



Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina

DEB – Università degli Studi della Tuscia

PROGETTO DI RICERCA:

**“STUDIO DELL’EVOLUZIONE MORFOLOGICA E DEI
FLUSSI DI SEDIMENTAZIONE NELL’AREA DEL GOLFO
DI GAETA: POSSIBILI EFFETTI DEI DRAGAGGI
PORTUALI”**

1. INTRODUZIONE.....	1
2. STATO DI AVANZAMENTO DEL PROGETTO DI RICERCA ADDENDUM 4.....	2
2.1. Schema funzionale del sistema osservativo.....	2
2.2. Sommario sulle conoscenze acquisite relativamente alla dinamica costiera.....	3
2.2.1 Indagini morfologiche.....	16
2.2.2. Analisi chimiche dei sedimenti.....	18
3. PROPOSTA PROGETTUALE.....	21
3.1. Evoluzione morfologica dei fondali marini.....	21
3.1.2. Elaborazione dati.....	25
3.2. Dinamica dei profili verticali dei flussi di sedimentazione e dei metalli in traccia.....	27
3.2.1. Stazione di misura deposimetrica per la misura dei flussi di sedimentazione verticale.....	28
3.2.2. Analisi del sedimento raccolto dalla stazione deposimetrica.....	30
3.3. Integrazione delle indagini chimico-fisiche dei sedimenti superficiali.....	33
3.4. Analisi modellistica della dispersione del sedimento dragato e dei contaminanti ambientali.....	34
3.4.1. Modello idrodinamico DELFT3D-FLOW.....	34
3.4.2. Modello di moto ondoso SWAN.....	35
3.4.3. Modello di dispersione del materiale in sospensione e dei contaminanti DELFT3D-WAQ.....	37
3.4.4. Set-up delle simulazioni.....	41
4. TEMPI DEL PROGETTO.....	41
5. RISULTATI SCIENTIFICI DEL PROGETTO DI RICERCA.....	43

BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUZIONE

La presente proposta si inquadra nell'ambito del progetto di ricerca previsto dall'Atto Aggiuntivo all'Addendum n.4, sottoscritto con l'Autorità Portuale in data 23/10/2015, che prevede lo sviluppo di un innovativo monitoraggio della dinamica dell'ambiente marino costiero nell'area limitrofa il Porto di Gaeta da parte del Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina (LOSEM) del DEB dell'Università degli Studi della Tuscia. A seguito della riunione intercorsa in data 20/09/2017, l'Autorità Portuale ha manifestato, in considerazione dei risultati preliminari ottenuti nel progetto di monitoraggio ambientale, l'interesse a conoscere i volumi e la qualità dei materiali afferenti nell'area soggetta ad escavo, al fine di prevedere i tassi di riempimento dell'escavo e le variazioni morfologiche utili alla funzionalità e sicurezza della navigazione portuale. Questo Dipartimento ha interesse ad effettuare un'analisi quali-quantitativa annuale della dinamica sedimentaria e dell'evoluzione morfologica dei fondali del Golfo di Gaeta con particolare attenzione sui processi dinamici che governano la distribuzione e l'accumulo dei contaminanti ambientali.

Sulla base di tali elementi e dei risultati ad oggi ottenuti nel monitoraggio ambientale del Golfo di Gaeta, il Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina (LOSEM) propone di integrare le attività previste dall'Addendum n.4, mediante un progetto di ricerca congiunto che preveda l'analisi quali-quantitativa della dinamica sedimentaria del Golfo di Gaeta.

L'integrazione delle nuove informazioni con quelle acquisite per mezzo delle stazioni di monitoraggio della colonna d'acqua, del satellite, delle centraline di monitoraggio della torbidità, delle condizioni meteorologiche (stazione meteo) e delle condizioni idrodinamiche (radar costiero), permetteranno di effettuare uno studio completo della dinamica che caratterizza il Golfo di Gaeta.

Le attività integrative contribuiranno all'implementazione del sistema osservativo sviluppato nel Golfo di Gaeta sul modello di quello presente a Civitavecchia (C-CEMS) (Bonamano et al., 2016) apportando l'ulteriore sviluppo del sistema modellistico di previsione degli impatti sulle principali specie e habitat dell'ecosistema marino-costiero.

Le attività previste dal progetto di ricerca sono:

- rilievi morfologici ad elevata risoluzione per la misura delle possibili variazioni morfologiche a scala stagionale al fine di definire se tali variazioni sono riconducibili a processi di

assestamento delle pendenze prodotte dall'escavo o da processi di sedimentazione ed erosione come risultato della morfo-dinamica costiera del luogo.

- misura dei profili verticali dei flussi di sedimentazione e stima dei tassi di deposizione e risospensione delle particelle, per definire la dinamica sedimentaria annuale dell'area discretizzando la componente organica e dei metalli in traccia.
- analisi modellistica della dispersione del sedimento e dei contaminanti ambientali nell'area costiera compresa tra il Circeo e il Monte Procida con particolare dettaglio al Golfo di Gaeta.

2. STATO DI AVANZAMENTO DEL PROGETTO DI RICERCA ADDENDUM 4

2.1. Schema funzionale del sistema osservativo

Il progetto di ricerca previsto dall'Atto Aggiuntivo all'Addendum n.4 si compone di una serie di attività che hanno come obiettivo quello di analizzare e prevedere gli impatti potenziali prodotti dalle attività di dragaggio sulle principali specie e habitat dell'ecosistema marino costiero nell'area del Golfo di Gaeta.

Nello schema (Fig.1) viene riportato il diagramma di flusso dell'intero sistema osservativo sviluppato nell'ambito del progetto in cui è mostrata la connessione tra le informazioni necessarie per raggiungere gli obiettivi dell'attività di ricerca (rettangoli rossi). In grigio sono mostrate le informazioni mancanti (rettangoli grigi) per ottenere una stima quantitativa dei flussi sedimentari e dei contaminanti con l'ulteriore sviluppo di un sistema modellistico di valutazione dei potenziali effetti su specie e habitat dell'ambiente marino costiero.

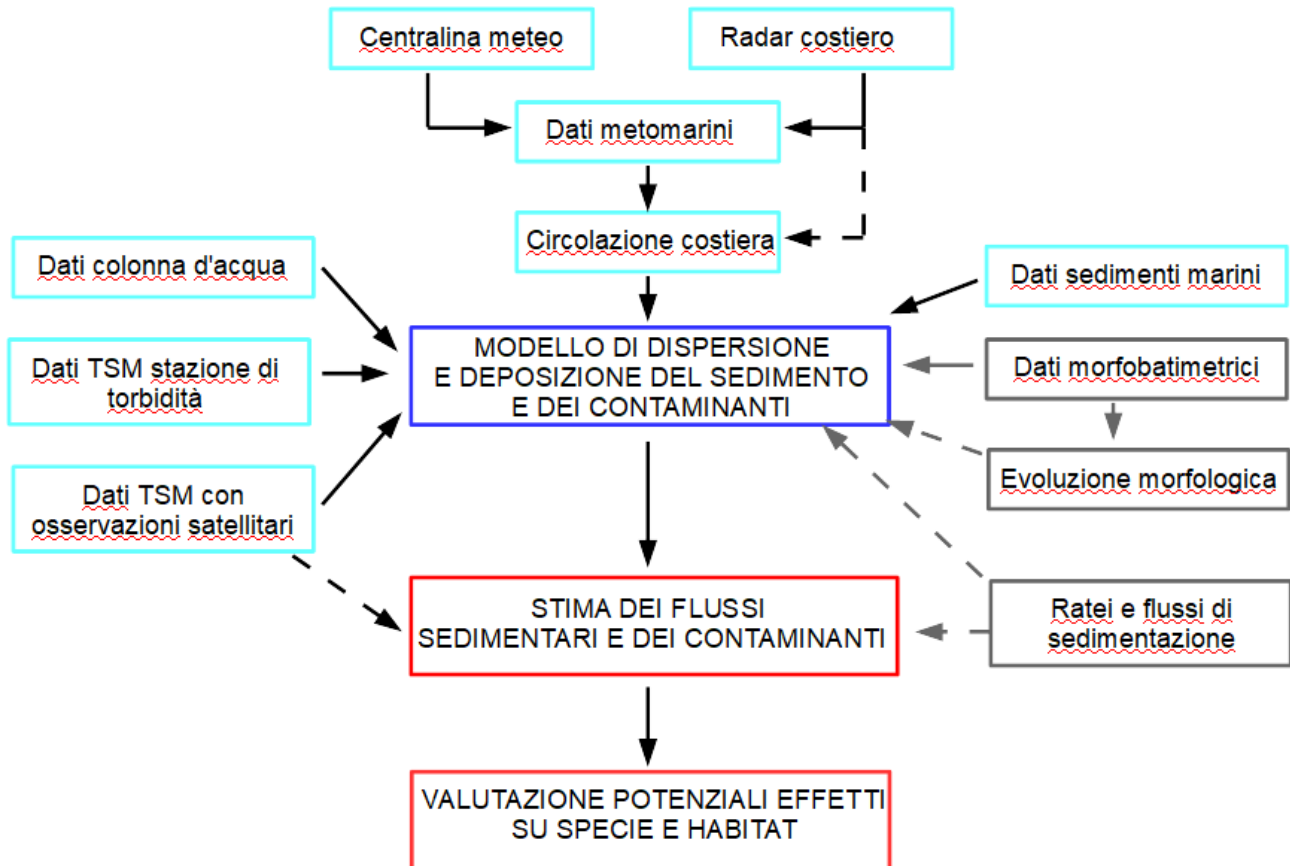


Fig.1. Diagramma di flusso del sistema osservativo. Nel diagramma è mostrata la connessione tra i dati raccolti in situ o da satellite (rettangoli celesti) e modelli matematici (rettangoli blu) che sono utilizzati per raggiungere gli obiettivi di interesse (rettangoli rossi). Le frecce tratteggiate indicano le operazioni di validazione e il colore grigio delle frecce e dei rettangoli indicano le attività mancanti per raggiungere gli obiettivi finali.

2.2. Sommario sulle conoscenze acquisite relativamente alla dinamica costiera

Le stazioni di misura fisse per la misura dei parametri chimico-fisici nel Golfo di Gaeta (Fig.2) che compongono il sistema osservativo fino ad ora sviluppato sono:

- Stazione torbidimetrica (2016 – oggi)
- Stazione mareografica (2016 – oggi)
- Stazione meteorologica (2011 – oggi)
- Radar costiero (2016 – oggi)
- Boa ondometrica (2013-2014)
- Stazione colonna d'acqua (2013 – oggi)
- Campionamento sedimenti (2015 – oggi)

Si aggiunge l'acquisizione ed elaborazione di immagini satellitari relativamente alla distribuzione del Solido Sospeso Totale (TSM) e Clorofilla *a*.

Inoltre, in occasione delle fasi ante-, durante e post-operam sono state integrate una serie di attività (REL-223-MON- 0715-AP) volte allo studio dei fenomeni di trasporto solido e delle caratteristiche chimico-fisiche nell'area antistante e limitrofa al Porto commerciali di Gaeta e allo studio dei potenziali effetti delle attività di dragaggio sulle aree sensibili presenti all'interno del Golfo di Gaeta (REL-235MON- 1015-AP). Nell'ambito del progetto le diverse attività di ricerca fino ad ora effettuate hanno permesso di conoscere la dinamica costiera del Golfo di Gaeta. Al fine di chiarire lo stato delle conoscenze ed inquadrare le attività di integrazione nell'ambito dell'intero progetto, viene effettuato, di seguito, un sommario delle conoscenze acquisite relativamente alla dinamica costiera.

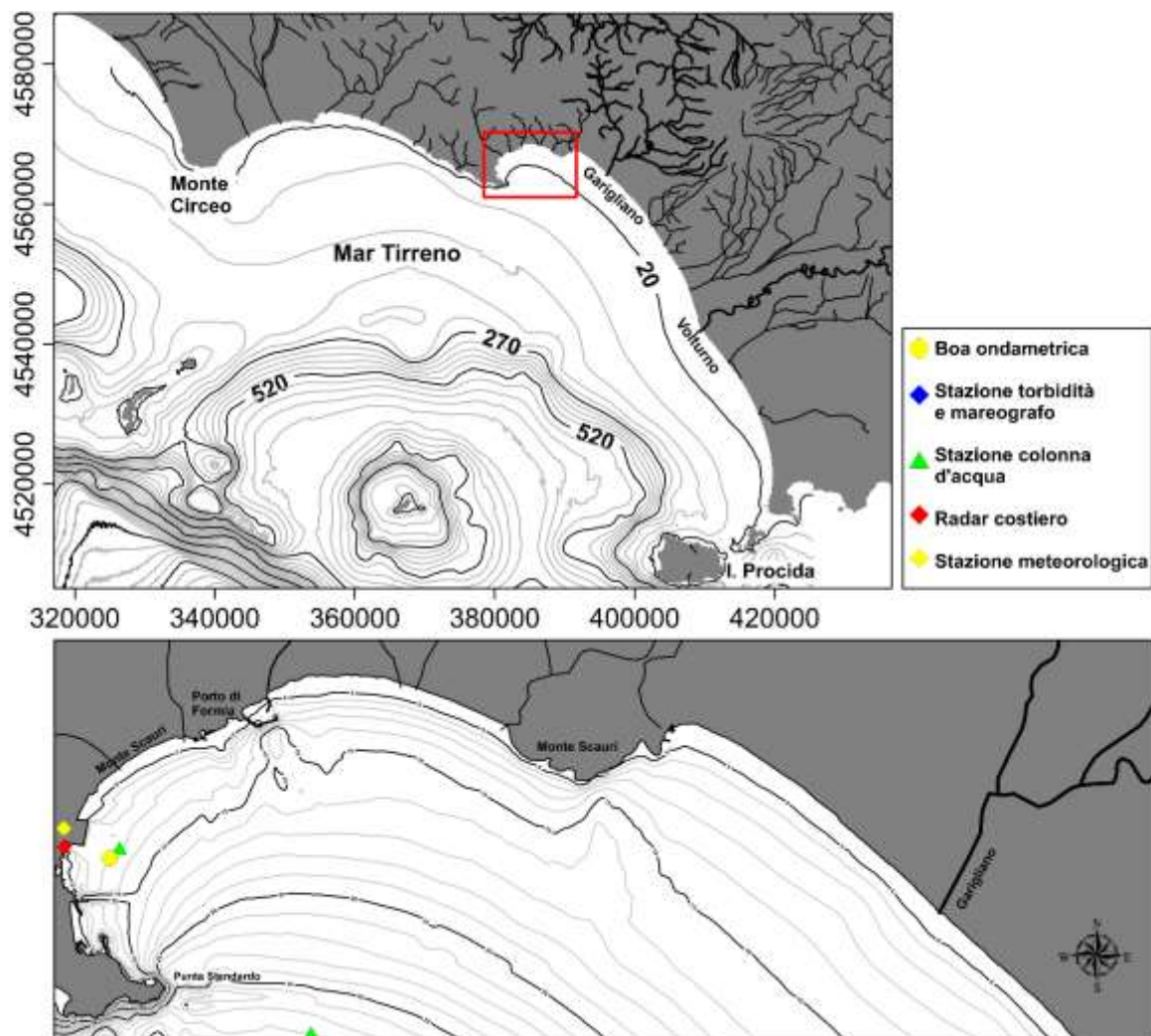


Fig.2 Unità fisiografica in cui è inserita l'area di studio (sopra) e Golfo di Gaeta in cui è indicata la posizione delle stazioni di misura fisse (sotto)

Il tratto di costa oggetto di studio (Golfo di Gaeta) è inserito all'interno di un'unità fisiografica estesa dal Monte Circeo al Monte Procida (Fig.2). La morfologia dell'entroterra dell'area di studio mostra una variazione E-W, passando da un morfotipo di “Costa terrazzata” a “Costa di litorale diritto”. Tale transizione è determinata dalla presenza delle propaggini dei Monti Aurunci nel settore occidentale e dai depositi alluvionali del Fiume Garigliano e Volturno nel settore orientale, come si osserva dalla topografia 3D (DEM, *Digital Elevation Model*) riportata in figura 3.

