



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente

La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere



MANUALI E LINEE GUIDA



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente

La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere

Informazioni legali

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e le persone che agiscono per conto dell'Istituto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo Manuale.

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
www.isprambiente.gov.it

ISPRA, Manuali e Linee Guida 169/2017
ISBN 978-88-448-0872-3

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica

Grafica di copertina: Sonia Poponessi
ISPRA – Area Comunicazione

Foto di copertina: Luisa Nicoletti, Alfredo Pazzini, Elena Romano (ISPRA), Sina Saremi (DHI)

Coordinamento pubblicazione on line:

Daria Mazzella
ISPRA – Area Comunicazione

Coordinamento tecnico

Ing. Maurizio Ferla (ISPRA – Centro Nazionale per la caratterizzazione ambientale e la protezione della fascia costiera, l’oceanografia operativa e la climatologia marittima, CN-COS).

Responsabile scientifico

Dott. Iolanda Lisi (ISPRA – Area oceanografia operativa, idrodinamica costiera, monitoraggio e difesa delle coste, COS-ODC).

Autori

Dott.ssa Iolanda Lisi, Ing. Alessandra Feola, Dott. Antonello Bruschi, Dott.ssa Elena Romano (ISPRA, CN-COS)

Ing. Marcello Di Risio, Ing. Davide Pasquali (Università dell’Aquila, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile Architettura e Ambientale)

Ing. Andrea Pedroncini (DHI, Responsabile della Divisione Marina)

Stesura della parte normativa

Ing. Francesca Giaime (ISPRA, VAL-ASI)

Elaborazione grafica delle immagini

Dott.ssa Sonia Poponessi

Referee

Ing. Michele Mossa (Co.N.I.S.Ma, Membro del Comitato dei Direttori, Politecnico di Bari, Prof. Ordinario di Idraulica)

Dott.ssa Rosa Maria Bertolotto e Ing. Mauro Quagliati, Ing. Stefania Magri, Dott.ssa Patrizia De Gaetano (ARPA Liguria, Gruppo modellistica Marina)

Ing. Stefano Corsini (Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale)

Ing. Giorgio Filomena (Regione Marche, PF-Difesa del Suolo e della Costa)

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento al Dr. Massimo Gabellini, già responsabile del Dipartimento II ex ICRAM di ISPRA, che ha avviato questo lavoro con sentito impegno, selezionando e motivando il gruppo di ricercatori e tecnologi di ISPRA, autori del documento.

Revisione e correzione dei testi per ISPRA

Antonella Ausili, Andrea Bonometto, Rossella Boscolo, Paola La Valle, Elena Mumelter, Luisa Nicoletti, Daniela Paganelli, Maria Elena Piccione (ISPRA, CN-COS)

Fulvio Onorati, David Pellegrini (ISPRA, CN-LAB), Chiara Maggi (ISPRA, LAB-CHI)

Si prega di citare il documento con la seguente dicitura:

Lisi I., Feola A., Bruschi A., Di Risio M., Pedroncini A., Pasquali D., Romano E. (2017). La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere. Manuali e Linee Guida ISPRA, 169/2017, pp.144.

PREFAZIONE

Gli interventi che prevedono la movimentazione dei sedimenti marini rivestono un ruolo spesso fondamentale per la fruizione delle aree marino-costiere e per il mantenimento della qualità ambientale. Nel considerare rilevanti gli aspetti tecnici della movimentazione dei sedimenti in queste aree, è altresì indubbia l'importanza della verifica e della valutazione dei possibili effetti (fisici, chimici e biologici) sull'ambiente che possono essere ricondotti all'esecuzione di tali attività, soprattutto laddove si riconosca la presenza di criticità ambientali.

Numerose linee guida e studi di letteratura internazionali evidenziano la necessità di ricorrere all'utilizzo di modelli matematici per la previsione e la valutazione degli effetti ambientali legati al trasporto dei sedimenti sospesi durante le attività di movimentazione.

Questo Manuale, risultato della sinergia di autori provenienti da Istituti con diverse competenze e aree di interesse, si concentra sulla valutazione degli effetti sul sistema fisico, rimandando ad altra letteratura tecnica per l'approfondimento degli aspetti correlati, quali, ad esempio, l'analisi degli effetti della mobilitazione dei contaminanti eventualmente presenti nei sedimenti movimentati e degli effetti indotti sul sistema biologico.

L'importanza del Manuale risiede nella messa a sistema di informazioni provenienti dalla raccolta di studi di settore al fine di disporre di un quadro il più possibile completo ed organico cui gli operatori e gli enti territorialmente competenti al controllo possano riferirsi per la scelta e l'impostazione degli studi modellistici, prevedendo livelli di accuratezza e di dettaglio crescenti in relazione alla presenza e alla tipologia delle criticità ambientali rilevate.

Da ciò si evidenzia l'importanza del Manuale a supporto dell'ottimizzazione degli interventi nelle diverse fasi progettuali (dalla scelta delle modalità di esecuzione, alla pianificazione delle attività di monitoraggio) e della verifica della rispondenza ambientale delle scelte progettuali effettuate ai fini della minimizzazione degli effetti attesi e riscontrati.

Ing. Maurizio Ferla

Dott. Massimo Gabellini

Dirigente CN-COS, ISPRA

Responsabile VAL-ASI, ISPRA

INDICE

PREMESSA	7
1. INTRODUZIONE	12
1.1. Inquadramento normativo	13
1.2. Riferimenti nazionali ed internazionali	15
1.3. Obiettivi e struttura del Manuale	17
PARTE I - GUIDA ALLA COMPrensIONE	20
2. PRINCIPALI TECNICHE DI MOVIMENTAZIONE E MECCANISMI DI RILASCIO DEI SEDIMENTI	21
2.1. Inquadramento generale e finalità degli interventi	22
2.2. Tecniche di dragaggio	22
2.2.1 <i>Dragaggio meccanico</i>	23
2.2.1.1 <i>Draghe a benna o a cucchiaio</i>	24
2.2.1.2 <i>Draghe a grappo o benna mordente</i>	24
2.2.1.3 <i>Draghe a secchie</i>	26
2.2.1.4 <i>Dragaggio meccanico di tipo ambientale</i>	27
2.2.2 <i>Dragaggio idraulico</i>	27
2.2.2.1 <i>Draghe aspiranti stazionarie</i>	28
2.2.2.2 <i>Draghe aspiranti stazionarie con disgregatore</i>	30
2.2.2.3 <i>Draghe aspiranti semoventi con pozzo di carico</i>	31
2.2.2.4 <i>Dragaggio idraulico di tipo ambientale</i>	32
2.3. Tecniche di trasporto e collocazione	33
2.3.1 <i>Trasporto dei sedimenti dragati</i>	33
2.3.2 <i>Sversamento mediante aperture dello scafo (dumping)</i>	34
2.3.3 <i>Sversamento mediante pompaggio idraulico</i>	35
2.3.4 <i>Sversamento con mezzi di tipo meccanico</i>	37
2.4. Misure di mitigazione	37
2.5. Generazione e sviluppo di pennacchi di torbida	38
2.5.1 <i>Generazione e sviluppo dei pennacchi di torbida durante il dragaggio</i>	38
2.5.2 <i>Generazione e sviluppo dei pennacchi di torbida durante lo sversamento</i>	39
3. MODELLI UTILIZZABILI PER UN APPROCCIO INTEGRATO	41
3.1. Considerazioni generali	41
3.2. Modelli matematici per la simulazione dell'idrodinamica	44
3.2.1 <i>Modelli matematici per la simulazione di onde</i>	44
3.2.2.1 <i>Modelli di larga scala</i>	44
3.2.2.2 <i>Modelli di piccola scala</i>	45
3.2.2 <i>Modelli matematici per la simulazione della circolazione</i>	45
3.2.2.1 <i>Modelli tridimensionali</i>	47
3.2.2.2 <i>Modelli 2DH, Q3D e a strati</i>	47
3.3. Formulazioni per la stima del termine sorgente	48
3.3.1 <i>Termine sorgente per attività di dragaggio</i>	50
3.3.3.1 <i>Formulazioni su base tabellare</i>	50
3.3.3.2 <i>Formulazioni empiriche</i>	52
3.3.2 <i>Termine sorgente per attività di sversamento in aree costiere</i>	56
3.3.3 <i>Termine sorgente per attività di sversamento al largo</i>	56
3.3.4 <i>Il metodo generale di Becker et al. (2015)</i>	59
3.4. Modelli matematici per la simulazione del trasporto e della deposizione dei sedimenti	62
3.4.1 <i>Modelli semplificati con soluzione analitica</i>	62
3.4.2 <i>Modelli con soluzione numerica</i>	63
3.4.3 <i>Processi di deposizione e risospensione del sedimento</i>	64
3.5. Cenni sull'impiego dei modelli negli studi di morfodinamica	68
3.5.1 <i>Modelli negli studi di morfodinamica costiera</i>	69

3.6. Cenni sulla modellazione dei contaminanti	71
PARTE II - GUIDA ALL'APPLICAZIONE.....	72
4. INDICAZIONI PER L'APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO MODELLISTICO INTEGRATO	73
4.1. Considerazioni generali	73
4.2. Definizione degli scenari di modellazione	77
4.2.1 <i>Approccio climatologico</i>	78
4.2.2 <i>Approccio realistico a scenari</i>	78
4.2.3 <i>Approccio realistico di lungo periodo</i>	79
4.2.4 <i>Approccio in modalità previsionale-operativa</i>	79
4.3. Modelli idrodinamici	80
4.3.1 <i>Modellazione idrodinamica in aree costiere</i>	80
4.3.2 <i>Modellazione idrodinamica in bacini semichiusi</i>	81
4.3.3 <i>Modellazione idrodinamica in aree al largo</i>	81
4.4. Definizione del termine sorgente	82
4.4.1 <i>Analisi delle modalità di lavoro per la definizione di tipologia di sorgente</i>	83
4.4.2 <i>Quantificazione del volume totale di sedimento fine disponibile</i>	85
4.4.3 <i>Frazionamento del sedimento fine disponibile al campo lontano</i>	86
4.5. Modelli di trasporto dei sedimenti.....	88
4.5.1 <i>Applicazione del termine sorgente nel dominio di calcolo</i>	89
4.5.2 <i>Attività di movimentazione in aree costiere</i>	90
4.5.3 <i>Attività di movimentazione in bacini semichiusi</i>	91
4.5.4 <i>Attività di movimentazione al largo</i>	91
4.6. Elaborazione e presentazione dei risultati	92
4.6.1 <i>Definizione di livelli di riferimento sito specifici</i>	92
4.6.2 <i>Analisi e sintesi dei risultati</i>	95
5. RELAZIONE TRA MODELLISTICA E MONITORAGGIO AMBIENTALE	101
5.1. Considerazioni generali	101
5.1.1 <i>Processo di condivisione tra proponente e Autorità Competenti</i>	103
5.2. Il monitoraggio a supporto della modellistica	104
5.2.1 <i>Dati di campo a supporto della modellistica</i>	105
5.2.1.1 <i>Dati sedimentologici, batimetrici e descrittivi del sito</i>	105
5.2.1.2 <i>Dati meteomarini e idrodinamici</i>	106
5.2.1.3 <i>Dati chimico-fisici della colonna d'acqua</i>	107
5.2.2 <i>Alcuni database liberamente accessibili per la raccolta di dati</i>	108
5.2.3 <i>Utilizzo dei dati di monitoraggio per la verifica dell'accuratezza dei modelli</i>	110
5.2.4 <i>Il monitoraggio nelle diverse fasi di progettazione e gestione</i>	111
5.2.4.1 <i>Monitoraggio ante operam (o di base)</i>	111
5.2.4.2 <i>Monitoraggio in corso d'opera</i>	112
5.2.4.3 <i>Monitoraggio post operam</i>	113
5.3. La modellistica a supporto delle attività di monitoraggio.....	113
5.3.1 <i>Modellazione operativa in fase di cantiere</i>	114
5.4. Gestione dei dati di monitoraggio e del flusso di informazione	115
BIBLIOGRAFIA.....	118
APPENDICE 1: SCHEDE ESEMPLIFICATIVE PER LA DEFINIZIONE DEL TERMINE SORGENTE.....	127
APPENDICE 2: ESEMPIO DI SCHEDA INFORMATIVA DI PROGETTO.....	137

PREMESSA

È ormai prassi consolidata che l'esecuzione di interventi che comportano la movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere sia preceduta da studi specialistici volti a prevedere e verificare i potenziali effetti sull'ambiente riconducibili alla formazione di pennacchi di torbida. In tale ambito, l'impiego di modelli matematici per stimare le perdite e il trasporto dei sedimenti a diverse distanze dalle aree di intervento è considerato un valido strumento a supporto delle diverse fasi di progettazione e gestione dell'intero ciclo della movimentazione dei sedimenti, dall'escavo (o dragaggio) allo sversamento (o collocazione finale).

Come già delineato nel "Manuale per la movimentazione di sedimenti marini" (APAT-ICRAM, 2007), anche il recente riordino della legislazione italiana, che regola la movimentazione di sedimenti in Siti di Interesse Nazionale (D.M. 172/2016) e l'immersione in mare dei materiali di escavo di fondali marini (D.M. 173/2016), ha evidenziato l'importanza della modellistica numerica nelle diverse fasi progettuali della movimentazione dei sedimenti.

Esistono numerose evidenze scientifiche e linee guida internazionali che raccomandano l'utilizzo di modelli matematici per supportare la scelta comparata delle modalità tecnico-operative in grado di minimizzare gli impatti per l'ambiente circostante, a fronte di una ottimizzazione della produttività (e quindi dei costi) degli interventi.

Tuttavia, allo stato attuale, non sono disponibili metodologie e linee di indirizzo riconosciute a livello nazionale cui gli operatori del settore e gli enti territorialmente competenti al controllo possano riferirsi per individuare gli strumenti e gli approcci modellistici più idonei per la previsione e la verifica dei potenziali effetti ambientali, in relazione alla finalità degli interventi e agli obiettivi degli studi progettuali e ambientali:

- nell'*ante operam* a supporto della scelta delle modalità operative, della pianificazione di piani di monitoraggio e di studi di impatto ambientale;
- in corso d'opera a supporto della pianificazione di misure di mitigazione e di controllo in seguito alla previsione di eventi meteo-marini avversi e di livelli critici di torbidità;
- nel *post operam* a supporto della verifica degli effetti di lungo termine.

Nel presente documento sono illustrate linee di indirizzo, basate su criteri condivisi dalla letteratura di settore, per supportare i soggetti a vario titolo coinvolti nella progettazione e nella gestione degli interventi nel corretto utilizzo della modellistica, con livelli di accuratezza e dettaglio adeguati all'insorgere di eventuali criticità ambientali. In particolare, il documento fornisce indicazioni sulle modalità di implementazione di un Approccio Modellistico Integrato (AMI), basato sull'utilizzo di diversi strumenti modellistici da implementare in cascata per la simulazione dei processi di trasporto dei sedimenti (risospensione, dispersione, diffusione e deposizione) indotti da operazioni di escavo e sversamento.

Più precisamente, le linee di indirizzo vogliono supportare la scelta dei modelli esistenti e la loro implementazione nell'ambito dell'AMI (e.g. risoluzione del dominio di calcolo, tipologia, numerosità e durata degli scenari, condizioni iniziali e al contorno, definizione delle forzanti e del termine sorgente, ecc.) ai fini dell'ottimizzazione degli interventi, in relazione:

- alle finalità progettuali (escavo e sversamento);
- ai volumi complessivi ed alla tipologia dei sedimenti (e dei contaminanti eventualmente associati) da movimentare;
- alle modalità tecniche e operative di esecuzione degli interventi (tipologia di draga, ciclo di dragaggio, modalità e tempi di esecuzione dei lavori, ecc.);
- alle peculiarità del contesto ambientale in cui si svolgono gli interventi (caratteristiche morfologiche ed idrodinamiche, presenza di obiettivi sensibili e/o aree a vario titolo protette) e all'entità degli effetti attesi.

