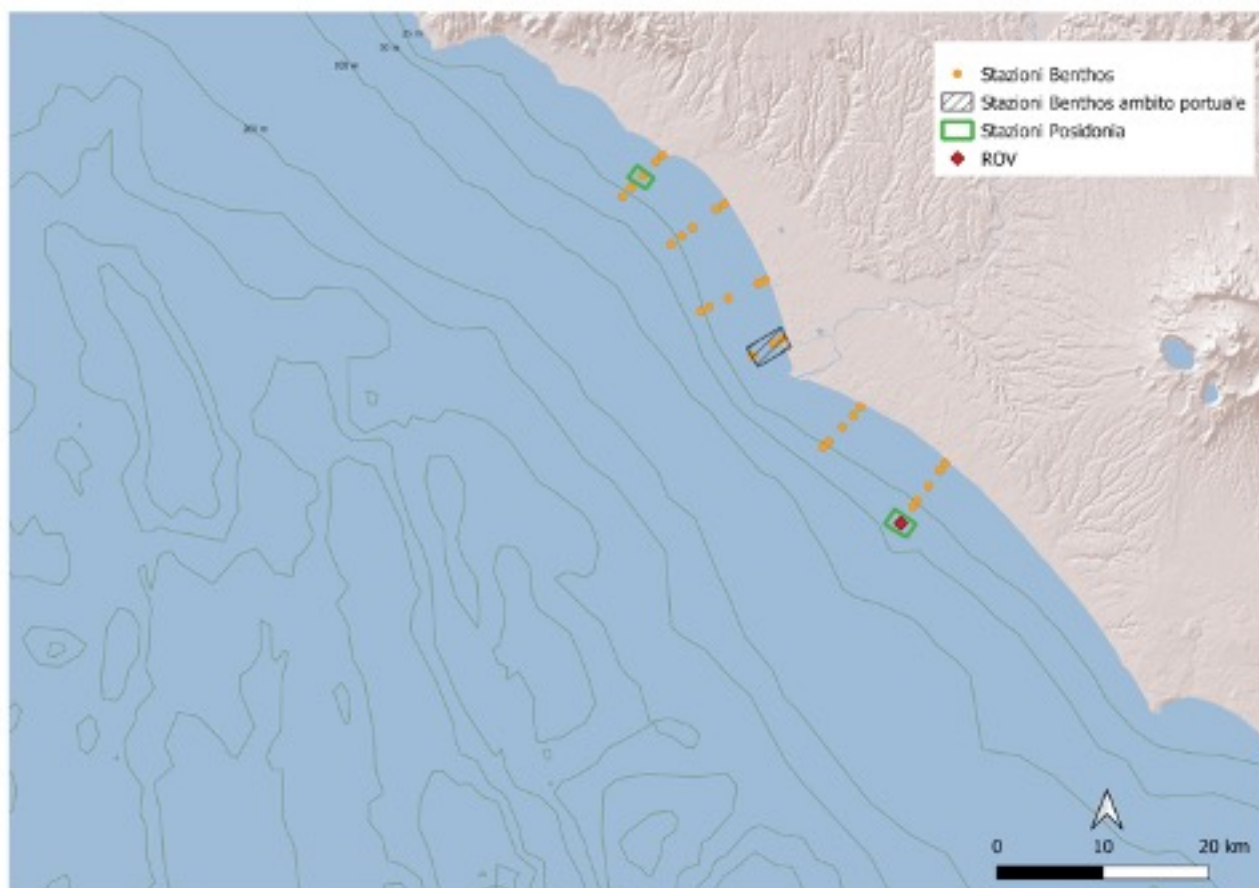


Figura 26. Ubicazione dei siti di campionamento per la caratterizzazione delle comunità bentoniche di fondo mobile

#### 8.4. Analisi del Benthos di fondo duro attraverso metodi non distruttivi

I substrati duri, che comprendono rocce infralitorali e substrati coralligeni, verranno indagati mediante campionamenti non distruttivi come ROV (Remotely Operated underwater Vehicle) su substrati a profondità comprese tra 35 e 50m, come indicato nel manuale “Monitoraggio e valutazione dello stato ecologico dell’habitat a coralligeno. Il coralligeno di parete, ISPRA, Manuali e Linee Guida n.191/2020” con riferimento alla (UNEP-MAP, 2017; 2019). I video e le foto prodotte saranno utilizzati per l’applicazione di uno o più indici tra cui: il MAES (Mesophotic Assemblages Ecological Status index, Cánovas-Molina et al., 2016), il MACS (Mesophotic Assemblages Conservation Status, Enrichetti et al., 2019) e il CBQI (Coralligenous Bioconstructions Quality Index, Ferrigno et al., 2018); questi indici, descritti e consigliati nei manuali ISPRA, sono stati concepiti allo scopo di analizzare filmati prodotti con veicoli operati da remoto.

Le indagini saranno eseguite in due aree distinte: l'AMP delle Secche di Tor Paterno ed una seconda area sensibile evidenziata tramite l'utilizzo di simulazioni numeriche. In entrambe le aree verranno effettuati n.3 transetti tramite ROV della distanza di 100/150 m ciascuno, posizionati in base alle caratteristiche biologiche e morfostrutturali dell'area; l'indagine e la caratterizzazione delle biostrutture coralligene sarà utile ad evidenziare la presenza potenziale di alterazioni qualitative legate alla costruzione dell'opera portuale. Il posizionamento dei transetti sarà stabilito anche sulla base delle simulazioni numeriche che indicheranno le aree maggiormente soggette ad accumulo di sedimenti (siltation) in cui si potrebbe verificare un progressivo “soffocamento” delle comunità sessili locali.

Le indagini verranno eseguite tramite un ROV, dotato di sistema di georeferenziazione, modello blue ROV 2 della Blue Robotics equipaggiato con un sistema di ripresa video HD e 4 illuminatori modello Lumen Subsea Light. L'utilizzo di tecniche di rilievo visivo da piattaforma remota georeferenziata, permetteranno di acquisire immagini, che verranno utilizzate per la caratterizzazione qualitativa delle comunità presenti (foto o filmati in HD).

#### **8.5. Analisi della Posidonia oceanica mediante metodi acustici e campionamenti in situ**

Il monitoraggio delle praterie di *Posidonia oceanica* lungo l'U.F verrà effettuato tramite acquisizione di dati acustici raccolti con un ecoscandaglio scientifico MX AQUATIC HABITAT ECHOSOUNDER della BioSonics che funziona con un trasduttore a frequenza singola di 204.8 kHz. Tale tecnica di monitoraggio permette di stimare i descrittori sintetici strutturali (densità assoluta, relativa e copertura) della *P. oceanica*, con l'obiettivo di restituire una misura diretta dell'abbondanza della pianta nello spazio e se misurata su una scala temporale ampia, permette di definire la dinamica dello stato di salute dell'ecosistema. Verrà effettuato un totale di n.2 transetti selezionati sulla base della distribuzione della *P. oceanica* lungo l'unità fisiografica, un transetto verrà effettuato all'interno delle Secche di Tor Paterno (sud) mentre il secondo verrà effettuato nella prateria localizzata nelle Secche di Torre Flavia (nord). In ogni transetto verrà effettuato 1 campionamento di calibrazione utile a validare i dati acustici; la calibrazione sarà effettuata tramite prelievi diretti e mediante l'analisi dei parametri morfo-strutturali della prateria, le operazioni di campionamento si svolgeranno mediante l'impiego di operatori subacquei. L'analisi dello stato del posidonieto verrà effettuata mediante l'applicazione integrata di una serie di descrittori indicativi, seguendo i protocolli standardizzati riportati nelle “Metodologie analitiche di riferimento ICRAM-ISPRA” del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio (Cicero e Di Girolamo, 2001) e successive modifiche (Buia et al., 2003)

e come previsto anche nei programmi di monitoraggio per la Strategia Marina (Art. 11, D.Lgs. 190/2010) con riferimento metodologico relativo al DM 260/2010.

| ATTIVITA'                                    | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                                                                                  | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021) | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-<br>Agosto 2021) | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021<br>post risultati modellistica<br>fase 0)                            | FASE 2 (24 mesi) | FASE 3 (24 mesi)                                                                                       |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Campagne di studio delle comunità bentoniche | Analisi della <i>Posidonia oceanica</i> mediante metodi acustici e campionamenti in situ                     |                               |                                                       | n. 1 Campagna x n.2 transetti (n.1 calibrazione a transetto con 3 campioni) = 2 transetti e 6 campioni |                  | n. 1 Campagna x n.2 transetti (n.1 calibrazione a transetto con 3 campioni) = 2 transetti e 6 campioni |
|                                              | Analisi del Benthos di fondo duro attraverso metodi non distruttivi (ROV e/o metodi fotografici)             |                               |                                                       | n.2 Campagne ROV x n.3 transetti (di 100m)                                                             |                  | n.2 Campagne ROV x n.3 transetti (di 100m)                                                             |
|                                              | Analisi del Benthos di fondo mobile attraverso campionamento standard                                        |                               |                                                       | n.1 Campagna x n.5 transetti x n.5 stazioni = 25 campioni                                              |                  | n.1 Campagna x n.5 transetti x n.5 stazioni = 25 campioni                                              |
|                                              | Analisi del Benthos di fondo mobile all'interno/esterno dell'area portuale attraverso campionamento standard |                               |                                                       | n.1 Campagna x n.3 stazioni = n. 3 campioni                                                            |                  | n.1 Campagna x n.3 stazioni = n. 3 campioni                                                            |

Tabella 8. Attività previste per il comparto bentonico

## 8.6. Analisi delle variazioni quali-quantitative del pescato delle Marinerie locali

La costruzione di opere portuali e le operazioni di dragaggio ad essa associate possono alterare le caratteristiche quali-quantitative dei popolamenti ittici demersali e le reti trofiche ad esse associate. La defaunizzazione diretta da “soffocamento”, la diminuzione di prede, l’aumento dei solidi sospesi lungo la colonna d’acqua (abrasione del corpo e occlusione degli apparati branchiali) e la conseguente diminuzione della penetrazione della luce (diminuzione delle capacità visive dei pesci con possibili effetti sul comportamento trofico e sull’efficienza predatoria) potrebbero comportare una futura perdita di biodiversità con conseguenti danni sulla pesca e sull’economia locale.

Al fine di caratterizzare le popolazioni ittiche locali e di creare un bianco utile a confronti futuri, sono stati raccolti ed analizzati i dati quali quantitativi relativi al pescato delle marinerie locali degli ultimi 10 anni (pesca a strascico, reti da posta e attrezzi fissi).

Nella fasi 1, 2 e 3 si procederà alla raccolta giornaliera (diari di bordo e descrizione del pescato giornaliero) dei dati quali quantitativi relativi al pescato delle marinerie locali; questi dati saranno utili ad evidenziare, attraverso un confronto diretto, se le attività di dragaggio comporteranno

alterazioni dirette sia per quanto riguarda la composizione del pescato a livello specifico (dati qualitativi), sia per quanto riguarda le catture per unità di sforzo e la pescosità media (dati quantitativi). Inoltre, lo studio delle frequenze di taglia e i rapporti lunghezza-peso forniranno importanti informazioni utili a valutare eventuali stati di disequilibrio all'interno di tutta la componente faunistica sfruttata dalla pesca. I dati di una popolazione ittica eccessivamente sfruttata o sottoposta a seri stress di varia natura, infatti, mostreranno chiaramente su un grafico di tipo istogramma una situazione in cui le taglie medie saranno rappresentate da bassi valori di frequenza.

| ATTIVITA' | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                                              | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021) | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-Agosto 2021) | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021<br>post risultati modellistica fase 0) | FASE 2 (24 mesi) | FASE 3 (24 mesi)                                                     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Pesca     | Analisi delle variazioni quantitative del pescato delle Marinerie locali |                               |                                                   | Raccolta dati qualitativi relativi al pescato delle marinerie locali     |                  | Raccolta dati qualitativi relativi al pescato delle marinerie locali |

Tabella 9. Attività previste per il comparto pesca

## 9. Marine Strategy Framework Directive

Tra le politiche di protezione dell'ambiente marino, la Direttiva Quadro 2008/56/CE sulla Strategia per l'ambiente marino (MSFD, *Marine Strategy Framework Directive*) ha come obiettivo il raggiungimento del buono stato ambientale (GES, “*Good Environmental Status*”) per le proprie acque\fondali\biota marini, attraverso l'attribuzione di un valore quantitativo e misurabile per 11 descrittori articolati attorno a una serie di dettagliati criteri e standard metodologici. La MSFD rappresenta il primo strumento Europeo legislativo che ingloba l'approccio ecosistemico integrato nella gestione delle attività umane e dei relativi impatti sull'ambiente marino.

L'attuazione del Decreto legislativo 190/2010 ha previsto, tra le altre fasi, “l'elaborazione dei Programmi di Monitoraggio coordinati, finalizzati a valutare in maniera continua lo stato dell'ambiente marino per stimare l'eventuale divario rispetto al buono stato ambientale definito o il suo mantenimento nel tempo. I criteri per la definizione del monitoraggio dei mari italiani sono stati definiti con l'obiettivo di colmare i gap conoscitivi in funzione dei GES e dei traguardi ambientali precedentemente definiti, raccordandosi alle attività di monitoraggio svolte ai sensi di altre normative e/o accordi internazionali”. I programmi di monitoraggio con i relativi sottoprogrammi sono stati ufficializzati con il D.M. del 11 febbraio 2015, pubblicato in Gazzetta Ufficiale il 2 marzo 2015.