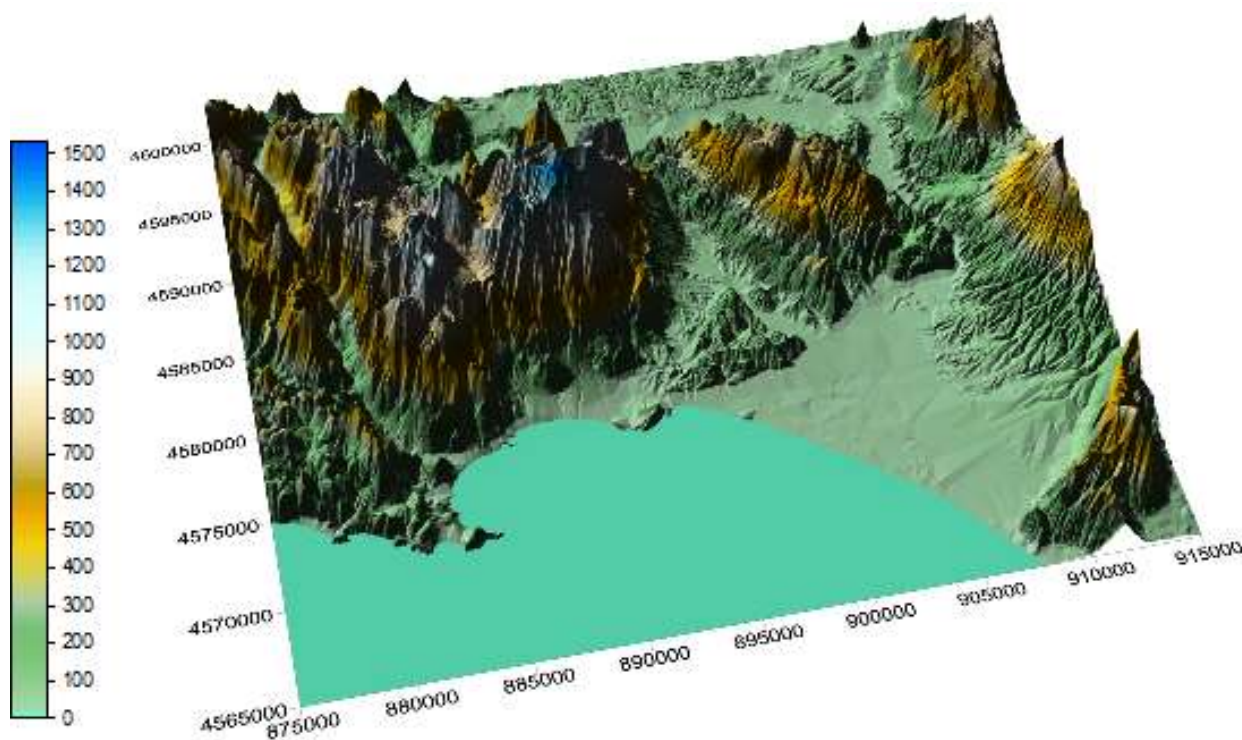


Fig.3 Digital Elevation Model (Tarquini et al., 2012) dell'entroterra dell'area di studio

All'interno del Golfo di Gaeta la fascia costiera ha perso completamente le caratteristiche naturali in quanto l'intera linea di riva compresa tra la spiaggia di Vindicio e Punta Stendardo è completamente trasformata in una costa armata (Fig.4).

Relativamente alla morfologia del bacino marino, il tratto di piattaforma compreso tra Monte Circeo e Gaeta (Punta Stendardo) presenta una caratteristica forma a falce, con una pendenza crescente procedendo verso Sud. La piattaforma continentale tra Gaeta e Ischia costituisce un'estensione della piana alluvionale dei corsi d'acqua Garigliano e Volturno. La piattaforma continentale si riduce in ampiezza da circa 20Km nel tratto in corrispondenza della foce del Garigliano a meno di 10Km in



corrispondenza della foce del Volturno dove c'è la connessione tra il bacino di Gaeta e quello di Ventotene.



Fig.4 Immagine da drone del Golfo di Gaeta da Punta Stendardo

Le Isole Pontine sono localizzate sulla piattaforma continentale che borda le coste del Tirreno orientale, al largo del Golfo di Gaeta. L'arcipelago, costituito da tre isole a ovest (Ponza, Palmarola e Zannone) e da altre due isole verso est (Ventotene e Santo Stefano), forma nel suo insieme una catena lungo circa 30 km, che corre parallela al Lazio, tra Roma e Napoli.

Relativamente alle condizioni idrodinamiche, il moto ondoso è caratterizzato, a largo del Golfo, da fenomeni provenienti dai quadranti occidentali (Fig.5a sx). Le onde che si propagano dalla zona di largo verso il Golfo di Gaeta risentono inizialmente dell'effetto delle isole Pontine e successivamente la propagazione è fortemente influenzata dalla presenza del promontorio di Punta Stendardo e dall'Isola di Procida che permette la propagazione libera del moto ondoso ad un settore limitato alla direzione di Sud Est (Fig.5a dx). Dai risultati ottenuti dal modello ST-WAVE sulla propagazione delle onde all'interno del Golfo di Gaeta, considerando gli eventi caratteristici dell'area di studio (REL-119MON-0513-AP), si osserva in maniera evidente come la morfologia costiera determini una transizione dell'intensità del moto ondoso decrescente da Est verso Ovest per tutte le direzioni di provenienza del moto ondoso (Fig.5b).

Il Golfo di Gaeta è quindi uno specchio di mare generalmente riparato dal moto ondoso, che però è caratterizzato da un fenomeno locale denominato “Garigliano” caratterizzato da venti di forte intensità che spirano da un settore angolare compreso tra 45°N e 75°N , direzioni che risultano pressochè perpendicolari alla linea di costa. Tale fenomeno si presenta con una frequenza del 37%, rispetto agli eventi con intensità maggiore di 10 m/s. Nella genesi di questo fenomeno giocano un ruolo importante le condizioni orografiche dell’entroterra che tendono a far incanalare, ruotare ed intensificare i venti settentrionali. Tale fenomeno produce onde di mare vivo che hanno raggiunto nell’anno 2013-2014 un’altezza massima di 1.5m.

Le misure condotte con il radar costiero, installato nel Golfo di Gaeta dal 22/01/2016, hanno permesso di analizzare la dinamica delle correnti e della propagazione ondosa durante gli eventi di mareggiata. Le figure 6 e 7, rappresentano delle registrazioni effettuate in due condizioni diverse di provenienza del moto ondoso rispettivamente $130\text{-}160^{\circ}\text{N}$ e $160\text{-}190^{\circ}\text{N}$ che risultano essere le principali condizioni ondose che interessano il Golfo di Gaeta (Fig.5a dx). Dalle registrazioni radar si evince come il flusso costiero in entrambi i casi sia caratterizzato da una corrente di direzione Nord-Est Sud-Ovest all’interno del Golfo. Con onde e venti provenienti dai quadranti sud-orientali emerge una interessante rotazione antioraria del flusso all’interno del Golfo (Fig.6). In presenza di onde provenienti maggiormente da Sud (Fig.7) la rotazione è meno evidente e il flusso procede principalmente in direzione Nord-Est Sud-Ovest. In entrambi gli scenari si osserva un decremento dell’intensità del flusso procedendo da Est verso Ovest.

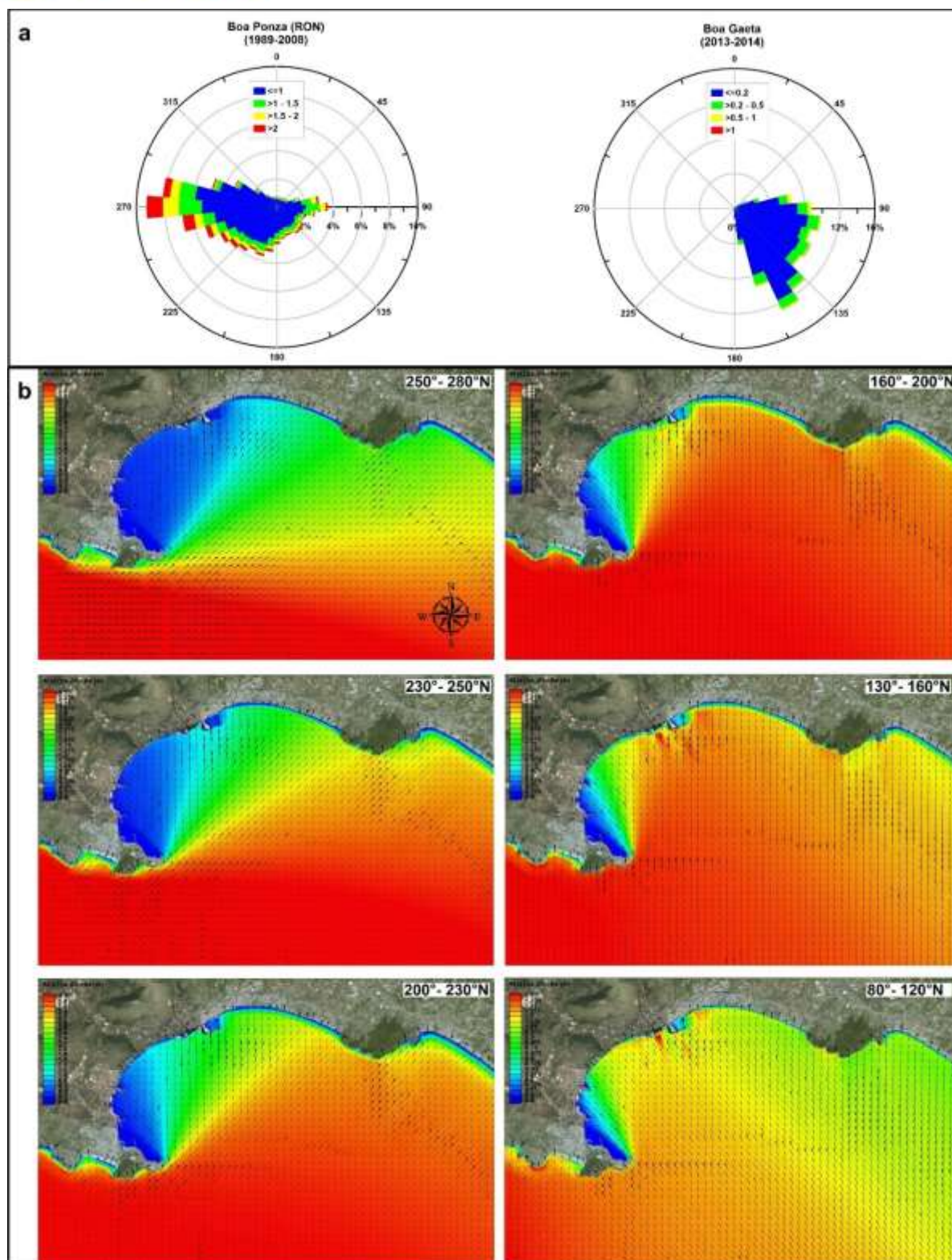


Fig.5 a) climi d'onda registrati dalle boe ondametrische di Ponza e Gaeta; b) Propagazione all'interno del Golfo di Gaeta del moto ondoso effettuata mediante il modello ST-Wave. Scenari relativi agli eventi ondosi caratteristici dell'area.

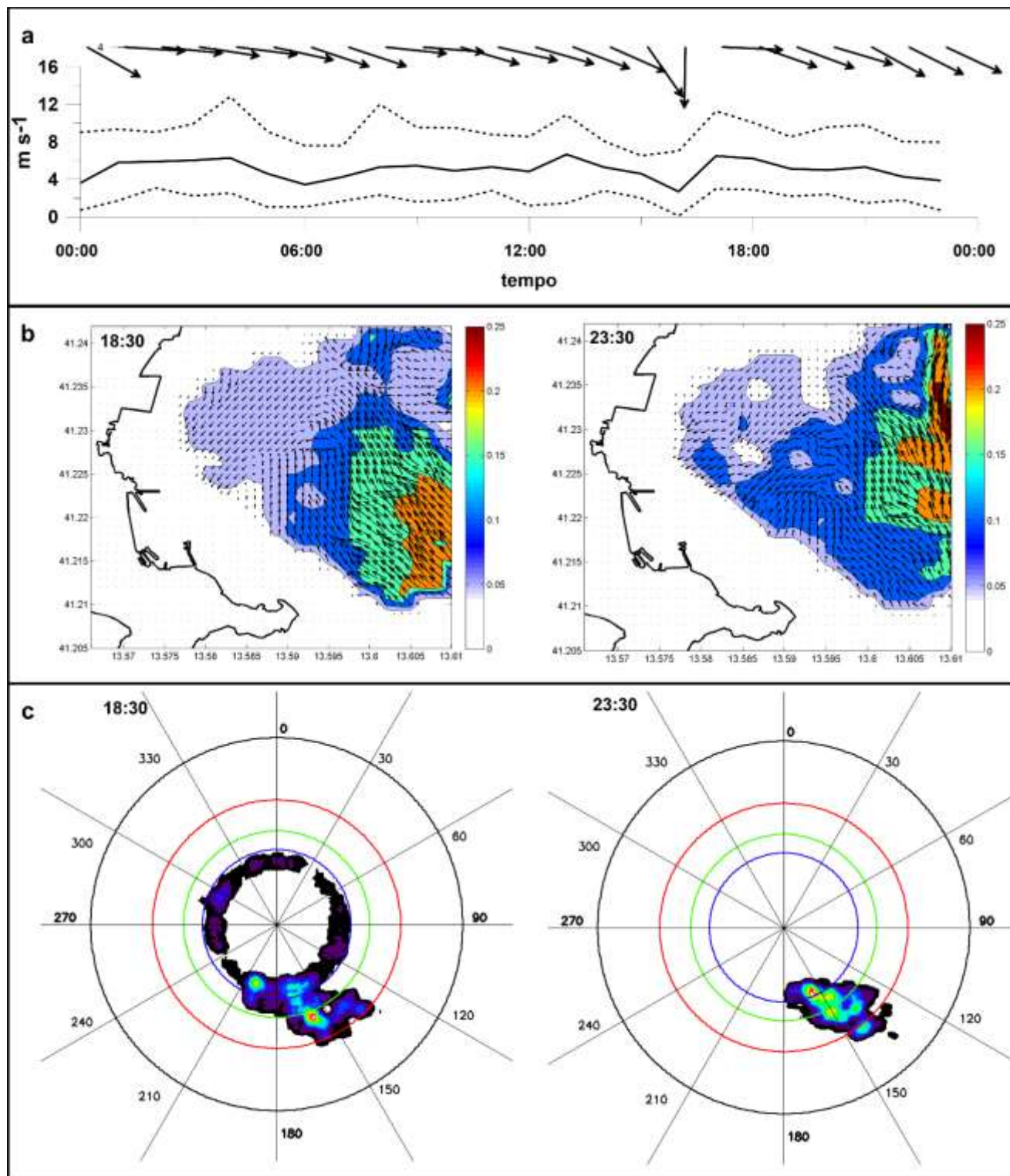


Fig.6. Acquisizione radar del 14/10/2016

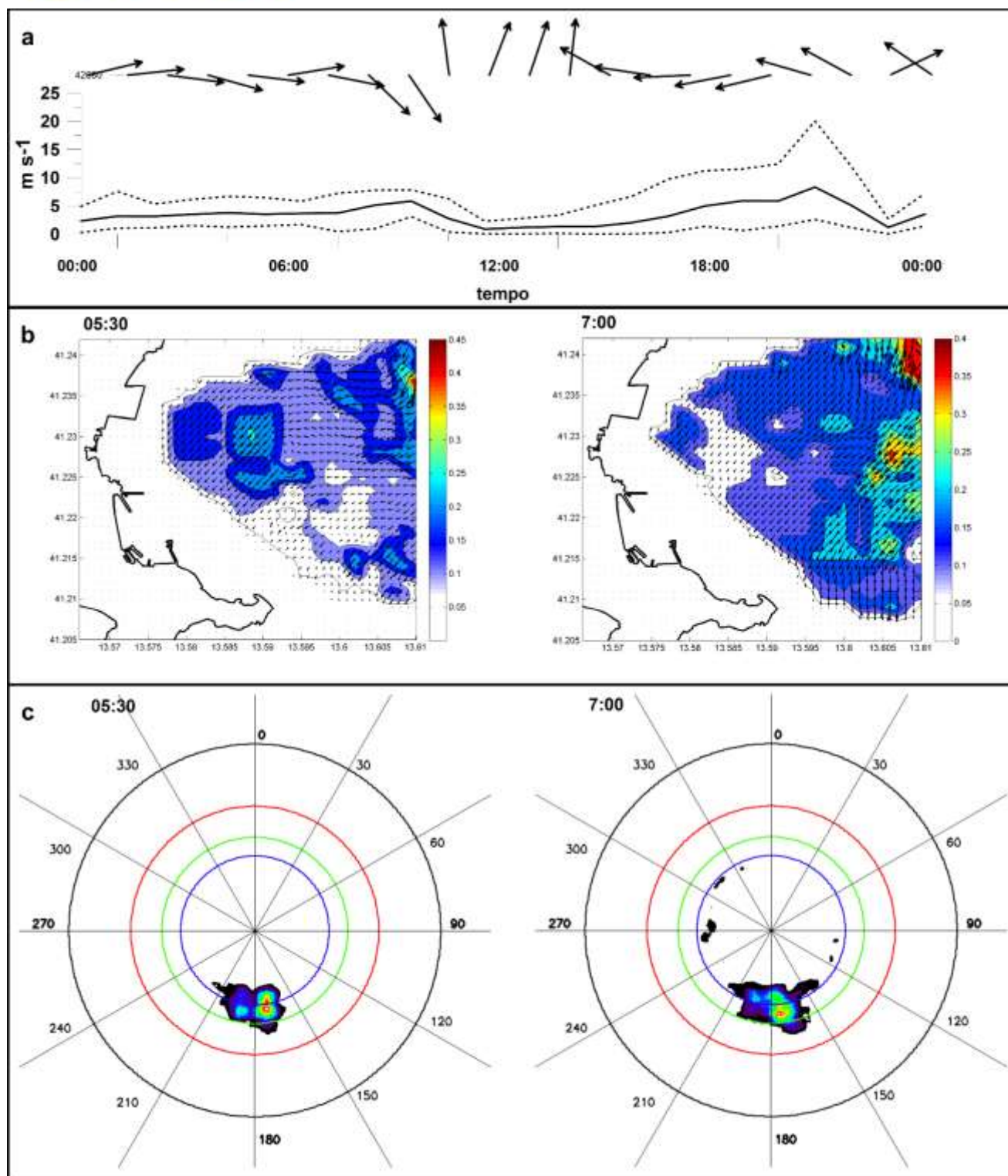


Fig.7. Acquisizione radar del 6/11/2016

I pattern di distribuzione ricavati dall'analisi dei dati satellitari relativi alla distribuzione superficiale della clorofilla *a* e solido sospeso totale (TSM) nell'arco temporale compreso tra il 2013 e il 2017 hanno fornito importanti informazioni in merito alla dinamica costiera. Le mappe di distribuzione di ogni singola acquisizione sono prodotte a partire da dati acquisiti dal sensore MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), montato sulla piattaforma satellitare Aqua (EOS PM) e processati mediante il software di elaborazione SeaDAS, attraverso il quale viene effettuata la correzione atmosferica, la geolocalizzazione e riproiezione, nonché l'applicazione degli algoritmi bio-ottici. La ricostruzione dei pattern di distribuzione è stata ottenuta a partire dalla serie temporale totale delle mappe (in totale 650 per ogni variabile). La serie temporale è stata analizzata mediante l'*Empirical Orthogonal Function* (EOF) da cui sono state selezionate le componenti che rappresentano il 90% della varianza. Attraverso un'operazione di clustering, mediante il k-means, sono stati ottenuti i patterns (centroidi) che rappresentano i modi di oscillazione del campo di distribuzione della variabile. Relativamente alla distribuzione della Clorofilla *a* i patterns che rappresentano il 90% della varianza sono 2 (Fig.8) mentre per quanto riguarda il TSM sono stati ottenuti 5 patterns (Fig.9).