Il Manuale fornisce elementi utili per la valutazione degli aspetti fisici legati alla risospensione/rilascio dei sedimenti conseguenti alle operazioni di movimentazione. Fornisce, inoltre, indicazioni sulle tecniche di analisi e sintesi dei risultati per una chiara ed immediata valutazione della significatività degli effetti in relazione al superamento di livelli di riferimento per i parametri di interesse da stabilire, sulla base di dati bibliografici e di campo, in relazione alle specifiche peculiarità ambientali del sito e progettuali dell'intervento.

Sono delineati, infine, gli elementi utili alla comprensione della mutua interazione tra le attività modellistiche e le attività di monitoraggio ambientale nelle diverse fasi di progetto (*ante operam*, in corso d'opera e *post operam*), di cui tener conto sia in fase di *set-up*, calibrazione, validazione e verifica (in corso d'opera) dell'approccio modellistico scelto sia per la pianificazione e l'ottimizzazione delle attività di monitoraggio.

Sono forniti, inoltre, cenni su aspetti correlati ma che esulano dalle finalità del presente Manuale, quali lo studio delle modifiche indotte sulla morfodinamica e sull'evoluzione della linea di riva, della mobilitazione/trasformazione dei contaminanti legati al sedimento e delle conseguenze indotte sul sistema biologico in generale, per gli approfondimenti dei quali si rimanda alla letteratura di settore.

Si riporta nel seguito un glossario con le definizioni e la terminologia utilizzata nel presente Manuale.

GLOSSARIO DELLA TERMINOLOGIA E DEGLI ACRONIMI

- **Ambiti d'intervento**

Aree marino-costiere in cui sono eseguiti gli interventi (o le diverse fasi operative dell'intero ciclo della movimentazione previste). Sulla base delle specificità fisiche gli ambiti di intervento sono differenziati in: aree costiere (comprendenti le aree di transizione), bacini semi-chiusi e aree al largo.

- **AMI - Approccio Modellistico Integrato**

Approccio basato sull'utilizzo di strumenti modellistici diversi da implementare a cascata per riprodurre i fenomeni di trasporto e deposizione dei sedimenti rilasciati/sospesi (termine sorgente) durante le operazioni di movimentazione.

- **Aree al largo**

Aree ubicate ad una distanza dalla costa superiore a tre miglia nautiche o oltre la batimetrica dei 200 metri (secondo art. 2 D.M. 173 del 2016).

- **Aree costiere**

Aree comprese tra la linea di costa, ovvero la zona di interfaccia terra-mare, e il limite delle aree di largo (si veda relativa definizione). Tali aree possono presentare forme e dinamiche diverse non apprestandosi, per definizione, a rigidi confini spaziali. Ai fini del presente Manuale sono trattate in questa categoria anche le aree di transizione.

- **Aree di transizione**

Aree in cui le acque dolci terrestri e salate marine si mescolano. Costituiscono il passaggio (confine) naturale tra ambienti acquatici terrestri e marini. Con il D.lgs. 152/2006 "Norme in materia ambientale" lo Stato italiano, in recepimento alla Direttiva Quadro in materia di Acque (2000/60/CE), ha definito ambienti di transizione (lagune, stagni costieri, foci fluviali) i corpi idrici "delimitati verso monte (fiume) dalla zona ove arriva il cuneo salino (definito come la sezione dell'asta fluviale nella quale tutti i punti monitorati sulla colonna d'acqua hanno il valore di salinità superiore a 0.5 psu) in bassa marea e condizioni di magra idrologica e verso valle (mare) da elementi fisici quali scanni, cordoni litoranei e/o barriere artificiali, o più in generale dalla linea di costa. Sono attribuiti alla categoria "acque di transizione" anche gli stagni costieri che, a causa di intensa e prevalente evaporazione, assumono valori di salinità superiori a quelli del mare antistante".

Ai fini del presente Manuale le aree di transizione sono trattate nell'ambito delle aree costiere. Le principali peculiarità fisiche dei diversi ambienti (rilevanza delle oscillazioni di marea, limitato battente idrico, gradienti di salinità e stratificazione, ecc.) sono specificate nel corso della trattazione.

- **Bacini semichiusi**

Aree e/o strutture naturali o artificiali poste sul litorale e con confini delimitati. Rientrano in questa categoria le aree in grado di fornire protezione da avverse condizioni meteo-marine e di consentire (se adibite) l'approdo e l'ormeggio in sicurezza delle imbarcazioni (darsene, porti, ecc.).

- **Calibrazione**

Procedimento per determinare il valore dei parametri interni del modello al fine di rendere i risultati delle applicazioni modellistiche più vicini ai valori osservati/misurati. La calibrazione può essere effettuata sia in maniera automatica sia manuale. Si veda anche la definizione di Validazione.

- **Criticità ambientali**

Qualsiasi alterazione dei parametri ambientali d'interesse che può aversi in seguito alle operazioni di movimentazione, su diverse scale spaziali/temporali, e in grado di produrre effetti (o *stress*) significativi (reversibili o irreversibili) sui recettori e gli obiettivi sensibili individuati. Ai fini del presente Manuale, rientrano in questa definizione anche i vincoli ambientali (si veda relativa

definizione) e quei fattori ambientali (tipologia dei sedimenti e dei contaminanti eventualmente associati, volumi complessivi da movimentare, ecc.), a cui potrebbero essere correlate alterazioni significative dei parametri di interesse, che condizionano e limitano la scelta delle modalità operative.

- **DEP**

Tasso di deposizione al fondo dei sedimenti messi in sospensione.

- **Dragaggio**

Il generico termine dragaggio identifica le diverse fasi della movimentazione del sedimento che si articolano in escavo, carico e trasferimento del sedimento rimosso dal fondo nella sua destinazione finale. Nel presente Manuale questo termine è frequentemente utilizzato anche nell'accezione più comune di escavo.

- **Escavo**

Rimozione del sedimento dal fondo con la draga.

- **Fase conoscitiva preliminare**

Fase conoscitiva che precede la fase modellistica preliminare e di dettaglio (si vedano relative definizioni). Consiste nella raccolta ed analisi di informazioni di letteratura e dati di campo relativi all'area d'intervento. L'obiettivo di questa fase è evidenziare, attraverso giudizio esperto, la possibile insorgenza di criticità ambientali (si veda relativa definizione) riconducibili all'esecuzione delle operazioni di movimentazione e, quindi, la necessità di procedere (o meno) con l'implementazione degli studi modellistici. Inoltre, in questa fase deve essere verificata la disponibilità e l'idoneità dei *set* di dati utili per implementare, calibrare e validare i modelli matematici, nonché l'eventuale necessità di pianificare nuove misure per aggiornare (o implementare) i *set* di dati disponibili.

- **Fase modellistica di dettaglio**

Segue alla fase conoscitiva preliminare (si veda relativa definizione) e alla fase modellistica preliminare (si veda relativa definizione), qualora queste evidenzino il possibile insorgere di criticità ambientali (si veda relativa definizione). La fase modellistica di dettaglio è condotta con modelli più raffinati di quelli utilizzati nella fase modellistica preliminare al fine quantificare con maggiore accuratezza le criticità ambientali individuate.

- **Fase modellistica preliminare**

Segue alla fase conoscitiva preliminare (si veda relativa definizione) qualora questa evidenzi la necessità di appurare/escludere con maggiore certezza l'insorgere di possibili criticità ambientali (si veda relativa definizione). La fase modellistica preliminare è condotta con modelli semplificati al fine di stimare in prima approssimazione gli effetti sull'ambiente. Tale fase supporta l'ottimizzazione della progettazione preliminare degli interventi, ossia la scelta delle modalità tecnico-operative da adoperare per minimizzare gli effetti attesi e conferma/evidenzia l'insorgere di eventuali criticità ambientali, nonché specifiche condizioni di criticità ambientale, da approfondire nella fase modellistica di dettaglio (si veda relativa definizione).

- **Fasi operative della movimentazione dei sedimenti**

Le fasi operative comprese in un intero ciclo di movimentazione sono articolate in: fase di escavo (o dragaggio); fase di trasporto; fase sversamento (o collocazione finale). Le diverse fasi possono essere eseguite nel medesimo o in differenti ambiti di intervento (si veda definizione di Ambiti di intervento).

- **Foci fluviali**

Zone in cui le acque dei fiumi si uniscono al mare con progressivo mescolamento. I gradienti di salinità e densità tra acque dolci e marine producono una stratificazione verticale delle masse d'acqua e un flusso convettivo (circolazione estuarina) che influenzano significativamente l'idrodinamica locale.

- **Immersione in ambienti conterminati**

Materiale sversato in strutture di contenimento a diverso grado di permeabilità (es. casse di colmata).

- **Lagune costiere**

Ambienti acquatici costieri parzialmente delimitati verso il mare da cordoni di sabbie o ciottoli e meno frequentemente da coste basse rocciose. Sono caratterizzati da acque lentiche (con assenza di corrente e direzione costante nel tempo), salate o salmastre, poco profonde, caratterizzate da notevoli variazioni stagionali in salinità e in profondità in relazione agli apporti idrici (acque marine o continentali), alla piovosità e alla temperatura che condizionano l'evaporazione. L'idrodinamica

interna, per il contatto diretto con il mare, risente significativamente dell'effetto delle maree.

- Livello di riferimento (LR)

Valore (o serie di valori) rappresentativo della variabilità dei parametri di interesse (es. SSC e DEP) in condizioni indisturbate (es. prima dell'inizio delle operazioni di movimentazione o, successivamente, in aree non influenzate dai lavori). Esso è definito sulla base di dati di letteratura o di campo sito-specifici anche in funzione del progetto (es. estensione, entità dei volumi da movimentare, durata) e delle sue interazioni con l'ambiente circostante e può essere eventualmente verificato e aggiornato con i risultati degli studi modellistici e con i dati di nuovi monitoraggi. È utilizzato, in fase di analisi e sintesi dei risultati, per la valutazione dell'entità degli effetti attesi sulla base dei superamenti del livello (o serie di livelli) di riferimento stabiliti per i parametri di interesse.

Nel caso in cui non siano disponibili informazioni di letteratura o dati di campo rappresentativi dell'area di studio (nel tempo e nello spazio), i LR possono essere eventualmente definiti utilizzando i risultati ottenuti con l'AMI (si veda la relativa definizione) mediante un'analisi degli intervalli di variabilità dei parametri di interesse.

- Livello di tolleranza

Valore (o serie di valori) stabilito sulla base di considerazioni biologiche ed ecologiche relative alla natura e allo stato dei recettori sensibili (si veda relativa definizione) eventualmente presenti. Esso è derivato da giudizio esperto, sulla base di informazioni di letteratura e dati di campo sito-specifici, ed è utilizzato per la valutazione della risposta (*stress*) di uno specifico recettore sensibile all'entità dei cambiamenti indotti sui parametri di interesse (in generale in termini di intensità e durata degli effetti). Tale valore può essere utilizzato per supportare l'individuazione dei livelli di riferimento e per pervenire ad una classificazione della severità degli impatti.

- SSC - Concentrazione di Sedimenti Sospesi

Da *Suspended Sediment Concentration*. Nel presente Manuale per SSC si intende il parametro, approssimabile nell'ambito delle attività di dragaggio e refluentamento ai Solidi Sospesi Totali (TSS), utilizzato nel modello di trasporto.

- Stagni costieri

Specchi d'acqua costieri caratterizzati da bassi fondali e separati dal mare da lingue di sabbia (es. cordone litorale, freccia litorale, tombolo, ecc.). Generalmente comunicano con il mare attraverso stretti canali, per cui la salinità delle acque dipende dal contributo relativo delle acque dolci e marine. Diversamente dalle lagune non sentono l'influenza delle maree.

- Sversamento al largo (o immersione deliberata in mare)

Deposizione di materiali di escavo dei fondali marini o salmastri o di terreni litoranei emersi in aree ubicate a una distanza dalla costa superiore a 3 miglia nautiche o oltre la batimetrica dei 200 metri (D.M. 173/2016).

- Sversamento in aree costiere o in bacini semichiusi

Deposizione del materiale al fine di ricostruire o modificare la morfologia del fondo e della spiaggia (emersa e sommersa). Nelle aree litoranee è prioritariamente eseguito in relazione a fenomeni di erosione della costa (si veda definizione di Ripascimento).

- Recettore sensibile

Qualsiasi specie, popolamento o habitat che può subire un effetto (*stress*) in seguito a cambiamenti dei parametri di interesse (SSC, DEP, ecc.) indotti dalle operazioni di movimentazione.

- Refluimento

Usato nella stessa accezione di "Sversamento in aree costiere o bacini semichiusi" (si veda la relativa definizione).

- Ripascimento

Sversamento in aree costiere ai fini del ripristino e della ricostruzione degli arenili (così come definito anche dall'art. 2, comma 1 del D.M. 173/2016).

- TSS - Solidi Sospesi Totali

Materiale in sospensione, composto di frazione organica e inorganica, che è presente in un campione d'acqua e che può essere separato attraverso filtri o membrane di dimensioni standardizzate. Ai TSS è generalmente correlata la concentrazione di sedimenti sospesi (SSC) utilizzata nel modello di trasporto (si veda definizione di SSC).

- Validazione

Procedimento utilizzato per verificare che il modello sia in grado di realizzare delle stime accurate. Questo implica che il modello, precedentemente calibrato (si veda definizione di Calibrazione), sia applicato per la ricostruzione di un nuovo insieme di osservazioni, o sottoinsieme dedicato del set di dati originali (*dataset* di validazione) mantenendo inalterata la scelta dei parametri. Lo scopo della validazione è la stima del grado di approssimazione con cui il modello riesce a riprodurre i valori osservati/misurati.

- Vincolo Ambientali

Rientrano nella definizione di vincolo ambientale: 1) zone di protezione ecologico-ambientale, quali: aree archeologiche marine, aree marine protette (AMP), aree protette territoriali costiere (es. oasi, parchi e riserve naturali, SIC, ZSC e ZPS, zone marine di ripopolamento e zone marine di tutela biologica, aree di *nursery* di specie ittiche di interesse commerciale, ecc.); 2) *habitat* e specie protette ai sensi della Direttiva Habitat 92/43/CEE; 3) altri usi legittimi del mare (aree destinate alla maricoltura e aree balneabili ai sensi della Direttiva 2006/7/CE, ecc.) e zone di navigazione regolate (cavi, condotte, oleodotti e relative zone di interdizione, aree di sversamento dei materiali portuali ecc.); 4) prescrizioni formulate dalle Autorità Competenti nell'ambito delle procedure di Valutazione Ambientale.

1. INTRODUZIONE

La gestione delle operazioni di movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere rappresenta una tematica di grande rilevanza e attualità in Europa e nel mondo. In aree costiere, gli interventi che comprendono la movimentazione dei sedimenti sono essenzialmente finalizzati a mantenere o migliorare la funzionalità dei porti e la fruibilità di canali navigabili e aree litoranee, al ripristino morfologico di zone intertidali in ambienti di transizione, alla riapertura di foci fluviali o al ripascimento di spiaggia (emersa e/o sommersa). In aree non costiere, invece, sono principalmente legati al dragaggio di depositi di sabbie al largo, all'immersione deliberata in mare e a operazioni di realizzazione o dismissione di infrastrutture *offshore*.

Nella prassi l'intero ciclo della movimentazione dei sedimenti (opportunosamente caratterizzati qualora previsto dalla normativa) è generalmente articolato in tre principali fasi operative: l'escavo (o dragaggio), il trasporto e lo sversamento (o collocazione finale). Sia che esso sia eseguito (totalmente o in parte) in ambiti costieri o al largo, gli effetti ambientali chimico-fisici e biologici sugli ecosistemi marini possono essere molteplici, con conseguenze talvolta anche sulla salute pubblica (e.g. Wilber & Clark, 2001; HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003; Erftemeijer *et al.*, 2006; Nicoletti *et al.*, 2006; PIANC, 2006; Paganelli *et al.*, 2014). In particolare, gli effetti sui comparti abiotici (substrato e colonna d'acqua) e biotici (popolamenti bentonici, ittici, ecc.) possono essere localizzati:

- all'interno dei siti di intervento, in prossimità del mezzo dragante, principalmente riconducibili all'azione diretta del prelievo e dello sversamento dei sedimenti;
- a diversa distanza dai siti di intervento, prevalentemente riconducibili al trasporto e alla deposizione dei sedimenti fini in seguito alla formazione di pennacchi di torbida (superficiali e profondi) durante le attività.