Il progetto di monitoraggio proposto, finalizzato alla conoscenza delle potenziali alterazioni ed i potenziali effetti a breve e lungo termine, che la realizzazione della nuova area portuale potrà causare sull'ecosistema marino, fornisce un apporto a quanto richiesto dai Programmi e Sottoprogrammi di monitoraggio definiti per la valutazione continua dello stato ambientale delle acque marine comprese nell'unità fisiografica che va da Capo Linaro a Capo d'Anzio. Nell'ambito di questo progetto è prevista inoltre, l'integrazione del piano di monitoraggio con alcuni indicatori associati ai target ambientali coerentemente con quanto indicato nel D.M. del 11 febbraio 2015.

Il contributo del presente progetto alla Marine Strategy è sintetizzato nella tabella di seguito.

| Programma                                                                                               |                                                                                                                                                   | attività connesse alla valutazione del raggiungimento dei traguardi ambientali del descrittore... |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1 - Fito-Zooplankton, caratteristiche chimico-fisiche della colonna d'acqua e rifiuti spiaggiati</b> |                                                                                                                                                   |                                                                                                   |
| 1.1                                                                                                     | Monitoraggio delle variabili chimico-fisiche in ambito costiero                                                                                   | 5 - Eutrofizzazione                                                                               |
| <b>2 - Habitat del fondo marino e biodiversità.</b>                                                     |                                                                                                                                                   |                                                                                                   |
| 2.2                                                                                                     | Monitoraggio dell'estensione dell'habitat a coralligeno                                                                                           | 1 - Biodiversità e habitat, 6 - Integrità el fondale marino                                       |
| 2.3                                                                                                     | Monitoraggio delle praterie di Poidonia oceanica                                                                                                  | 1 - Biodiversità e habitat, 6 - Integrità el fondale marino                                       |
| 2.7                                                                                                     | Monitoraggio di specie bentoniche protette - Pinna nobilis                                                                                        | 1 - Biodiversità e habitat                                                                        |
| 2.8                                                                                                     | Identificazione e mappatura di aree ad rischio di introduzione di specie non indigene                                                             | 2 - Specie non indigene                                                                           |
| 2.11                                                                                                    | Monitoraggio associato alla valutazione di impatto di specie aliene invasive in aree marino costiere                                              | 2 - Specie non indigene                                                                           |
| <b>4 - Contaminanti ambientali e input di nutrienti.</b>                                                |                                                                                                                                                   |                                                                                                   |
| 4.6                                                                                                     | Monitoraggio delle concentrazioni di contaminanti chimici nei sedimenti                                                                           | 8 - Contaminanti chimici                                                                          |
| <b>6 - Condizioni idrografiche.</b>                                                                     |                                                                                                                                                   |                                                                                                   |
| 6.1                                                                                                     | Censimento di nuove infrastrutture costiere o offshore e altre attività antropiche potenzialmente in grado di alterare le condizioni idrografiche | 7 - Condizioni Idrografiche                                                                       |
| 6.2                                                                                                     | Monitoraggio costiero dei parametri chimico-fisici con piattaforme fisse                                                                          | 7 - Condizioni Idrografiche                                                                       |
| 6.4                                                                                                     | Messa a sistema delle informazioni su topografia e batimetria del fondo marino e monitoraggio della loro evoluzione                               | 1 - biodiversità e habitat, 6 - Integrità del fondo marino, 7 - Condizioni Idrografiche           |
| 6.5                                                                                                     | Validazione della modellistica oceanografica in aree chiave                                                                                       | 7 - Condizioni Idrografiche                                                                       |
| 6.9                                                                                                     | Monitoraggio dei parametri chimico fisici a scala di sottobacino con navi oceanografiche, VOS e sistemi autonomi (drifter e glider)               | 7 - Condizioni Idrografiche                                                                       |
| <b>7 - Rumore sottomarino</b>                                                                           |                                                                                                                                                   |                                                                                                   |
| 7.2                                                                                                     | Monitoraggio dei suoni continui a bassa frequenza                                                                                                 | 11 - Rumore sottomarino                                                                           |

Tabella 10. Elenco delle attività che contribuiranno all'estrazione dei dati utili alla Marine Strategy Framework Directive

| ATTIVITA'          | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                               | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021) | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-<br>Agosto 2021) | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021 post<br>risultati modellistica fase 0) | FASE 2 (24 mesi)                                                                                                                                                                  | FASE 3 (24 mesi)                                                                                                                                                                  |
|--------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Supporto alla MSFD | Estrazione dei dati utili a supporto dei descrittori MSFD |                               |                                                       |                                                                          | D1 - Biodiversità e habitat<br>D2 - Specie non indigene<br>D5 - Eutrofizzazione<br>D6 - Integrità del fondale marino<br>D7 - Condizioni Idrografiche<br>D8 - Contaminanti chimici | D1 - Biodiversità e habitat<br>D2 - Specie non indigene<br>D5 - Eutrofizzazione<br>D6 - Integrità del fondale marino<br>D7 - Condizioni Idrografiche<br>D8 - Contaminanti chimici |
|                    | Integrazione dati in conformità con descrittori MSFD      |                               |                                                       | D11 - Rumore sottomarino (n. 2 idrofoni in continuo)                     | D11 - rumore sottomarino (n. 2 idrofoni in continuo)                                                                                                                              | D11 - rumore sottomarino (n. 2 idrofoni in continuo)                                                                                                                              |
|                    |                                                           |                               |                                                       | D10 Rifiuti Marini                                                       |                                                                                                                                                                                   | D10 Rifiuti Marini                                                                                                                                                                |

Tabella 11. Attività di estrazione dati utili alla Marine Strategy Framework Directive

## **10. Modelli numerici**

Di seguito si riporta la descrizione delle attività previste per la modellistica numerica utilizzata per studiare gli impatti potenziali sugli ecosistemi marini costieri e sulla dinamica sedimentaria (evoluzione della linea di riva e cambiamenti morfologici della spiaggia emersa e sommersa) dovuti alla realizzazione della nuova opera portuale. Al fine di perseguire tale obiettivo i dati raccolti nel corso di attività sperimentali descritte nei paragrafi precedenti saranno integrati nei modelli matematici (*fig. 27*).

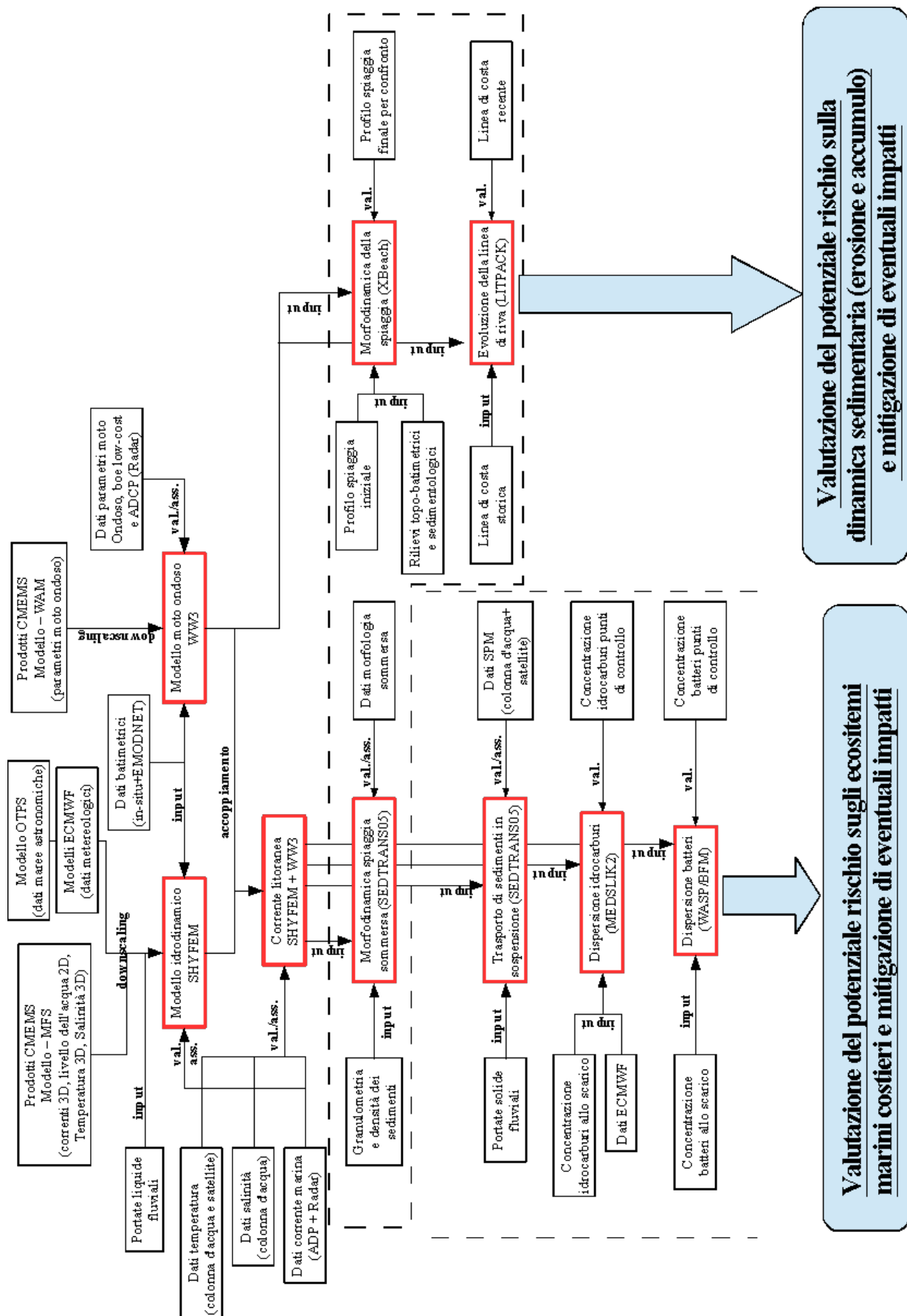


Figura 27. Ruolo ed integrazione della modellistica numerica nel progetto di ricerca

### **10.1. Downscaling con modelli a scala regionale**

Le condizioni iniziali e al contorno laterali del modello idrodinamico e di moto ondoso saranno forniti dai risultati dei modelli a scala di bacino e/o regionali presenti nel sistema Copernicus Marine Service che fornisce prodotti osservativi, di previsione, analisi e rianalisi di variabili ambientali marine utili per il monitoraggio della Terra. Tra i prodotti di previsione disponibili verranno utilizzati quelli relativi a:

- correnti marine prodotte dal modello MFS (Mediterranean Forecasting System);
- livello del mare rispetto alla superficie media prodotte dal modello MFS (Mediterranean Forecasting System);
- temperatura e salinità prodotte dal modello MFS (Mediterranean Forecasting System);
- parametri del moto ondoso calcolate attraverso il modello WAM nel Mar Mediterraneo.

Il livello del mare tiene anche conto della marea astronomica che viene fornita attraverso il modello OTPS (OSU Tidal Prediction Software). Per quanto riguarda le condizioni al contorno in superficie verranno utilizzati i dati meteorologici (temperatura di rugiada a 2m, temperatura dell'aria a 2m, velocità del vento a 10m, pressione atmosferica, copertura nuvolosa e precipitazione totale) provenienti dai modelli di previsione del sistema ECMWF fornito al CMCC dall'Aeronautica Militare.

### **10.2. Predisposizione dei modelli a scala di unità fisiografica**

Il modello idrodinamico SHYFEM (Shallow water HYdrodynamics Finite Element Model) (Umgiesser et Al. 2004) e di moto ondoso Wave Watch 3 utilizzeranno lo stesso approccio basato sull'utilizzo di una griglia agli elementi finiti di tipo non strutturata riconfigurabile. Tale griglia 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 aventi uno spessore minimo di 1 m in prossimità della superficie marina.

Il modello idrodinamico e di moto ondoso necessitano di altri dati di input per simulare il campo di corrente marino e il moto ondoso. 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.
- 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).

### **10.3. Integrazione dei modelli nel Tevere**

I fiumi rappresentano la principale fonte di materiale sedimentario che viene in parte utilizzato per alimentare la spiaggia emersa e quella sommersa. All'interno dell'unità fisiografica Capo Linaro – Capo d'Anzio il Tevere con le sue due foci, Fiumara Grande e Fiumara Piccola, è in termini di portata liquida e di portata solida il principale corso d'acqua della zona. Nel corso del tempo la quantità di materiale sedimentario apportata dal fiume è passata da 10 milioni di tonnellate/anno nel 1935 a 0.37milioni di tonnellate annue del 1973 (Margaritora, 1993).