I due pattern di distribuzione della clorofilla *a* (Fig.8) mostrano come i valori maggiori di concentrazione siano sempre localizzati in corrispondenza delle foci fluviali del Volturno e del Garigliano, il cui effetto è attribuibile all'afflusso di nutrienti che favoriscono una costante produzione fitoplanctonica in prossimità delle aree deltizie. La concentrazione mostra un gradiente decrescente sia lungo la costa in direzione SE-NW che costa-largo.

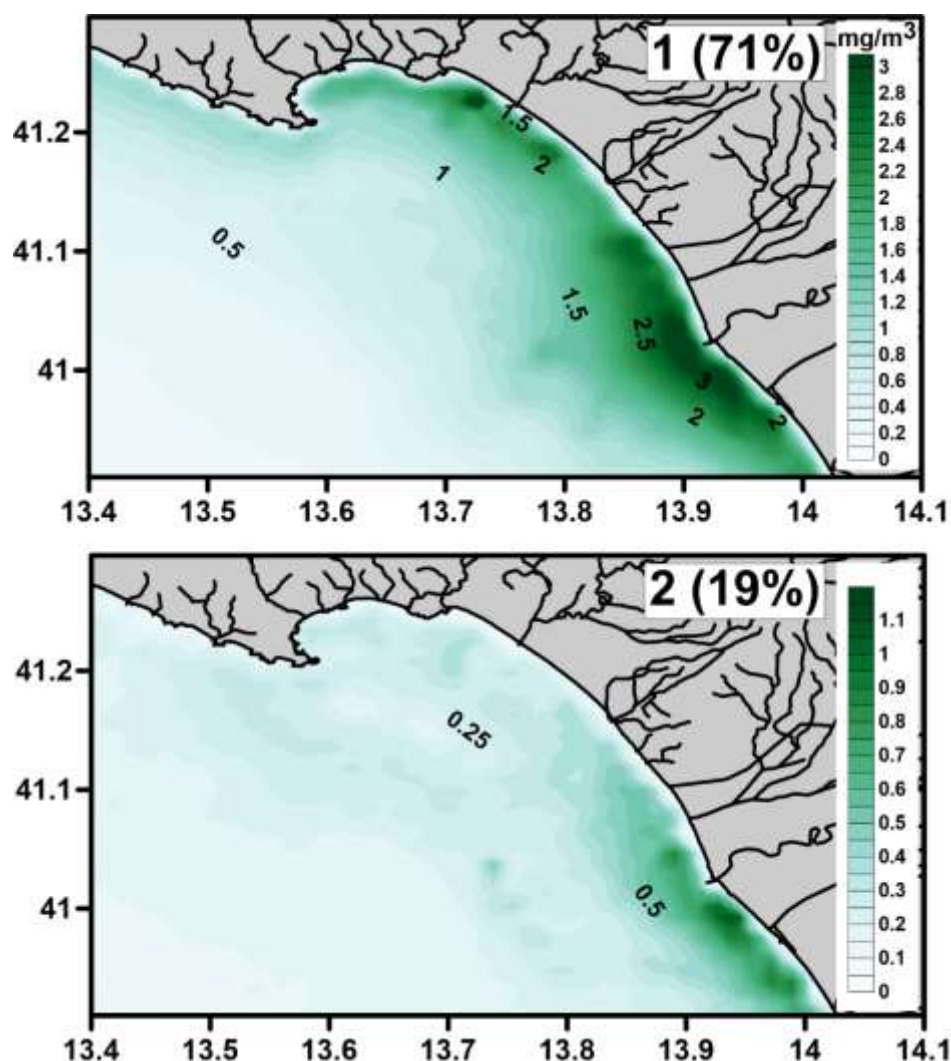


Fig.8. Patterns di distribuzione della Clorofilla a

Per quanto riguarda il TSM (Fig.9) i primi due pattern mostrano due condizioni opposte rispettivamente caratterizzate da valori massimi e valori minimi di concentrazione del solido totale in sospensione riconducibili a condizioni di abbondante e scarso afflusso di solido in sospensione dall'entroterra. Nel primo pattern si osserva chiaramente l'effetto prodotto dalle foci fluviali che giocano un ruolo fondamentale nel regolare i livelli di torbidità nelle acque costiere dell'area di studio. Nei pattern (3) e (4) si osservano due dinamiche differenti di distribuzione del TSM proveniente dalle foci fluviali ed in particolare da quella del fiume Volturno che nel primo caso (3) è orientata SE-NW verso il Golfo di Gaeta e nel secondo caso (4) invece è orientata ESE-WNW doppiando il promontorio di Punta Stendardo.

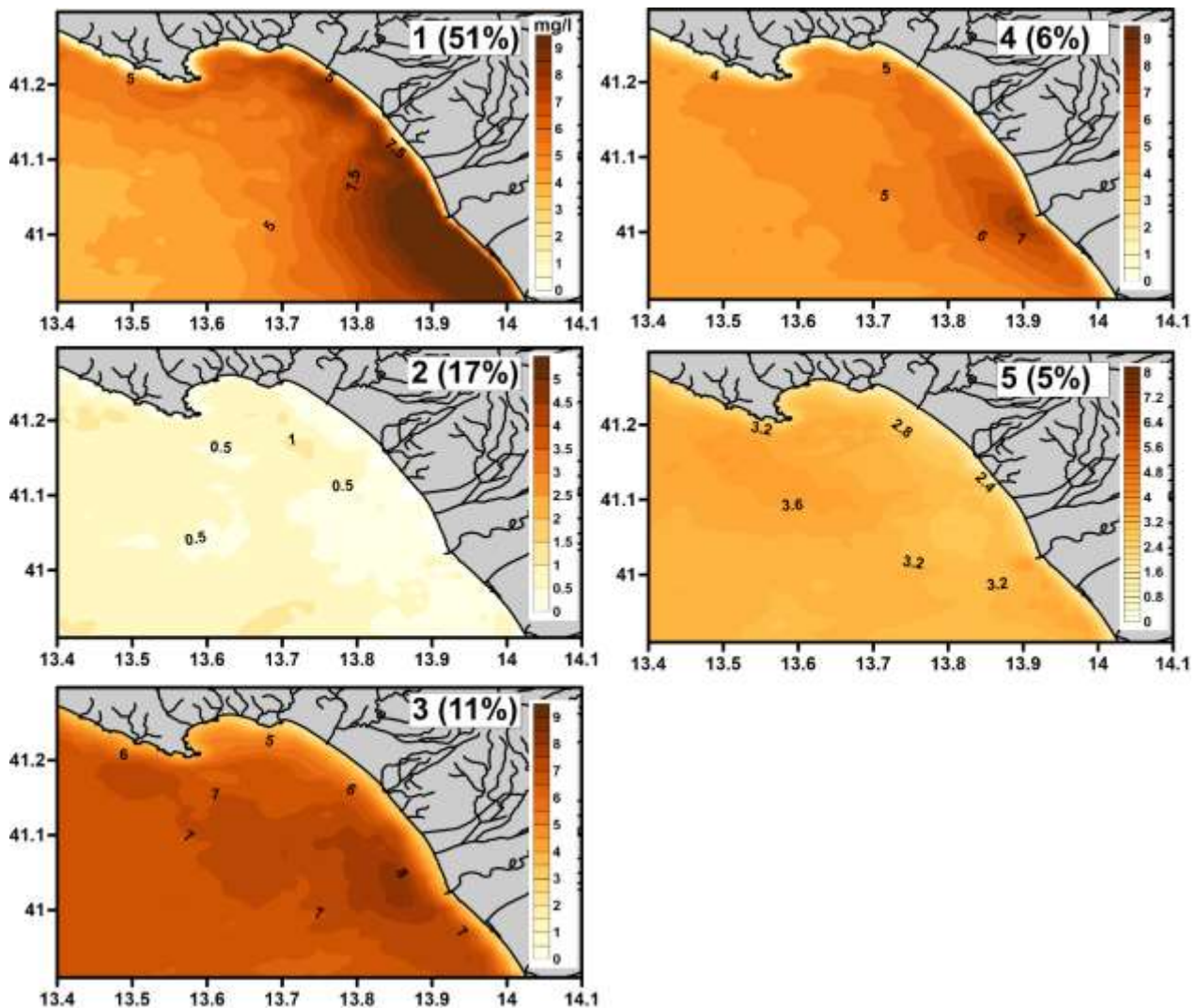


Fig.9. Patterni di distribuzione della Solido Sospeso Totale (TSM)

Nel pattern (5) si osserva a largo di Punta Stendardo una patch a maggiore concentrazione orientata NW-SE che fa presupporre un fenomeno di trasporto proveniente dai settori costieri settentrionali. Dall'analisi dei pattern emerge una distribuzione del solido sospeso caratterizzato da un costante gradiente decrescente della concentrazione dalle foci fluviali verso il Golfo di Gaeta (SE-NW). Dall'analisi effettuata emerge in maniera evidente come le foci fluviali regolino in maniera importante sia la produzione fitoplanctonica che la concentrazione del solido sospeso dell'area in esame. I Fiumi Volturno e Liri-Garigliano drenano rispettivamente un bacino idrografico di circa 5000 km², e sono responsabili del maggior contributo solido nell'area, come risultato del drenaggio

dei rilievi in gran parte vulcanici dei relativi bacini idrografici. Mentre la frazione sabbiosa alimenta principalmente le spiagge adiacenti alle foci, la frazione in sospensione è in grado sia di raggiungere il Golfo di Gaeta che superarlo doppiando Punta Stendardo e andando ad alimentare le porzioni costiere a Nord del Golfo. Tali risultati sono in accordo con quelli ottenuti dalle analisi mineralogiche e dei radionuclidi nell'area compresa tra il Monte Circeo e Procida dove si evince come l'area del Golfo sia maggiormente interessata dalla deposizione e fenomeni di accumulo (Brondi et al., 1983). Il progetto di ricerca fino ad ora svolto ha portato ad una prima fase di sviluppo del sistema modellistico di previsione degli impatti sulle specie e habitat marino-costieri (Piermattei et al., 2016). In particolare, sono stati utilizzati i modelli Delft-3D Wave, Flow e WAQ attraverso cui è possibile simulare la propagazione del moto ondoso, il campo idrodinamico delle correnti indotte da vento e onda e la dispersione del sedimento.

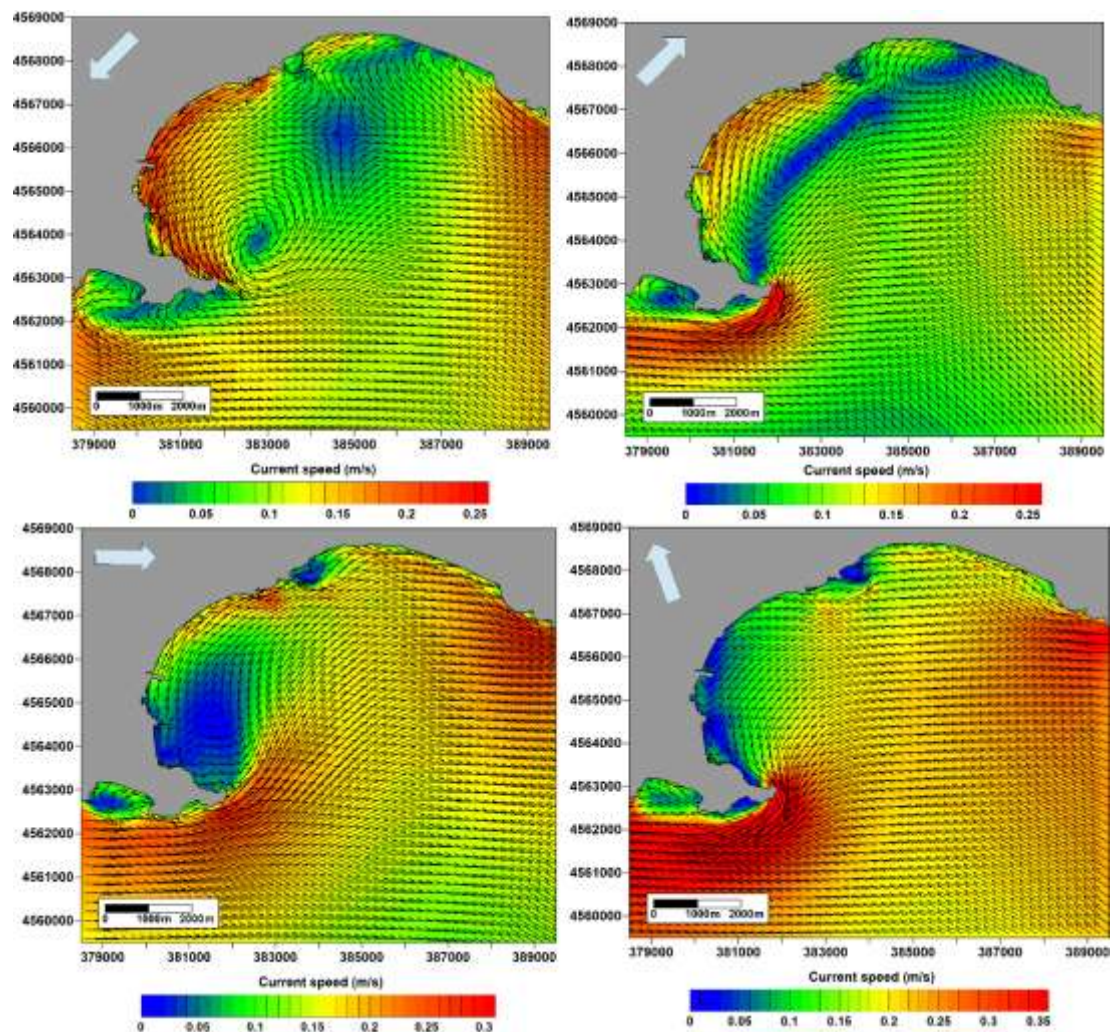


Fig.10 Risultati del modello Delft-3D flow che simula il campo idrodinamico indotto da vento e moto ondoso in due differenti scenari

Sono stati riprodotti una serie di scenari significativi ed in figura 10 e 11 sono riportati i risultati modellistici ottenuti simulando il campo idrodinamico e di dispersione del sedimento in diverse condizioni meteomarine.

La costruzione del sistema modellistico ha permesso di effettuare delle prime valutazioni sulla dispersione dei sedimenti dragati. Nei due scenari si osservano 4 dinamiche di dispersione del sedimento movimentato. In presenza di fenomeni provenienti da Sud-Ovest e Ovest il sedimento tende a essere trasportato verso le coste di Formia e Scauri mentre in presenza di fenomeni Nord-orientali e Sud-orientali si favorisce il trasporto verso i fondali antistanti il centro abitato di Gaeta.