All'interno dei siti di intervento, l'azione diretta del prelievo e dello sversamento dei sedimenti causa effetti localizzati prevalentemente associati alle modifiche arrecate alla morfologia e alla batimetria dei fondali, nonché alla defaunazione e ai fenomeni di seppellimento e soffocamento dei popolamenti bentonici presenti (con possibile defaunazione dei fondi). Le alterazioni morfo-batimetriche, inoltre, possono causare cambiamenti dell'idrodinamica locale (e quindi dei fenomeni di erosione e deposizione) e, laddove il dragaggio e lo sversamento esponano sedimenti con caratteristiche granulometriche e tessiture differenti, cambiamenti nella composizione e struttura delle comunità bentoniche.

A diverse distanze dall'area di intervento i principali effetti ambientali sono generalmente associati all'incremento temporaneo della concentrazione dei sedimenti sospesi in colonna d'acqua e della possibile variazione dei tassi di deposizione e della natura del sedimento rideposto al fondo nelle aree interessate dall'estensione del pennacchio di torbida. In particolare, gli effetti fisici di tipo diretto sul comparto abiotico sono dovuti prevalentemente alle alterazioni delle caratteristiche chimico-fisiche della colonna d'acqua (es. diminuzione temporanea della penetrazione della luce e della concentrazione di ossigeno disciolto, mobilitazione e solubilizzazione dei contaminanti eventualmente associati ai sedimenti sospesi, ecc.) e del fondo (es. per la deposizione di sedimento fine su substrati di diversa tipologia). Sul comparto biotico, invece, gli effetti diretti sono essenzialmente legati ai possibili fenomeni di seppellimento e soffocamento (intrappolamento e trascinarsi sul fondo, inefficienza dell'attività di filtrazione e intasamento dell'apparato branchiale, ricopertura, abrasione dei tessuti, ecc.).

Agli effetti già citati si vanno a sommare quelli di tipo indiretto, come ad esempio il disturbo alle aree di *nursery*, quelli associati a variazioni della quantità di sostanza organica presente nelle frazioni sedimentarie più sottili che, nel caso di movimentazione di rilevanti volumi di sedimento¹, possono determinare situazioni di anossia, e soprattutto in presenza di habitat sensibili come le praterie di *Posidonia oceanica* o biocenosi del Coralligeno in prossimità delle aree di intervento alterazioni della capacità fotosintetica (es. Manzanera *et al.*, 1998). Inoltre, nel caso di movimentazione di sedimenti

¹ La significatività dei volumi da movimentare deve sempre essere valutata in relazione allo specifico contesto ambientale in cui è eseguito l'intervento. Per il caso specifico di interventi di ripascimento, inoltre, si riporta nel D.M. 173/2016 la distinzione per gli interventi di ripascimento in: piccoli interventi annuali che comportano un apporto complessivo di sabbia inferiore a 5.000 m³, interventi di media entità con volumi complessivi annui tra 5.000 m³ e 40.000 m³ ed infine interventi di notevole entità con volumi complessivi superiori ai 40.000 m³ annui.

contaminati, ulteriori effetti indiretti sul comparto biotico possono essere causati dalla mobilitazione dei contaminanti presenti (es. bioaccumulo dei contaminanti nei tessuti degli organismi, biomagnificazione e trasferimento nella catena trofica, alterazione microbiologica di acqua e sedimenti, ecc.).

Nel caso specifico di interventi che prevedono la movimentazione massiccia di cospicue volumetrie di sedimenti in ambito costiero (es. ripascimenti e ricostruzioni morfologiche) l'aumento temporaneo della torbidità normalmente si protrae oltre la conclusione delle operazioni di sversamento fino al raggiungimento del nuovo profilo di equilibrio, a causa della maggiore mobilità del sedimento deposto avente un minor grado di compattazione (Paganelli *et al.*, 2014). Si sottolinea infine che, seppure esulino dalle finalità del presente Manuale, in questi casi possono essere rilevanti anche gli effetti (di breve e lungo periodo) arrecati dalle modificazioni morfo-batimetriche per lo sversamento diretto dei sedimenti nei siti di destinazione e a cui possono conseguire cambiamenti, talvolta sostanziali, anche sulla morfodinamica ad una certa distanza dall'area di intervento (es. modifiche del trasporto dei sedimenti e dell'evoluzione della linea di riva).

L'individuazione di aree maggiormente critiche in termini di entità degli effetti (attesi e/o riscontrati) e della significatività dei livelli di esposizione deve tener conto, oltre che delle caratteristiche idrodinamiche locali, anche dei volumi e della tipologia dei sedimenti da movimentare, delle modalità tecniche e operative utilizzate e della posizione, rispetto alle aree di intervento, di obiettivi sensibili e vincoli ambientali eventualmente presenti (cfr. al glossario della terminologia e degli acronimi).

Pertanto, sebbene la scelta delle modalità tecniche e operative sia spesso legata alle finalità dell'intervento e alla loro incidenza sulla durata e sui costi di esecuzione (EPA, 1993; OMOE, 1994; IADC, 1998; USACE, 2003; Anchor Environmental, 2003; Eisma, 2006, CEDA/IADC, 2018), le diverse fasi di progettazione e gestione degli interventi devono essere precedute da studi specialistici finalizzati ad individuare le possibili criticità ambientali (cfr. al glossario della terminologia e degli acronimi) e le modalità operative da adottare per minimizzare i possibili effetti ambientali (fisici, chimici, biologici ed ecotossicologici) che potrebbero conseguire, su diverse scale spaziali e temporali, alle operazioni di movimentazione.

Nella fattispecie, studi internazionali raccomandano di dotarsi, in fase di progetto e gestione degli interventi, di modelli matematici in grado di riprodurre i processi di generazione e sviluppo dei pennacchi di torbida (superficiali e di fondo) laddove si riconosca l'insorgenza di possibili criticità ambientali. Tali modelli devono permettere di riprodurre la dinamica dei sedimenti risospesi a partire dall'analisi delle interazioni tra fattori operativi (tipo di draga, velocità e produttività del ciclo di dragaggio/sversamento, volumi complessivi da movimentare, ecc.) e ambientali (composizione e granulometria dei sedimenti da movimentare, caratteristiche idrodinamiche e morfo-batimetriche, ecc.) che condizionano i processi di trasporto (dispersione, diffusione e deposizione) a differenti profondità e distanze dal sito di intervento (es. Nakai, 1978; Herbich & Brahme, 1991; Collins, 1995; Pennekamp *et al.*, 1996; IADC, 1998; Johnson & Parchure 1999; Burt *et al.*, 2000; Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Palermo & Averett, 2003; USACE, 2003; Bridges *et al.*, 2008; Palermo *et al.*, 2008).

Un prerequisito di base per la valutazione degli effetti ambientali consiste nell'identificare i potenziali effetti delle attività di movimentazione (Becker *et al.*, 2015):

- nel breve periodo, durante la realizzazione degli interventi;
- nel medio periodo, dovuti al susseguirsi di operazioni ripetute nel tempo;
- nel lungo periodo, legati alla configurazione finale di progetto.

La corretta impostazione degli studi ambientali richiede, pertanto, di prevedere e quantificare la variabilità degli incrementi della concentrazione dei sedimenti sospesi e dei tassi di sedimentazione, nel tempo e nello spazio, tramite un opportuno approccio modellistico (CEDA/IADC, 2018).

1.1. Inquadramento normativo

Il tema della movimentazione dei sedimenti nelle aree marino-costiere e di transizione è inquadrata a vario titolo nell'ambito di Convenzioni internazionali (Convenzione di Barcellona, Convenzione di Londra, OSPAR, ecc.) e di Direttive comunitarie (Direttiva Quadro Acque WFD 2000/60/CE, Direttiva Habitat 92/43/CEE, Direttiva Quadro Marine Strategy MSFD 2008/56/CE, Direttiva Valutazione Impatto Ambientale 2014/52/UE, ecc.) e relativi disposti normativi nazionali di recepimento.

Nel rispetto degli obblighi derivanti da tali normative, in particolare della Direttiva 2000/60/CE (e relativi decreti nazionali di recepimento: D.lgs. 152/2006, D.M. 260/2010, D.lgs. 219/2010 e ss.mm.ii.) che prevede il mantenimento o il raggiungimento degli obiettivi di "buono stato chimico ed

ecologico”, le attività di movimentazione dei sedimenti devono essere condotte in modo tale da garantire non solo il “non peggioramento” dello stato riscontrato, ma anche la compatibilità con il raggiungimento degli obiettivi di qualità previsti.

In tale ottica, a livello nazionale gli interventi di dragaggio in ambito portuale e marino costiero (ad esclusione delle aree ricadenti all’interno dei Siti di bonifica di Interesse Nazionale) sono disciplinati dal D.M. 15 luglio 2016, n. 173: “Regolamento recante modalità e criteri tecnici per l’autorizzazione all’immersione in mare dei materiali di escavo di fondali marini”.

Tale regolamento determina le modalità per il rilascio dell’autorizzazione di cui all’articolo 109, comma 2, del D.lgs. 3 aprile 2006, n. 152, per l’immersione deliberata in mare dei materiali di escavo di fondali marini o salmastri o di terreni litoranei emersi di cui al comma 1, lettera a) del medesimo articolo. Fornisce, inoltre, criteri omogenei per tutto il territorio nazionale per l’utilizzo dei sedimenti di dragaggio ai fini di ripascimento o del refluento all’interno di ambienti conterminati. In particolare, l’Allegato Tecnico al Decreto, in buona parte derivato dal Manuale APAT-ICRAM (2007), disciplina l’intero percorso di caratterizzazione e gestione dei sedimenti da movimentare, includendo le fasi di pianificazione e attuazione del campionamento, di analisi di laboratorio (fisiche, chimiche, ecotossicologiche, e biologiche) e di classificazione della qualità dei sedimenti, fino alla formulazione di ipotesi di gestione ambientalmente compatibili ed allo sviluppo di piani di monitoraggio delle attività.

Nei Siti di bonifica di Interesse Nazionale ai sensi dell’art. 252 del D.lgs. 3 aprile 2006, n. 152, e ss.mm.ii., gli interventi di dragaggio sono disciplinati dall’art. 5 bis della L. 28 gennaio 1994, n. 84, e ss.mm.ii.. I relativi decreti attuativi:

- *D.M. 7 novembre 2008: “Disciplina delle operazioni di dragaggio nei siti di bonifica di interesse nazionale, ai sensi dell’articolo 1, comma 996, della legge 27 dicembre 2006, n. 296”;*
- *D.M. 15 luglio 2016, n. 172: “Regolamento recante la disciplina delle modalità e delle norme tecniche per le operazioni di dragaggio nei Siti di Interesse Nazionale, ai sensi dell’art. 5 bis, c. 6, della L. 28 gennaio 1994, n. 84”;*

disciplinano gli aspetti principali del processo di movimentazione dei sedimenti all’interno dei Siti di Interesse Nazionale, dalla caratterizzazione (campionamento, analisi di laboratorio, restituzione dei risultati) alle modalità di intervento e gestione dei materiali (tecnologie di dragaggio e trasporto, gestione del materiale dragato, misure di mitigazione e monitoraggio).

In particolare, l’Allegato A al D.M. 172/2016, seppur riferito ad interventi di dragaggio in aree per lo più contaminate, rappresenta un importante punto di riferimento per la tutela dei comparti abiotici e biotici dell’ambiente marino-costiero da effetti di tipo fisico indotti dagli interventi di dragaggio. Nel suddetto Allegato si fa esplicita menzione all’utilizzo di modelli matematici ai fini della stima dei potenziali impatti generati dagli interventi di movimentazione dei sedimenti: *“Le scelte progettuali, effettuate in conformità di quanto previsto dall’articolo 3 del presente decreto, possono essere adottate [...] anche sulla base di modelli matematici adeguatamente implementati in grado di prevedere, per i diversi scenari ipotizzati, il comportamento del sedimento movimentato in ambiente acquatico e i processi di dispersione e/o diffusione della contaminazione eventualmente presente. I risultati di tali modelli, ove applicati, devono costituire parte integrante del progetto di dragaggio di cui all’articolo 3 del presente decreto.”*

Inoltre, il testo del D.M. 172/16 riprende e rafforza quanto già previsto dal D.M. 7 novembre 2008 in merito alla necessità di presentare un unico documento contenente tutte le informazioni utili alla progettazione di un intervento di dragaggio (risultati della caratterizzazione ambientale dei sedimenti da dragare, tecniche idonee per la rimozione, il trasporto e la gestione), introducendo rilevanti novità nella normativa di settore, tra cui:

- l’obbligo di predisporre un piano di monitoraggio che consenta di valutare gli effetti sull’ambiente dell’intero processo di movimentazione (dal dragaggio alla ricollocazione);
- l’elencazione dei fattori ambientali da considerare nella scelta delle metodologie operative, dal dragaggio alla ricollocazione del materiale secondo la normativa vigente;
- l’obbligo di acquisire durante tutte le attività di movimentazione informazioni sulle condizioni meteo-marine, i dati operativi del dragaggio e del traffico navale, al fine di correlare i risultati del monitoraggio con le variazioni delle condizioni al contorno e quindi comprendere i processi in atto;
- l’obbligo di prevedere opportune misure di mitigazione degli impatti attesi, con *focus* tecnico sulle barriere fisiche di contenimento del pennacchio prodotto dalle attività di dragaggio;
- la definizione di un modello concettuale degli impatti, basato sulla conoscenza dell’area di intervento (es. presenza e tipologia di obiettivi sensibili da tutelare coerentemente con le

indicazioni europee ed internazionali, quali, *P. oceanica*, formazioni coralligene, ecc.), da utilizzare per commisurare all'entità degli impatti attesi il Piano di Monitoraggio: [...] *il piano di monitoraggio deve contenere la descrizione del contesto ambientale in cui si svolgono gli interventi (caratteristiche morfologiche ed idrodinamiche, presenza di obiettivi sensibili e/o aree a vario titolo protette); [...]*

- l'obbligo di prevedere la rapida divulgazione e valutazione dei risultati del Monitoraggio, tramite la predisposizione di una banca dati dedicata.

Sebbene nella prassi i progetti che comprendono la movimentazione dei sedimenti siano autorizzati dagli enti competenti sulla base della qualità dei sedimenti, stabilita in esito ai risultati di specifiche caratterizzazioni, questi sono spesso soggetti anche a dettagliate Valutazioni di Impatto Ambientale (Direttiva 2011/92/UE e ss.mm.ii., recepita in Italia nei successivi aggiornamenti della Parte II del D.lgs. 152/2006). Tra gli obiettivi di tali valutazioni vi è quello di escludere impatti riconducibili alla formazione di pennacchi di torbida e a modificazioni morfo-batimetriche e idrodinamiche locali. Tale procedura è richiesta soprattutto nel caso in cui gli interventi prevedano la movimentazione di ingenti quantitativi di sedimento o di sedimenti contraddistinti dalla presenza di contaminanti e/o di alte percentuali delle frazioni sedimentarie fini.

A tal proposito, anche sulla scorta di una corposa esperienza internazionale (EPA/USACE, 1991, 1998, 2004; EPA, 2004, 2016; Moksness *et al.*, 2009; IMDC, 2012; Gómez *et al.*, 2014) si fa sempre più strada l'esigenza di ricorrere a studi specifici volti ad escludere eventuali impatti nell'area vasta durante l'esecuzione degli interventi e a verificare la rispondenza delle scelte progettuali alle prescrizioni ambientali eventualmente richieste.