Al fine di analizzare la dispersione dei sedimenti fluviali all'interno del tratto di costa oggetto di studio e individuare le aree soggette ad erosione e sedimentazione è stato utilizzato il modello SEDTRANS05 che utilizza il campo idrodinamico generato dall'accoppiamento tra il modello idrodinamico SHYFEM e il modello di moto ondoso WW3. In questo contesto per simulare la velocità della corrente in prossimità delle foci di Fiumara Grande e di Fiumara Piccola e la relativa dispersione dei sedimenti fluviali saranno utilizzati i dati pregressi di portata liquida e solida e quelli raccolti mediante campagne di misura in situ, mentre per quanto riguarda i dati meteomarinari saranno impiegati quelli derivanti dal downscaling con i modelli regionale (vedi Par. xx). La griglia agli elementi finiti del modello consentirà di ottenere un elevato dettaglio in prossimità delle foci fluviali e, laddove necessario, lungo l'ultima parte del corso dei fiumi.

### **10.4. Predisposizione dei modelli operativi e catena operativa**

All'interno del progetto di ricerca verrà predisposto un sistema operativo in cui convergeranno il modello idrodinamico SHYFEM, il modello di moto ondoso WW3 e il modulo di trasporto solido

SEDTRANS05 che sono stati messi a punto e validati nel corso delle precedenti attività. L'obiettivo è quello di fornire delle previsioni nell'intera unità fisiografica oggetto di studio e a scala di dettaglio nella zona in cui verrà realizzata l'opera delle seguenti variabili:

- velocità e direzione della corrente marina in diversi strati della colonna d'acqua;
- livello del mare rispetto alla superficie media;
- temperatura e salinità in diversi strati della colonna d'acqua;
- parametri del moto ondoso (altezza significativo, periodo di picco e direzione media);
- cambiamento morfologico del fondale e trasporto in sospensione.

Per migliore l'attendibilità delle previsioni i dati raccolti in situ saranno assimilati all'interno del sistema di previsione (data assimilation).

**10.5.** Simulazioni con modelli idrodinamici e di trasporto solido al fine di definire il corretto posizionamento delle stazioni di campionamento e misura

Sia per il modello idrodinamico che per quello di moto ondoso verrà riprodotto un anno significativo con un output di 1h (simulazione realistica) al fine di analizzare nel dettaglio la variabilità giornaliera e stagionale (variabilità intra-annuale) dei parametri calcolati dai modelli (correnti marine, stress al fondo, livello dell'acqua, temperatura salinità, altezza d'onda, periodo di picco, direzione media del moto ondoso). Tali simulazioni permettono di riprodurre la completa variabilità fisica dei processi idrodinamici e di condurre un'analisi dei risultati di carattere statistico (es. il tempo e la frequenza di superamento di determinati livelli di riferimento per le variabili di interesse, le intensità massime raggiunte dalle variabili su un periodo rappresentativo, l'evoluzione spazio-temporale delle variabili simulate, etc.) che sarà propedeutica all'identificazione delle aree che subiranno il maggior impatto. Questa tipologia di simulazione verrà effettuata sia in assenza che in presenza della nuova opera al fine di evidenziare le principali differenze tra le variabili che descrivono gli effetti sulle biocenosi costiere.

Così come le simulazioni del campo idrodinamico e di moto ondoso, quelle che riproducono il trasporto delle diverse frazioni di sedimento hanno una durata di un anno (simulazione realistica) con un output di 1h al fine di analizzare nel dettaglio la variabilità giornaliera e stagionale della distribuzione di solido sospeso e morfologia del fondale (zone di erosione e accumulo) nell'area di studio. Tali simulazioni permettono di riprodurre la completa variabilità fisica dei processi dinamici

del sedimento e di condurre un'analisi dei risultati di carattere statistico (es. il tempo e la frequenza di superamento di determinati livelli di riferimento per le variabili di interesse, le intensità massime raggiunte dalle variabili su un periodo rappresentativo, l'evoluzione spazio-temporale delle variabili simulate, etc.) che sarà propedeutica all'identificazione delle aree che subiranno il maggior impatto. Questa tipologia di simulazione verrà effettuata sia in assenza che in presenza della nuova opera al fine di evidenziare le principali differenze tra le variabili che descrivono gli effetti sulle biocenosi costiere.

In particolare, verranno riprodotti tre scenari di simulazione:

- nel primo verrà simulata la distribuzione dei materiali sospesi aventi le medesime caratteristiche granulometriche dei materiali che verranno dragati (inserendo anche punti di immissione che simulano gli input fluviali);
- nel secondo scenario verrà aggiunto, alla simulazione precedente, l'input derivante dalle attività di dragaggio;
- nel terzo scenario verrà simulata l'effetto del trasporto dei materiali sospesi e del relativo cambiamento morfologico del fondale in presenza ed assenza del primo lotto funzionale del Porto.

I risultati delle simulazioni saranno utilizzati per identificare le aree maggiormente soggette ai fenomeni di erosione ed accumulo che sono dovute alla realizzazione del primo stralcio del porto di Fiumicino. Le variabili che verranno prese in considerazione sono il cambiamento morfologico del fondale e la variazione di solido sospeso all'interno della colonna d'acqua, che risultano essere i parametri che possono causare dei potenziali effetti negativi sulle biocenosi marine costiere. Le simulazioni permetteranno infatti di stimare l'intensità, la durata e l'estensione degli impatti per valutare in maniera appropriata il rischio sugli habitat e sulle specie presenti nell'area di interesse. Le zone che risulteranno avere un maggior grado di rischio saranno quelle in cui si concentrerà il campionamento per il monitoraggio degli impatti, permettendo così di proporzionare gli studi e le attività.

In particolare, nelle aree evidenziate dalle simulazioni verranno incrementati i punti di prelievo e campionamento relativi alla fauna macrozoobentonica, al fine di evidenziare la potenziale presenza di alterazioni nella struttura delle comunità di fondo mobile. L'utilizzo di griglie di campionamento più fitte sarà utile per osservare le alterazioni dirette, a breve e medio termine, legate alla deposizione del sedimento risospeso sui substrati limitrofi al porto. Infatti, il rapido accumulo di ingenti quantità di sedimento sui fondi mobili potrebbe comportare un "soffocamento" delle zoocenosi bentoniche ad

essi associate che causerebbe sia alterazioni quali/quantitative nelle comunità animali (es. scomparsa specie sensibili, aumento specie opportuniste/tolleranti, variazione dei rapporti trofici ecc.) sia una potenziale perdita di biodiversità a scala locale. Inoltre, il campionamento di maggior dettaglio delle aree “sensibili” sarà utile in futuro per determinare i cambiamenti a lungo termine che potranno avvenire nelle zoocenosi più impattate dall’opera. La struttura delle griglie di campionamento (tipo di griglia, numero di transetti, batimetria ecc.) e la localizzazione dei punti di prelievo saranno stabiliti sulla base delle risultanze dalle simulazioni numeriche e quindi alla morfologia e all’estensione all’eventuale impatto sulle aree “sensibili” evidenziate.

#### **10.6. Validazione dei modelli idrodinamici (onde e correnti) e di trasporto solido con i dati di raccolti in situ**

La validazione del modello idrodinamico SHYFEM verrà effettuata confrontando i risultati delle simulazioni (velocità e direzione delle correnti marine, livello dell'acqua, temperatura e salinità) con i dati acquisiti *in situ* e da remoto. In particolare, il campo di velocità superficiale nella zona antistante il nuovo porto di Fiumicino verrà validato attraverso le misure del radar in banda X che permettono la misura della velocità e della direzione della corrente marina con una elevata risoluzione spaziale quando esistono eventi che determinano significative anomalie della superficie dell'acqua. Il sistema consente infatti di rilevare le correnti marine e il moto ondoso quando le onde hanno un'altezza superiore a 0.5 m ed un periodo sufficientemente lungo da essere al di sopra della frequenza di Nyqvist. Inoltre, un altro limite del sistema è l'incapacità di effettuare misure in assenza totale di vento condizione, comunque, molto poco frequente. La corrente marina superficiale verrà inoltre messa a confronto con i dati acquisiti dalle boe lagrangiane che verranno lanciate nella zona costiera e di largo a bordo di una imbarcazione e da terra all'interno dell'alveo del fiume Tevere. Il modello calcolerà la traiettoria delle boe attraverso il rilascio di un corpo galleggiante nello stesso punto e allo stesso orario in cui queste saranno lanciate. Successivamente verrà confrontata la traiettoria simulata con il percorso compiuto dai diversi drifter. Il profilo verticale delle correnti marine (direzione e velocità) viene invece validato attraverso i dati acquisiti dallo strumento ADP (Acoustic Doppler Profiler) che ha una frequenza spaziale di 1 m ed una temporale di 10 s. A livello spaziale e temporale, le misure saranno definite sulla base delle prime simulazioni del modello SHYFEM in modo da confrontare i dati in zone ed in periodi in cui si verificano processi dinamici diversi.

La temperatura superficiale calcolata con il modello idrodinamico nella zona di studio verrà messa in relazione con le immagini satellitari a media ed alta risoluzione dei sensori di Modis e LandSAT8

(TIRS) che permettono di rilevare dati sulla superficie del mare ad una risoluzione orizzontale pari rispettivamente a circa 500/1000 m e a circa 30 m. Il confronto permetterà inoltre di valutare l'attendibilità del modello nel riprodurre la dinamica della plume del fiume Tevere, necessaria per gli studi di dinamica costiera. L'andamento verticale della temperatura e della salinità verrà validato utilizzando le misure da imbarcazione con la sonda CTD (Conductivity Temperature Depth) che saranno effettuate con cadenza stagionale (regime di stratificazione e regime di mescolamento).

La performance del modello di moto ondoso WWIII (WAVEWATCH III) verrà valutata utilizzando gli spettri d'onda acquisiti dal radar in banda X nell'area di Fiumicino. Come già detto per i campi di velocità, lo strumento permette la misura dello spettro e dei principali parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) negli intervalli di tempo in cui le onde hanno un'altezza superiore a 0.5 m e un periodo sufficientemente lungo da essere al di sopra della frequenza di Nyquist. All'interno di questi periodi di tempo vengono acquisite le caratteristiche spettrali del moto ondoso al centro del dominio del radar che possono essere confrontati con i risultati delle simulazioni del modello WWIII.

I risultati delle simulazioni del modello idrodinamico e di moto ondoso prodotti al punto 4.5 saranno utilizzati per analizzare la dispersione delle frazioni granulometriche di sedimento che caratterizzano i fondi mobili della zona di studio. A tale scopo saranno utilizzati tutti i dati disponibili relativi ai campioni di sedimento raccolti nel corso di precedenti campionamenti all'interno dell'unità fisiografica Capo Linaro-Capo d'Anzio. In particolar modo si farà riferimento alle diverse classi della frazione sabbiosa e ghiaiosa e all'intera frazione fine ( $< 63 \mu\text{m}$ ), e, qualora fossero disponibili, anche alle analisi mineralogiche, fondamentali per definire la densità del materiale che verrà trasportato dalle correnti marine costiere.

Il trasporto del materiale sedimentario verrà calcolato dal modello SEDTRANS05 che tiene conto dei processi associati sia ai sedimenti coesivi (silt e argilla) che a quelli non coesivi (sabbia e ghiaia).

La capacità del modello di simulare il trasporto in sospensione verrà valutata utilizzando i dati di solido sospeso acquisiti *in situ* o da remoto. Il dato satellitare permetterà l'attendibilità del modello SEDTRANS05 nel riprodurre la distribuzione spaziale del sedimento in sospensione e la dinamica della plume del fiume Tevere. I dati acquisiti *insitu* permetteranno di validare il modello analizzando anche la distribuzione verticale del solido in sospensione. I processi di sedimentazione ed erosione simulati dal modello saranno invece valutati analizzando la morfologia sommersa che definisce in diversi istanti di tempo la variazione del fondale all'interno dell'area di studio. Questo parametro sarà

confrontato con i dati batimetrici acquisiti lungo 5 transetti in due regimi idrodinamici significativi (inverno e estate). I dati del primo campionamento verranno forniti in input al modello mentre quelli del secondo rilievo batimetrico serviranno per valutare le performance del modello nel riprodurre i cambiamenti morfologici del fondale lungo i transetti di indagine.

#### **10.7. Modello operativo: simulazioni del trasporto solido per la valutazione delle zone soggette ad erosione e sedimentazione**

Al fine di prevedere gli effetti prodotti dalla realizzazione della nuova struttura portuale sui fenomeni di erosione e sedimentazione che potrebbero coinvolgere la zona costiera oggetto di studio, verrà utilizzato il sistema di previsioni che fornirà risultati relativi al cambiamento morfologico del fondale nei tre giorni successivi rispetto a quello in cui ha inizio la simulazione. I risultati delle previsioni saranno divulgati attraverso un portale messo a disposizione dal CMCC per l'intera durata del progetto in cui verranno riportati ad intervalli di 3 ore per i 3 giorni di previsione le seguenti variabili:

- velocità e direzione della corrente marina in diversi strati della colonna d'acqua;
- livello del mare rispetto alla superficie media;
- temperatura e salinità in diversi strati della colonna d'acqua;
- parametri del moto ondoso (altezza significativo, periodo di picco e direzione media);
- cambiamento morfologico del fondale.