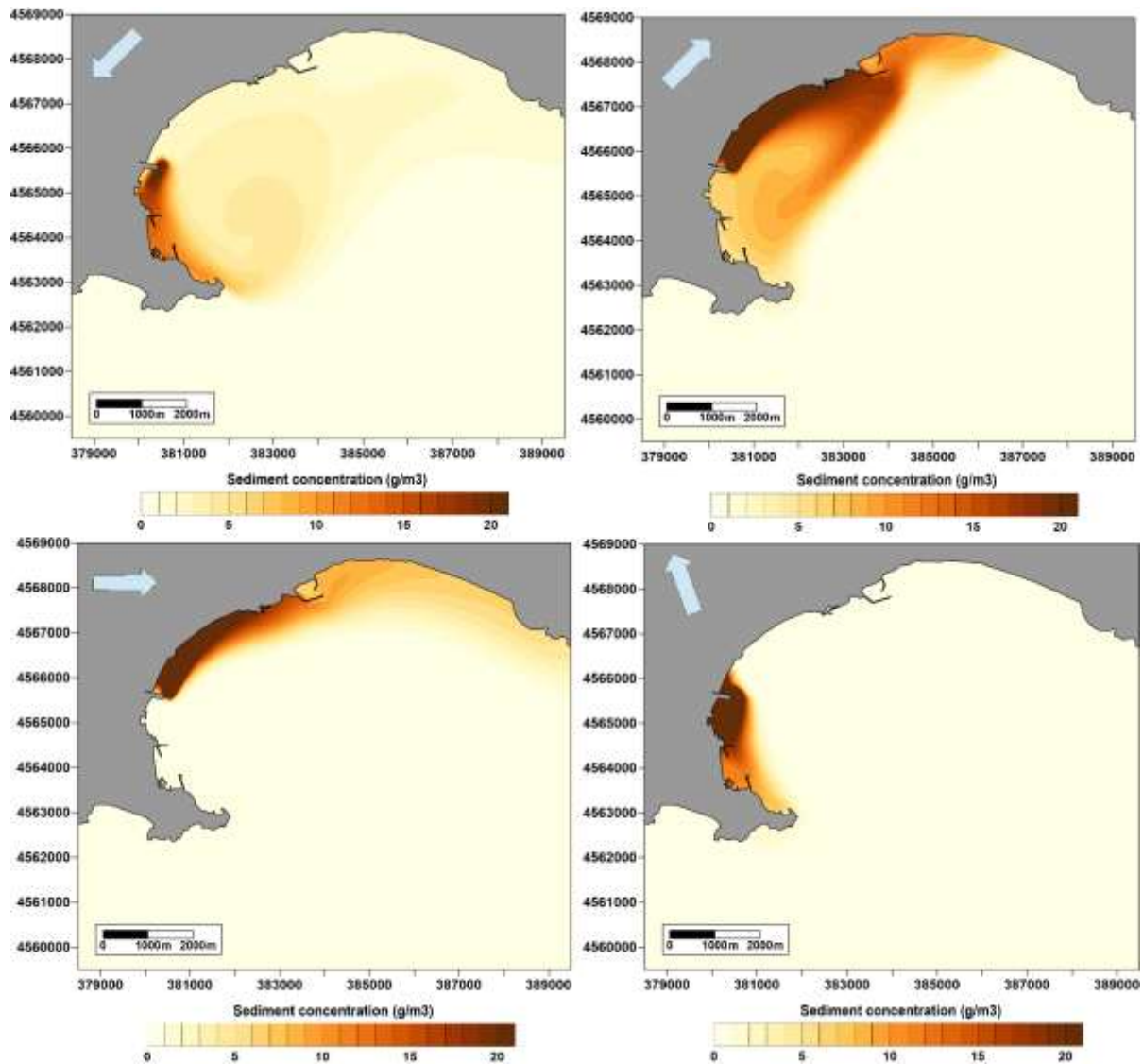


Fig.11 Risultati del modello Delft-3D WAQ che simula la dispersione del sedimento dragato nei due scenari considerati

2.2.1 Indagini morfologiche

I risultati morfologici relativi alle campagne fino ad ora effettuate sono relativi a 4 campagne batimetriche effettuate con cadenza stagionale (18/10/16; 15/02/2017; 15/05/2017; 14/09/2017) e hanno messo in evidenza delle variazioni morfologiche tra i diversi rilievi inferiori a 0.5 m. E' stata effettuata una stima volumetrica sovrapponendo le superfici ottenute dal rilievo di seconda pianta, effettuato a Maggio 2016, e dal rilievo del LOSEM effettuato 15/05/2017 ed è possibile vedere che ad un anno di distanza è presente una variazione morfologica positiva di circa 10.000 m³. Dalla ricostruzione 3D del fondale marino (Digital Elevation Model, DEM) si osserva il precedente escavo che ha portato le quote a -10m e su cui è stato effettuato l'ultimo approfondimento di ulteriori 2m. Osservando i risultati in Fig.12b e c le variazioni positive maggiori si concentrano nell'area a maggiore approfondimento mentre nelle porzioni circostanti si osservano variazioni lievemente negative o assenza di variazioni.

Punti	Longitudine	Latitudine	Ottobre 2016	Maggio 2017	Variazione
1	380564.72	4565574.51	11.92	12.1	0.18
2	380744.69	4565223.22	11.97	11.92	-0.05
3	380516.99	4565347.83	11.76	11.71	-0.05
4	380507.13	4565419.55	11.79	11.88	0.09
5	380482.92	4565477.82	11.40	11.52	0.12
6	380564.72	4565574.51	11.71	11.89	0.18
7	380564.85	4565574.43	11.70	11.77	0.07

Tab. 1. Variazioni puntali osservate all'interno dell'area dragata

Le variazioni puntuali osservate (Tabella 1) non eccedono in alcun punto un valore superiore a 0.25m e considerando il grado di accuratezza delle indagini, sulla base del parametro non dipendente dalla profondità ($a = 0.25m$), non è possibile asserire con certezza che tali variazioni siano imputabili a processi di assestamento delle pendenze prodotte dalle operazioni di escavo o a processi di sedimentazione indotti dalla presenza di quote ribassate del fondo del mare che potrebbero agire da bacino di captazione delle particelle.

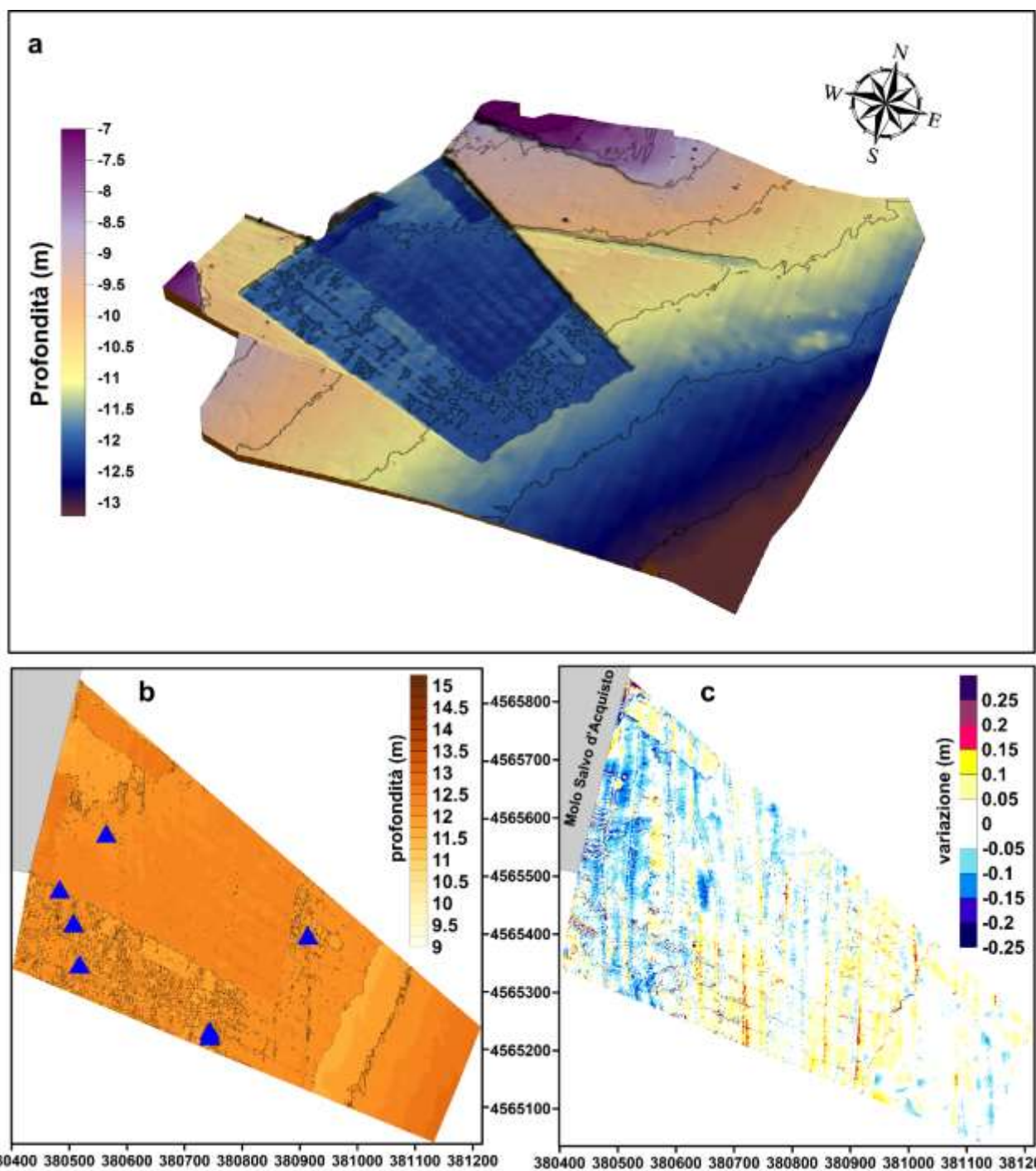


Fig.12 Risultati indagini multibeam presso il Golfo di Gaeta. a) Digital Elevation Model (DEM) del fondale investigato; b) batimetrie area soggetta ad escavo, i triangoli blu sono quelli utilizzati per i confronti puntuali rispetto alle batimetrie di Ottobre 2016; c) Variazioni osservate in tutta l'area dragata tra le indagini di Ottobre 2016 e Maggio 2017, i valori negativi indicano incrementi delle quote e quindi deposizione mentre quelli positivi decrementi delle quote.

2.2.2. Analisi chimiche dei sedimenti

In occasione delle operazioni di escavo è stato effettuato un campionamento di sedimento superficiale in n.5 stazioni esterne all'area di dragaggio (Fig.13). Il campionamento è stato effettuato in tre fasi: prima del dragaggio (ante-operam) in data 06/10/2015, durante (15/04/2016) e dopo il dragaggio (post-operam) in data 27/06/2017.

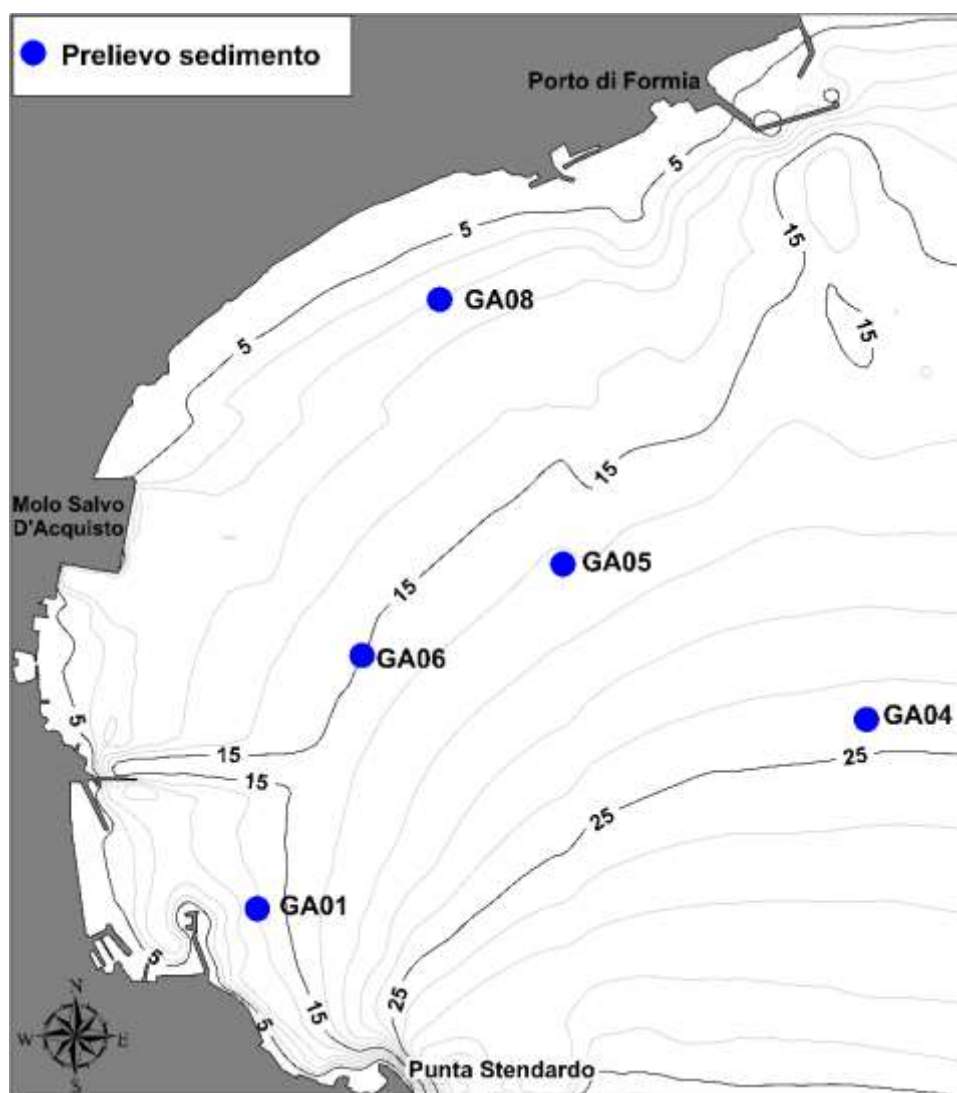


Fig.13 Stazioni relative al piano di monitoraggio del progetto Addendum 4 in cui sono state effettuate i prelievi di sedimento superficiale su cui sono state effettuate le analisi chimiche.

I risultati delle analisi chimiche ottenute dal campionamento dei sedimenti superficiali effettuato nella fase ante-operam e durante le operazioni di dragaggio sono riportati in tabella 2.

Limiti				Risultati campioni Ante-operam					Risultati campioni durante-operam				
Metalli	APAT/ICRAM 2007 (mg/Kg)												
	LCB (pelite < 10%)	LCB (pelite > 10%)	LCL	GA01	GA04	GA05	GA06	GA08	GA01	GA04	GA05	GA06	GA08
As	17	25	32	24.5	11.8	12.5	15.1	13.3	20.9	17.5	12.7	18.7	15.6
Cd	0.2	0.35	0.8	0.73	<0.35	<0.35	<0.35	<0.35	0.34	0.34	0.25	0.31	0.21
Ni	40	70	75	43.9	21.8	26.7	25.6	19.7	30.6	31	23.2	27.7	19.1
Pb	25	40	70	63.8	23.1	28.8	30.3	23.4	75.5	66.3	46.3	68.5	38.9
Zn	50	100	170	160	66.8	86.3	86.2	63.8	89.1	81.6	68.3	80.6	48.8
ΣPCB*	5		189	5.26	3.75	3.75	5.15	3.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.7

*Il valore di PCB è la somma dei congeneri: 28, 52, 77, 81, 101, 118, 126, 128, 138, 153, 156, 169, 180

*Il valore di PCB è la somma dei congeneri: 28, 52, 77, 81, 101, 118, 126, 128, 138, 153, 156, 169, 180

Tab.2. Concentrazioni di Metalli e PCB in relazione ai limiti APAT-ICRAM nelle stazioni di campionamento nelle fasi ante- e durante-operam

Dai risultati analitici dei sedimenti campionati in fase ante-operam risulta che in tutte le stazioni di campionamento i valori delle specie di metalli analizzati (*As*, *Cd*, *Ni*, *Pb*, *Zn*) e di PCB risultano ben al di sotto del Livello Chimico Limite (LCL), secondo quanto riportato nel ‘Manuale per la movimentazione dei sedimenti’ APAT-ACRAM 2007. Solo le specie *Cd*, *Pb*, *Zn* e PCB nella stazione GA01 presentano valori al di sopra della soglia LCB. Dai risultati analitici dei campioni di sedimento superficiale prelevati in fase durante-operam, risulta che le concentrazioni dei metalli e dei PCB analizzati risultano al di sotto sia del Limite Chimico di Base (LCB) che del Livello Chimico Limite (LCL), fatta eccezione per le concentrazioni di *Pb* nelle stazioni GA01, GA04, GA05 e GA06 dove si eccede il LCB e per la stazione GA01 dove la concentrazione di *Pb* risulta superiore a LCL.

Alla luce dell’aggiornamento normativo e della attuazione del Decreto 15 luglio 2016, n. 173, i risultati ottenuti dalle analisi chimiche dei sedimenti superficiali nella fase post-operam evidenziano che tutti i metalli misurati in tutte le stazioni di campionamento eccedono la soglia L1 (Decreto 15 luglio 2016, n. 173) (Tabella 3).

Inoltre risulta che: nella stazione GA01 le concentrazioni di *As*, *Cd*, *Pb* e *Zn* eccedono la soglia L2 (Decreto 15 luglio 2016, n. 173); nella stazione GA04 le concentrazioni di *As*, *Cd* e *Zn* eccedono la

soglia L2; nella stazione GA05 *As*, *Cd* e *Zn* eccedono la soglia L2; nella stazione GA06, *As*, *Cd*, *Pb* e *Zn* eccedono la soglia L2; nella stazione GA08 *As* e *Cd* eccedono la soglia L2.

Limiti						Risultati dei campioni				
Metalli	APAT/ICRAM 2007 (mg/Kg)			Dlgs n.173 15/07/16 (mg/Kg)						
	LCB (pelite < 10%)	LCB (pelite > 10%)	LCL	L1	L2	GA01	GA04	GA05	GA06	GA08
As	17	25	32	12	20	33.2	29	26.8	36	33.3
Cd	0.2	0.35	0.8	0.3	0.8	1.3	1.1	1.3	1.3	1
Ni	40	70	75	30	75	67.5	55.8	54.8	61.3	46.4
Pb	25	40	70	30	70	239	63.8	61.1	74.2	53.1
Zn	50	100	170	100	150	21.3	156	165	183	129
ΣPCB*	5		189	8	60	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
*Il valore di PCB è la somma dei congeneri: 28, 52, 77, 81, 101, 118, 126, 128, 138, 153, 156, 169, 180										

Tab.3. Concentrazioni di Metalli e PCB in relazione ai limiti APAT-ICRAM ed ai limiti descritti nel Decreto 15 luglio 2016, n. 173 nelle stazioni di campionamento.