1.2. Riferimenti nazionali ed internazionali

È opinione condivisa che una stima attendibile della variabilità spaziale e temporale della sorgente di risospensione e del conseguente trasporto dei sedimenti sia basilare negli studi di impatto ambientale propedeutici all'esecuzione di interventi di movimentazione di sedimenti (Clarke & Wilber, 2000; PIANC, 2010; GBRMPA, 2012; Capello *et al.*, 2014; Saremi, 2014; Becker *et al.*, 2015; Feola *et al.*, 2015, 2016; Er *et al.*, 2016, Kemps & Masini., 2017). Sono disponibili numerosi contributi tecnico-scientifici e linee guida internazionali (es. Herbich & Brahme, 1991; Edwards *et al.*, 2006; Jouon *et al.*, 2006; PIANC, 2010; EPA, 2011; Feola *et al.*, 2015, 2016; Lisi *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2016; Nicoletti *et al.*, 2017; CEDA/IADC, 2018) che raccomandano l'uso di modelli matematici nelle diverse fasi di progettazione e gestione di tali interventi al fine di limitare e controllare gli effetti ambientali (diretti o indiretti) durante l'esecuzione dell'intero ciclo di movimentazione. Nella fattispecie, i modelli possono essere di supporto per il confronto e la verifica delle alternative tecniche e progettuali e nella pianificazione di attività di monitoraggio ambientale al fine di ottimizzare la produttività delle operazioni di movimentazione nel rispetto dei livelli di rilascio (o di qualità) prefissati (o esistenti in normativa) per le eventuali criticità ambientali rilevate (CCME, 2001; Savioli *et al.*, 2013; Manap & Voulvoulis, 2014).

I modelli attualmente in uso per prevedere e quantificare la dinamica dei sedimenti durante le operazioni di escavo e sversamento sono comunemente distinti nei cosiddetti modelli di campo vicino (o *near-field models*, es. Johnson *et al.*, 2000; Howlett, 2003; Bailey *et al.*, 2004; Henriksen *et al.*, 2012; Er *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2016), utilizzati per studi di dettaglio in prossimità del mezzo dragante, e nei modelli del campo lontano (o *far field models*, es. Shankar *et al.*, 1997; Chao *et al.*, 1999; Zhang & Gin, 2000; Bilgili *et al.*, 2005; Kim & Je, 2006; Bell *et al.*, 2010), utilizzati per lo studio dell'evoluzione di pennacchi di torbida caratterizzati da una dinamica di tipo passivo. Tuttavia, sebbene la corretta impostazione modellistica (risoluzione del dominio di calcolo, tipologia, numerosità e durata degli scenari di modellazione, condizioni iniziali e al contorno, definizione delle forzanti e del termine sorgente, ecc.) sia alla base di un buon livello di affidabilità dei risultati numerici, l'analisi della letteratura di settore evidenzia l'assenza di un quadro d'insieme organico e di un approccio condiviso a cui riferirsi per l'utilizzo della modellistica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere (e quindi delle conseguenze sul sistema biologico) in relazione alle finalità (escavo e/o sversamento) e agli ambiti di esecuzione degli interventi.

A tal proposito, in un recente lavoro di *review* contenente numerose informazioni relative ad un cospicuo numero di progetti di dragaggio eseguiti in Australia, Kemps & Masini (2017) hanno evidenziato una notevole diversità di approcci e la tendenza generale a formulare ipotesi

eccessivamente conservative per la definizione del termine sorgente di risospensione/rilascio dei sedimenti, perché testate sulla base di un numero limitato di informazioni e dati (ambientali e progettuali) acquisiti durante specifici progetti e spesso non utilizzabili perché acquisiti e divulgati mediante approcci non standardizzati (es. *data library*).

Diverse tipologie di approccio emergono anche in merito alla scelta della durata degli scenari di modellazione. I risultati numerici sono di solito presentati per “scenari singoli” di durata tipicamente limitata a qualche giorno e con condizioni meteo-climatiche rappresentative di eventi intensi. Talvolta sono analizzati “scenari stagionali” (Liu *et al.*, 2002; Jiang & Fissel, 2011; IMDC, 2012) volti alla simulazione di intere stagioni. Più raramente sono presentati scenari di durata pari ad almeno un anno (es. Deltares, 2009; GBRMPA, 2012).

In particolare, Johnson & Parchure (1999) hanno evidenziato che per supportare adeguatamente la progettazione e la verifica delle possibili alternative di progetto nell’ambito di un processo di ottimizzazione dell’intervento, deve essere eseguito, in un tempo relativamente breve, un numero di simulazioni sufficiente a garantire il confronto di molteplici scenari e di valutare così per quale finestra temporale sia minore la probabilità di produrre impatti negativi. In tale contesto è motivata anche la scelta di analizzare in maniera integrata l’andamento della concentrazione dei sedimenti in sospensione e dei tassi di deposizione al fondo considerando una molteplicità di “scenari singoli” di durata relativamente breve. Un esempio di applicazione è riportato in Feola *et al.* (2015, 2016) dove viene proposto il metodo Dr-EAM (*Dredging - Environmental Assessment Module*), basato sull’utilizzo in modalità integrata di una piattaforma di strumenti di analisi e sintesi della variabilità spaziale e temporale di parametri ambientali d’interesse, per il confronto dei risultati ottenuti con simulazioni di scenari di movimentazione multipli ed indipendenti in condizioni climatiche differenti, per differenti soluzioni tecniche/operative e differenti localizzazioni dell’area di dragaggio come stralcio funzionale di progetto.

Un approccio diverso in termini di scenari modellati si basa sull’analisi a lungo termine (oltre 12 mesi) dei processi di dispersione e deposizione dei sedimenti (SKM, 2013) al fine di considerare le fluttuazioni inter-annuali delle correnti a grande scala (tipicamente non considerate). In questo caso, per consentire una valutazione dei processi di trasporto e deposizione conseguenti allo sviluppo di un pennacchio di torbida, la durata degli scenari di simulazione deve comprendere sia la durata dello svolgimento delle operazioni di escavo e/o sversamento (Schoellhamer, 2002), sia un intervallo successivo al completamento delle operazioni di movimentazione sufficientemente lungo da garantire il raggiungimento di una condizione stabile.

La letteratura di settore evidenzia anche l’importanza di tecniche di analisi, sintesi e rappresentazione dei risultati modellistici standardizzate che agevolino l’individuazione e il confronto, nell’ambito delle procedure decisionali e di gestione ambientale, delle aree esposte ai fenomeni di sviluppo e trasporto dei pennacchi di torbida in diverse condizioni progettuali e ambientali (Clarke & Wilber, 2000; PIANC, 2010; GBRMPA, 2012; SKM, 2013; Feola *et al.*, 2015, 2016).

A tale proposito, in GBRMPA (2012) si raccomanda l’elaborazione di mappe di sintesi dei valori massimi e medi della concentrazione dei sedimenti sospesi calcolati in prossimità degli strati intermedi e profondi della colonna d’acqua, oltre che dei tassi di deposizione (g/m^2) al fondo. Si raccomanda, inoltre, l’estrazione in punti strategici delle serie temporali di concentrazione dei sedimenti sospesi e depositati al fondo durante lo svolgimento delle attività di movimentazione. In SKM (2013), inoltre, si suggerisce l’utilizzo di mappe di sintesi rappresentative dell’estensione delle aree interessate dal pennacchio di torbida per singoli istanti di uno specifico scenario di modellazione, immediatamente al termine dell’azione di movimentazione, o per un certo intervallo di tempo successivo, per facilitarne l’analisi e il confronto dei risultati.

In linea generale, per la corretta valutazione degli effetti è importante stimare la durata (o tempo di permanenza) dei superamenti delle concentrazioni di sedimento sospeso oltre un valore (o una serie di valori) predefinito (IMDC, 2012; Savioli *et al.*, 2013). In alcuni casi ci si riferisce anche alla percentuale di finestre temporali durante le quali tali concentrazioni sono superiori ad un valore predefinito per più di 12 ore su un periodo di 24 ore (Fitzpatrick *et al.*, 2009). In questi casi, oltre all’elaborazione di mappe di sintesi, è opportuna la definizione di indici statistici di immediata interpretazione che facilitino la lettura integrata delle informazioni ottenute in termini di intensità, durata e probabilità di superamento dei livelli (o delle soglie) di riferimento individuati come rappresentativi della variabilità sito-specifica dei parametri di interesse in condizioni indisturbate (es. prima dell’inizio delle operazioni di movimentazione o, successivamente, in aree ‘disturbate’ solo da fattori estranei ai lavori stessi).

In Fisher *et al.* (2017) si propone di quantificare l’entità dello *stress* (o disturbo) ambientale tramite un’analisi combinata (IDF) dei parametri intensità (I), durata (D) e frequenza (F) dei superamenti di

condizioni di riferimento iniziali sito-specifiche derivate da dati di campo. Inoltre, dall'analisi dei dati di campo e dei principali parametri che caratterizzano il disturbo (IDF) prodotto dall'incremento di SSC (aumento della torbidità, attenuazione della luce al fondo ed aumento della sedimentazione al fondo), si propone un approccio per derivare le curve di "stress-risposta" delle specie (nel caso specifico di coralli).

Sebbene la valutazione della severità dei potenziali impatti sul comparto biotico non rientri tra le finalità del presente Manuale, si evidenzia che la definizione di curve "stress-risposta" può avere un risvolto applicativo importante nell'ambito dei processi progettuali e decisionali. La disponibilità di tali curve, infatti, può essere di supporto all'individuazione di livelli di riferimento più verosimili, perché stabiliti tenendo conto del reale grado di tolleranza (o sensibilità) dei recettori sensibili ad una maggiore esposizione agli incrementi di SSC e DEP, o di altri parametri di interesse in generale (Clarke & Wilber, 2000; Wilber & Clarke, 2001; PIANC, 2010; Feola *et al.*, 2015, 2016; Fisher *et al.*, 2017). In tale ambito, pertanto, risulta cruciale la conoscenza dell'ecologia di specie dei recettori sensibili eventualmente presenti in prossimità dei siti di intervento.

1.3. Obiettivi e struttura del Manuale

Il presente Manuale fornisce indicazioni sulle modalità di implementazione di un Approccio Modellistico Integrato (AMI) finalizzato a stimare la quantità dei sedimenti rilasciati durante l'intero ciclo della movimentazione (dall'escavo allo sversamento) e a prevederne la variabilità nello spazio e nel tempo a diverse distanze dal sito di intervento in relazione all'idrodinamica e alla configurazione batimetrica locale.

L'approccio modellistico è definito "integrato" perché basato sull'utilizzo di strumenti modellistici diversi, da implementare a cascata per riprodurre i fenomeni di trasporto (risospensione, dispersione, diffusione e deposizione) dei sedimenti. L'affidabilità dei risultati è fortemente correlata a una stima attendibile del flusso della frazione dei sedimenti rilasciati dal termine sorgente, che deve essere rappresentativo delle diverse fasi delle operazioni di movimentazione.

Il Manuale si concentra sulla valutazione della significatività degli effetti fisici causati dai fenomeni di risospensione/rilascio e trasporto dei sedimenti (per lo più fini) movimentati e caratterizzati da scale spaziali e temporali diverse procedendo dalla sorgente di risospensione al campo lontano.

L'AMI può essere applicato con diverse modalità di approccio in funzione delle molteplici finalità degli studi progettuali e ambientali e delle peculiarità dei diversi ambiti marino-costieri in cui possono essere eseguiti gli interventi. A tal proposito, ai fini del presente Manuale sono individuati tre principali ambiti di intervento: aree costiere (comprendenti le aree litoranee e di transizione), bacini semi-chiusi e aree al largo (cfr. al glossario della terminologia e degli acronimi per la definizione degli specifici ambiti di intervento).

Inoltre, in funzione delle finalità degli interventi, delle principali tecniche utilizzabili per l'esecuzione e della collocazione finale dei sedimenti, sono state prese in esame le seguenti fasi operative²:

- escavo (o dragaggio), in aree di acqua bassa e profonda;
- sversamento in aree costiere;
- sversamento al largo (o immersione).

Tale suddivisione in fasi operative non trova una corrispondenza biunivoca con la suddivisione degli ambiti di applicazione adottata nel presente Manuale (aree costiere litoranee e di transizione, bacini semichiusi e largo). La ragione di questa scelta discende dalla necessità di inquadrare le fenomenologie fisiche associate alle diverse fasi di movimentazione dei sedimenti in un contesto spaziale adeguato in grado di contemplare tutte le dinamiche idro-meteo-marine che influenzano la migrazione del sedimento movimentato in ambiente marino. Tale approccio trova riscontro nei principi ispiratori della Direttiva Quadro europea *Marine Strategy Framework Directive* che prevede, rispetto alla normativa precedente, un ampliamento della zona di indagine rispetto alle acque costiere da monitorare (secondo quanto previsto dalla Direttiva quadro 2000/60/CE e dal D.lgs. 152/06) fino al limite delle acque territoriali (12 miglia nautiche) e anche oltre, in virtù della non trascurabile mutua interazione tra i processi chimico-fisici di largo e quelli più sottocosta.

² In funzione della finalità degli interventi e della collocazione finale dei sedimenti, possono essere considerate solo alcune delle fasi operative (escavo/dragaggio, carico/trasporto e sversamento) dell'intero ciclo della movimentazione per il conseguimento degli obiettivi degli studi modellistici.

Il Manuale si rivolge ai soggetti coinvolti a vario titolo nella progettazione delle operazioni di movimentazione dei sedimenti marini.

In particolare, l'approccio modellistico proposto ha lo scopo di supportare l'ottimizzazione delle diverse fasi di progettazione e gestione degli interventi, nonché la pianificazione delle corrispondenti attività di monitoraggio ambientale, con modalità da stabilire in relazione alla presenza e alla natura delle criticità ambientali attese e/o riscontrate.

Più nel dettaglio la metodologia può essere utilizzata:

- a supporto dell'ottimizzazione degli interventi, indirizzando la scelta delle modalità tecniche e operative (e di eventuali misure di mitigazione) più idonee per limitare i potenziali effetti ambientali attesi in seguito alla risospensione/rilascio e al trasporto dei sedimenti a diverse distanze dai siti di escavo/sversamento;
- per individuare le potenziali criticità ambientali (di breve e lungo periodo) imputabili allo svolgimento delle operazioni di movimentazione e gli scenari più sfavorevoli (o scenari critici) in relazione ai criteri operativi selezionati e alle caratteristiche ambientali locali (es. idrodinamica e tipologia dei sedimenti da movimentare);
- come strumento di supporto operativo in corso d'opera, per supportare l'interpretazione dei dati acquisiti durante le attività di monitoraggio condotte per verificare la rispondenza ambientale dei criteri operativi (e delle eventuali misure di mitigazione) selezionati;
- come strumento di supporto per gli Enti preposti al controllo, nelle diverse fasi di progettazione e gestione degli interventi, nelle procedure di valutazione e verifica della fattibilità e della compatibilità ambientale degli interventi.

Oltre a questa sezione introduttiva, il Manuale è articolato in due parti collegate, ma autoconsistenti (Figura 1.1):

- nella parte I, guida alla comprensione (capitoli 2 e 3), sono fornite le nozioni teoriche a supporto dell'implementazione dell'AMI;
- nella parte II, guida all'applicazione (capitoli 4 e 5), sono fornite le indicazioni operative per la definizione degli scenari modellistici nell'AMI da implementare in relazione alle finalità e agli ambiti di applicazione delle operazioni di movimentazione.

Più precisamente:

- il capitolo 1 fornisce una rassegna bibliografica utile all'inquadramento della tematica e degli obiettivi del presente Manuale;
- il capitolo 2 illustra le principali finalità delle operazioni di movimentazione, le principali modalità tecniche e operative utilizzabili per il dragaggio e lo sversamento e i meccanismi di rilascio dei sedimenti ad esse correlati;
- il capitolo 3 inquadra gli strumenti modellistici utilizzabili nei diversi ambiti marino-costieri e ne elenca i requisiti minimi ed i limiti di applicabilità;
- il capitolo 4 dettaglia le componenti dell'approccio modellistico integrato (AMI) e fornisce indicazioni operative a supporto della sua implementazione per le diverse fasi operative (dragaggio, trasporto e sversamento) del ciclo della movimentazione, in relazione alle peculiarità fisiche e ambientali degli ambiti di intervento (aree costiere, bacini semichiusi e aree al largo) e alle finalità degli studi progettuali e ambientali; inoltre, illustra le tecniche di analisi e sintesi proposte per la valutazione dei risultati;
- il capitolo 5 fornisce indicazioni di carattere generale sulla mutua-interazione tra le attività modellistiche e di monitoraggio nelle diverse fasi di progettazione e gestione degli interventi, sui set di dati da impiegare per l'implementazione, la calibrazione e la validazione dell'approccio modellistico scelto, nonché sulle attività di campo da eseguire in corso d'opera per la verifica dei risultati modellistici e della rispondenza ambientale delle operazioni di movimentazione. Evidenzia, inoltre, l'importanza dei processi di condivisione tra Proponente e Autorità Competenti e acquisire e divulgare informazioni e dati (ambientali e progettuali) progetto-specifici secondo approcci standardizzati.