Queste variabili saranno visualizzate sia nell'intera unità fisiografica oggetto di studio, che a scala di dettaglio nella zona in cui verrà realizzata l'opera. In questo modo sarà più efficace l'identificazione e la sitizzazione di interventi volti a mitigare gli effetti della struttura portuale sull'evoluzione della linea di costa mediante adeguate azioni correttive da attuare in corso d'opera.

#### **10.8. Modello operativo: simulazioni del materiale eventualmente dragato per la valutazione dei potenziali effetti indotti sull'ecosistema marino**

Al fine di prevedere gli effetti prodotti dalla realizzazione della nuova struttura portuale sugli ecosistemi marini costieri presenti nella zona di studio, verrà impiegato il sistema di previsioni che fornirà risultati relativi alla concentrazione del sedimento fine in sospensione e dei relativi tassi di sedimentazione nei tre giorni successivi rispetto a quello in cui ha inizio la simulazione. I risultati delle previsioni saranno divulgati attraverso un portale messo a disposizione dal CMCC per l'intera durata del progetto in cui verranno riportati ad intervalli di 3 ore per i 3 giorni di previsione, oltre alle

variabili elencati al punto precedente, anche la torbidità indotta dal sedimento fine ed i relativi ratei di sedimentazione.

Queste variabili saranno visualizzate sia nell'intera unità fisiografica oggetto di studio, che a scala di dettaglio nella zona in cui verrà realizzata l'opera. In questo modo sarà più efficace l'identificazione e la sitizzazione di interventi volti a mitigare gli effetti della struttura portuale sugli ecosistemi marini costieri mediante adeguate azioni correttive da attuare in corso d'opera.

#### **10.9. Predisposizione e simulazioni attraverso il modello di oil slick ed il modello di dispersione dei batteri**

Con riferimento all'istruttoria VIA (n.187 del 15/12/2008) risulta necessario tener conto del rischio di alterazione della qualità delle acque per immissione in mare di idrocarburi, acque di scarico da navi in movimento e/o in stazionamento. A tale riguardo verrà utilizzato il modello di dispersione degli idrocarburi MEDSLIK-II (De Dominicis et. al 2013) che consente di riprodurre il trasporto e i processi di weathering del petrolio utilizzando una rappresentazione lagrangiana delle macchie di olio all'interno dell'ambiente marino. L'input idrodinamico del modello viene fornito dai risultati delle simulazioni di SHYFEM mentre la parte atmosferica (es. velocità e direzione del vento) viene trasmessa attraverso i dati risultanti dai modelli di previsione del sistema ECMWF. Il modello riprodurrà degli scenari in cui verranno simulate diverse tipologie di sorgente (navi e pipeline) e di sversamento (continuo e istantaneo) in differenti condizioni meteomarine. In particolare, verranno effettuate simulazioni con navi in movimento e in stazionamento all'interno e all'esterno della nuova struttura portuale per valutare il rischio sull'ambiente marino e per poter mitigare eventualmente tale impatto. Inoltre, verrà analizzato il rischio di impatto dovuto allo spostamento della SeaLine.

Oltre al rischio di sversamento da idrocarburi si può verificare anche quello relativo alle acque di scarico che possono contenere, se non efficientemente depurate, una elevata concentrazione di batteri fecali che possono arrecare danni all'ambiente marino e alla salute pubblica. In quest'ultimo caso possono determinare anche la chiusura temporanea delle attività di balneazione negli stabilimenti limitrofi alla sorgente con conseguente danno economico al turismo locale. Per analizzare il rischio alla salute pubblica e agli ecosistemi marini costieri verrà utilizzato il modello WASP/BFM che consente di analizzare la dispersione e i processi di decadimento, dovuti alla temperatura, salinità e alla radiazione UV, del carico batterico patogeno. L'input idrodinamico del modello viene fornito dai risultati delle simulazioni di SHYFEM mentre la parte atmosferica (es. radiazione UV) viene trasmessa attraverso i dati risultanti dai modelli di previsione del sistema ECMWF. Il modello

riprodurrà degli scenari in cui verranno simulate diverse tipologie di sorgente (navi e scarichi costieri) e di sversamento (continuo e istantaneo) in differenti condizioni meteomarine. In particolare, verranno effettuate simulazioni con navi in movimento e in stazionamento all'interno e all'esterno della nuova struttura portuale per valutare il rischio sull'ambiente marino e per poter mitigare eventualmente tale impatto. Per valutare l'attendibilità del modello i risultati delle simulazioni saranno confrontati con i dati microbiologici (concentrazione del carico batterico patogeno) raccolti in punti di controllo collocati ad una distanza progressiva dalla sorgente. Si dovrà prevedere un numero minimo di 3 punti di prelievo rispettivamente a -2, -5 e -10 m, da monitorare con una frequenza temporale di 4 ore per un totale di 4 campioni giornalieri a stazione (indicativamente alle 7:30, 11:30, 15:30, 19:30) da effettuare durante una campagna giornaliera. Le attività di campionamento saranno svolte da ARPA durante la Fase 2 e la Fase 3.

| ATTIVITA'                                                                                                               | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                                                                                                                                           | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021) | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-<br>Agosto 2021) | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021 post risultati<br>modellistica fase 0) | FASE 2 (24 mesi) | FASE 3 (24 mesi) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| <b>Predisposizione dei modelli numerici per l'area di studio</b>                                                        | Downscaling con modello a scala regionale                                                                                                                             |                               |                                                       |                                                                          |                  |                  |
|                                                                                                                         | Predisposizione dei modelli a scala di unità fisiografica                                                                                                             |                               |                                                       |                                                                          |                  |                  |
|                                                                                                                         | Integrazione modelli nel Tevere                                                                                                                                       |                               |                                                       |                                                                          |                  |                  |
|                                                                                                                         | Predisposizione modelli operativi e catena operativa (onde e correnti; dati in input batimetrie)                                                                      |                               |                                                       |                                                                          |                  |                  |
| <b>Applicazione dei modelli e simulazioni</b>                                                                           | Simulazioni con modelli idrodinamici e di trasporto solido al fine di definire il corretto posizionamento delle stazioni di campionamento e misura                    |                               |                                                       |                                                                          |                  |                  |
| <b>Modelli numerici: validazione e mantenimento modelli matematici. Messa a punto ulteriori modelli per simulazioni</b> | Validazione dei modelli idrodinamici (onde e correnti) e di trasporto con i dati di raccolti in situ                                                                  |                               |                                                       |                                                                          |                  |                  |
|                                                                                                                         | Modello operativo: Simulazioni del materiale eventualmente dragato per la valutazione dei potenziali effetti indotti sull'ecosistema marino                           |                               |                                                       |                                                                          |                  |                  |
|                                                                                                                         | Predisposizione e simulazioni modello di oil slick e modello di dispersione batteri                                                                                   |                               |                                                       |                                                                          |                  |                  |
|                                                                                                                         | Modello operativo: Simulazioni del trasporto solido per la valutazione delle zone soggette ad erosione e sedimentazione (per definire eventuali opere di mitigazione) |                               |                                                       |                                                                          |                  |                  |

Tabella 12. Attività previste per la predisposizione, validazione e mantenimento dei modelli numerici

## **11. Studio della variazione della linea di riva a breve e a lungo termine**

Al fine di “individuare eventuali alterazioni a breve e lungo termine sull'evoluzione della linea di costa e sugli ecosistemi marini costieri” si rende necessario predisporre un modello (o più modelli) previsionale/i per analizzare, nelle differenti scale spaziali e temporali, l'andamento della linea di riva ed eventualmente anche la morfologia (nel breve termine) della spiaggia emersa e sommersa, a seguito della realizzazione delle opere del nuovo porto di Fiumicino, sia della darsena pescherecci che di tutte le altre opere portuali previste dal PRP.

Per una previsione attendibile dell'evoluzione futura della linea di riva è necessaria una preliminare calibrazione e validazione del modello sulla base dei dati storici a disposizione.

L'obiettivo della fase di calibrazione consisterà nel verificare che il modello sia in grado di simulare l'evoluzione lungo l'unità fisiografica nel periodo compreso tra il 1990 ed il 2020 (prima della realizzazione delle opere portuali) e nel determinare il set di parametri che meglio la riproducono.

Per calibrare il modello quindi, sarà necessario comparare i risultati dell'analisi storica (nel periodo 1990-2020) della variazione della linea di riva con i risultati delle simulazioni modellistiche (sempre 1990-2020) ottenute considerando anche i parametri meteomarini per il corrispondente periodo.

Una volta calibrati i modelli verranno utilizzati per simulare scenari evolutivi in assenza e presenza delle opere portuali nel breve periodo (analisi intra-annuale per 2-3 anni) e nel lungo periodo (inter-annuale 10, 20, 30 anni).

### **11.1. Analisi storica della linea di riva e ricostruzione dei profili della spiaggia sommersa**

La linea di riva rappresenta il contatto aria-terra-mare e la sua mappatura è essenziale per la pianificazione e gestione costiera. La linea di riva è un elemento soggetto ad elevata variabilità intra-annuale, in quanto risente dei processi idrodinamici, indotti dal moto ondoso e del vento che avvengono lungo l'intero sistema costiero che si estende dalla retroduna al limite verso mare della spiaggia sommersa. Essendo un sistema estremamente dinamico il suo monitoraggio risulta essere un fattore fondamentale per una corretta analisi del bilancio sedimentario della spiaggia, sia quella emersa che quella sommersa.

La linea di riva può migrare a seguito di diversi processi, quali:

- innalzamento del livello del mare;

- cambiamenti nel drift litoraneo;
- cambiamenti stagionali o annuali delle tempeste in termini di altezza d'onda, durata dell'evento di tempesta, angolo d'incidenza e wave set-up;
- cambiamenti nel budget sedimentario;
- cambiamenti nell'apporto sedimentario fluviale;
- variazioni del clima d'onda;
- eventi estremi;
- interventi antropici (sia nella spiaggia emersa sia in quella sommersa).

Per un corretto monitoraggio le incertezze legate alla mappatura della linea di costa non devono essere maggiori della risoluzione dei cambiamenti della linea di costa (Bowman, Pranzini, 2007). Per questo motivo quando si intendono acquisire le tendenze e l'intensità delle variazioni spazio-temporali della linea di riva la strategia di acquisizione deve essere calibrata allo scopo che s'intende raggiungere.

Il piano di monitoraggio della linea di riva prevederà una serie di attività specifiche per le diverse fasi del monitoraggio e che di seguito vengono descritte.

L'analisi dell'evoluzione storica, a medio e lungo termine, della linea di riva sarà condotta prima della realizzazione delle opere, attraverso l'esame comparato di documenti storici ed elaborati cartografici relativi alle varie epoche (laddove disponibili). In particolare verranno prese in considerazione variazioni a medio e lungo termine che saranno analizzate attraverso foto aeree ed immagini satellitari ad altissima risoluzione.

L'analisi delle immagini satellitari e delle foto aeree permetterà di ottenere un'osservazione sinottica dell'area estesa, effettuando valutazioni relative al trend passato della linea di riva, e la tendenza attuale in relazione al periodo di osservazione. Al fine di definire in maniera accurata la posizione della linea di costa verranno scelti degli indicatori come HWL (High Water Line) che basa la sua stima sull'ultimo evento di acqua alta e di conseguenza risulta facilmente distinguibile nelle foto aeree (Dolan and Hayden, 1983) e nelle osservazioni satellitari (Carli et al., 2008) o MHWL (Mean High Water Line) che si basa sull'intersezione della HWL con la topografia trasversale ottenuta mediante rilievi topografici e altimetrici sul campo (Liu et al., 2007).

Inoltre verranno presi come riferimento dell'andamento batimetrico i profili della spiaggia sommersa ed emersa disponibili che potranno essere comparati con i profili attuali per verificare la variazione batimetrica a lungo termine.

I dati raccolti in questa fase saranno fondamentali per validare i modelli che analizzeranno l'evoluzione della linea e il cambiamento morfologico della spiaggia emersa e sommersa (vedi par 11.2).

### **11.2. Predisposizione e simulazioni attraverso il modello per l'analisi dell'evoluzione della linea di riva e della spiaggia sommersa ed emersa**

Una parte rilevante degli studi di dinamica costiera viene svolta attraverso l'analisi dell'evoluzione della linea di riva. Nella fattispecie deve essere considerato un tratto di costa sufficientemente esteso all'interno del quale i materiali che formano o contribuiscono a formare la costa presentano movimenti confinati all'interno del tratto stesso o scambi con l'esterno in misura non influenzata da quanto accade nel litorale.

In questo studio l'evoluzione della linea di riva e della spiaggia emersa sarà effettuata a scala di unità fisiografica attraverso il modello monodimensionale LITPACK (LittoralTransport and CoastlineKinetics) e il modello bidimensionale XBeach. Il primo, sviluppato dal DanishHydraulic Institute, consiste in un sistema di modellazione deterministica che descrive i maggiori processi della fascia costiera, mentre il secondo, finanziato da US Army Corps of Engineers e messo a punto da un consorzio formato da UNESCO-IHE, Delft University of Technology e University of Miami, simula la propagazione dell'onda, il trasporto solido e i cambiamenti morfologici sulla spiaggia emersa e sommersa, sia in modalità 1D (lungo un profilo trasversale alla linea di costa) e 2D (in un'area ristretta interessata dalla nuova opera).