Tali risultati sono stati confermati da un'ulteriore analisi di controllo eseguita su 2 delle 5 stazioni. In tabella 4 vengono riportate le analisi di controllo effettuate sui campioni prelevati nelle stazioni GA01 e GA06 ed il confronto con il Livello Chimico di Base (LCB), Livello Chimico Limite (LCL) (APAT-ICRAM, 2007) e con le soglie L1 e L2 (Decreto 15 luglio 2016, n. 173). Dai risultati si è ottenuta la conferma delle concentrazioni riscontrate in precedenza.

In particolare tutti i metalli misurati eccedono la soglia L1. Inoltre nella stazione GA01 *As*, *Cd*, *Pb* e *Zn* eccedono la soglia L2. Nella stazione GA06 *As*, *Cd* e *Pb* eccedono la soglia L2.

Alla luce di tali risultati emerge la necessità di approfondire la dinamica di trasporto e sedimentazione dei sedimenti e dei contaminanti ambientali ad esso associati al fine di discriminare in maniera puntuale le possibili fonti di provenienza dei contaminanti considerati.

Limiti						Risultati dei campioni	
Metalli	APAT/ICRAM 2007 (mg/Kg)			Dlgs n.173 15/07/16 (mg/Kg)		GA01	GA06
	LCB (pelite < 10%)	LCB (pelite > 10%)	LCL	L1	L2		
As	17	25	32	12	20	39.7	41.7
Cd	0.2	0.35	0.8	0.3	0.8	1.1	1
Ni	40	70	75	30	75	48	48.4
Pb	25	40	70	30	70	96.3	76.1
Zn	50	100	170	100	150	186	149

Tab.4. Concentrazioni di Metalli e PCB in relazione ai limiti APAT-ICRAM ed ai limiti descritti nel Decreto 15 luglio 2016, n. 173 nelle stazioni di campionamento GA01 e GA06 (II analisi).

3. PROPOSTA PROGETTUALE

Le attività che vengono proposte nel presente progetto, necessarie all'integrazione del progetto di ricerca di cui all'Atto Aggiuntivo all'Addendum n.4 per lo studio della dinamica dei processi sedimentari, consistono in un'analisi sia quantitativa delle variazioni morfologiche e delle componenti del flusso di sedimentazione (risospensione e sedimentazione) che qualitativa (frazione organica e inorganica) in aggiunta ai parametri già monitorati dal sistema osservativo posto in essere nel Golfo di Gaeta. Nel dettaglio le attività previste sono:

- studio di dettaglio dell'evoluzione morfologica dei fondali marini
- studio della dinamica dei profili verticali dei flussi di sedimentazione e dei metalli in traccia
- analisi e validazione modellistica della dispersione del sedimento dragato e dei contaminanti ambientali

3.1. Evoluzione morfologica dei fondali marini

Il progetto prevede l'implementazione delle indagini morfologiche con n.6 campagne estese ad un'area di 690500 m² antistante il Molo Salvo d'Acquisto (Fig.14), che tra il 2002 e il 2016 è stata soggetta a diverse operazioni di dragaggio. Le indagini saranno ripetute con cadenza trimestrale al fine di osservare possibili variazioni stagionali.

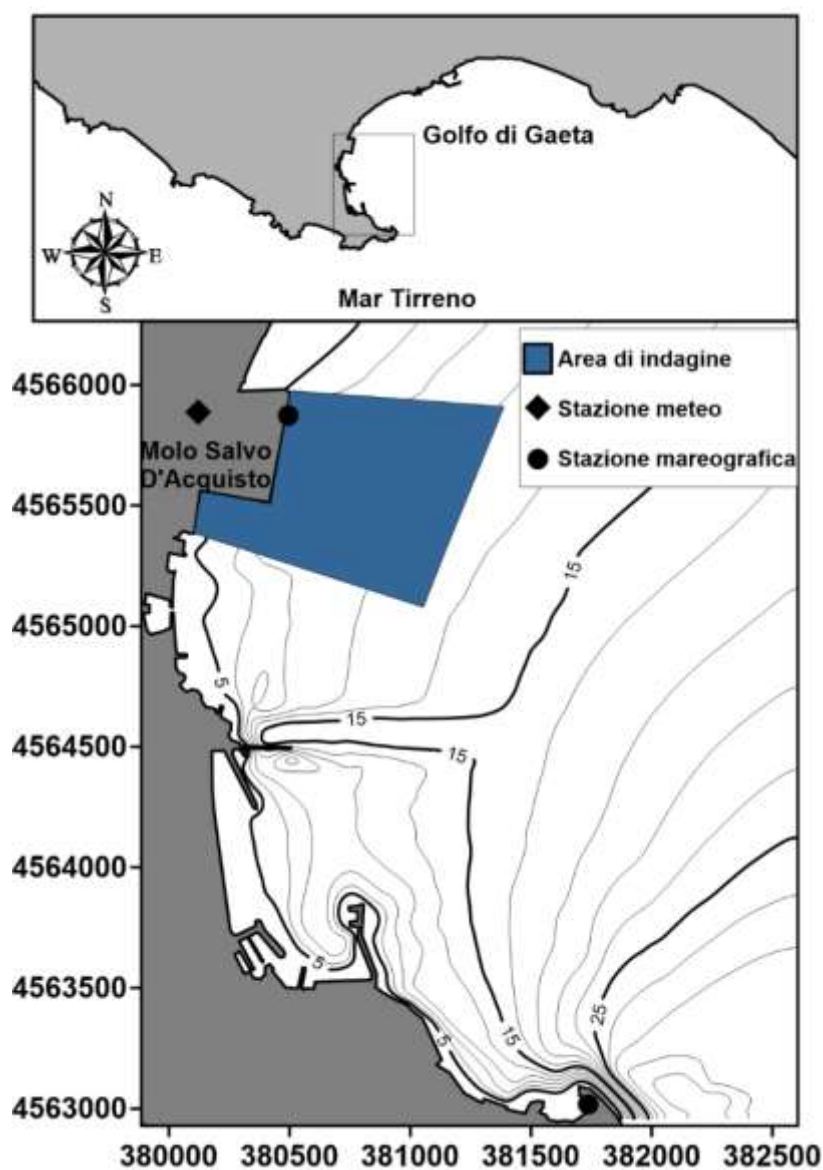


Fig.14 Area di indagine per i rilievi morfologici

La strumentazione per le indagini morfologiche è composta da:

- Sistema multibeamGeoSwat+ 250kHz (Fig.15)
- Sistema MRU TSS Mod. DM-05
- Sonda SVP Valeport
- Sistema RTK-NavCom 2030M

- Software GS+ 3.6 per elaborazione dati

Ad ausilio delle misure batimetriche saranno utilizzati i dati mareografici (livello del mare) registrati dalla stazione del LOSEM, installata presso la banchina commerciale del porto di Gaeta, e dalla stazione della Rete Mareografica Nazionale (RMN) sita all'interno del Golfo di Gaeta. Saranno utilizzati i riferimenti cartografici della linea di riva su tre punti forniti dall'Autorità Portuale in recenti rilievi effettuati sul Molo Salvo d'Acquisto nel Porto Commerciale di Gaeta.

Saranno considerate anche le condizioni meteorologiche registrate dalla centralina dell'Autorità Portuale di Gaeta situata nel Porto Commerciale di Gaeta a circa 10 s.l.m e gestita dal LOSEM. I parametri considerati sono relativi alla direzione ed intensità del vento e della pressione atmosferica.



Fig.15 Sistema GeoSwath montato a bordo dell'imbarcazione

Al fine di studiare l'evoluzione nel tempo e nello spazio dei fondali oggetto di studio saranno elaborate delle mappe ad elevata risoluzione che permetteranno di confrontare i risultati delle diverse indagini effettuate. In questo modo sarà possibile studiare i processi di trasporto ed eventuale accumulo dei sedimenti.

All'interno di questa attività verranno effettuati due specifici rilievi che saranno condotti e verificati con l'ausilio di personale specializzato dell'Istituto Idrografico della Marina Militare, per ottenere la certificazione dei rilievi per la categoria di Ordine Speciale Nazionale, che è il livello massimo di

dettaglio richiesto per le aree portuali come definito dal “Disciplinare tecnico per la standardizzazione dei rilievi idrografici” (Tabella5).

Ordine	Speciale Nazionale	Speciale	1a	1b	2
Descrizione area	Aree portuali in cui il battente d'acqua sotto chiglia è critico e per <i>port management</i> .	Aree in cui il battente d'acqua sotto chiglia è critico.	Aree con profondità <100 m e battente d'acqua sotto chiglia meno critico ma in cui è possibile la presenza di ostacoli significativi per la navigazione in superficie.	Aree con profondità <100 m in cui il battente d'acqua sotto chiglia non è considerato problematico per il tipo di navigazione in superficie previsto in quella zona.	Aree con profondità generalmente >100 m in cui è ritenuta sufficiente una rappresentazione generica del fondale.
IOT massima consentita (Livello di confidenza 95%)	0.5 m	2 m	5 m + 5% della profondità	5 m + 5% della profondità	20 m + 10% della profondità
IVT massima consentita (Livello di confidenza 95%)	$a = 0.10 \text{ m}^{-1}$ $b = 0.0075$	$a = 0.25 \text{ m}^{-1}$ $b = 0.0075$	$a = 0.5 \text{ m}^{-1}$ $b = 0.013$	$a = 0.5 \text{ m}^{-1}$ $b = 0.013$	$a = 1.0 \text{ m}^{-1}$ $b = 0.023$
Ricerca totale sul fondo	Richiesta	Richiesta	Richiesta	Non richiesta	Non richiesta
Rilevamento di ostacoli	Ostacoli cubici > 0.5 m	Ostacoli cubici > 1 m	Ostacoli cubici > 2 m in profondità fino a 40 m; 10% della profondità oltre i 40 m	Non applicabile	Non applicabile
Interlinea massima raccomandata	Non indicata in quanto è richiesta la ricerca totale sul fondo	Non indicata in quanto è richiesta la ricerca totale sul fondo	Non indicata in quanto è richiesta la ricerca totale sul fondo	25 m o 3 x la profondità media, se il risultato è >25. Per LIDAR, batimetrico spazio fra spot 5 x 5 m	4 x profondità media
Posizione di ausili alla navigazione fissi e topografia significativa per la navigazione (Livello di confidenza 95%)	0.5 m	2 m	2 m	2 m	5 m
Posizione di linea di costa e topografia meno significativa per la navigazione (Livello di confidenza 95%)	1 m	10 m	20 m	20 m	20 m
Posizione media di ausili alla navigazione galleggianti (Livello di confidenza 95%)	2 m	10 m	10 m	10 m	20 m

Tab.5. Minimi standard per i rilievi idrografici, tabella tratta dal “Disciplinare tecnico per la standardizzazione dei rilievi idrografici” della Marina Militare

In occasione di tali campagne di misura verrà impiegata strumentazione ad elevatissima risoluzione (Fig.16), specificatamente scelta per raggiungere il livello di dettaglio richiesto. Il sistema selezionato è come di seguito composto:

- Ecoscandaglio Multibeam Reson T50-P;
- Sensore di Assetto Applanix POS MV Wave Master II SFF IP68;
- Software specifico Teledyne PDS Survey/Office per elaborazione dati.



Fig.16 Sistema Multibeam Reson T50-P con sistema di assetto Applanix POS MV Wave Master II SFF IP68

Tale attività consentirà di validare le misure morfo-batimetriche condotte, definendo con la massima accuratezza possibile i cambiamenti morfologici.

Tale attività risulta essenziale alla luce dei risultati fino ad ora ottenuti, in quanto essendo una porzione marina a scarso apporto solido è necessario operare con la massima precisione per effettuare una stima previsionale accurata volta ad una corretta gestione e pianificazione delle attività di movimentazione e per la sicurezza della navigazione. Ogni campagna sarà organizzata in due giornate, di cui la prima necessaria per il montaggio e la calibrazione della strumentazione e la seconda per l'acquisizione.

3.1.2. Elaborazione dati

I dati saranno elaborati mediante i software forniti in dotazione con i sistemi utilizzati, che permettono di interfacciare i dati acquisiti dall'ecoscandaglio *Multibeam* sia con le posizioni geografiche acquisite in continuo con il sistema di posizionamento ad elevata risoluzione *Real Time Kinematic (RTK)* che i movimenti dell'imbarcazione registrati dai sensori di movimento. I dati saranno ulteriormente corretti applicando i valori relativi all'oscillazione del livello del mare, registrati dalle centraline mareografiche, e i valori di velocità del suono registrati dalla sonda SVP durante le campagne di misura lungo la colonna d'acqua nel sito d'indagine. I dati subiranno quindi un processo di calibrazione (Fig.17) relativa ai parametri di *latency*, *roll*, *pitch* e *yaw*, che permetteranno di ricostruire la corretta geometria del sistema di acquisizione e allineare correttamente le singole tratte.

L'elaborazione delle singole strisciate sarà seguito dal processo di interpolazione, che, attraverso un'operazione di *gridding*, consentirà di ottenere delle mappe continue con una risoluzione orizzontale di 0.5x0.5 m.

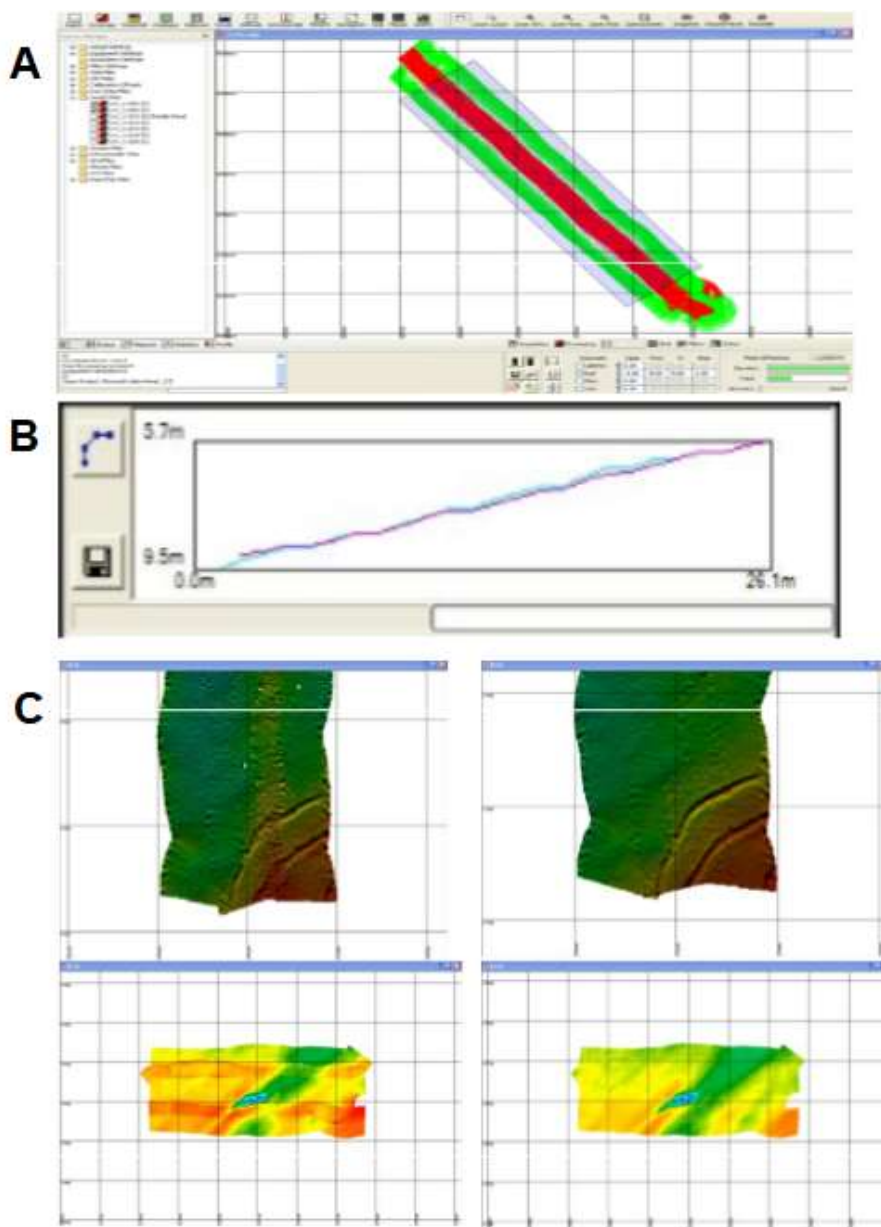


Fig.17 Operazione di calibrazione. A) tratte sovrapposte utilizzate per la calibrazione; B) Differenza tra i singoli profili dei due transetti sovrapposti; C) Elaborazione senza calibrazione (destra) e post-calibrazione (sinistra).

Le indagini morfologiche, oltre a comprendere l'evoluzione dei fondali nel tempo, permetteranno di testare la capacità da parte del sistema radar X-Band “*Remocean*”, installato dal LOSEM all'interno del porto commerciale di Gaeta, di misurare la morfologia sommersa del bacino attraverso la relazione che intercorre tra la propagazione del moto ondoso e la morfologia del fondale.

L'analisi morfologica di dettaglio permetterà inoltre di valutare i possibili effetti della nuova morfologia del bacino sui processi di propagazione del moto ondoso e del campo idrodinamico superficiale misurati mediante il sistema radar X-Band “*Remocean*”. Il progetto e i risultati che saranno ottenuti dalle attività integrative saranno di fondamentale importanza per fornire dati di input ad elevata risoluzione spaziale e temporale da inserire all'interno dei modelli numerici, al fine di ottenere simulazioni e scenari sempre più accurati nello studio della propagazione del moto ondoso verso costa, del campo idrodinamico, delle variazioni morfologiche del fondale e della dispersione di sostanze conservative e non-conservative all'interno dell'area di studio. Le misure morfologiche del fondale, effettuate su scala stagionale e annuale, andranno ad integrare il set di dati acquisiti nella zona e saranno inoltre utilizzati per validare i risultati ottenuti mediante i modelli numerici.