STRUTTURA E CONTENUTI DEL MANUALE		ASPETTI UTILI PER L'IMPLEMENTAZIONE DELL'AMI
PARTE I GUIDA ALLA COMPrensIONE	Cap. 1 - INTRODUZIONE Inquadramento della tematica e della necessità di gestione, descrizione della struttura e degli obiettivi del manuale	Formulazione del problema e definizione degli obiettivi degli studi modellistici
	Cap. 2 - PRINCIPALI TECNICHE DI MOVIMENTAZIONE E MECCANISMI DI RILASCIO DEI SEDIMENTI Rassegna delle principali finalità delle operazioni di movimentazione, delle tecniche di dragaggio, trasporto e sversamento, delle misure di mitigazione e dei meccanismi di rilascio e trasporto dei sedimenti.	Definizione del termine sorgente in base alle modalità tecnico-operative
	Cap. 3 - STRUMENTI MODELLISTICI UTILIZZABILI PER UN APPROCCIO MODELLISTICO INTEGRATO Caratteristiche salienti dei modelli per lo studio dell'idrodinamica, del termine sorgente e del trasporto dei sedimenti nel campo lontano, con approfondimenti sui livelli di dettaglio forniti in relazione alle finalità progettuali (escavo/sversamento) e alle peculiarità fisiche degli ambiti di intervento (aree costiere, bacini semi-chiusi e aree a largo).	Aspetti utili per la scelta dei modelli utilizzabili per studi di livelli di approfondimento crescente
PARTE II GUIDA ALL'APPLICAZIONE	Cap. 4 - INDICAZIONI PER L'APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO MODELLISTICO INTEGRATO Indicazioni operative sull'utilizzo dei modelli nelle diverse fasi della movimentazione dei sedimenti (escavo, trasporto e sversamento), in relazione alle peculiarità fisiche ed ambientali degli ambiti di intervento, e sulle tecniche di analisi e sintesi dei risultati.	Guida alla definizione degli scenari di modellazione e all'analisi e sintesi dei risultati durante le diverse fasi di progettazione e gestione
	Cap. 5 - RELAZIONE TRA MODELLISTICA E MONITORAGGIO AMBIENTALE Descrizione delle interazioni tra attività modellistica e di monitoraggio nelle diverse fasi progettuali e di gestione degli interventi, con cenni circa i processi di condivisione tra Proponente e Autorità Competenti e sulle modalità di divulgazione dei risultati.	Dati di input, per la calibrazione e validazione dei modelli e per la verifica in corso d'opera dell'attendibilità delle semplificazioni modellistiche attuate. Supporto della modellistica alle attività di monitoraggio e ai processi decisionali

Figura 1.1: Schema dei contenuti del Manuale e indicazione degli aspetti trattati nell'ambito dell'Approccio Modellistico Integrato (AMI).

Il Manuale si concentra sulla valutazione degli effetti sul sistema fisico conseguenti alla movimentazione di sedimento, rimandando ad altra letteratura tecnica per l'approfondimento di aspetti correlati, quali, l'analisi delle modifiche su idrodinamica e morfodinamica, del ricambio idrico, dei fenomeni di adsorbimento/desorbimento dei contaminanti eventualmente presenti nei sedimenti e delle conseguenze indotte sul sistema biologico in generale.

PARTE I - GUIDA ALLA COMPrensIONE

2. PRINCIPALI TECNICHE DI MOVIMENTAZIONE E MECCANISMI DI RILASCIO DEI SEDIMENTI

In questo capitolo sono descritte le principali tecniche utilizzate per l'escavo (dragaggio), il trasporto e lo sversamento dei sedimenti e i principali meccanismi di rilascio dei sedimenti (per lo più fini) in colonna d'acqua in relazione alle finalità degli interventi (EPA, 1993; OMOE, 1994; IADC, 1998; Anchor Environmental C.A. L.P., USACE, 2001; 2003; Eisma, 2006, CEDA/IADC, 2018). La trattazione ha la finalità principale di fornire una rassegna, seppur senza pretesa di completezza, degli aspetti tecnici e operativi utili per la definizione del termine sorgente, ossia alla stima del rateo (o del flusso) dei sedimenti rilasciati dal mezzo dragante, necessari per implementare correttamente l'Approccio Modellistico Integrato (AMI) descritto nel dettaglio nel capitolo 0, in relazione ai principali fattori tecnico-operativi.

Per facilitare l'utilizzo del Manuale, nello schema di Figura 2.1 sono esplicitate le correlazioni tra i paragrafi di questo capitolo con quelli che descrivono la tipologia dei modelli (cfr. cap.3) e degli approcci modellistici (cfr. cap. 0) implementabili nell'AMI.

		AMBITI DI INTERVENTO			
		AREE COSTIERE	BACINI SEMI-CHIUSI	AREE AL LARGO	
FASI OPERATIVE	DRAGAGGIO	§3.2, §4.3.1	§3.2, §4.3.2	§3.2, §4.3.3	IDRODINAMICA
		§2.2, §3.3.1, §4.4	§2.2, §3.3.1, §4.4	§2.2, §3.3.1, §4.4	SORGENTE DI RISOSPENSIONE
		§2.5.1, §4.5.1, §4.5.2	§2.5.1, §4.5.1, §4.5.3	§2.5.1, §4.5.1, §4.5.4	TRASPORTO
	SVERSAMENTO	§3.2, §4.3.1	§3.2, §4.3.2	§3.2, §4.3.3	IDRODINAMICA
		§2.3, §3.3.2, §4.4	§2.3, §3.3.2, §4.4	§2.3, §3.3.3, §4.4	SORGENTE DI RILASCIO
		§2.5.2, §4.5.1, §4.5.2	§2.5.2, §4.5.1, §4.5.3	§2.5.2, §4.5.1, §4.5.4	TRASPORTO

Figura 2.1 - Indicazione dei paragrafi di riferimento in funzione degli ambiti di intervento (aree costiere, bacini semi-chiusi, aree al largo) e delle fasi operative della movimentazione considerate per l'implementazione dell'AMI.

In particolare, nel seguito si riporta una sintesi circa:

- le principali tipologie e finalità degli interventi che prevedono la movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere;
- le più comuni tecniche di dragaggio (idrauliche e meccaniche) convenzionali, mettendone in risalto i principali vantaggi e svantaggi, in termini di campi di applicazione e dei più significativi meccanismi di rilascio dei sedimenti;
- le più comuni tecniche di sversamento dei sedimenti in aree marine-costiere (es. ripascimento di aree litoranee, refluento in ambienti conterminati, ripristino morfologico in ambienti di transizione) e non (es. immersione deliberata in mare);
- le principali misure di mitigazione per limitare la dispersione dei sedimenti rilasciati;
- le caratteristiche salienti dei processi di generazione e trasporto dei pennacchi di torbida, dal campo vicino al campo lontano, che possono aversi durante l'escavo e lo sversamento (al largo e in aree costiere).

2.1. Inquadramento generale e finalità degli interventi

La movimentazione dei sedimenti marini si rende spesso necessaria per la realizzazione di molteplici interventi. Gli interventi più comuni in ambito costiero spaziano dal dragaggio finalizzato a mantenere o migliorare la funzionalità di porti e la fruibilità di canali (costruzione di terrapieni, manutenzione delle opere esistenti, ripristino della navigabilità, ecc.), al ripascimento di spiagge emerse e sommerse ed al ripristino di arenili, al ripristino morfologico di zone intertidali in ambienti di transizione, alla regolarizzazione o riapertura di foci fluviali per facilitare o ripristinare il deflusso delle portate, alla creazione di nuove zone umide, al ripristino ambientale di aree contaminate. In ambiti non costieri, invece, la movimentazione dei sedimenti può essere essenzialmente legata al dragaggio di sabbie al largo a fini di ripascimento, alla realizzazione o dismissione di grandi infrastrutture *offshore* quali piattaforme di estrazione di olio e gas, posa di cavi e condotte sottomarine, o immersione deliberata in mare di grandi quantità di sedimento.

Da un punto di vista tecnico l'intero ciclo di movimentazione è generalmente articolato in tre fasi operative distinte: escavo (o dragaggio), trasporto e sversamento (o collocazione finale) dei sedimenti. Per quanto riguarda la fase di escavo (o dragaggio) si individuano, in funzione delle finalità degli interventi, tre categorie principali: (1) dragaggio principale o infrastrutturale, (2) dragaggio manutentivo e (3) dragaggio ambientale. Per ciascuna categoria di dragaggio, la scelta delle modalità tecniche e operative è funzione delle caratteristiche geotecniche del fondale (in particolare della resistenza al taglio) e della necessità di effettuare un dragaggio di tipo ambientale.

Nel dettaglio, il dragaggio principale o infrastrutturale è finalizzato all'approfondimento delle quote d'imbasamento di opere esistenti ed alla realizzazione *ex novo* d'infrastrutture. Pertanto, prevede operazioni di escavo non ripetute nel tempo e la rimozione di fondali generalmente caratterizzati da sedimenti compatti e indisturbati e con contenuto di contaminanti scarso (o nullo).

Il dragaggio manutentivo viene effettuato periodicamente per il mantenimento delle profondità navigabili dei canali di accesso di aree portuali e foci fluviali. Questa tipologia di intervento prevede la rimozione di quantità variabili di sedimenti, generalmente incoerenti e distribuiti su strati sottili, che possono essere caratterizzati dalla presenza di contaminanti e da scarse proprietà geotecniche dei materiali (scarsa resistenza al taglio).

Il dragaggio ambientale viene solitamente effettuato qualora si debba procedere all'escavo di sedimenti contaminati o al ripristino di fondali inquinati. Generalmente, questa tipologia di intervento prevede operazioni di dragaggio di sedimento incoerente non ripetute, a patto che sia controllabile la sorgente di contaminazione e che sia possibile la rimozione totale dei sedimenti. In considerazione della tipologia del materiale da dragare è necessario eseguire specifiche indagini preliminari di caratterizzazione ambientale, finalizzate a stabilire, oltre alla tipologia ed allo spessore dei sedimenti da rimuovere, anche il livello di contaminazione.

Nella selezione delle tecniche di movimentazione e sversamento dei sedimenti dragati si può tener conto, in base alle possibili opzioni di gestione del sedimento (disciplinate, ad es., dall'Art.5 del D.L. 84/94 e dal D.M. 15 luglio 2016, n. 173), delle seguenti collocazioni finali del sedimento: al largo (per l'immersione deliberata in mare); in aree costiere (per contrastare il fenomeno dell'erosione dei litorali, o più in generale, per stabilizzare/ripristinare specifici ambiti costieri); in ambienti conterminati (come, ad esempio, per il refluento in casse di colmata e per la creazione di piazzali e banchine).

Si ricordano, inoltre, gli interventi di sversamento in aree costiere di transizione, come ad esempio quelli eseguiti ai fini del ripristino morfologico di strutture intertidali. Gli interventi di ripristino morfologico prevedono, in genere, la deposizione del materiale all'interno di conterminazioni provvisorie realizzate con sistema di pali e reti filtranti che trattengono il sedimento refluito consentendo l'uscita della parte fluida.

2.2. Tecniche di dragaggio

Le tecniche di dragaggio sono generalmente raggruppate, in base alla strumentazione utilizzata, in due categorie principali: meccaniche e idrauliche. A queste si aggiunge una terza tipologia che utilizza in modo combinato tecnologie di tipo meccanico ed idraulico (o pneumatico) (e.g. EPA, 1993; USACE, 2003; Eisma, 2006). La scelta del mezzo dragante è influenzata da diversi fattori, sia di tipo operativo (finalità dell'intervento, distanza tra l'area di prelievo e quella di versamento, incidenza sulla durata e sui costi degli interventi), sia di tipo ambientale (tipologia, quantità e qualità dei sedimenti da

movimentare, profondità del tirante idrico e condizioni meteo-marine del sito di intervento). L'interazione tra questi fattori è complessa e spesso incide notevolmente sull'entità e la tipologia dei meccanismi di rilascio dei sedimenti in colonna d'acqua durante la fase in opera.

Nei paragrafi seguenti sono descritte le draghe meccaniche e idrauliche convenzionali più comuni (i cui riferimenti tecnici sono riportati anche nel DM 172/2016), mettendone in risalto sia i principali campi di applicazione, sia i principali vantaggi e svantaggi derivanti dal loro utilizzo. Si fornisce, inoltre, una descrizione dei meccanismi di rilascio dei sedimenti più significativi associati al loro utilizzo e i principali accorgimenti tecnici utilizzabili per limitare il rilascio di sedimenti in colonna d'acqua e nell'ambito di dragaggi di tipo ambientale.

2.2.1 Dragaggio meccanico

Le draghe di tipo meccanico sono adatte per rimuovere sedimenti di tipo coesivo, sabbioso e ghiaioso, e altri materiali duri o compatti di diversa tipologia, ma non sono adatte per la rimozione di sedimenti coesivi molto consolidati e basamenti rocciosi. Sono generalmente utilizzate quando le dimensioni ridotte dell'area di dragaggio, la presenza di strutture costiere e portuali (moli, banchine, barriere, ecc.) o le grandi distanze tra il sito di dragaggio ed il sito di sversamento non permettono di operare con draghe di tipo idraulico (Anchor Environmental, 2003). Sono spesso utilizzate per effettuare dragaggi manutentivi e per la realizzazione di nuove strutture marittime, soprattutto qualora sia necessario operare con escavi di precisione (es. in prossimità di strutture costiere e portuali). Le draghe meccaniche sono stazionarie, richiedono punti di ancoraggio per l'ormeggio e l'avanzamento, e consentono di asportare i sedimenti con un limitato contenuto di acqua, mantenendo quindi livelli di coesione e densità prossime a quella di origine.

La scelta del sistema di escavo (benne, grappi e tazze) è prevalentemente dettata dalla tipologia del materiale da dragare (OMOE, 1994).

Lo svolgimento di un intero ciclo di dragaggio, definito discontinuo, prevede che il materiale rimosso dal fondo attraverso l'intera colonna d'acqua, venga raccolto e trasportato mediante pontoni e chiatte, o attraverso specifiche imbarcazioni a tramoggia (o bette di appoggio), e quindi rilasciato nel sito di destinazione.

Nel seguito si riporta una descrizione sintetica, e non esaustiva, delle principali categorie di draghe meccaniche suddivise, in base al meccanismo di escavo, in draghe a cucchiaio (*BackHoe* o *Dipper - Dredges*, BHD), draghe a grappo o a benna mordente (*Grab Dredges*, GD) e draghe a secchie (*Ladder Bucket Dredges*, BLD).

In Tabella 2.1 sono schematizzate le principali condizioni di utilizzo e produttività delle draghe meccaniche descritte con maggior dettaglio nei paragrafi successivi.

Si rimanda alla letteratura di settore per approfondimenti ulteriori delle singole tecniche di dragaggio meccanico convenzionali (es. Bray *et al.*, 1996) e ambientali (es. Bray, 2008).

Tabella 2.1 - Schema di sintesi delle condizioni di utilizzo e produttività delle principali draghe meccaniche. Modificato da Vlasblom (2003).