Entrambi i modelli hanno bisogno di dati meteomarini e di dati sedimentologici (granulometria e densità dei sedimenti). Il modello LITPACK ha inoltre bisogno della morfologia della linea di riva mentre il modello XBeach necessita di dati topo-batimetrici della spiaggia emersa e sommersa

I processi dinamici che determinano la variazione della linea di costa nel modello LITPACK saranno validati utilizzando simulazioni a breve e a lungo termine che prevedono l'impiego di linee di costa antecedenti a quella attuale. La linea della costa dell'unità fisiografica è stata ricostruita da fotografie

aeree composte insieme, sulle quali è stata fissata una linea di riferimento necessaria per definire la griglia numerica utilizzata dal modello per risolvere le equazioni matematiche alle differenze finite. Il modello sarà validato confrontando i risultati dell'analisi storica (nel periodo 1990-2020) della variazione della linea di riva con i risultati delle simulazioni modellistiche (sempre 1990-2020).

Una volta che il modello è stato validato si procederà ad effettuare scenari futuri per analizzare il contributo degli effetti della nuova struttura portuale sulle variazioni morfologiche della linea di costa.

Lo stesso approccio verrà seguito per validare il modello XBeach e analizzare gli impatti del nuovo porto sui profili di spiaggia emersa e sommersa nelle zone in cui si manifesta la maggiore variazione morfologica del fondale (risultati del modello SEDTRANS05). Come base di partenza verranno utilizzati i profili topo-batimetrici effettuati prima delle mareggiate. Il modello verrà validato con i rilievi morfologici della spiaggia emersa e sommersa effettuati successivamente al suddetto periodo di mareggiate. In seguito, verranno predisposti degli scenari per valutare e discriminare gli impatti prodotti dalla realizzazione dell'opera.

L'analisi dei risultati prodotti da entrambi i modelli consentirà di identificare e posizionare in maniera tempestiva ed efficace interventi volti a mitigare gli effetti dell'opera sull'evoluzione della linea e sui cambiamenti morfologici della spiaggia emersa e sommersa (zone soggette ad erosione).

## **12. Opere di mitigazione**

Il Dec. VIA specifica: “il monitoraggio sarà finalizzato ad individuare eventuali alterazioni a breve e lungo termine sull'evoluzione della linea di costa e sugli ecosistemi marini costieri ed a mitigare gli stessi mediante adeguate azioni correttive da attuare in corso d'opera e in fase di esercizio”.

Durante la fase istruttoria VIA, in via preliminare, dalla commissione tecnica di verifica ambientale (parere n. 187 del 15.12.2008) vengono identificate alcune azioni di mitigazione da effettuare durante la fase di Cantiere e durante l'esercizio.

Inoltre, nello Studio Preliminare Ambientale SPA04 rev. 04-2014 vengono proposte alcune misure mitigative che in parte riprendono quanto prescritto durante la fase istruttoria.

In entrambi i documenti viene posta attenzione alle tecnologie e metodologie che verranno utilizzate durante le attività realizzative delle opere, alle caratteristiche infrastrutturali del porto in termini di sistemi di confinamento e depurazione degli inquinanti per la minimizzazione degli impatti e in termini di controllo ambientale.

La definizione delle azioni correttive si svolgerà durante la fase di cantiere e di esercizio con tempi utili alla attuazione degli interventi.

Sulla base dei risultati del modello operativo verranno identificati e sitizzati gli interventi di mitigazione e correzione degli effetti prodotti sull'evoluzione della linea di riva e sugli ecosistemi marini costieri.

Al termine della fase di caratterizzazione (ante operam) il modello operativo, attraverso l'assimilazione dei dati satellitari e delle misure in sito, fornirà previsioni relative alla diffusione dei sedimenti e degli inquinanti associati che si verificherà durante la fase di cantiere a causa delle operazioni di escavo e di realizzazione delle opere a mare e durante l'esercizio, nell'ambito delle operazioni di dragaggio. Inoltre, nella fase di esercizio il modello operativo fornirà automaticamente la circolazione delle acque all'interno del porto.

Successivamente all'identificazione e sitizzazione degli interventi, si effettueranno simulazioni numeriche basate sugli eventi più frequenti e più intensi (analisi di scenario) per procedere al dimensionamento degli interventi stessi. E' prevista inoltre una attività di monitoraggio sistematica e la programmazione di eventuali opere di bonifica qualora si rendessero necessari.

Questa attività verrà effettuata durante la Fase 2 (cantiere) e durante la Fase 3 (esercizio) e prevede l'analisi di differenti interventi e la valutazione del loro effetto in funzione dei risultati dei risultati dei modelli numerici al fine di scegliere tempestivamente la tipologia di intervento (tra una serie di ipotesi progettuali) che minimizza gli impatti sull'ambiente.

### **13. Analisi dell'impatto dovuto allo spostamento della SeaLine**

Questo impatto verrà studiato solamente quando sarà realizzato l'intero Porto, in quanto lo spostamento della SeaLine è previsto nell'ultima fase dello sviluppo del porto di Fiumicino dopo il completamento del primo lotto funzionale.

Questa tematica non verrà affrontata per la realizzazione del primo stralcio del primo lotto funzionale ma verrà affrontata durante la fase post operam a seguito del completamento della fase di Cantiere dell'intero primo lotto funzionale.

## 14. Analisi dati e reporting

Durante tutte le fasi del progetto sarà garantita la redazione di reportistica scientifica per massimizzare la condivisione dei risultati ottenuti dalle diverse attività di monitoraggio svolte con le parti interessate e le autorità competenti.

Report descrittivi delle attività svolte e relativa analisi dei dati raccolti verranno prodotti con una cadenza coerente alla durata delle attività previste nelle diverse fasi del progetto. Le attività di ricerca sviluppate durante il progetto verranno quindi indirizzate alla divulgazione scientifica, ovvero i risultati ottenuti dalle attività di ricerca verranno pubblicati su riviste scientifiche internazionali referate nonché presentati a convegni scientifici di settore, sia nazionali che internazionali. Il progetto di ricerca posto in essere infatti, integra una serie di attività e di collaborazioni con diversi istituti scientifici (Università della Tuscia, SCRIPPS Institution of Oceanography, CNR, Università di Bologna), con lo scopo di eseguire, nel corso delle attività, approfondite elaborazioni dei dati finalizzate alla produzione scientifica. I dati raccolti potranno essere inoltre oggetto di tesi di laurea triennale, magistrale e di dottorato.

Verranno prodotte rappresentazioni cartografiche al fine di consentire una rapida consultazione dei risultati del monitoraggio in merito al comparto biotico (distribuzione ed estensione delle praterie di *P. oceanica*, caratterizzazione delle comunità bentoniche, etc), alla colonna d'acqua (profili di temperatura, salinità, solido sospeso, etc.), e al comparto sedimentologico (caratterizzazione granulometrica e chimica dei sedimenti). Verranno inoltre restituite simulazioni preliminari di corrente marina, moto ondoso, trasporto solido e cambiamento morfologico del fondale al fine di valutare le zone soggette ad erosione e sedimentazione prima e dopo la costruzione delle opere nonché, simulazioni dell'eventuale dispersione di idrocarburi e batteri.

Infine, verrà prodotto un elaborato contenente l'identificazione, la sitizzazione e l'entità degli interventi volti a mitigare gli effetti della costruzione della nuova area portuale sull'evoluzione della linea di costa e sugli ecosistemi marini costieri, mediante adeguate azioni correttive da attuare in corso d'opera.

| ATTIVITA' | DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'                                                                                                                                    | FASE 0<br>(Fine Gennaio 2021) | FASE 1<br>(Luglio 2020-Dicembre 2020-Agosto 2021) | FASE 1<br>(Febbraio - Agosto 2021<br>post risultati modellistica fase 0) | FASE 2ù<br>(24 mesi) | FASE 3<br>(24 mesi) |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|
| Reporting | I dati acquisiti nelle diverse fasi del progetto saranno analizzati ed elaborati al fine di produrre una serie di report descrittivi delle attività effettuate | n. 1 report                   | n. 1 report                                       | n. 1 report                                                              | n. 1 report          | n. 2 report         |

Tabella 13. Attività di analisi dati e reporting

## 15. ALLEGATI

### 15.1. Descrizione Modelli

#### 15.1.1. Modello idrodinamico SHYFEM

Il modello 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 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- $\epsilon$  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,

$\zeta$  = livello del mare,

$\rho_0$  = densità media del mare,

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

$\tau$  = 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,

$\rho_a$  = 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  $l$ ,

$\nu_h$  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/m<sup>3</sup>] densità dell'acqua.  $Q$  è il flusso di calore per unità di tempo in W/m<sup>2</sup> 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-waveradiation).  $Q_s$  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-waveradiation): 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.

Il modello è inizializzato e annidato nel sistema di previsione MFS, forzato alle condizioni al contorno da MFS e da OTS (OSU TidalPrediction Software, codice in grado di fornire il segnale di marea) e forzato alla superficie dai campi di ECMWF. Il set up completo del modello è stato implementato in termini di:

- (i) condizioni iniziali: temperatura, salinità, livello del mare, correnti (da MFS);
- (ii) condizioni al contorno alla superficie: temperatura di rugiada a 2m, temperatura dell'aria a 2m, velocità del vento a 10m, pressione atmosferica, copertura nuvolosa e precipitazione totale (da ECMWF);
- (iii) condizioni al contorno aperte: correnti, temperatura e salinità (da MFS), livello del mare (da MFS e OTS);
- (iv) climatologie e variazioni orarie/giornaliere relative alla velocità del flusso, temperatura e salinità del fiume Tevere.

### *15.1.2. Modello di moto ondoso WaveWatch3*

Per riprodurre il moto ondoso verso costa verrà utilizzato il modello WaveWatch3 (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, WW3 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.

Le variabili calcolate dal modello idrodinamico (correnti, livello del mare e traccianti attivi) nella zona costiera saranno influenzate dal campo d'onda che sarà fornito in input con un intervallo temporale di 1 ora.

### 15.1.3 Modello di trasporto del sedimento SEDTRANS05

I risultati dell'accoppiamento del modello idrodinamico con quello di moto ondoso verranno utilizzati dal modello di trasporto dei sedimenti SEDTRANS05 per determinare la dispersione del materiale dragato e le zone di accumulo ed erosione in assenza ed in presenza del primo stralcio del porto.

La dinamica del materiale in sospensione viene descritto dall'equazione 6. Alla superficie e al fondo le condizioni di contorno dell'equazione 6 per i sedimenti sono:

$$+\nu_{v,top}\frac{\partial S_{top}}{\partial z} + w_s S_{top} = FS \quad z=\text{superficie del primo livello}$$

$$-\nu_{v,bot}\frac{\partial S_{bot}}{\partial z} + w_s S_{bot} = ED \quad z=\text{fondo dell'ultimo livello}$$

dove  $FS$  è la quantità di sedimento sversata in superficie ed  $ED$  è il flusso netto di sedimento tra fondale marino e colonna d'acqua, calcolato come differenza tra deposizione e risospensione. Tale termine viene calcolato dal modello SEDTRANS05 (Neumeier et al., 2008). I fenomeni di erosione e deposizione avvengono principalmente all'interno dello strato limite, situato tra la colonna d'acqua e il fondale. Lo sforzo tangenziale al fondo indotto dai processi idrodinamici viene calcolato applicando la teoria dello strato limite della scarpata continentale ("Continental shelfbottom boundarylayer theory") di Grants e Madsen (1986). La scabrezza del fondale è calcolata ad ogni intervallo temporale, considerando tre diversi tipologie di scabrezza: granulare, della morfologia del fondo e quella indotta dal trasporto al fondo.

SEDTRANS05 non solo calcola i parametri dello strato limite, ma predice anche lo sviluppo delle forme di fondo e i tassi di trasporto solido, sia come carico di fondo sia in sospensione, per sabbie e sedimenti coesivi. Il modello matematico SEDTRANS05 può essere usato per predire il tasso di trasporto e la direzione di sabbia o fango in condizioni di corrente stazionaria oppure onde e correnti combinate, al di fuori della zona di frangimento delle onde. Il modello computa entrambe le tipologie

di trasporto dei sedimenti, al fondo per i sedimenti non coesivi e sospeso per sedimenti coesivi e non coesivi. In particolare, il trasporto al fondo per i sedimenti non coesivi può essere calcolato per mezzo di diverse formule presenti all'interno di SEDTRANS05. Diversamente, nel momento in cui lo sforzo tangenziale al letto supera il valore di sforzo critico per la sospensione, le particelle di sedimenti entrano nella colonna d'acqua e vengono trasportate sotto l'azione delle correnti.