3.2.Dinamica dei profili verticali dei flussi di sedimentazione e dei metalli in traccia

Durante l'attività verrà effettuata l'analisi dei profili verticali del flusso di sedimentazione totale lungo un intero anno, allo scopo di definire i processi sedimentari che caratterizzano il Golfo di Gaeta, discretizzando così la dinamica delle componenti inorganiche e organiche.

Il progetto si compone delle seguenti fasi:

1. Installazione di una stazione di misura deposimetrica ubicata nell'area che è stata oggetto di escavo;
2. Analisi del sedimento raccolto con le trappole per ottenere il flusso totale, la concentrazione dei metalli in traccia e il contenuto organico;
3. Integrazione di n.11 punti di prelievo del sedimento superficiale rispetto a quelli già previsti nelle attività di monitoraggio ed integrazione delle analisi granulometriche, della frazione organica e dei nutrienti;

I risultati ottenuti dallo studio saranno analizzati attraverso il supporto delle registrazioni della centralina meteorologica e del radar costiero situati nel Golfo di Gaeta. Inoltre, la dinamica delle componenti del flusso di sedimentazione (frazione organica e inorganica) saranno messe in relazione

con la dinamica della clorofilla *a* e del solido sospeso acquisite dal sistema di monitoraggio già posto in essere nel Golfo di Gaeta. Di seguito sono descritte nel dettaglio le diverse fasi che compongono il progetto di ricerca.

3.2.1. Stazione di misura deposimetrica per la misura dei flussi di sedimentazione verticale

All'interno del Golfo di Gaeta, nel bacino prospiciente il Molo Salvo d'Acquisto, verrà posizionata una stazione di misura per l'analisi del flusso totale di sedimentazione del particolato organico, inorganico e dei metalli in traccia ad una profondità di circa 12 metri (Fig.18).

L'installazione della stazione di misura avverrà, previo rilascio delle autorizzazioni da parte delle Autorità competenti, mediante il supporto di Operatori Tecnici Subacquei (OTS) così come le operazioni di installazione e prelievo delle trappole per ogni singola campagna.

Il flusso totale di sedimentazione verrà misurato a sei differenti quote lungo la colonna d'acqua (tra 0.3 m e 9 m dal fondale) attraverso l'utilizzo di trappole di sedimento (Fig.18). Ad ogni quota verranno posizionate due repliche utili sia alla definizione dell'errore sia per permettere di collezionare abbastanza materiale per le analisi chimiche. Al fine di minimizzare il rischio di risospensione all'interno delle trappole, queste saranno di forma cilindrica con un rapporto di aspetto ($\text{Altezza} = 0.035 / \text{Lunghezza} = 0.33$) uguale a 9.4. Questo approccio, in accordo con le indicazioni ottenute dalla letteratura (Bloesch J. and N. M. Burns, 1980; Blomqvist S. and Hakanson, L. 1981), permetterà di ottenere la massima performance di campionamento delle particelle, minimizzando gli errori di sottostima e sovrastima del materiale raccolto. Le prime due quote, rispettivamente a 0.3 e 0.6 dal fondo, verranno posizionate su picchetti di ferro di 1cm di diametro, mentre le restanti 4 quote saranno posizionate lungo un cavo su cui sarà posizionata la sequenza di trappole. Il cavo sarà ormeggiato attraverso un corpo morto, costituito da un blocco di cemento di 1 ton, che sarà mantenuto verticale attraverso una boa di spinta di 80 l di volume. Il cavo è suddiviso in moduli separati, che saranno collegati attraverso un sistema che permetterà di mantenere le trappole in posizione verticale anche se la catena dovesse essere inclinata dai movimenti del mare.

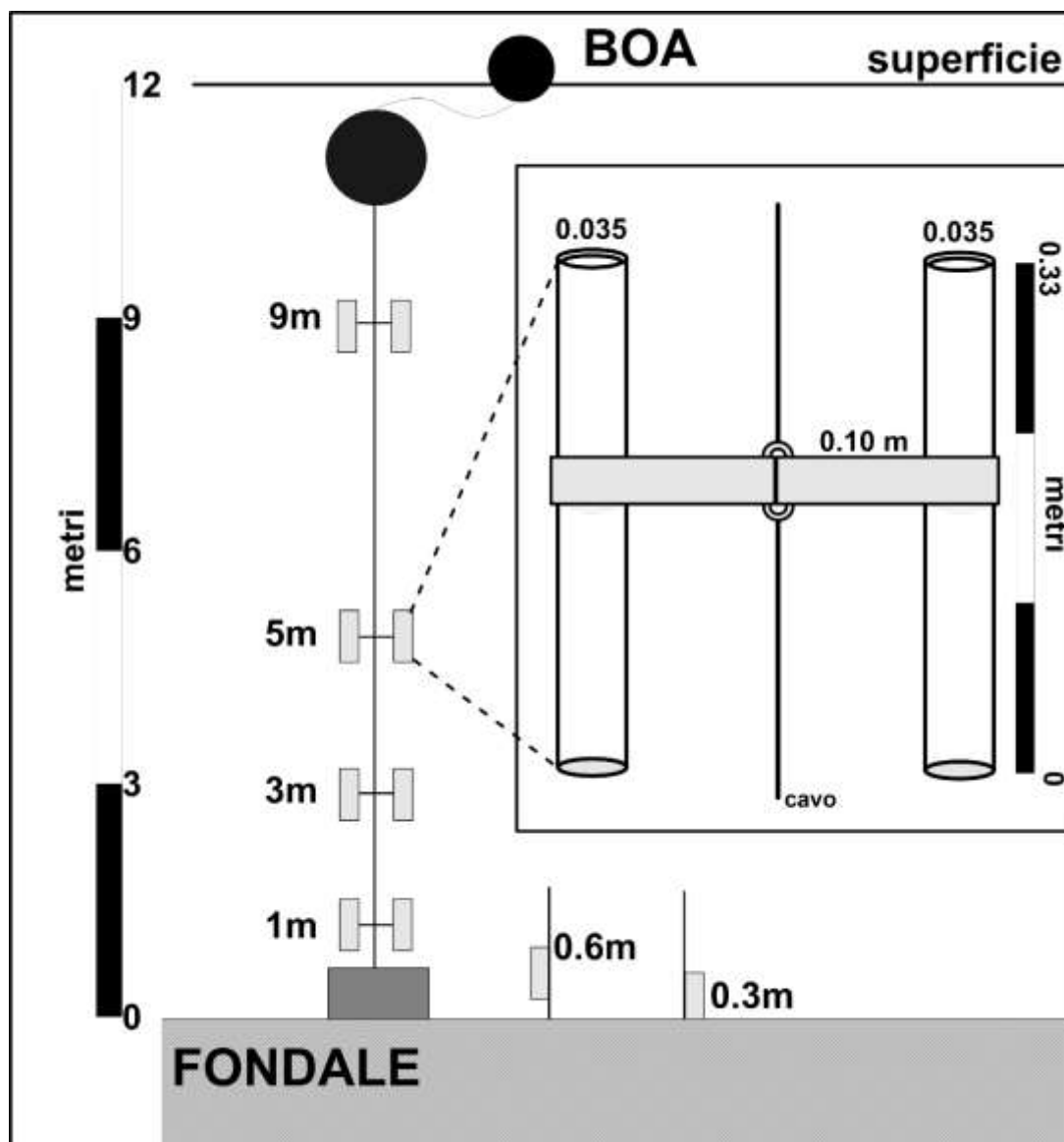


Fig.18 Schema della stazione di misura deposimetrica e delle trappole di sedimento

Le trappole saranno inserite nel supporto e bloccate in modo da impedirne la perdita. Si prevedono un totale di n.12 campagne estese per un intero anno con cadenza mensile ed ogni campagna avrà una durata massima 2 settimane, tempo massimo per evitare una degradazione della sostanza organica superiore al 10% (Bloesch and Burns, 1980), in condizioni di massimo tasso di degradazione (estate).

3.2.2. Analisi del sedimento raccolto dalla stazione deposimetrica

Il materiale collezionato dalle trappole verrà analizzato per ottenere la massa totale, discretizzando la componente organica da quella inorganica, e per determinare i metalli in traccia. La massa particolata totale sarà determinata attraverso filtrazione su filtri GF/F da 47 mm e successivamente il materiale filtrato sarà analizzato per la determinazione dei metalli in traccia e della componente organica. Dalla massa particolata campionata con le trappole verrà effettuata una stima del flusso verticale di sedimentazione alle varie quote, considerando il rapporto di superficie della trappola su 1m^2 e il tempo di immersione.

Il flusso totale di sedimentazione (F_t) è composto dal flusso primario di sedimentazione (F_p) ed il flusso di risospensione del sedimento (F_r) (Pejrup et al., 1996) (Fig.19). Il flusso primario è definito come il particolato di sedimento, che include la materia terrigena, la materia organica morta autoctona, o i frammenti di gusci e scheletri che non si sono ancora depositi sul fondo del sito di misura. Il flusso risospeso consiste invece nelle stesse componenti ma che si sono già deposte precedentemente una o più volte. Il processo di risospensione può essere indotto dal moto ondoso (Lesht et al., 1980; Aalderlink et al., 1984), dalle onde interne (Cachione & Southard, 1974) o dalle correnti (Sanford et al., 1991). In area costiera, il processo di risospensione è generato maggiormente da onde e correnti di marea mentre ad alte profondità da correnti di fondo.

Il flusso verticale totale verso il basso (F_t) è la somma di F_p e F_r , e il tasso lordo di deposizione è considerato come F_t alla superficie del sedimento. Il tasso di sedimentazione (A) invece è il quantitativo di sedimento permanentemente depositato al di sotto dello strato di fondo mescolato.

Le componenti del flusso verticale totale (risospensione e sedimentazione) possono essere derivate registrando i flussi a diverse quote dal fondo (Hakanson et al. 1989; Valeur et al., 1994). L'approccio si basa sul principio che la concentrazione del materiale risospeso declini esponenzialmente all'aumentare della distanza dal fondale che ne è la sorgente (Ichiye, 1966; Hakanson et al., 1989; Valeur, 1994; Pejrup et al., 1996).

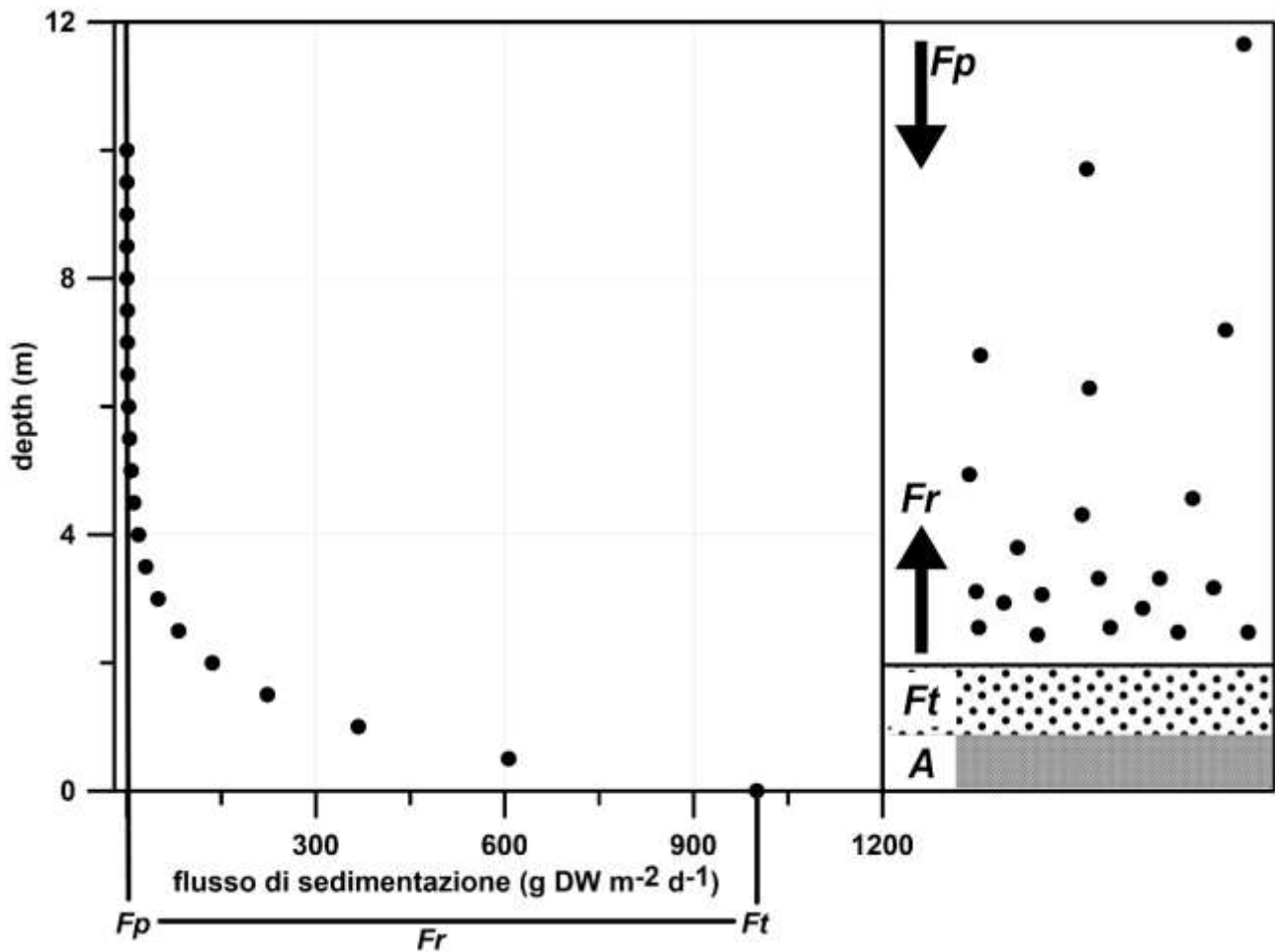


Fig.19 Schema dei processi sedimentari dove risospensione (Fr) e sedimentazione primaria (Fp) contribuiscono al flusso totale di sedimentazione (Ft). Il bilancio dei processi sedimentari determina il tasso di deposizione (A).

La variazione di Ft con l'altezza dal fondo dovrebbe corrispondere ad una funzione negativa esponenziale della forma:

$$Ft = a \exp^{-bh}$$

Dove Ft è il flusso totale di sedimentazione ($\text{gDW m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e h è la distanza dal fondo (cm). La presenza di risospensione è determinata dalla significatività statistica con il modello. Ft alla superficie del sedimento corrisponde al flusso totale di sedimentazione (Ft). Fp corrisponde al valore asintotico del declino esponenziale di Ft con l'incremento della distanza dal fondo che fornisce una stima del

tasso primario di sedimentazione (F_p). Il flusso verso il basso del materiale risospeso (F_r) è quindi determinato dalla differenza tra F_t e F_p .

Tale approccio permette di analizzare i processi sedimentari discretizzando la componente risospesa da quella di sedimentazione primaria. Il bilancio tra la sedimentazione e la risospensione misurati con un intervallo mensile permetteranno di ottenere una stima dettagliata dei tassi deposizionali annuali alla nuova quota batimetrica raggiunta con il dragaggio, analizzando nel dettaglio il contributo delle componenti del flusso deposizionale totale.

Attraverso l'analisi dei metalli in traccia e della frazione organica sarà possibile determinarne i profili dei flussi verticali. La valutazione dell'arricchimento dei metalli in traccia alle varie quote deposimetriche permetterà di definire se il flusso dei contaminanti è legato a processi di risospensione o sedimentazione. L'analisi della materia organica permetterà di avere informazioni importanti riguardo la provenienza del materiale catturato e delle possibili relazioni con i contaminanti.

Successivamente alla filtrazione e alla determinazione della massa totale il campione verrà sottoposto alle seguenti analisi: analisi granulometrica; Materia Organica Totale (TOM); Carbonio Organico Totale (TOC); Contenuto di Azoto Totale (TN); Contenuto di Fosforo Totale (TP); misura della concentrazione dei metalli in traccia (As , Cd , Pb , Ni , Zn). Le analisi saranno ripetute a tutte le quote della stazione deposimetrica in tutte le campagne di misura. Come testimoniato ampiamente in letteratura (Rognerud et al., 2000; a Sreekanth et al., 2015; Cowie, 2005) c'è una significativa corrispondenza tra i livelli di arricchimento dei metalli pesanti e le caratteristiche tessiturali e di contenuto organico. In particolare, l'entità della produzione primaria ed i flussi di materia organica derivanti dagli input terrestri determina il rilascio di particelle nella colonna d'acqua che regolano fortemente la complessazione dei metalli in traccia nell'acqua e nel sedimento.

I rapporti TOC/TN sono comunemente usati per differenziare la materia organica di origine terrestre e marina (Perdue and Koprivnjak, 2007). Il rapporto indica se la sorgente di materia organica è autoctona o alloctona. Se l'origine della materia organica è da una sorgente terrestre, il rapporto del TOC/TN è generalmente maggiore di 20.

I dati misurati saranno fondamentali per la validazione del modello numerico di dispersione del sedimento e dei contaminanti ambientali.