		DRAGHE MECCANICHE		
		Draga a cucchiaio (BHD)	Draga a grappo (GD)	Draga a secchie (BLD)
Sedimento da movimentare	Sabbioso	SI	SI	SI
	Argilloso	SI	SI	SI
	Roccia	SI	NO	SI
Condizioni di utilizzo e produttività	Funi di ancoraggio	NO	SI	SI
	Profondità massima di lavoro	20	>100	30
	Livelli di accuratezza raggiunti	SI	NO	SI
	Possibilità di operare <i>offshore</i>	NO	SI	NO
	Trasporto attraverso condotte	NO	NO	NO
	Possibilità di rimuovere il sedimento con densità prossime a quelle <i>in situ</i>	SI	SI	SI

2.2.1.1 Draghe a benna o a cucchiaio

Le draghe a benna o cucchiaio (*BackHoe Dredgers*, BHD) sono costituite da un escavatore idraulico convenzionale montato su un pontone e dotato di un sistema di pali per lo spostamento e l'ancoraggio (Figura 2.2). La struttura che sorregge il braccio della gru è generalmente fissata su una piattaforma girevole, che può ruotare intorno ad un albero (spinale) verticale. Il cucchiaio ha un fondo incernierato che può essere aperto o chiuso per mezzo di una fune manovrabile dalla cabina dell'operatore. Il sedimento viene rimosso dal cucchiaio dell'escavatore (*bucket*) e successivamente sversato su una betta di appoggio affiancata alla draga.

Questa tipologia di draghe è adatta per l'escavo di molteplici tipologie di fondali ed è spesso utilizzata per rimuovere sedimento roccioso, duro e compatto o materiale di risulta dall'utilizzo di cariche esplosive e anche per la rimozione di vecchi moli, scogliere, blocchi di calcestruzzo, ceppi e radici, ecc.. Poiché richiedono spazi ridotti per le manovre e consentono un'elevata capacità di controllo delle operazioni e precisione del taglio sono utilizzate per dragaggi in prossimità di strutture portuali e costiere (ponti, darsene, moli, scogliere frangiflutti, ecc.).

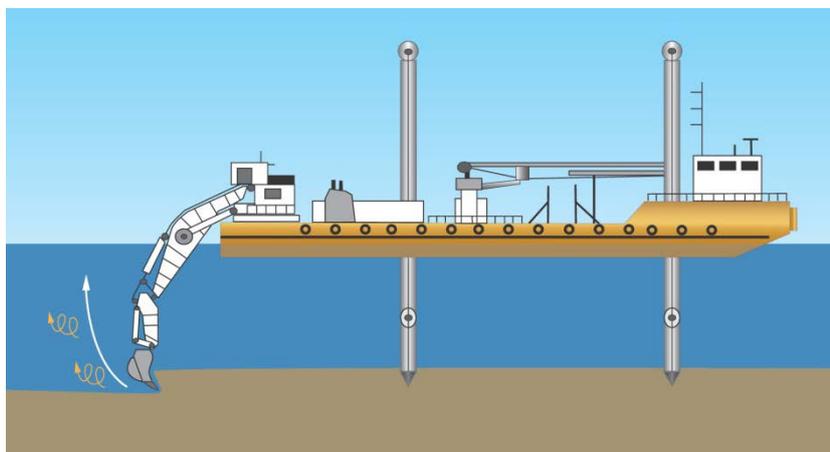


Figura 2.2 - Schema di una draga a cucchiaio (da Becker et al., 2015).

Condizioni di utilizzo e produttività

Le BHD possono operare fino a profondità massime di circa 15 m. La capacità degli scavatori (benna o cucchiaio) è solitamente compresa tra 6 m³ e 9 m³, pertanto, la produttività giornaliera è generalmente limitata e molto variabile. Le draghe di dimensioni maggiori possono raggiungere produttività pari a circa 500 m³/h, per un numero di cicli di dragaggio variabile tra i 30 e i 60 l'ora.

Attraverso l'utilizzo di sofisticate tecniche di monitoraggio è possibile ottenere una accurata precisione del taglio e della profondità di dragaggio. Riducendo la diminuzione della produttività, e quindi la velocità del ciclo di dragaggio, è possibile operare con un'accuratezza inferiore ai 10 cm.

Questa tipologia di draga non è considerata adatta per la rimozione di sedimenti contaminati, a meno che non si utilizzino specifici accorgimenti (cfr. par. 2.2.1.4).

Meccanismi di rilascio dei sedimenti

I principali meccanismi di rilascio dei sedimenti in colonna d'acqua si generano a causa dell'impatto e del disturbo che subisce il fondale durante l'asportazione dei sedimenti (Figura 2.2). Parte del sedimento può essere perso anche attraverso le acque di scolo rilasciate quando la benna fuoriesce dall'acqua (Figura 2.4). Una piccola frazione dei sedimenti può essere rilasciata, infine, per il lavaggio della benna durante la fase di discesa verso il fondale.

2.2.1.2 Draghe a grappo o benna mordente

Il funzionamento delle draghe a grappo (*Grab Dredgers*, GD), o a benna mordente, è molto simile a quello delle draghe a cucchiaio. La differenza principale risiede nel dispositivo di asportazione del sedimento dal fondo, costituito da un grappo collegato alla gru tramite un cavo e montate su pontone (Figura 2.3). Il sedimento dragato è generalmente sversato all'interno di una betta di appoggio

affiancata al pontone o, meno frequentemente, viene depositato in un pozzo di carico proprio della draga (*Grab Hopper Dredger*), generalmente di capacità compresa tra 100 m³ e 2.500 m³.

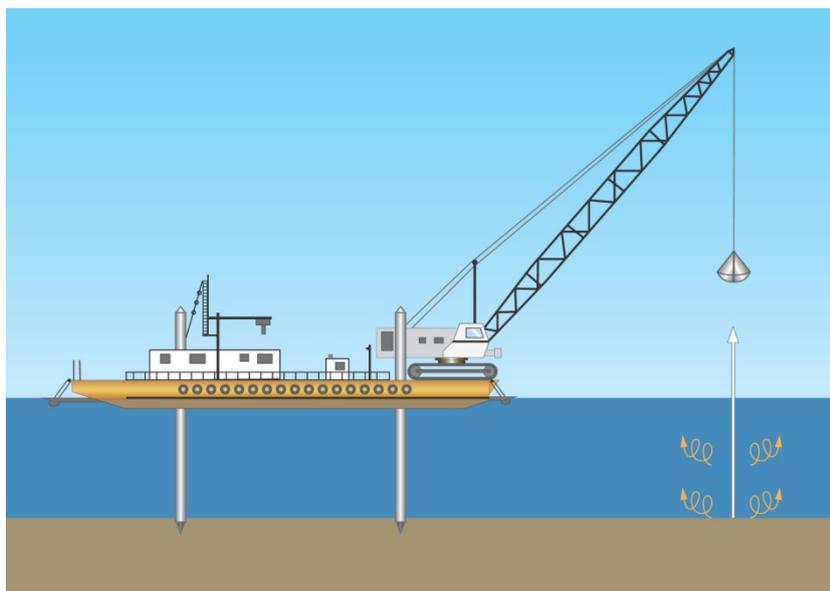


Figura 2.3 - Schema di una draga a grappo.

Le GD sono adatte per l'escavo di fondali di diversa natura, di solito limosi o fangosi, ma non per la rimozione di sedimenti coesivi consolidati, duri e compattati, e di materiale roccioso. Uno dei maggiori vantaggi derivanti dall'utilizzo di draghe di questa tipologia è che la densità del sedimento rimosso rimane prossima a quella di origine. Analogamente alle BHD, anche le GD richiedono spazi ridotti per le manovre e sono adatte per escavi di precisione in prossimità delle strutture portuali e costiere. Inoltre, pur consentendo un'elevata capacità di controllo delle operazioni e della precisione del taglio, hanno generalmente un'accuratezza limitata poiché il grappo va riposizionato al termine di ogni ciclo di dragaggio. Infatti, a meno che le draghe non siano dotate di sofisticati sistemi di monitoraggio, è difficile ottenere un preciso riposizionamento.

Condizioni di utilizzo e produttività

Le GD possono operare anche a profondità massime di circa 100 m. La capacità del grappo è generalmente compresa tra 1 m³ e 200 m³ secondo la tipologia. Per grappi di capacità molto grande, la produttività è dell'ordine di 1.000-2.000 m³/h. La produttività, tuttavia, è strettamente dipendente anche dalla profondità di dragaggio: ad esempio alle medie profondità è generalmente compresa tra 300 e 800 m³/h. Sono disponibili draghe a grappo molto grandi che permettono di raggiungere produttività anche superiori (tra 1.000 e 20.000 m³/h).

Questa tipologia di draghe non è adatta per la rimozione di sedimenti contaminati, a meno che non si utilizzino grappi a tenuta idraulica, appositamente studiati per minimizzare il rilascio dei sedimenti in colonna d'acqua.

Meccanismi di rilascio dei sedimenti

Il rilascio dei sedimenti può avvenire quando il grappo impatta sul fondale, durante la sua risalita in colonna d'acqua a seguito dell'innescarsi di fenomeni di turbolenza in prossimità delle attrezzature di dragaggio (Figura 2.3), per il rilascio del sedimento contenuto nelle acque di scolo quando la benna fuoriesce dall'acqua (Figura 2.4) e, in piccola parte, per il lavaggio del grappo durante la sua ridiscesa verso il fondale.

A meno che non si utilizzino dispositivi e accorgimenti tecnici specifici (cfr. par. 2.2.1.4), il rilascio dei sedimenti è spesso significativo. L'utilizzo di grappi a tenuta idraulica può portare, ad esempio, a una riduzione dal 30% al 70% del rilascio dei sedimenti in colonna d'acqua. Tale riduzione riguarda principalmente (fino al 35% circa) la fase di risalita.



Figura 2.4 – Rilascio (*spillage*) durante la risalita di una draga a grappo (a sinistra) e a cucchiaio (a destra).
Da HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd (2003).

2.2.1.3 *Draghe a secchie*

Le draghe a secchie (*Ladder Bucket Dredgers*, BLD) sono costituite da un ampio pontone dotato di un pozzo centrale ove è installata una catenaria, lungo la quale sono montate le secchie per il prelievo dei sedimenti (Figura 2.5). La secchia (*bucket*) penetra nel fondale e i sedimenti sono trasportati verso l'alto dalla catenaria e convogliati in una betta affiancata alla draga. Sono costituite da uno scafo stazionario. Draghe di dimensioni più piccole possono essere auto-propulse.

Le BLD consentono una buona precisione nel taglio (le secchie passano alla stessa profondità se il braccio della draga rimane nella stessa posizione), pertanto sono considerate adatte per escavi di precisione come, ad esempio, la realizzazione di trincee per la posa di cavi e condotte. Inoltre, possono essere utilizzate quando è richiesta una buona accuratezza (dell'ordine dei 10 cm) e per la rimozione di sottili strati di sedimento. Se ne consiglia, quindi, l'utilizzo quando è necessario evitare il mescolamento di strati di sedimento di caratteristiche differenti. È comunque richiesto uno spessore minimo di sedimento da rimuovere per evitare che le secchie siano parzialmente riempite con acqua. Sono adatte per il dragaggio di sedimenti a granulometria fine, quando il trasporto della miscela acqua-sedimento può creare problemi e quando si richiede che siano conservate buone caratteristiche geotecniche dei sedimenti di dragaggio.

Condizioni di utilizzo e produttività

Le BLD possono operare generalmente fino a profondità massime pari a circa 30 m. La produttività della draga è funzione della capacità delle secchie (solitamente variabile tra 0,1 m³ e 2 m³) e della velocità della catenaria e generalmente varia tra 50 e 1.500 m³/h. Uno svantaggio connesso con l'utilizzo di questa tipologia di draghe è lo spazio richiesto per i sistemi di ancoraggio che può ostacolare la navigabilità. Inoltre, l'alta possibilità che l'equipaggio entri in contatto con il materiale dragato durante la fase di carico e trasporto dei sedimenti fuori dall'acqua non le rende adatte per la rimozione di materiale contaminato.

Meccanismi di rilascio dei sedimenti

Il fenomeno del rilascio dei sedimenti a seguito di dragaggio con draga a secchie non è stato molto studiato. Tuttavia, contrariamente alle draghe meccaniche precedentemente descritte, le draghe a secchie operano seguendo un ciclo di dragaggio relativamente continuo e pertanto (soprattutto nel caso di dragaggio di sedimenti omogenei) il sedimento è rilasciato in percentuale costante lungo la colonna d'acqua. Solo al fondo la concentrazione dei sedimenti risospesi può essere maggiore a causa dell'impatto delle secchie col fondale. La porzione dei sedimenti persi in colonna d'acqua durante l'impatto con il fondale e la fase di risalita delle secchie (dentro e fuori l'acqua) può non essere trascurabile, tuttavia il rilascio legato alle acque di scolo può essere limitato diminuendo la velocità di dragaggio a scapito della produttività.

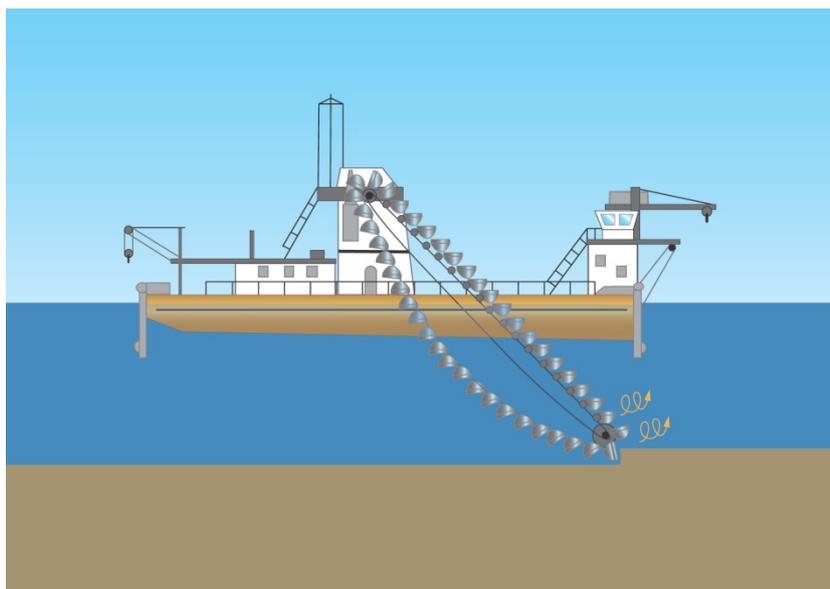


Figura 2.5 - Schema di una draga a secchie.

2.2.1.4 Dragaggio meccanico di tipo ambientale

In generale le draghe meccaniche ambientali sono dotate di accorgimenti tecnici e di sistemi di monitoraggio delle azioni di apertura e chiusura della testa dragante che permettono di migliorare la precisione nel posizionamento e nel taglio e di operare con una maggiore selettività ed accuratezza in modo da consentire di rimuovere separatamente strati, anche sottili, di sedimento caratterizzati da diversi gradi e tipologie di contaminanti. Inoltre, specifici accorgimenti sono impiegati per prevenire le perdite di sedimento asportato dal grappo in fase di risalita lungo la colonna d'acqua.

Alle draghe meccaniche modificate per l'utilizzo in dragaggi di tipo ambientale appartengono l'*Ecodrag* (a tazze) e il *Visor Bucket* o l'*Ecograb* (a grappo o benna).

L'*Ecodrag* è una secchia munita di coperchio che consente di ridurre sia la fuoriuscita di sedimento e la formazione di aria nelle secchie durante la fase di risalita sia il rilascio della frazione rimasta adesa al suo interno per il lavaggio in fase di discesa. Inoltre, può essere dotata di guaine per la chiusura ermetica per ridurre ulteriormente il contatto diretto tra il sedimento dragato e la colonna d'acqua.

L'*Ecograb* presenta un movimento orizzontale di chiusura che, realizzando un profilo di escavo secondo piani orizzontali può dragare con elevata precisione anche strati relativamente sottili di materiale, limitando la quantità d'acqua intercettata e realizzando un buon grado di riempimento della benna. Può avere la particolarità di essere provvista di una visiera girevole (*visor bucket*) che, azionata da due pistoni idraulici, richiude il cucchiaio prima della risalita verso la superficie.

L'utilizzo di queste benne (o grappi) modificate su gru idrauliche dotate di braccio meccanico (*Backhoe Dredger*) permette un miglior posizionamento di quelle dotate di cavi di acciaio.

La produttività è ridotta rispetto al dragaggio meccanico tradizionale e, in genere, limitata a poche centinaia di metri cubi per ora.