SEDTRANS05 consente inoltre di calcolare il flusso sedimentario netto tra la colonna d'acqua e il fondo sia per i sedimenti coesivi sia per quelli non-coesivi. Per i sedimenti coesivi il flusso è dato semplicemente dalla differenza tra il tasso di erosione e quello di deposizione, mentre per quelli non-coesivi il flusso netto è computato come differenza tra la concentrazione di equilibrio e la concentrazione dello strato più basso della colonna d'acqua. In questo modo, quando la concentrazione dei sedimenti vicino al fondo è inferiore a quella di equilibrio, il flusso netto di sedimenti è diretto dal letto alla colonna d'acqua, viceversa quando la concentrazione vicino al fondo è superiore a quella di equilibrio.

La variazione morfologica del fondale è uguale alla somma dei contributi erosivi e di deposizione delle diverse frazioni sedimentarie presenti nella zona di studio e viene calcolata per entrambe le tipologie di trasporto ad ogni intervallo temporale del modello, in modo tale da aggiornare la topografia per il modello idrodinamico. SEDTRANS05 è in grado, inoltre, di computare i processi di flocculazione e consolidamento del fondale, di rilevante importanza per sedimenti coesivi.

Per caratterizzare il fondale e suddividere il trasporto di materiale possono essere definite diverse classi granulometriche. Il fondale è rappresentato tramite una sovrapposizione di strati sedimentari indipendenti, ciascuno caratterizzato dalla propria granulometria. Tra di essi il più superficiale rappresenta lo strato attivo per il trasporto di sedimenti. Per ogni frazione di sedimenti viene definito un volume disponibile all'interno di ciascuno strato, limitandone la quantità erodibile. Di conseguenza, il modello può tenere conto la diversa resistenza all'erosione fra gli strati e la distribuzione spaziale dei sedimenti. Nel momento in cui uno strato viene completamente eroso, viene rimosso dalla simulazione e gli strati inferiori vengono rialzati di un livello.

#### *15.1.4. Modello dell'evoluzione della linea di riva LITPACK*

Il LITPACK è un sistema di modellazione deterministica che descrive i maggiori processi della fascia costiera, sotto forma di un insieme di singoli programmi sviluppati dal Danish Hydraulic Institute per diversi anni e continuamente modificati grazie all'esperienza acquisita in base alle oltre 300 applicazioni in tutto il mondo. E' un modello alle differenze finite e questo pone dei limiti nella rappresentazione di tratti di costa piccoli e molto articolati.

Il modello può essere applicato ad un ampio range di processi litoranei, investigati con dettaglio differente in base al tipo di modulo applicato:

- trasporto puntuale di sedimento: include la modellazione del trasporto in un sito specifico, puntuale nello spazio;
- correnti litoranee;
- trasporto solido litoraneo: include la modellazione del trasporto parallelo alla linea di costa, gli effetti delle strutture antropiche e la distribuzione perpendicolarmente alla linea di costa del trasporto di sedimento;
- trasporto annuale: calcolo dei volumi totali trasportati nell'arco di un anno, utilizzato per la valutazione degli effetti delle strutture protettive, del budget di sedimento, e come input per il modulo di previsione dell'evoluzione della linea di costa;
- evoluzione della linea di costa: include la simulazione della variazione della linea di costa in base al clima di trasporto e ad eventuali strutture introdotte nel sistema studiato;
- evoluzione di profili batimetrici

La distribuzione verticale del sedimento non coesivo al di sopra di un punto del fondale esposto ad onde e correnti, viene calcolata sulla base della teoria di Engelund e Fredsoe (1976) che definisce il trasporto di sedimento come somma del carico sospeso ( $q_s$ ) più il carico di fondo ( $q_b$ ). Il metodo per

descrivere la distribuzione verticale del sedimento sospeso è l'applicazione della seguente equazione di diffusione:

$$dc/dt = w \partial c / \partial y + \partial(\varepsilon \partial c / \partial y) / \partial y$$

dove:

c = concentrazione del sedimento

t = tempo

w = velocità di caduta del sedimento sospeso

y = coordinata verticale

$\varepsilon$  = eddy diffusivity

Nell'equazione non vengono considerati i termini di diffusione orizzontale, in quanto il gradiente verticale del sedimento sospeso è molto maggiore di quello orizzontale. Applicando all'equazione precedente la relazione che descrive la distribuzione parabolica dell'eddy diffusivity:

$$\varepsilon = U_r k \cdot y(1-y/D)$$

dove:

$U_f$  = shear velocity, rapporto tra  $\tau_b$ (bed shear stress) e densità dell'acqua

k = costante di von Karman

y = distanza dal fondo

D= profondità

e ipotizzando la condizione di stabilità nel tempo ( $dc/dt=0$ ) si ottiene:

dove:

$$c/c_y = ((D-y/y) \cdot (y/D-y))^{w/kUf}$$

$c_y$  = concentrazione ad una certa distanza  $y$  dal fondo

In caso di combinazione degli effetti di correnti ed onde, il moto orbitale di quest'ultime nei pressi del fondo produrrà un incremento considerevole nei valori istantanei di bed shear stress e di eddy viscosity all'interno del boundary layer. Tale situazione è stata descritta da Fredsoe tramite un modello la cui idea di base è che lo sviluppo del wave boundary layer venga calcolato per ogni mezzo periodo d'onda, assumendo che il profilo di velocità al suo interno sia logaritmico. Il modello tratta ogni angolo tra il moto orbitale dell'onda e la corrente, ed ogni combinazione tra i valori di queste ultime. Un ulteriore effetto del moto ondoso risulta essere una riduzione della velocità media della corrente presso il fondo rispetto ad una situazione simile ma con assenza di onde. Questo effetto può essere quantificato tramite il wave roughness ( $k_w$ ) che descrive il profilo della velocità media di corrente all'esterno del boundary layer;  $k_w$  dovrà sempre essere maggiore o uguale al normale hydraulic roughness( $k$ ) del fondo. In caso di frangimenti dell'onda ci sarà, oltre agli effetti già citati, un'intensa produzione di turbolenza nei pressi della superficie, con energia pari a quella persa in un salto da un'altezza pari a quella dell'onda stessa. Dopo che il fronte d'onda ha superato la colonna d'acqua considerata, l'energia turbolenta viene dissipata gradualmente e diffusa verso il basso.

Una volta determinate le condizioni idrodinamiche viene calcolato il trasporto di sedimento sulla base della già citata teoria di Engelund e Fredsoe basata sulla distinzione tra il trasporto come carico sul fondo e il trasporto in sospensione.

Le caratteristiche richieste dal modulo per la descrizione del sedimento riguardano le dimensioni del sedimento del fondale superficiale (esprese in termini di  $d_{50}$ , che rappresenta la mediana dei valori del diametro dei granuli di sedimento), e la velocità di caduta, calcolata in base alla legge di Stokes. Per la descrizione del fondale vengono invece indicati il bed shear stress e delle costanti che definiscono dimensioni ed effetti di eventuali ripple marks, le increspature del fondo dovute proprio al passaggio dell'onda. Una volta specificate le caratteristiche morfologiche e granulometriche del fondale viene calcolato il trasporto di sedimento considerando le caratteristiche del moto ondoso e la presenza di correnti dovute sia alla circolazione generale sia ad eventuali venti. Il modello calcola, oltre al trasporto longitudinale, anche quello trasversale, considerando l'influenza di parametri quali l'asimmetria delle onde, stress dovuti a gradienti verticali di densità, e circolazione della corrente sul trasporto di sedimento.

I risultati finali sono:

1) la simulazione della variazione della linea di riva ( $dY/dt$ ), calcolata rispetto ad una linea di base presa come riferimento:

$$dY/dt = -1/(h(1-n)) dq_s/dX$$

dove:

Y= distanza dalla linea di base

t= tempo

h = altezza del profilo costiero

n = porosità del sedimento (input richiesto dal modello)

qs = trasporto litoraneo netto

X = coordinata lungo l'alinea di base

2) la simulazione della variazione dei profili batimetrici calcolata come (Hedegaard et al.,1991):

$$\partial h/\partial t = - (1/1-n) \cdot \partial q_s/\partial x$$

dove:

h = livello del fondo;

n = porosità del sedimento

t = tempo

qs = stima del trasporto di sedimento locale

x = coordinata spaziale (maglia della griglia di rappresentazione).

#### 15.1.5. Modello per la variazione del profilo di spiaggia 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  $c_\theta$  sono le velocità di propagazione nello spazio orizzontale e nello spazio direzionale,  $D_v$  è la dissipazione legata alla vegetazione e  $\sigma$  la frequenza dell'onda. La formulazione per il calcolo della dissipazione legata al frangimento dell'onda,  $D_w$ , può essere scelta tra 5 diverse formulazioni implementate all'interno del software, mentre la dissipazione legata al fondale  $D_f$  è calcolata mediante l'equazione:

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

dove  $\rho$  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  $u_a$ .

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 bi-dimensionale (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. 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. Per maggiori dettagli sulle formulazioni del modello XBeach, si faccia riferimento a Roelvink et al., (2009).

#### 15.1.6. Modello di dispersione degli idrocarburi MEDSLIK II

Il trasporto di idrocarburi in mare è governato dall'avvezione del campo idrodinamico e dalla dispersione generata dalla componente turbolenta del campo di moto. Inoltre, la concentrazione dell'idrocarburo varia a causa di numerosi processi di trasformazione chimico-fisici. L'utilizzo di un modello numerico di trasporto e dispersione di idrocarburi in mare consente di prevedere l'evoluzione della posizione della macchia d'olio e della sua concentrazione nel tempo.

MEDSLIK-II è un modello Lagrangiano, questo significa che la macchia d'olio viene rappresentata da un gran numero di particelle. Ogni singola particella viene trasportata per effetto dell'avvezione e della dispersione turbolenta. L'equazione della traiettoria della particella è la seguente:

$$dx(t) = \begin{pmatrix} U(x,t) \\ V(x,t) \\ 0 \end{pmatrix} dt + dx'(t)$$

dove  $U(x, t)$ ,  $V(x, t)$  sono le componenti della velocità delle correnti marine,  $dx'(t)$  è lo spostamento della particella dovuto alla componente turbolenta del moto. La velocità verticale è stata considerata trascurabile, perché di due ordini di grandezza più piccola delle componenti orizzontali della velocità. Le particelle costituenti la macchia d'olio si spostano orizzontalmente trasportate dal campo di correnti orizzontale, il quale è generato dalle forze di galleggiamento, vento e onde. Il primo termine dell'equazione in alto può quindi essere riscritto nel seguente modo:

$$dx(t) = [U_c(x,t) + U_w(x,t) + U_s(x,t)] dt + dx'(t)$$

dove  $U_c(x, t)$  è la velocità delle correnti marine generate dalle forze di galleggiamenti e venti non locali,  $U_w(x, t)$  è la velocità dovuta ai venti locali (correnti di Ekman),  $U_s(x, t)$  è la velocità della particella generata dall'azione del moto ondoso (velocità di Stokes drift). In passato, le velocità delle correnti marine utilizzate erano quelle delle correnti geostrofiche e climatologiche. La macchia di idrocarburi è, però, trasportata dalle correnti marine superficiali (correnti ageostrofiche). Per tale motivo, in passato, era necessario aggiungere alle correnti geostrofiche, una correzione dovuta al vento, il termine  $U_w(x, t)$ , per poter ricostruire correttamente la componente della corrente ageostrofica di Ekman. Il termine  $U_w(x, t)$  consente di parametrizzare le correnti di Ekman superficiali, in funzione dell'intensità del vento e di un angolo di deviazione rispetto alla direzione del vento.

Gli idrocarburi presenti sulla superficie marina si spostano anche per effetto del moto ondoso, la velocità generata dal moto ondoso è chiamata velocità di Stokes drift,  $U_s(x, t)$ . Tale velocità deve essere aggiunta alla velocità delle correnti prodotte da un modello idrodinamico Euleriano, se tale modello non è direttamente accoppiato con un modello d'onde. La velocità dello Stokes drift è stata introdotta all'interno di MEDSLIK-II utilizzando una formulazione analitica, nella quale la velocità dello Stokes drift è espressa in funzione dello spettro d'onda. Si è utilizzato la parametrizzazione dello spettro di JONSWAP - Joint North Sea Wave Project- (K. Hasselmann et al. 1973), in cui lo spettro è espresso in funzione dell'intensità del vento e del fetch. Si è inoltre assunto, che la direzione della propagazione dell'onda è la stessa della direzione del vento. I processi di trasporto dovuti alla dispersione turbolenta sono rappresentati da un modello di "random walk":

$$\begin{aligned} dx'(t) &= [2n - 1]\sqrt{6K_h}dt \\ dy'(t) &= [2n - 1]\sqrt{6K_h}dt \\ dz'(t) &= [2n - 1]\sqrt{6K_v}dt \end{aligned}$$

dove  $n$  è un numero random reale che può assumere valori tra 0 e 1, mentre  $K_h$  e  $K_v$  sono le componenti della diffusività nella direzione orizzontale e verticale.