3.3. Integrazione delle indagini chimico-fisiche dei sedimenti superficiali

Al fine di definire la dinamica del particolato organico e inorganico risulta necessario integrare il piano di campionamento e le analisi già condotte all'interno del progetto previsto dall'Atto Aggiuntivo all'Addendum n.4, al fine di porre in relazione le variazioni spaziali delle caratteristiche fisiche e chimiche dei sedimenti superficiali in relazione alle sorgenti del particolato organico e inorganico. Il piano di campionamento esistente sarà integrato con n.11 stazioni che si estendono dalla foce del Fiume Garigliano al Golfo di Gaeta, tra le quote batimetriche dei 5m e dei 35m (Fig.20). Le stazioni sono state posizionate con un criterio che tiene conto delle forzanti e dei processi che possono influenzare la dinamica delle particelle organiche e inorganiche. In particolare, si è tenuto conto dei risultati fino ad ora ottenuti dalle attività di ricerca svolte nell'area di studio e in particolare è stato pianificato sulla base del gradiente lungo riva, che caratterizza sia i processi idrodinamici che di distribuzione del solido sospeso e della Clorofilla *a*.

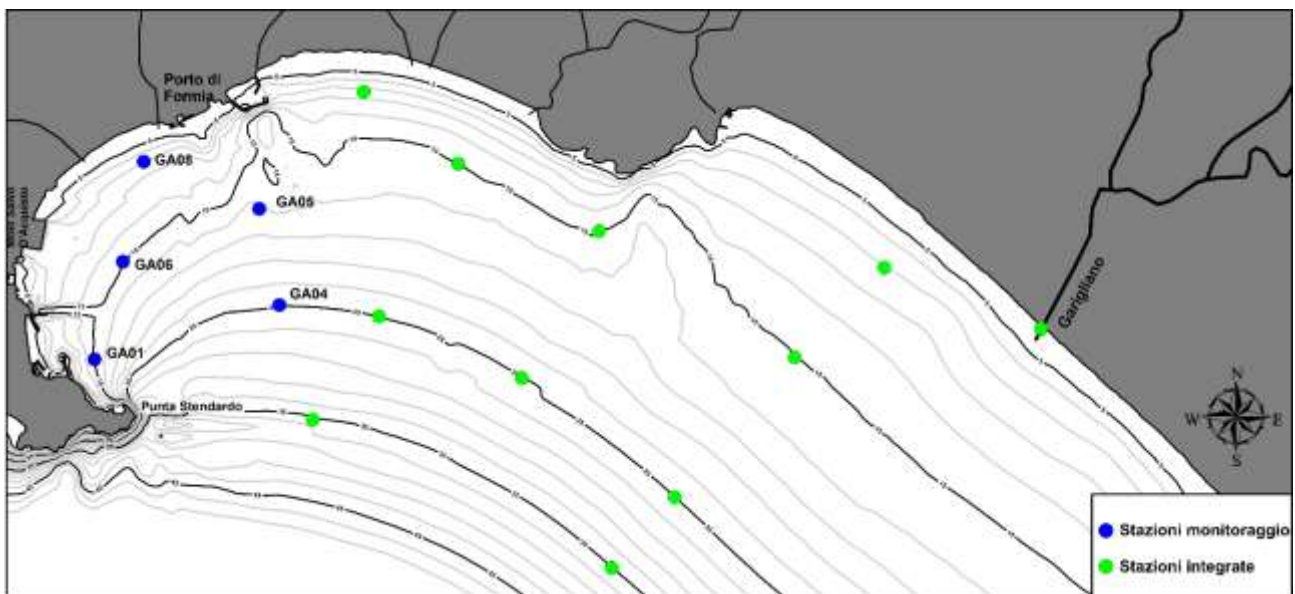


Fig.20 Piano di campionamento del sedimento superficiale

I campioni di sedimento superficiale saranno prelevati con una benna Van Veen e le analisi condotte saranno le stesse previste per il sedimento raccolto dalle trappole e dettagliate nel paragrafo precedente (par 3.2.2.).

3.4. Analisi modellistica della dispersione del sedimento dragato e dei contaminanti ambientali

L'analisi del tasso di deposizione e della dispersione del materiale in sospensione nella colonna d'acqua saranno stimati nell'intero Golfo di Gaeta attraverso il DELFT-3D, che è un sistema di modelli ampiamente utilizzato per simulare il trasporto di particelle conservative (sedimento, talee di piante marine, etc) e non conservative (fitoplancton, batteri patogeni, etc.). Il sistema modellistico è costituito dal modulo DELFT3D-FLOW (Lesser et al., 2004) che riproduce il campo idrodinamico indotto dal vento, dal modello di moto ondoso SWAN (Booij et al., 1999) che simula la propagazione dell'onda verso costa e dal modulo DELFT3D-WAQ che descrive i processi associati al trasporto di particelle conservative e non conservative. L'attività integrativa di ricerca che si intende svolgere per implementare il sistema modellistico di previsione degli impatti su specie e habitat marino-costieri consentirà di analizzare la dispersione del sedimento e dei contaminanti ad esso associati, che è condizionata dalle correnti marine e dal moto ondoso, nonché dai processi di sedimentazione e risospensione legati alla tipologia del materiale.

I risultati delle simulazioni saranno validate con i dati raccolti per mezzo delle campagne di misura sui flussi sedimentari.

3.4.1. Modello idrodinamico DELFT3D-FLOW

Il modello idrodinamico che verrà utilizzato per effettuare le simulazioni delle correnti marine è il DELFT3D-FLOW che risolve le equazioni shallow-water nelle tre direzioni. Il sistema di equazioni comprendono le equazioni orizzontali del moto, l'equazione di continuità, quella del trasporto e l'equazione di chiusura della turbolenza. L'equazione della quantità di moto nella direzione z è ridotta all'equazione idrostatica in quanto l'accelerazione verticale è assunta essere troppo piccola paragonata all'accelerazione di gravità. Questo consente al modello DELFT3D di predire il flusso in diverse aree come in domini dove è valida la condizione shallow-water, zone costiere, estuari, lagune, fiumi e laghi. Nel modello vengono utilizzate per il piano orizzontale coordinate cartesiane o coordinate geografiche, mentre nel piano verticale il sistema σ il quale si basa su un numero costante di piani verticali (Fig21).

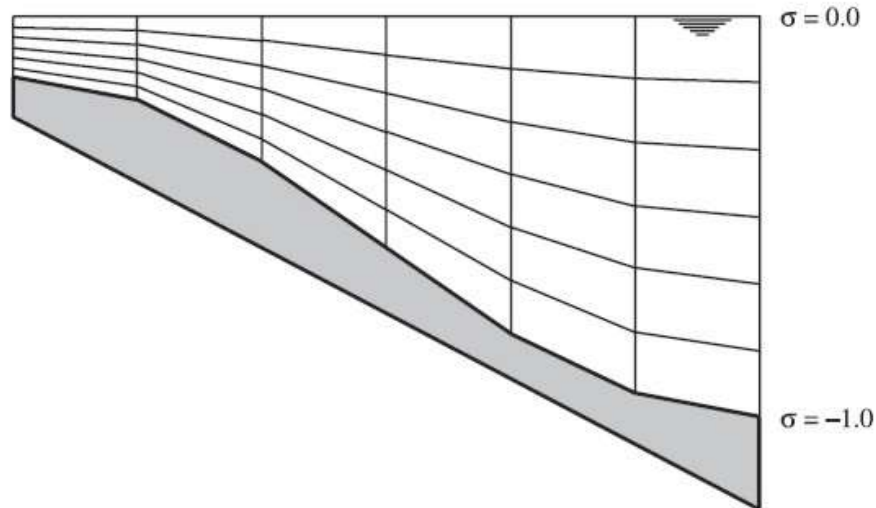


Fig.21. Un esempio di griglia verticale consistente di sei strati σ di uguale spessore.

3.4.2. Modello di moto ondoso SWAN

Gli effetti dell'onda possono essere inclusi nel modello idrodinamico DELFT3D-FLOW utilizzando i risultati del modulo DELFT3D-WAVE che simula la propagazione del moto ondoso verso costa. Le variabili calcolate dal modello DELFT3D-WAVE come l'altezza d'onda, il picco di periodo nello spettro, la direzione dell'onda, il flusso di massa, ecc. vengono letti dal modello DELFT3D-FLOW che calcola le velocità delle correnti nelle tre direzioni prodotte dal moto ondoso. Le simulazioni sulla propagazione delle onde possono essere effettuate utilizzando modelli di seconda generazione come HISWA (Holthuijsen et al., 1989) o modelli di terza generazione come SWAN (Holthuijsen et al., 1993). Un pratico vantaggio del modello SWAN è quello di poter girare sulla stessa griglia curvilinea usata per il modello idrodinamico.

Nelle situazioni in cui il livello dell'acqua, la batimetria o il campo di velocità cambiano significativamente durante la simulazione del modello DELFT3D-FLOW, sarebbe opportuno richiamare più volte il modello DELFT3D-WAVE. Il campo d'onda computato può quindi essere aggiornato tenendo conto del cambiamento di profondità e delle velocità della corrente. Questo tipo di funzione è resa possibile grazie al processo di “steering” che richiama in maniera alternata il modello idrodinamico e quello di moto ondoso.

Nella zona costiera, l'azione dell'onda può influenzare la morfologia per diverse ragioni come:

(1) l'azione dell'onda dovuta al fenomeno di breaking (attraverso i gradienti di radiation stress) è modellata come uno shear stress sulla superficie del mare. Il gradiente di radiation stress è modellato usando l'espressione semplificata di Dingemans et al. (1987), dove il contributo legato all'energia dell'onda viene trascurato. La sua espressione è data da:

$$\vec{M} = \frac{D}{\omega} \vec{k}$$

In cui M è la forzante dovuta ai gradienti di radiation stress (N/m^2), D è la dissipazione dovuta al frangimento dell'onda (W/m^2), ω è la velocità angolare (rad/s) e k è il numero d'onda (rad/m).

(2) L'effetto dello shear stress al fondo è preso in considerazione dalla parametrizzazione di Soulsby et al. (1993).

(3) Il flusso di massa indotto dall'onda è incluso ed è corretto per gli spostamenti di Stokes non uniformi verticalmente.

(4) La produzione di turbolenza addizionale dovuta alla dissipazione dell'onda al fondo e al frangimento è incluso come termine nel modello di chiusura turbolenta.

(5) La corrente indotta dall'onda vicino al fondo è modellata come uno shear stress addizionale agente attraverso lo spessore dello strato del *boundary layer* al fondo.

I processi (3), (4) e (5) sono stati inclusi di recente nel DELFT3D-FLOW e sono fondamentali se l'effetto delle onde sul flusso viene correttamente rappresentato nelle simulazioni 3D. Tali fenomeni risultano importanti anche nei modelli di trasporto in prossimità della costa.

3.4.3. Modello di dispersione del materiale in sospensione e dei contaminanti DELFT3D-WAQ

DELFT3D-WAQ è un modello di trasporto euleriano che risolve l'equazione di avvezione-diffusione-reazione sulla stessa griglia di calcolo utilizzata per il DELFT3D-FLOW. E' in grado di simulare un'ampia varietà di processi fisici, chimici e biologici come:



- sedimentazione e risospensione
- ri-areazione dell'ossigeno
- crescita e mortalità delle alghe
- mineralizzazione della sostanza organica
- (de)nitrificazione
- assorbimento dei metalli pesanti
- volatilizzazione dei micro-inquinanti organici
- sedimentazione e risospensione di sostanze conservative e non-conservative

In questo progetto verranno simulati i processi di sedimentazione e risospensione del sedimento e i processi di accumulo dei metalli pesanti.

Nel seguente schema vengono riportati i parametri e le variabili che devono essere definite nel modello per stimare i suddetti processi.

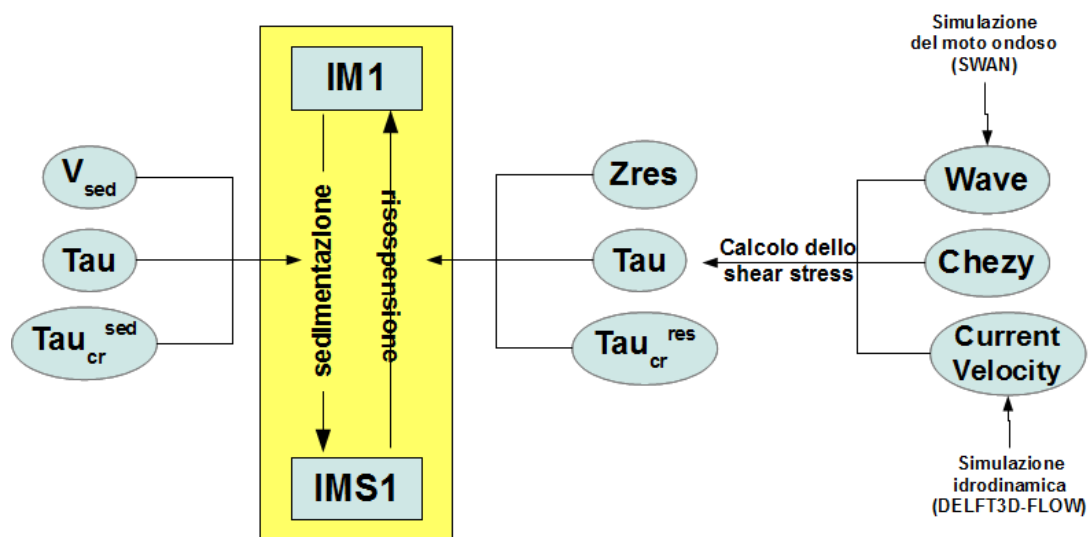


Fig.22. Schema che identifica le variabili e i parametri di input del modello DELFT3D-WAQ per riprodurre i processi di sedimentazione e risospensione (zona gialla) del sedimento.

La concentrazione del sedimento sospeso nella colonna d'acqua (*IM1*) decresce quando avviene la sedimentazione, mentre al contrario aumenta quanto il materiale che si trova sul fondo (*IMS1*) subisce il processo di erosione, alternativamente chiamata risospensione. Il valore delle variabili *IM1* e *IMS1* è determinato dalle formulazioni di Partheniadas (1962) e Krone (1962) che si basano sul bilancio di massa.

La sedimentazione di *IM1* dipende dallo shear stress ambientale (*Tau*) e dallo shear stress critico per la sedimentazione (Tau_{cr}^{sed}). Se *Tau* risulta minore di Tau_{cr}^{sed} si verifica il processo di sedimentazione:

$$Sedflux = P_{sed} \times V_{sed} \times (IM1)$$

$$P_{sed} = \max \left(0, 1 - \frac{Tau}{Tau_{cr}^{sed}} \right)$$

dove *Sedflux* è il flusso di sedimento ($g/(d \cdot m^2)$), P_{sed} è la probabilità di sedimentazione, V_{sed} è la velocità di sedimentazione (m/d), *IM1* è la concentrazione della materia inorganica (g/m^3), *Tau* è lo shear stress ambientale (N/m^2) e Tau_{cr}^{sed} è lo shear stress critico per la sedimentazione (N/m^2).

La risospensione dipende invece dallo shear stress ambientale e dal valore del critical shear stress per la risospensione (Tau_{cr}^{res}). Solo quando *Tau* è maggiore di Tau_{cr}^{res} si verifica il processo di risospensione:

$$Risflux = P_{res} \times Z_{res}$$

$$P_{res} = \max \left(0, \frac{Tau_{cr}^{res}}{Tau} - 1 \right)$$

ove *Risflux* è il flusso di risospensione ($g/(m^2 \cdot d)$), P_{res} è la probabilità di risospensione, Z_{res} è il tasso di risospensione di ordine 0 ($g/(m^2 \cdot d)$) e Tau_{cr}^{res} è lo shear stress critico per la risospensione (N/m^2).

Lo shear stress ambientale (*Tau*) rappresenta la forza che agisce sul sedimento attraverso l'azione della corrente e del moto ondoso.

$$Tau = Tau_{veloc} + Tau_{waves}$$

$$Tau_{veloc} = f(Vel, Chezy)$$

$$Tau_{waves} = f(W, Depth, Fetch)$$

dove Tau_{veloc} indica lo shear stress esercitato dalle correnti marine (N/m^2), Tau_{waves} è lo shear stress esercitato dalle onde (N/m^2), *Vel* è la velocità del campo idrodinamico (m/s) calcolato con il modello DELFT3D-FLOW, *Chezy* è il coefficiente di Chezy ($m^{0.5}/s$), *W* è la velocità del vento (m/s), *Depth* è la profondità (m) e *Fetch* rappresenta il tratto di mare su cui il vento spira con velocità e direzione

costante (m). W, Depth e Fetch sono alcune delle condizioni di input del modello SWAN che calcola la propagazione del moto ondoso verso costa.

Per riprodurre i processi di accumulo dei metalli in traccia, il modello tiene conto dei processi di assorbimento degli ioni metallici con le particelle organiche e inorganiche in sospensione nella colonna d'acqua. Il parametro che contiene l'informazione relativa alla capacità di cattura dei metalli in traccia da parte del materiale sospeso è la Capacità di Scambio di Cationi del sedimento (dall'inglese CEC). Le particelle più grandi hanno un minore rapporto superficie peso e conseguentemente minori quantità di luoghi di legame per unità di peso. L'ammontare di metalli assorbiti per unità di peso di sedimento dipende dal rapporto degli ioni metalli con gli ioni concorrenti. L'assorbimento è linearmente proporzionale alla concentrazione dei metalli disciolti e viene calcolato attraverso un coefficiente di proporzionalità chiamato coefficiente di partizione. Quest'ultimo dipende dalla presenza di altri ioni e generalmente diminuisce al diminuire del pH ed è più basso per l'acqua di mare con molti ioni concorrenti. L'affinità dei metalli pesanti per le diverse frazioni di sedimento è differente ed ogni affinità può essere specificata nel modello DELFT3D-WAQ. È possibile aggiustare il coefficiente di assorbimento per ogni metallo nell'acqua e nei sedimenti.