2.2.2 Dragaggio idraulico

Il principio di funzionamento delle draghe idrauliche si basa sull'utilizzo di pompe centrifughe. I sedimenti sono prelevati e trasportati in forma fangosa (miscela di acqua e sedimento tipicamente costituita dal 5-20% di frazione solida) per mezzo di una corrente fluida indotta dalla pompa che genera una depressione nella zona di prelievo. I sedimenti trasportati nella condotta di aspirazione per mezzo del sistema idraulico refluyente possono essere sversati direttamente nel pozzo di carico della draga, su una betta di appoggio affiancata alla draga o direttamente nel sito di refluento o sversamento.

Il dragaggio di tipo idraulico permette di soddisfare specifiche esigenze legate alla rimozione di grandi volumi di sedimento, anche compatto. Nel caso di sedimenti sciolti o incoerenti la sola suzione può essere sufficiente per la rimozione ed il trasporto del sedimento. Nel caso di sedimenti coesivi, invece,

può essere necessario l'ausilio di dispositivi aggiuntivi, incorporati nella bocca d'aspirazione della testa dragante. Tali dispositivi possono essere ad azione meccanica, quali ad esempio, frese terminali a lame (*cutter-head*), a secchie (*bucket wheel*) o a vite (*worm wheel*), oppure ad azione idraulica o pneumatica, con il ricorso a getti addizionali d'acqua o di aria. In questi casi le draghe utilizzano dispositivi di tipo sia idraulico sia meccanico, in quanto il materiale viene disgregato meccanicamente e poi asportato e trasportato, miscelato con acqua, mediante pompaggio.

Le draghe aspiranti possono essere autopropulse (draghe semoventi) o dotati di cavi e ancore di prua per il posizionamento e lo spostamento (draghe stazionarie).

Diversamente da quanto accade per un dragaggio di tipo meccanico, le diverse fasi operative (rimozione, trasporto, sversamento) si svolgono a ciclo chiuso. Dal punto di vista ambientale ciò costituisce un vantaggio perché è estremamente ridotto il rischio di rilascio dei sedimenti in colonna d'acqua durante la fase di trasporto verso il sito di sversamento (a meno di eventi particolari, come in seguito a rotture, intasamenti o rimozione delle pompe di aspirazione).

Di seguito si riporta una descrizione sintetica e non esaustiva delle principali tipologie di draghe idrauliche catalogate come: draghe aspiranti stazionarie (*Stationary Suction Dredgers, SD*), draghe aspiranti stazionarie con disgregatore (*Cutter Suction Dredgers, CSD*), draghe aspiranti semoventi con pozzo di carico (*Trailing Suction Hopper Dredgers, TSHD*).

Si riportano, inoltre, cenni sugli accorgimenti tecnici adottabili per limitare le perdite di sedimento e per eseguire dragaggi idraulici di tipo ambientale.

In tabella 2.2 sono schematizzate le principali condizioni di utilizzo e produttività per le draghe idrauliche descritte con maggior dettaglio nei paragrafi successivi.

Si rimanda alla letteratura di settore per ulteriori approfondimenti delle singole tecniche di dragaggio idraulico convenzionali (es. Bray *et al.*, 1996) e ambientali (es. Bray, 2008).

Tabella 2.2 - Schema di sintesi delle condizioni di utilizzo e produttività delle principali draghe idrauliche. Modificato da Vlasblom (2003).

		DRAGHE IDRAULICHE		
		Draga aspirante stazionaria (SD)	Draga con disgregatore (CD)	Draga semovente con pozzo di carico (TSHD)
Sedimento da movimentare	Sabbioso	SI	SI	SI
	Argilloso	NO	SI	SI
	Roccia	NO	SI	NO
Condizioni di utilizzo e produttività	Funi di ancoraggio	SI	SI	NO
	Profondità massima di lavoro	70	25	100
	Livelli di accuratezza raggiunti	NO	SI	NO
	Possibilità di operare al largo	SI	NO	SI
	Trasporto attraverso condotte	SI	SI	NO
	Possibilità di rimuovere il sedimento con densità prossime a quelle <i>in situ</i>	NO	Limitata	NO

2.2.2.1 Draghe aspiranti stazionarie

Le draghe aspiranti stazionarie (*Stationary Suction Dredgers, SD*) sono le più semplici tra le draghe idrauliche. Sono costituite da un ampio pontone da cui viene calata la condotta di aspirazione (Figura 2.6). Il sedimento viene trasportato idraulicamente nella condotta di mandata direttamente nello scafo o sversato nel sito di scarico o, raramente, è sversato in apposite bette di appoggio. La condotta di aspirazione è connessa allo scafo attraverso un argano che consente la necessaria libertà di movimento alla sua estremità inferiore e alla testa della draga. L'argano mantiene la testa aspirante della condotta ad un'altezza tale da garantire un sufficiente contenuto di acqua nella miscela all'interno della condotta.

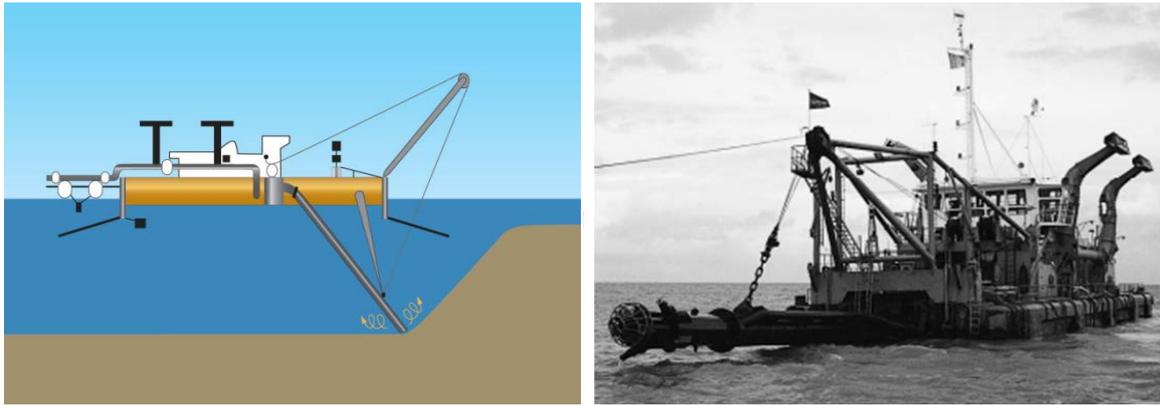


Figura 2.6 - Schema di una draga aspirante stazionaria con elinda sommersa (a destra) e foto della draga con elinda emersa (a sinistra, Eisma, 2006).

Questa tipologia di draga è adatta solo per la rimozione di sedimenti a granulometria fine (sabbia e limo), non coesi e poco compatti. Dispositivi aggiuntivi ad azione idraulica (getti addizionali d'acqua) in prossimità della testa dragante possono incrementare la capacità di escavo.

Tali draghe non sono adatte per escavi di precisione perché il processo di aspirazione è scarsamente controllabile e i profili di dragaggio piuttosto irregolari. Inoltre, realizzano solchi che possono sovrapporsi a causa di inevitabili allentamenti delle ancore. Non garantendo accuratezza e precisione nel taglio non sono adatte alla rimozione selettiva di diversi strati di sedimento. Solo modificando la testa dragante con una di forma più larga e piatta (ad esempio la *dustpan dredge*), è possibile ottenere una precisione maggiore, dell'ordine dei 10-20 cm.

Condizioni di utilizzo e produttività

La draga è mantenuta stabile durante le operazioni di dragaggio da quattro ancore laterali, così che il tubo aspirante (che non può muoversi trasversalmente rispetto alla direzione longitudinale della draga) una volta penetrato all'interno dei fondali possa resistere ai momenti flettenti indotti dai movimenti dell'imbarcazione. È impossibile, quindi, per draghe di questo tipo, operare in condizioni di mare agitato. La massima altezza d'onda significativa compatibile con le operazioni di dragaggio è approssimativamente pari a 1,5 m. Tale limite di operatività dipende anche dal periodo (di picco) delle onde.

La produttività di queste draghe è generalmente compresa tra 50 e 5.000 m³/h, in funzione delle dimensioni della draga, delle caratteristiche dei sedimenti da movimentare e dell'efficienza del ciclo di dragaggio. L'efficienza del ciclo di dragaggio è invece dipendente dalla tipologia del sistema scelto per il trasporto dei sedimenti (es. dimensioni delle bette di appoggio).

Meccanismi di rilascio dei sedimenti

Il rilascio dei sedimenti si verifica principalmente durante la fase di escavo, per l'azione di disturbo provocata dal movimento della testa dragante e (secondariamente) dal trascinarsi della tubazione sul fondale, e durante la fase di riempimento dei pozzi di carico per la fuoriuscita della miscela costituita da acqua e sedimento più fine (*overflow*). Nel caso specifico dei dragaggi di sabbia per ripascimento si potrebbe verificare un significativo *overflow* anche durante la fase di trasporto, generato dai dispositivi messi in atto per mantenere il carico della densità necessaria per essere pompato sulla spiaggia.

Contributi secondari al rilascio di sedimento fine in prossimità del fondo sono riconducibili alla turbolenza indotta dalle attrezzature di dragaggio (anche di quelle che non sono in contatto diretto con il fondale) soprattutto quando le attività sono effettuate in acque basse e al rilascio di gas che si forma nella miscela di acqua e fango non aspirato nelle tubazioni.

Anche l'eventuale svuotamento della tubazione in caso di ostruzione della condotta di aspirazione durante il ciclo di dragaggio può causare una risospensione dei sedimenti, ma generalmente è considerata trascurabile.

In questi casi l'entità del rilascio di sedimenti è considerata difficilmente controllabile e dipende per lo più dalla velocità di suzione e dalla velocità del getto d'acqua (o d'aria) eventualmente utilizzato per incrementare la capacità di escavo.

2.2.2.2 *Draghe aspiranti stazionarie con disgregatore*

Le draghe aspiranti stazionarie con disgregatore (*Cutter Suction Dredgers, CSD*) frantumano il materiale mediante una testa fresante a rotazione (Figura 2.7). L'utilizzo della testa disgregante (*cutter head*) incrementa l'efficienza e la fruibilità della draga, rendendola idonea alla movimentazione di una vasta tipologia di materiali, sciolti o rocciosi.

Come per le draghe aspiranti stazionarie (SD), il sedimento è aspirato e refluito mediante apposite pompe centrifughe sotto forma di miscela fangosa e poi trasportato e sversato idraulicamente direttamente nel sito di destinazione o, più raramente, in apposite bette di appoggio.

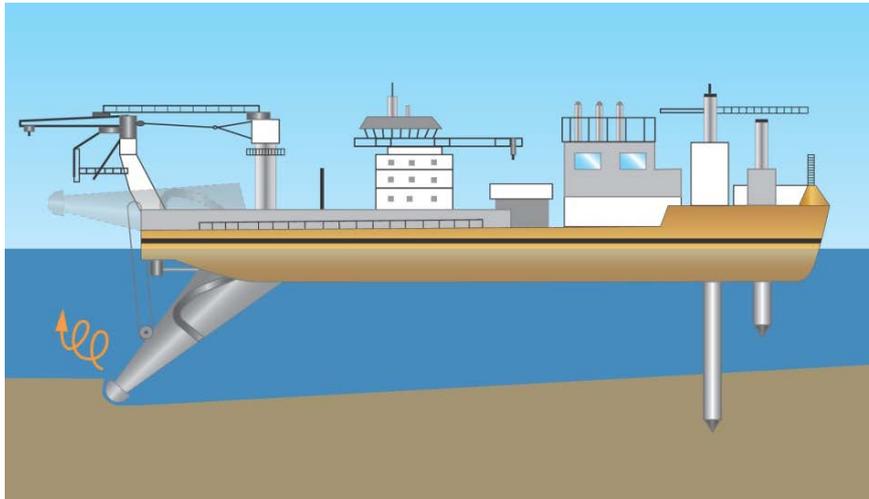


Figura 2.7 - *Draga aspirante stazionaria con testa disgregante.*

Lo scafo può avanzare per mezzo di due cavi fissati anteriormente alla nave, che ruotano la prua a destra e a sinistra, e di due pali di acciaio a poppa che si dispongono alternativamente nella posizione sollevata e infissa nel fondale. Il sistema di escavo risulta più uniforme e graduale di quello delle draghe aspiranti stazionarie (SD), perché il disgregatore scava sul fondale solchi paralleli semicircolari.

Tipicamente è possibile raggiungere un'accuratezza di 10 cm, sebbene, in condizioni di massima produttività l'accuratezza possa scendere sino a circa 25 cm. Tuttavia, questa tipologia di draghe può essere dotata di un sistema di posizionamento della testa disgregante che consente di ottenere una precisione dell'ordine del centimetro.

Le CSD sono utilizzate per il dragaggio di porti e canali dove l'altezza d'onda non è elevata, mentre non sono indicate per operare in mare aperto in quanto la massima altezza d'onda significativa tollerata si aggira intorno a 1,5 m. Tuttavia, considerati i costi previsti per l'utilizzo di questo tipo di draga è raramente impiegata per la realizzazione di piccoli interventi.

A causa delle alte concentrazioni di solidi sospesi che si possono avere in prossimità della testa dragante le tradizionali draghe aspiranti con disgregatore sono considerate poco adatte per la rimozione dei sedimenti in siti contaminati.

Condizioni di utilizzo e produttività

La varietà di dispositivi aggiuntivi (frese o lame terminali) per la preliminare disgregazione dell'ammasso sedimentario, disponibili per questa tipologia di draga, consente il dragaggio di diverse tipologie di fondali, da sciolti a rocciosi, con resistenza fino a 250 kg/cm²; in particolare, quelle più potenti sono in grado di rimuovere anche formazioni molto resistenti come coralli, basalti, calcari, ecc... La versione a ruota dotata di tazze, ad esempio, è utilizzata prevalentemente per la rimozione di materiali sciolti o leggermente compattati e per scavi a sezione obbligata.

La profondità di scavo delle CSD può variare dai 15 ai 30 m. Il ciclo di dragaggio di tipo chiuso e continuo consente di ottenere una produttività elevata, mediamente compresa tra 50 e 5000 m³/h.

La produttività è dipendente dalle caratteristiche dei sedimenti, dalle dimensioni della draga, dalla potenza di aspirazione e dalla lunghezza della condotta. Specifici studi sono stati condotti per relazionare la produttività delle *cutter-head* con le dimensioni della draga e la lunghezza della condotta di aspirazione (USACE, 1983).

Meccanismi di rilascio dei sedimenti

I meccanismi di rilascio dei sedimenti sono schematizzabili in maniera analoga a quelli descritti per le draghe aspiranti stazionarie (*Stationary Suction Dredgers, SD*). Le differenze principali si hanno per la risospensione al fondo che in questi casi può essere rilevante soprattutto nel caso di rimozione di sedimenti in prevalenza sabbiosi e argillosi. L'entità del rilascio dei sedimenti in prossimità della testa della draga, infatti, dipende notevolmente da alcuni parametri operativi, quali: velocità del movimento oscillatorio del braccio della draga, velocità di rotazione e grado di penetrazione nel fondale della testa fresante, capacità di taglio e potenza di aspirazione. Inoltre, è importante da parte dell'operatore massimizzare la produzione senza aumentare la concentrazione di sedimento nella miscela nella condotta di aspirazione (*pipeline*) in funzione della tipologia di sedimento per evitare che la parte di sedimento movimentato non aspirato dalle pompe venga lasciato *in situ* (il così detto *residual*, generalmente variabile da 0,25 m a 1 m).

2.2.2.3 Draghe aspiranti semoventi con pozzo di carico

Le draghe aspiranti semoventi con pozzo di carico (*Trailing Suction Hopper Dredgers, TSHD*) sono dotate di una tubazione aspirante flessibile con apposita testa dragante (Figura 2.8). Il ciclo di dragaggio dal sito di prelievo al sito di destinazione non è continuo, ma viene definito di tipo semi-chiuso, in quanto include diverse fasi di carico, trasporto e refluento di materiale. Il dragaggio del sedimento avviene generalmente mentre il natante è in navigazione a bassa velocità (2-3 nodi), garantendo così una buona accuratezza nella selettività di rimozione dei diversi strati di sedimento. La miscela di acqua e sedimento così formata, viene quindi trasportata direttamente nei pozzi di carico ricavati nello scafo del natante, per poi essere sversata direttamente nel sito di destinazione previsto tramite apertura del fondo dei pozzi o per aspirazione da questi e rinvio, per mezzo di pompe ausiliarie.