Oltre ai processi di trasporto sulla superficie marina, la macchia di petrolio si modifica per effetto di processi chimico-fisici, che trasformano gli idrocarburi. MEDSLIK-II permette di simulare i processi di espansione, di evaporazione, di dispersione, di emulsificazione e di assorbimento sulla costa. Per effetto dei processi di trasformazione, ogni particella costituente la macchia di petrolio modifica

alcune sue proprietà, ad esempio il suo volume. Nelle prime ore in cui il petrolio viene rilasciato in mare, si ha un processo di espansione della macchia di petrolio sulla superficie marina, per effetto delle forze gravitazionali. Durante il trasporto della macchia, le componenti più leggere degli idrocarburi scompaiono per effetto dell'evaporazione, mentre le componenti più pesanti vengono emulsionate con l'acqua o si disperdono nella colonna d'acqua. Inoltre, nel caso in cui la macchia di petrolio raggiunga la costa, MEDSLIK-II permette di considerare l'assorbimento del petrolio sulla costa.

#### ***15.1.7. Modello di dispersione dei batteri WASP/BFM***

Al fine di simulare la dispersione dei batteri verrà implementato il modello WASP e/o il modello BFM, tenendo conto delle linee guida ISPRA “Valutazione dell'impatto di inquinanti sulle acque di balneazione tramite l'utilizzo di metodi numerici, Versione 1 - Maggio 2010, ISPRA”.

Il modello WASP (Wool 2020) fa parte di una serie di modelli messi a disposizione dalla Environmental Modeling Community of Practice della US EPA.

Il modello dell'analisi della qualità dell'acqua (WASP) è un miglioramento del WASP originale (Di Toro et al., 1983; Connolly e Winfield, 1984; Ambrose, R.B. et al., 1988) che supporta gli utenti a interpretare e prevedere le risposte sulla qualità dell'acqua ai fenomeni naturali e all'inquinamento provocato dall'uomo. WASP è un programma dinamico di modellizzazione dei sistemi acquatici, che comprende sia la colonna d'acqua che il benthos sottostante.

WASP consente all'utente di studiare sistemi 1, 2 e 3 dimensionali e una varietà di tipi di inquinanti. Nel modello sono rappresentati i processi che variano nel tempo ed in base ai processi di dispersione a partire da sorgenti puntuali e/o diffuse. WASP può anche essere interfacciato a modelli di trasporto idrodinamici e di sedimenti che sono in grado di fornire velocità, temperatura, salinità e flussi di sedimenti. Il modello WASP può considerare l'inclusione del modello di diagenesi dei sedimenti che è collegato al sottomodulo di eutrofizzazione il quale prevede la domanda di ossigeno dei sedimenti e i flussi di nutrienti dai sedimenti sottostanti.

WASP è uno dei modelli di qualità dell'acqua più utilizzati negli Stati Uniti e nel mondo. Grazie al suo impiego nell'ambito della gestione di più tipi di inquinanti, è stato ampiamente applicato per simulare l'andamento dei carichi massimi giornalieri totali (TMDL). Il WASP è stato applicato a tutti

i principali estuari della Florida, dove è stato collegato a un modello idrodinamico che simula un periodo di 12 anni per aiutare l'EPA statunitense nello sviluppo di criteri per la gestione dei carichi di nutrienti.

Il modello di flusso biogeochimico (BFM) è un modello di biogeochimica generalizzata basato su una descrizione continua della biomassa di livelli trofici inferiori nell'ambiente marino. I principali componenti chimici e biologici sono descritti in termini di gruppi funzionali mediante i concetti teorici di Famiglie funzionali chimiche e Gruppi funzionali viventi (CFF e LFG; Vichi et al., 2015).

Da un punto di vista biologico, il biota è suddiviso in tre principali LFG: produttori (fitoplancton), decompositori (batteri pelagici e bentonici) e consumatori (zooplancton e zoobenthos). Queste ampie classificazioni funzionali sono ulteriormente suddivise in sottogruppi funzionali per creare una rete alimentare (ad es. Diatomee, picofitoplancton, microzooplancton, ecc.). Questi gruppi interagiscono con CFF non viventi inorganici e organici per sviluppare i cicli biogeochimici dei principali elementi (C, N, P, Si, O, ecc.).

Da un punto di vista matematico, il BFM è scritto in termini di un insieme di equazioni differenziali ordinarie. La sua formulazione va oltre i classici modelli di dinamica della popolazione a causa di un approccio funzionale agli ecosistemi marini. Le equazioni del modello consentono un accoppiamento diretto con i modelli idrodinamici sotto forma di equazioni differenziali parziali di Advection-Diffusion-Reaction (ADR).

Il BFM è un prodotto di ricerca non commerciale. È scritto in FORTRAN90 (sistemi UNIX) e messo a disposizione della comunità scientifica. I dettagli del modello sono disponibili sul sito Web del modello <http://bfm-community.eu>.

## **15.2. Relazioni del Laboratorio di Oceanologia sperimentale ed Ecologia Marina (LOSEM) inerenti il porto di Fiumicino**

A partire dalla metà della decade 2000, il LOSEM ha svolto una serie di studi sperimentali e modellistici, inerenti l'interazione delle opere portuali di Ostia e i progetti di quelle a Fiumicino con l'idrodinamica litoranea ed il bilancio sedimentario.

Di seguito si riportano le conclusioni degli studi effettuati.

### ***15.2.1. Relazione per Autorità Portuale, REL-4.0-BM-0306-AP 30 marzo 2006***

La relazione tecnica ha analizzato le caratteristiche meteomarine dell'area di realizzazione del nuovo Porto Canale di Fiumicino (vento e onde) e utilizzato modelli numerici per lo studio delle correnti e del moto ondoso.

L'andamento delle correnti è stato simulato mediante due diversi modelli matematici. Il modello Litpack è stato usato per studiare il contributo del moto ondoso alla circolazione litoranea mentre il modello SMS è stato utilizzato per lo studio del campo idrodinamico generale.

I risultati delle simulazioni Litpack hanno mostrato che:

- 1) il moto ondoso induce una corrente verso nord in concomitanza dello Scirocco, Ostro e Libeccio; quest'ultimo provoca una corrente verso nord con altezze d'onda inferiori a 2.5 metri;
- 2) il moto ondoso induce una corrente verso sud sono in concomitanza del Libeccio con altezze d'onda superiori a 2.5 metri e del Ponente; la frequenza di questi eventi è tale da non inficiare il risultato finale (ovvero bilancio annuale diretto principalmente verso nord);
- 3) la massima profondità interessata dagli effetti del moto ondoso è di 6.5 metri per le altezze d'onda di 4 metri; si presume che ad eventi estremi (altezze d'onda di 5.5 metri) sia associata una profondità massima di influenza del moto ondoso di circa 9 metri;

Lo studio è stato effettuato sia lungo tutta l'unità fisiografica sia nell'intorno della foce del Tevere. I risultati hanno mostrato che lungo tutta l'unità fisiografica si creano delle celle di circolazione la cui estensione e posizione rispetto alla linea di costa cambia in funzione degli eventi considerati. Nell'intorno della foce del Tevere, tuttavia, si evidenzia una corrente sotto costa diretta sempre verso nord. Questa corrente è influenzata dalle condizioni che si instaurano lungo tutta l'unità fisiografica

ed è la principale responsabile del trasporto solido lungo la costa e dunque della modellazione della linea di costa. Resta da comprendere quale componente della corrente è quella che maggiormente influenza il trasporto sia a breve sia a lungo termine.

Alla luce di questa considerazione si conclude che, al fine di verificare gli effetti dell'interazione tra eventuali interventi antropici nel tratto di costa interessato e il regime idrodinamico sarebbe necessario approfondire lo studio accoppiando i contributi delle diverse componenti di corrente con il trasporto solido, effettuando lo studio lungo tutta l'unità fisiografica così da individuare le condizioni al contorno da utilizzare nel modello per simulare l'area circostante la foce del Tevere.

Si vuole sottolineare che questo approccio consentirebbe da una parte di salvaguardare le attività antropiche da attivare localmente, dall'altra di salvaguardare la fascia costiera sia a scala locale sia a mesoscala.

#### *15.2.2. Relazione per Modimar REL-5.0-MM-0607-MD 22 Giugno 2007*

La relazione tecnica riguarda uno studio di tutta l'unità fisiografica della costa laziale, da Capo Linaro a Capo Anzio, utilizzando un modello idrodinamico bidimensionale, considerando le condizioni al contorno delle correnti indotte dal vento, le correnti di circolazione generale e la presenza del plume proveniente dal Tevere. Lo studio considera due situazioni, quella attuale (senza il porto) e quella con la presenza delle opere del Porto di Fiumicino.

##### 1) Sintesi dei risultati ottenuti con il modello ADCIRC

Attraverso il modello di simulazione ADCIRC sono stati ottenuti diversi scenari relativi ai campi di velocità presenti nell'unità fisiografica compresa tra Capo Linaro e Capo Anzio. Sono stati presi in considerazione i campi di velocità in presenza ed assenza dell'opera portuale presso l'area di Fiumara Piccola nel delta del Tevere.

Gli scenari 1 e 2 riproducono la distribuzione del campo di velocità indotto dalla corrente generale del Tirreno in assenza di vento con portate fluviali medie e massime; le velocità ottenute sono comprese tra valori di 0,03 e 0,08 m/s, con massimi a largo del delta fluviale e valori minimi in prossimità della linea di costa. La distribuzione dei vettori appare in questo caso decisamente omogenea e riproduce una corrente con direzione Nord Ovest.

Negli scenari successivi sono stati riprodotti i campi di velocità con l'aggiunta di una forzante di vento avente direzione variabile da caso a caso e velocità costante pari a 10 m/s.

I campi idrodinamici ottenuti in questi casi presentano velocità più elevate ed una distribuzione del campo molto più eterogenea. Il vento di Libeccio (scenario 3), anche se non causa aumenti di velocità consistenti, induce una distribuzione vettoriale non uniforme, in particolare nelle aree a Nord e Sud del delta. Venti di Scirocco (scenari 4 e 5), al contrario, mantengono uniforme la distribuzione vettoriale del campo ma presentano sensibili aumenti della velocità della corrente in direzione Nord Ovest, con massimi anche superiori ai 0,25 m/s a largo del delta fluviale.

Venti di Ponente e Maestrale infine, oltre ad indurre un sensibile aumento delle velocità, comportano anche la completa inversione della corrente generale costiera che all'equilibrio assume direzione Sud Est.

## 2) Sintesi dei risultati ottenuti con il modello LITPACK

E' stata valutata l'entità del trasporto litoraneo parallelo alla costa in tre tratti di particolare interesse, riguardanti la costruzione del nuovo Porto di Fiumicino. In particolare, i tratti a Sud ed a Nord del Porto Canale di Fiumicino ed il tratto alla foce del fiume Arrone.

Si può notare che nei casi di mareggiata intensa proveniente da Libeccio, Ponente o Maestrale, anche in presenza di forte vento, la fascia interessata dal trasporto di sedimento che partecipa all'evoluzione costiera non si estende oltre la profondità di - 6 m. Inoltre il pennello emerso costruito a Sud dello sbocco del canale navigabile di Fiumicino, con una lunghezza di oltre 250 m, arriva a fondali di - 7 m e costituisce una barriera che interrompe la continuità del trasporto solido litoraneo.

Per quanto riguarda il valore netto del trasporto litoraneo parallelo alla costa (bilancio fra il trasporto in direzione NO e direzione SE) si sono ottenuti i seguenti valori:

- 103.200 m<sup>3</sup>/anno circa, direzione NO, nel tratto a Sud del canale navigabile di Fiumicino,
- 169.800 m<sup>3</sup>/anno circa, direzione NO, nel tratto a Nord del canale navigabile di Fiumicino,
- 69.700 m<sup>3</sup>/anno circa, direzione NO, nel tratto alla foce del fiume Arrone.

Il maggiore trasporto ottenuto nella zona a Nord del canale navigabile di Fiumicino è dovuto in gran parte al particolare orientamento della costa (con un angolo minore rispetto alla direzione delle

mareggiate più significative) che permette la generazione di una maggiore corrente litoranea e quindi di maggiore trasporto litoraneo. Viceversa, il minore trasporto ottenuto nella foce dell'Arrone si deve, in parte, al particolare orientamento della costa, più perpendicolare alla direzione delle mareggiate più intense e significative. Si può dedurre, da quanto sopra, che fra il canale navigabile di Fiumicino e la foce dell'Arrone ci si trova in un tratto di costa in erosione generale, processo che potrebbe vedersi attenuato localmente in presenza di interventi ed opere di protezione costiera.

### *15.3.3. Relazione per Autorità Portuale, REL-6.0-BS-0707-AP 2 Luglio 2007*

Il presente lavoro fornisce una fotografia delle distribuzioni granulometriche e dell'andamento delle batimetrie per l'unità fisiografica compresa fra “Capo Linaro e Capo d'Anzio” (105 Km di costa) nel periodo di tempo compreso negli anni che vanno dal 2002 al 2007. Il lavoro è stato svolto mediante rilievi di campo e misure sperimentali che sono stati utilizzati per le rappresentazioni grafiche e le analisi, in particolare sono stati acquisiti i parametri granulometrici, morfologici e sono stati effettuati profili batimetrici per tutta l'estensione dell'unità fisiografica che si estende da Capo Linaro ad Anzio ed è stata effettuata l'analisi statistica dei parametri sedimentologici.