La relazione che lega la concentrazione dei metalli nei sedimenti con quella presente nella colonna d'acqua è la seguente:

$$C_{metal,particulate} = K_d C_{sediment} C_{metal,dissolved}$$

Lo schema in figura 23 mostra alcuni dei processi del modello per un tipo di metallo pesante come ad esempio il Piombo (*Pb*). I processi sono simili per gli altri metalli ma cambiano i coefficienti di partizione

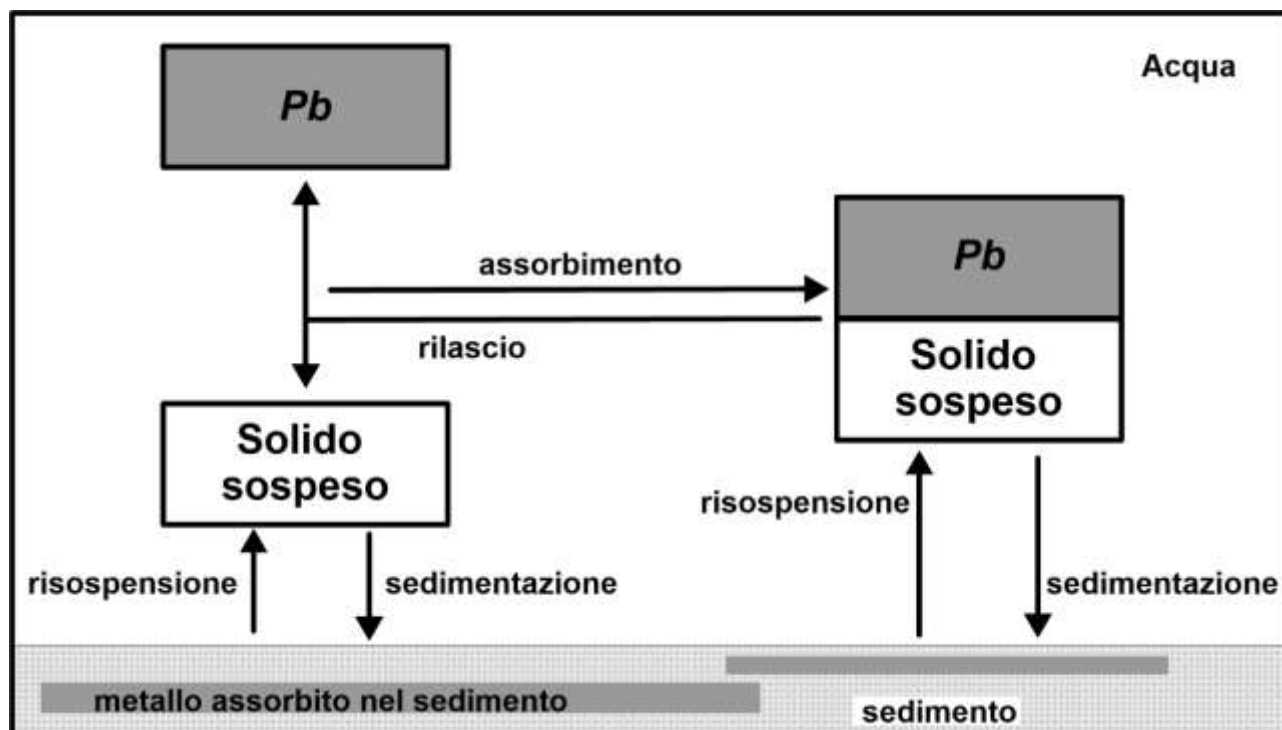


Fig.23. Schema che identifica le variabili e i parametri di input del modello DELFT3D-WAQ per riprodurre i processi di sedimentazione e risospensione (zona gialla) del sedimento.

Nello schema manca il processo di complessazione con il carbonio organico disciolto. Nel rettangolo grigio c'è il piombo disciolto, nel rettangolo bianco il solido sospeso totale (comprensivo anche della frazione organica). Il rettangolo grigio/bianco rappresenta la fase particolata del piombo. I metalli che possono essere simulati sono: *As*, *Cd*, *Cu*, *Pb*, *Ni*, *Zn*, nella colonna d'acqua e nel sedimento. Questi metalli hanno un'affinità per il sedimento e la materia in sospensione, che varia in funzione della frazione granulometrica.

3.4.4. Set-up delle simulazioni

Per analizzare la dispersione del sedimento e dei contaminanti ambientali, al fine di studiare i processi di accumulo, verranno effettuate una serie di simulazioni strutturate nel modo seguente:

- inizialmente verranno riprodotte con il modello DELFT-3D FLOW diverse condizioni intercorse durante le misure con il radar costiero, al fine di ottenere i parametri di calibrazione modellistici utili a validare i risultati del modello idrodinamico;

- Successivamente le condizioni intercorse durante le campagne di misura effettuate con la stazione deposimetrica verranno simulate con il modello DELFT3D WAQ in modo da ottenere i parametri di calibrazione utili alla validazione del modello di dispersione del sedimento e dei contaminanti.

La messa a punto dei modelli permetterà di simulare successivamente delle ipotesi di scenario utili alla costruzione di un sistema previsionale delle potenziali aree di accumulo dei sedimenti e dei contaminanti ambientali. Gli scenari riprodotti prenderanno in considerazione la variabilità del clima meteomarinico dell'area di studio, l'apporto solido dall'entroterra e l'apporto solido in presenza di movimentazioni nel bacino del Golfo di Gaeta.

4. TEMPI DEL PROGETTO

In questo paragrafo è dettagliata la cadenza temporale con cui verranno svolte le diverse attività previste dal presente progetto di ricerca. Le attività di misura si esauriranno nell'arco di un anno mentre l'analisi dei dati e la redazione della relazione conclusiva entro i tre mesi dal completamento delle misure. In figura 24 è riportata la *timeline* delle fasi del progetto schematizzata attraverso il *Gantt*.

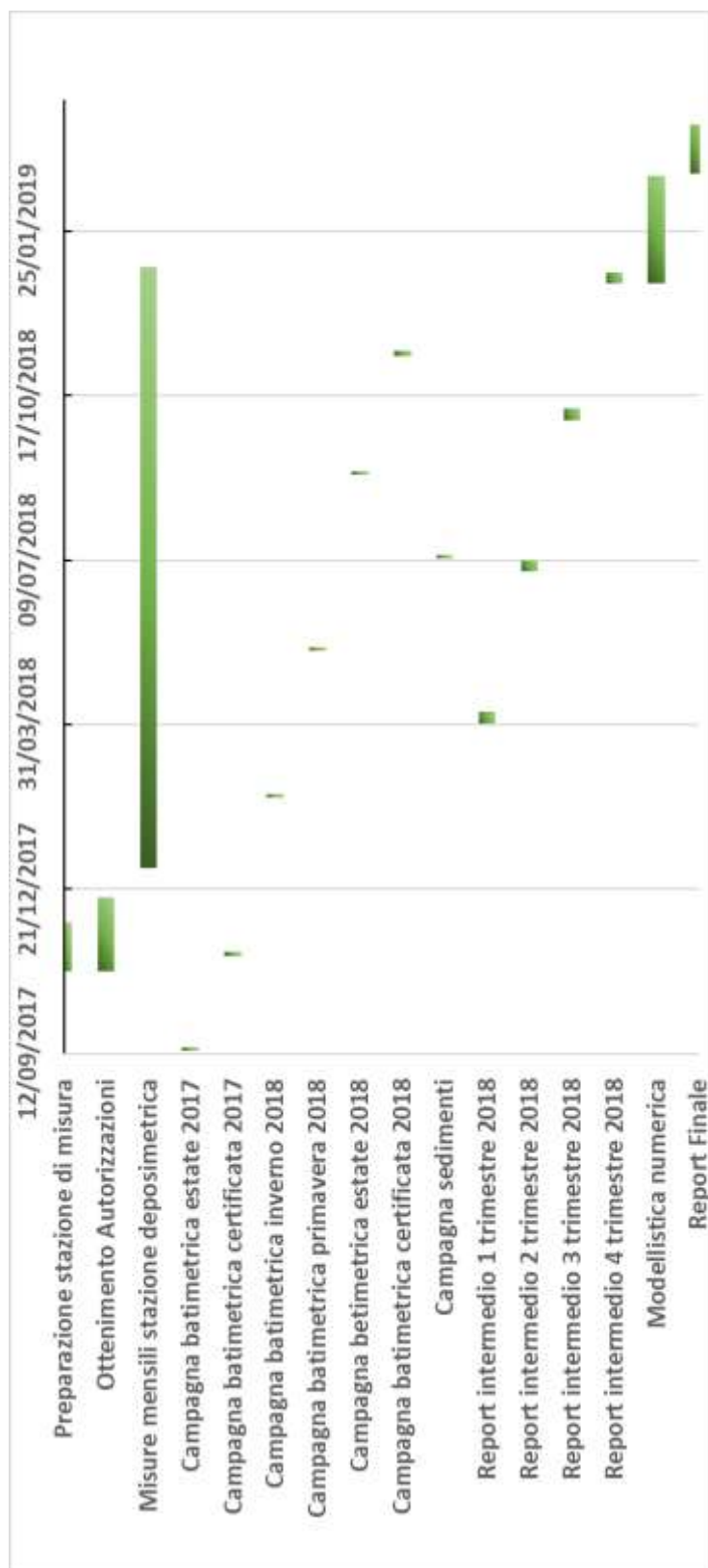


Fig.24 Gantt del progetto

5. RISULTATI SCIENTIFICI DEL PROGETTO DI RICERCA

I dati raccolti attraverso il presente progetto saranno oggetto di approfondite elaborazioni, che permetteranno di studiare una serie di fenomeni e processi nell'area del Golfo di Gaeta.

In particolare le tecnologie innovative e le nuove piattaforme disponibili permetteranno di approfondire e studiare i processi dinamici ad una scala spaziale fino ad ora mai utilizzata in questa area di studio.

Il radar costiero permetterà di acquisire dati sull'intensità e la direzione delle correnti marine che saranno di fondamentale importanza per lo sviluppo e la validazione di un modello numerico finalizzato alla ricostruzione del campo idrodinamico. Sarà possibile testare la sensibilità del sistema radar nell'osservazione di fenomeni oceanografici a micro-scala ed evidenziare variazioni del campo idrodinamico a seguito delle operazioni di escavo. Inoltre, si testerà la capacità del sistema radar di misurare la morfologia sommersa e confrontare le quote rilevate con le acquisizioni ad alta precisione.

Le misure permetteranno di analizzare i processi sedimentari che governano il flusso di sedimentazione delle particelle organiche e inorganiche. In particolare si analizzerà la dinamica che governa i processi di accumulo dei metalli in traccia.

I dati raccolti saranno fondamentali per lo sviluppo e la validazione di un modello matematico che simuli la dispersione e la deposizione del sedimento e dei contaminanti ambientali nel settore costiero del Golfo di Gaeta.

Le attività permetteranno di quantificare il contributo relativo della materia organica di origine continentale e marina attraverso il supporto delle indagini oceanografiche svolte mediante le acquisizioni satellitari e delle sonde multi-parametriche. I risultati combinati con una stima indicativa della mineralizzazione della sostanza organica nel sedimento permetterà di chiarire i processi di riciclo e ritenzione del carbonio organico e dei nutrienti nei sedimenti costieri di fondamentale importanza per l'equilibrio degli ecosistemi bentonici.

BIBLIOGRAFIA

- Aalderlink, R. H., Lijklema, L., Breukelman, J., Raaphorst, W. v. & Brinkman, A. G., 1984. Quantification of wind induced resuspension in a shallow lake. *Water Science Technology* 17, 903–914.
- APAT-ICRAM, 2007. Manuale per la movimentazione di sedimenti marini. Istituto Superiore per Protezione e Ricerca Ambientale.
- Bloesch, J., and Burns, N. M., 1980. A critical review on sediment traps in aquatic environments. *Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie* 42, 15-55.
- Blomqvist, S., and Hakanson, L., 1981. A review on sediment traps in a quatic environments. *Archiv fur Hydrobiologie* 91-1.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. *J. Geophys. Res.* 104, 7649-7666.
- Brondi A., Ferretti O., Papucci, C., 1983. Influenza dei fattori geomorfologici sulla distribuzione dei radionuclidi. Un esempio: dal M. Circeo al Volturno. Atti del convegno Italo-francese di radioprotezione. Firenze, 30 Maggio – 1 Giugno 1983.
- Cacchione, D. A. & Southard, J. B. 1974 Incipient sediment movement by shoaling internal gravity waves. *Journal of Geophysical Research* 79, 2237–2242.
- Cowie, G., 2005. The biogeochemistry of Arabian Sea surficial sediments: a review of recent studies. *Prog. Oceanogr.* 65, 260–289.
- Dingemans, M.W., Radder, A.C., De Vriend, H.J., 1987. Computation of driving forces of the wave induced currents. *Coastal Engineering* 11, 539-563.
- Hakanson L., S. Floderus and M. Wallin, 1989. Scdiment traps assembles - a methodological description. *Hydrobiologia*, 176/177, 481-490.
- Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., 1989. A prediction model for stationary, short crested waves in shollow water with ambient current. *Coastal Engineering* 13, 23-54.

Holthuisen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., 1993. A spectral wave model for the coastal zone. Proceeding of the 2nd International Symposium on the Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, pp. 630-641.

Ichiye, T. 1966 Turbulent diffusion of suspended particles near the ocean bottom. Deep-Sea Research 13, 679–685.

Istituto Idrografico della Marina. “Disciplinare Tecnico per la standardizzazione dei rilievi idrografici”, Genova, 2016.

Krone, R., 1962. Flume studies of transport of sediment in estuarial shoaling processes (Final report). Tech. rep., University of California, Hydraulics Engineering and Sanitary Engineering Laboratory, Berkeley, USA. 148, 151, 152, 271.

Lesht, B. M., Clarke, T. L., Freeland, G. L., Swift, D. J. P. & Young, R. A., 1980. An empirical relationship between the concentration of resuspended sediment and near-bottom wave-orbital velocity. Geophysical Research Letters 2, 1049–1052

Lesser, G.R., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. Coastal Eng. 51, 883-915.

Marcelli M., Paladini de Mendoza F., Bonamano S., 2013. “Studio del clima ondoso nel Golfo di Gaeta attraverso l'analisi degli eventi estremi e l'uso dei modelli numerici”. REL-119MON-0513-AP.

Partheniades, E., 1962. A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, USA. 182 p. 148, 152, 271.

Pejrup M., Valeur J., Jensen A., 1996. Vertical fluxes of particulate matter in Aarhus Bight, Denmark. Continental Shelf Research, 16, (8), 1047-1064.

Perdue, E.M., Koprivnjak, J.F., 2007. Using the C/N ratio to estimate terrigenous inputs of organic matter to aquatic environments. Estuar. Coast. Shelf Sci. 73, 65–72.

Piermattei V., Paladini de Mendoza F., Marcelli M. (2015). “Studio dei potenziali effetti delle attività di dragaggio sulle aree sensibili presenti all'interno del Golfo di Gaeta”. REL-235MON- 1015-AP.

Sreekanth A., Mrudulrag S.K., Eldhose C., Sujatha C.H., 2015. Trace metal enrichment and organic matter sources in the surface sediments of Arabian Sea along southwest India (Kerala coast). *Marine Pollution Bulletin* 101 (2015) 938–946.

Piermattei V., Paladini de Mendoza F., Giovacchini M., 2015. “Circoscrizione portuale di Civitavecchia; addendum n.4 del 02.08.2011 (prot. AP. 9349 del 03.08.2011); Progetto “Studio dei fenomeni di trasporto solido e delle caratteristiche chimico-fisiche nell'area antistante e limitrofa al Porto commerciali di Gaeta”; REL-223-MON- 0715-AP, 16/07/15 (Rev. 1.0) – DEB.

Rognerud S., Hongve D., Fjeld E., Ottesen R.T., 2000. Trace metal concentrations in lake and overbank sediments in southern Norway. *Environmental Geology*, 39(7), 723-732.

Sanford, L. P. 1994 Wave-forced resuspension of upper Chesapeake Bay muds. *Estuaries* 18, 148–165.

Soulsby R.L., Hamm L., Klopman G., Myrhaug D., Simons R.R., Thomas G.P., 1993. Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer. *Coastal Engineering*, 21, (1–3), 41-69.

Tarquini, S., Vinci, S., Favalli, M., Doumaz, F., Fornaciai, A., Nannipieri, L., 2012. Release of a 10m-resolution DEM for the Italian territory: Comparison with global-coverage DEMs and anaglyphmode exploration via the web, *Computers & Geosciences* 38, 168-170.

Valeur, J.R., Pejrup, M. & Jensen, A., 1992 Particulate Fluxes of Nutrients in Vejle Fjord and Arrhus Bay. HAV-90 Research Programme. Report No. 14, Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen (in Danish with English summary), 128 pp.

Valeur, J. R. 1994 Resuspension mechanisms and measuring methods. In *Sediment trap studies in the nordic countries* (Floderus, S., Heiskanen, A., Olesen, M. & Wassmann, P., eds). Marine Biological Lab., Helsingor, pp. 185–203.