In due aree, una prospiciente il Porto turistico di Ostia ed una nella zona dove sorgerà il nuovo porto di Fiumicino, sono state effettuate batimetrie di dettaglio e, in particolare, per l'area prospiciente il Porto turistico di Ostia, l'analisi sedimentologica è stata effettuata con maggior dettaglio spaziale e temporale (ripetizioni stagionali).

#### 1) Sintesi dei risultati dell'analisi batimetrica

Dal punto di vista batimetrico risulta molto evidente un accumulo di spiaggia sommersa a nord della foce del Tevere fra la batimetrica dei 10 e dei 15 metri. L'area fra Polidoro e Capo Linaro risulta caratterizzata dalla presenza di fondale roccioso che conferisce alla batimetria un andamento irregolare legato alle strutture geologiche sommerse. Tutta l'area a sud del Tevere presenta batimetrie regolari, compresa la zona in corrispondenza delle secche di “Tor Paterno” in quanto al largo della zona investigata dai profili batimetrici.

#### 2) Sintesi dei risultati dell'analisi sedimentologica

L'analisi sedimentologica ha consentito di individuare due aree a maggiore energia. Una prima zona, la più settentrionale, immediatamente a sud di Capo Linaro, sino subito a sud di Santa Severa, e caratterizzata da fondo prevalentemente roccioso con accumulo di bioclasti di grosso diametro mal

classati che si accumulano localmente. Una seconda zona con valori granulometrici e di skewness piuttosto omogenei si estende da Palidoro sino a nord del delta del Tevere.

L'area prospiciente la foce del Tevere risulta caratterizzata da una maggiore energia come testimoniano i bassi valori di skewness. La distribuzione statistica dei parametri sedimentologici in questa zona dimostra che il contributo sedimentario del delta del Tevere è prevalentemente diretto verso nord, soprattutto nel periodo invernale.

La zona a sud della foce del Tevere risulta abbastanza omogenea mostrando bassi valori di skewness sulla batimetria dei 7 metri a testimonianza dell'evento di burrasca che ha preceduto il periodo dei campionamenti dei sedimenti.

Nella zona prospiciente il Porto Turistico di Ostia i valori rinvenuti evidenziano che la maggiore quantità di energia è concentrata soprattutto in prossimità della foce e a nord del porto in qualunque stagione, mentre in vicinanza del porto si registra una caduta di energia a seguito della quale avviene una deposizione dei sedimenti assimilabili per caratteristiche sedimentologiche alla sabbia proveniente da Ostia lido (Sud del porto).

*15.3.4. Relazione per Autorità Portuale, Analisi preliminare degli effetti delle nuove opere costiere sul moto ondoso e sulla dinamica litoranea lungo il tratto di costa compreso tra Palo Laziale e Torvajonica (2014)*

La presente relazione tecnica costituisce un'analisi preliminare atta a valutare gli effetti delle opere costiere sul trasporto solido e sul relativo cambiamento morfologico del fondale nella zona di costa compresa tra Palo Laziale e Torvajonica. Lo scopo del presente studio è quello di analizzare preliminarmente la dinamica costiera lungo il tratto di costa compreso tra Palo Laziale e Torvajonica attraverso l'utilizzo di modelli numerici e formule empiriche. La finalità è quella di confrontare la situazione nel periodo precedente e in quello successivo alla costruzione di due importanti opere come il porto turistico a nord della foce di Fiumara Grande (Porto di Caltagirone), costruito nel 2010, e il nuovo porto croceristico di Fiumicino che sarà realizzato nella zona settentrionale del Canale Navigabile nei prossimi anni. L'attenzione sarà principalmente focalizzata nel tratto di costa compreso tra Fregene e Focene che tra il 2005 e il 2011 ha subito un arretramento di circa 10 m della linea di riva (Regione Lazio).

1) Sintesi dei risultati dell'analisi anemometrica

L'analisi dei dati anemometrici ha messo in evidenza come l'area di studio sia soggetta prevalentemente a due direzioni preferenziali di provenienza del vento, nord-orientale e sudoccidentale. Risulta senza informazioni l'area della cuspide deltizia del Tevere che ad eccezioni di registrazioni anemometriche presso Fiumicino per un arco temporale breve non presenta registrazioni di moto ondoso. Le registrazioni ondometriche in corrispondenza del delta potrebbero fornire informazioni importanti per comprenderne al meglio la morfodinamica data la nota sensibilità e variabilità su breve scala temporale dei sistemi deltizi.

## 2) Sintesi dei risultati dell'analisi della dinamica costiera

Le simulazioni numeriche (Delft-3D e CG-Wave) utilizzate per analizzare la dinamica costiera nel tratto di costa che si estende tra Palo Laziale e Torvaianica e per studiare l'ondazione all'interno del canale navigabile di Fiumicino hanno permesso di formulare le seguenti considerazioni preliminari. È importante sottolineare come queste prime considerazioni sono da ritenersi preliminari ed ipotetiche in quanto non supportate da idonee campagne di misura utili alla calibrazione dei modelli numerici utilizzati.

1) Per quanto riguarda gli effetti prodotti dalla costruzione del Porto di Caltagirone sulla dinamica costiera è emerso che la direzione della corrente e del trasporto litoraneo ha subito una variazione nel tratto di costa compreso tra Fiumara Piccola (canale navigabile di Fiumicino) e Fiumara Grande. In particolare, la simulazione in cui sono state riprodotte le condizioni meteomarine (onda e vento) relative a Novembre del 2003, dove si sono presentate una serie di mareggiate di diversa intensità e provenienza, hanno evidenziato come il campo idrodinamico, prodotto dalle correnti nel tratto di costa tra Fiumara Piccola e Fiumara Grande, abbia subito una variazione: nella parte settentrionale la corrente è diretta verso nord mentre nel tratto meridionale questa si dirige verso sud. La variazione di direzione è provocata dall'effetto ombra dell'antemurale sulla propagazione quando questa proviene dai quadranti meridionali.

2) La porzione settentrionale del delta del Tevere è interessata da un minore apporto sedimentario in quanto la componente principale della corrente litoranea, che si biforca in prossimità della cuspide deltizia, è diretta verso sud.

3) L'analisi della variazione morfologica ha messo in evidenza come la struttura portuale del Porto della Concordia abbia indotto una condizione erosiva rispetto alla situazione del 2005. Il trend erosivo sembra subire un ulteriore incremento con la costruzione del nuovo porto di Fiumicino soprattutto

per le spiagge situate a nord della struttura. I due nuclei deposizionali che tendono a generarsi in prossimità della struttura potrebbero infatti indurre un ulteriore deficit sedimentario lungo l'area in esame intensificando il trend erosivo che comunque è già presente. Il tratto di costa in esame, soprattutto nella porzione settentrionale, è naturalmente soggetto ad arretramento come osservato nell'analisi storica della linea di riva antecedente a tali opere.

Sulla base di queste considerazioni sarebbe quindi auspicabile posizionare una pompa idraulica che sia in grado di prelevare sedimento nella zona di accumulo in prossimità di Fiumara Piccola per trasportarlo a circa 5 km dal nuovo porto di Fiumicino dove è stato registrato il massimo deficit.

4) Per quanto riguarda l'ondazione all'interno del canale di Fiumara Piccola in presenza del nuovo porto di Fiumicino, l'analisi effettuata con il modello CG-Wave ha mostrato come l'area investigata subisca un'elevata ondatazione in presenza di moto ondoso proveniente dal settore compreso tra 220 e 270°N. Dal confronto tra le diverse ipotesi proposte emerge come al crescere dell'allungamento dell'imboccatura del canale si verifica una maggiore ondatazione dell'ingresso dello stesso poiché localizzata più a largo.

5) Per quanto riguarda l'attenuazione del moto ondoso all'interno del canale si osserva una maggiore attenuazione dell'onda all'allungarsi del molo di imboccatura. Il maggiore effetto di attenuazione all'interno del canale si ottiene con l'ipotesi 1 che però presenta i valori più elevati nella zona d'ingresso. L'ipotesi 3 appare come l'opzione migliore mettendo in rapporto l'intensità dell'onda all'interno del canale ed al suo ingresso. Inoltre, questa opzione progettuale è quella che sembra la più efficace nella zona d'ingresso per gli eventi provenienti da ponente e libeccio. L'opzione 3 consiste in un allungamento del molo di sovralfutto di circa 70-100 m e una rotazione verso 280- 290°N.

## 16. Bibliografia

AA.VV 2007, Manuale per la movimentazione di sedimenti marini. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare-ICRAM.APAT.

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

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.

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.

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.

Cánovas-Molina A., Montefalcone M., Vassallo P., Morri C., Bianchi, C.N., Bavestrello G. (2016). Combining literature review, acoustic mapping and in situ observations: an overview of coralligenous assemblages in Liguria (NW Mediterranean Sea). Scientia Marina 80, 7-16.

De Dominicis, M., Pinardi, N., Zodiatis, G., Lardner, R. 2015. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting–Part 1: Theory. Geoscientific Model Development, 6(6), 1851-1869.

Engelund F., e Fredsoe J. 1976. A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels. Nordic Hydrology, 7, pag.293-306.

Enrichetti F., Bo M., Morri C., Montefalcone M., Toma M., Bavestrello G., Tunesi L., Canese S., Giusti M., Salvati E., Bianchi C.N. (2019). Criteria to assess the environmental status of temperate mesophotic reefs. Ecological Indicators 102, 218-229.

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.

Ferrigno F., Apolloni L., Russo G.F., Sandulli R. (2018). Impact of fishing activities on different coralligenous assemblages of Gulf of Naples (Italy). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 98 (1), 41-50.

FRESI, Eugenio, et al. Benthic community and sediment types: a structural analysis. *Marine Ecology*, 1983, 4.2: 101-121.

Gennaro P., Piazzì L., Cecchi E., Montefalcone M., Morri C., Bianchi C.N. (Eds.), 2020. Monitoraggio e valutazione dello stato ecologico dell'habitat a coralligeno. Il coralligeno di parete. ISPRA, Manuali e Linee Guida n.191/2020

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

Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H. 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe, A8-12*

Hedegaard I.B., Deigard R., Fredsoe J. Onshore/offshore sediment transport and morphological modelling of coastal profiles.

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.

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

Margaritora, G. 1993. Il Tevere urbano. Accademia Nazionale dei Lincei Commissione per l'ambiente e grandi calamità naturali, 17.

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., Umgieser, G., Li, M.Z., 2008. Sedtrans05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters. *Comput. Geosci.* 34, 1223–1242.

Onorati, F., Mugnai, C., Pulcini, M., & Gabellini, M. (2013). A framework for the integrated assessment and management of dredged materials in Italy: a case study based on the application of Local Sediment Quality Guidelines. *Journal of Soils and Sediments*, 13(2), 474-487.

Pearson T.H., Rosenberg R., (1978). Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 16: 229-311.

Relazione ARPA (2014) “Valutazione degli indici di qualità ambientale delle acque marino-costiere prospicienti Capo Circeo e Golfo di Gaeta mediante analisi del macrobenthos di fondo mobile”

Relazione ARPA (2014) Valutazione degli indici di qualità ambientale delle acque marino-costiere prospicienti il litorale da Anzio al Lido di Tarquinia mediante analisi del macrobenthos di fondo mobile.

Roelvink D., Ad Reniers A., Van Dongeren A., Van Thiel de Vries J, Lescinski J., McCall R.F., 2010. XBeach model description and manual 6end. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology. 108 pp.

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

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.

UNEP/MAP-RAC/SPA (2014). Monitoring Protocol for Reefs - Coralligenous Community. By Garrabou J., Kipson S., Kaleb S., Kruzic P., Jaklin A., Zuljevic A., Rajkovic Z., Rodic P., Jelic K., Zupan D. (Eds.) RAC/SPA - MedMPAnet Project, Tunis. 35 pages + annexes.

UNEP/MED (2019). Monitoring Protocols for IMAP Common Indicators related to Biodiversity and Non-Indigenous species, which includes the Guidelines for monitoring marine benthic habitats in the Mediterranean (WG.467/16). UNEP/MAP Athens, 301 pp.

Van Rijn L. C., 1985, Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. Journal of Hydraulic Engineering, 110: 1733-1754.

Vichi M., Cossarini G., Gutierrez Mlot E., Lazzari P., Lovato T., Mattia G., Masina S., McKiver W., Pinardi N., Solidoro C., Zavatarelli M. (2015): The Biogeochemical Flux Model (BFM): Equation Description and User Manual. BFM version 5.1. BFM Report series N. 1. March 2015, Bologna, Italy, pp. 89.

Vichi, M., Masina, S., and Navarra, A., (2007a) A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part II: numerical simulations. Journal of Marine Systems, 64, 110-134.

Vichi, M., Pinardi, N., and Masina, S., (2007b) A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part I: theory. Journal of Marine Systems, 64, 89-109.

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

Wool, T., Ambrose, R. B., Martin, J. L., & Comer, A. (2020). WASP 8: The Next Generation in the 50-year Evolution of USEPA's Water Quality Model. *Water*, 12(5), 1398.

Dataset: [http://www.db.strategiamarina.isprambiente.it/app/#/data\\_consultation](http://www.db.strategiamarina.isprambiente.it/app/#/data_consultation)