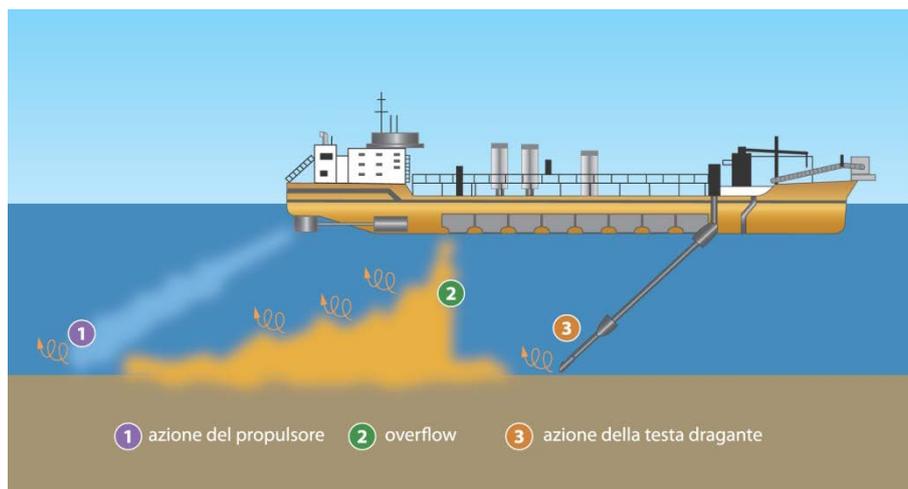


Figura 2.8 - *Draga aspirante semovente con pozzo di carico (TSHD). Schema dei potenziali meccanismi di rilascio (termini sorgenti) di sedimento: 1. testa dragante, 2. overflow, 3. azione del propulsore.*

Le TSHD sono generalmente utilizzate per la rimozione di grossi quantitativi di sedimenti di diversa tipologia, purché sciolti e incoerenti, a profondità elevate, comprese tra i 3 m e 250 m circa. Sono le uniche in grado di operare in mare aperto e in condizioni sfavorevoli di mare mosso e vento (fino a 35 nodi). Si muovono velocemente all'interno dell'area di dragaggio e costituiscono l'alternativa più economica quando la distanza tra le aree di dragaggio e di refluento sono grandi. Sono utilizzate per il dragaggio di sedimenti di buona qualità (es. ai fini di ripascimento) e sono adatte, inoltre, per il dragaggio manutentivo di porti particolarmente esposti alle condizioni meteo-marine e dove potrebbe essere ostacolato il traffico delle imbarcazioni.

Condizioni di utilizzo e produttività

La produttività delle draghe TSHD è generalmente compresa tra 200 m³/h e 10.000 m³/h.

La precisione e l'accuratezza del taglio rispetto alle altre draghe idrauliche è minore a causa della difficoltà di controllare e mantenere il posizionamento della pompa di aspirazione. Pertanto non sono adatte per operare in prossimità di infrastrutture. Normalmente l'accuratezza verticale è compresa tra i

0,5 m e 1 m mentre l'accuratezza orizzontale tra i 3 m e i 10 m. L'accuratezza può essere aumentata dotando la draga di sofisticati sistemi di monitoraggio.

Meccanismi di rilascio dei sedimenti

Durante la fase di rimozione dei sedimenti, la risospensione è determinata principalmente dal trascinarsi della testa della draga al fondo, ma è generalmente limitata rispetto al rilascio della frazione di sedimento più sottile in fase di carico (per *overflow*). Al fine di massimizzare il contenuto solido della miscela di acqua e sedimento nel pozzo di carico, infatti, la fase di carico viene spesso protratta anche dopo il completo riempimento dei pozzi di carico. Se la densità dell'*overflow* è sufficientemente alta e la velocità del natante bassa, il pennacchio tende a discendere rapidamente verso il fondo in un'area relativamente confinata. Se la densità dell'*overflow* è bassa e la velocità del natante è alta, la discesa del pennacchio può essere relativamente lenta e una grande porzione di sedimenti rilasciati può essere ulteriormente distribuita dall'azione del propulsore del natante e rimanere confinata nella parte più bassa della colonna d'acqua.

2.2.2.4 Dragaggio idraulico di tipo ambientale

In generale le draghe di tipo idraulico non hanno i requisiti necessari per eseguire un dragaggio di tipo ambientale. Tuttavia, nel corso degli anni sono state progettate speciali draghe ambientali che utilizzano specifici accorgimenti tecnici per limitare la risospensione al fondo, aumentare la densità del sedimento caricato e contenere l'*overflow* in fase di carico.

Tra le draghe idrauliche modificate per dragaggi di tipo ambientale vi sono: la draga con disgregatore a disco (*Disc Bottom Dredger* o *Environmental Disc Cutter*); la draga a paletta (*Scoop Dredger*); la draga spazzatrice (*Sweep Dredger*); la draga a ruota (*Auger Dredger*).

Nella draga con disgregatore a disco (*Disc Bottom Dredger* o *Environmental Disc Cutter*) la bocca aspirante si trova all'interno di una testa fresante cilindrica a fondo piatto dotata di un rivestimento verticale mobile adattabile sia in senso longitudinale che trasversale per ottenere un dragaggio molto accurato e selettivo. L'accuratezza, prossima a quella che si ottiene con il dragaggio stazionario, può raggiungere i 5 cm. Il sedimento movimentato viene raccolto ed allontanato regolando la portata di aspirazione in funzione dello spessore di sedimento da rimuovere, in modo da ottenere un fango di dragaggio di elevata densità. La produttività è molto ridotta rispetto alle draghe tradizionali e raggiunge i 500 m³/h circa. Il rilascio dei sedimenti in colonna d'acqua è scarso e limitato alla sola area circostante il dispositivo per il taglio.

La draga a paletta (*Scoop Dredger*) è munita di una testa dragante appositamente progettata per consentire il prelievo di sedimenti con una densità prossima a quella originaria. Il sedimento si accumula all'interno di una camera di raccolta prima di essere trasportato nella condotta di aspirazione, accorgimento tecnico che limita la produzione di torbidità.

La draga spazzatrice (*Sweep Dredger*) è dotata di una speciale testa dragante munita di una visiera regolabile, sia orizzontalmente sia verticalmente, che consente di controllare continuamente l'apertura della bocca di aspirazione. Tale sistema permette di minimizzare l'ingresso di acqua e di rimuovere il sedimento ad alta densità. L'apertura della bocca è adattabile all'altezza dello spessore da rimuovere, quindi, permette di realizzare accurati profili di dragaggio con minimi incrementi di torbidità. Nel caso in cui i sedimenti contengano gas possono essere dotati anche di sistemi di degassificazione per prevenire fenomeni di cavitazione nella pompa aspirante. La produttività raggiunge valori pari a 1.200 m³/h circa.

L'*Auger Dredger* è simile a una classica draga aspirante stazionaria dotata di una ruota che costituisce la testa dragante vera e propria. Grazie ad una connessione fissa tra la ruota ed il pontone, la coclea può essere posizionata con elevata precisione sul fondale, ruotare ampiamente e realizzare dragaggi "strato per strato" con elevata accuratezza (anche inferiore ai 5 cm). Il lento movimento di rotazione della ruota e la forma del dispositivo di taglio consentono di ridurre al minimo le perdite di materiale anche in prossimità del dispositivo di taglio. Il sedimento è poi aspirato dalla coclea e trasportato dalla pompa centrifuga con una densità elevata. La produttività raggiunge valori 800 m³/h. Le dimensioni del dispositivo di taglio rendono adatto questo strumento al dragaggio di aree ampie, ma non per il dragaggio di fondali particolarmente irregolari.

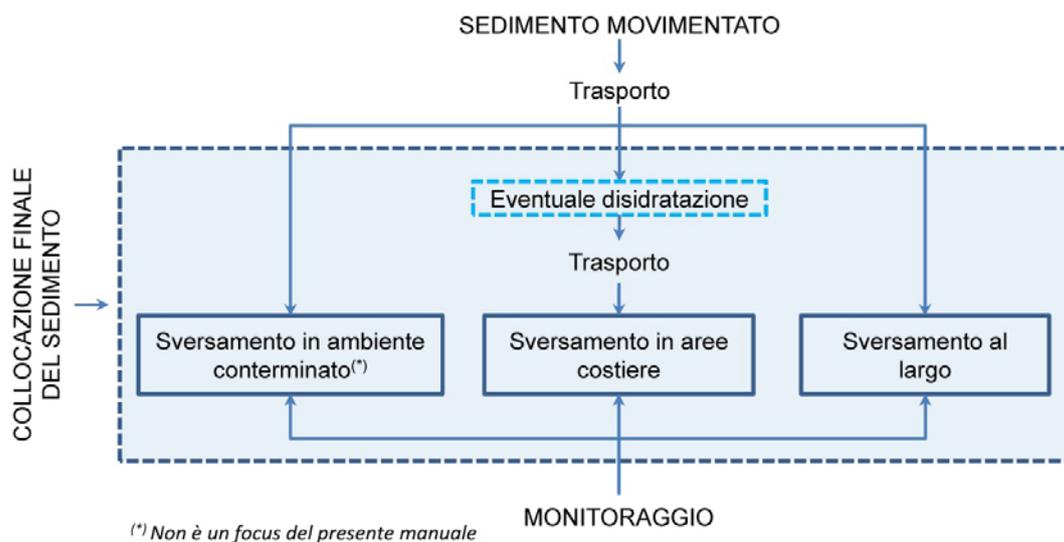
2.3. Tecniche di trasporto e collocazione

In analogia con le tecniche di escavo, anche il trasporto e lo sversamento di sedimenti possono essere effettuati con svariate tecniche, idrauliche o meccaniche, il cui impiego dipende in larga misura dalla loro destinazione finale.

Nel primo caso il sedimento viene tipicamente trasportato mediante l'utilizzo di condotte, garantendo così la continuità delle operazioni di trasferimento.

Nel secondo caso le operazioni possono essere continue o meno secondo la tipologia di strumenti adottati per il trasporto: l'utilizzo di nastri trasportatori permette la continuità delle operazioni, mentre il trasporto mediante natanti (che possono coincidere con la stessa draga) è discontinuo (ciclo di carico – trasporto – scarico).

Lo schema in Figura 2.9 illustra le possibili collocazioni finali del sedimento movimentato in funzione del sito di destinazione (ambiente conterminato, aree costiere e al largo), principalmente disciplinate dal D.M. 15 luglio 2016, n. 173.



(*) Non è un focus del presente manuale

Figura 2.9 - Possibili collocazioni finali dei sedimenti movimentati in ambiente conterminato (es. colmate), aree costiere (litoranee e di transizione) e al largo. [Da CEDA/IADC (2018) modificato].

Nel successivo paragrafo sono brevemente illustrate le principali tecniche di trasporto e sversamento dei sedimenti più comunemente utilizzate soprattutto in aree costiere (ai fini di ripascimento in aree litoranee e di ripristino morfologico in aree di transizione) e al largo (oltre le 3 miglia o a profondità superiori ai 200 m).

2.3.1 Trasporto dei sedimenti dragati

Il trasporto del materiale dragato è generalmente effettuato mediante natanti. In particolare, quando nelle operazioni di escavo sono impiegate draghe aspiranti semoventi con pozzo di carico (TSHD), è la stessa draga, una volta completate le operazioni di caricamento del materiale, a trasportare il materiale verso il sito di destinazione. Nei casi in cui le operazioni di escavo siano effettuate con draghe idrauliche differenti dalle TSHD (es. aspiranti stazionarie con disgregatore – CD o senza disgregatore –SD) o, alternativamente, con draghe di tipo meccanico (es. draghe a cucchiaio – BHD, draghe a grappo o benna mordente –GD) il sedimento dragato viene generalmente trasportato da appositi natanti (es. chiatte o bettoline), frequentemente indicati come “*barge*”, che fungono da vettore tra il sito di escavo e il sito di sversamento.

Le *barges* possono essere suddivise in due categorie (Vlasblom, 2003), sulla base della possibilità di scaricare autonomamente il materiale (*self-unloading barges*) o della necessità di ricorrere a un mezzo esterno (*non-self-unloading barges*). Nel primo caso, in analogia alle TSHD, la *barge* (o *split barge*) è generalmente dotata di un'apertura totale in senso longitudinale o di un sistema di aperture multiple nel fondo dello scafo (nella Figura 2.10 si riporta lo schema di una draga idraulica del tipo *Split Hopper Barge* – SHB).

Nel secondo caso il sedimento caricato sulla bettolina deve essere a sua volta prelevato con idonei mezzi di tipo meccanico o idraulico (tipicamente i mezzi utilizzati sono della stessa tipologia di quelli impiegati per l'escavo del materiale).

2.3.2 Sversamento mediante aperture dello scafo (*dumping*)

Lo sversamento del materiale effettuato con apertura dello scafo viene detto *dumping*. Il principale requisito che deve essere garantito in un'operazione di *dumping* è la rapidità dell'operazione: lo svuotamento dello scafo deve avvenire nel più breve tempo possibile, garantendo che, per qualsiasi tipologia di materiale, il residuo nel serbatoio (tramoggia) sia limitato a una quantità trascurabile.

Le modalità di rilascio del materiale possono variare in relazione alla configurazione delle aperture presenti nello scafo. In particolare, lo scafo può essere costituito da portelloni scorrevoli o del tipo "a valvola", posizionati lateralmente o al fondo, oppure da sistemi di apertura totale o parziale in senso longitudinale (*split barge*, Figura 2.10), con meccanismi di apertura e chiusura generalmente gestiti da un impianto idraulico di cui è dotato il mezzo.

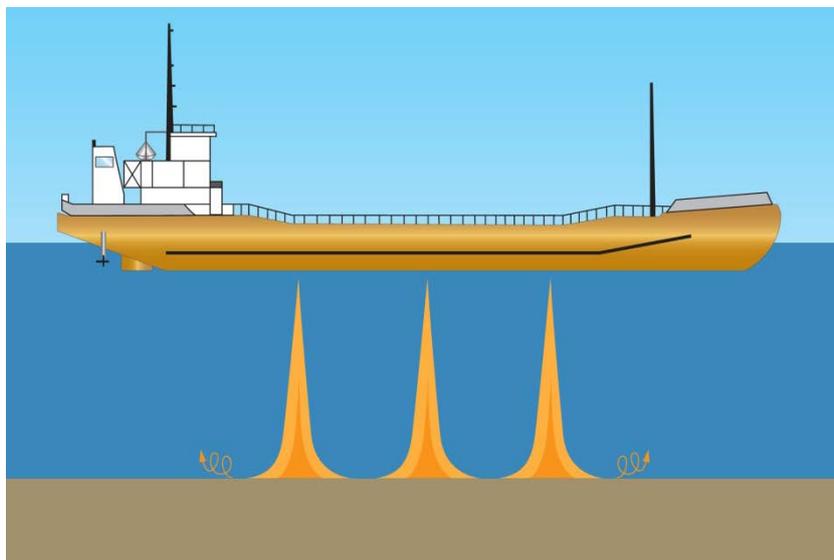


Figura 2.10 - *Split Hopper Barge (SHB)*. Da Becker et al. (2015). Esempio di sistemi di apertura parziale in senso longitudinale (*split barge*)

Meccanismi di rilascio dei sedimenti

Un'operazione di sversamento di sedimento mediante *dumping* determina un rilascio di sedimento lungo la colonna d'acqua e, in misura significativamente maggiore, in corrispondenza dello strato prossimo al fondo, laddove la massa di sedimento rilasciata impatta il fondale, per la contestuale messa in sospensione del sedimento costituente il fondale originale (Figura 2.11). L'incremento della concentrazione di sedimento in colonna d'acqua dipende significativamente dalla granulometria del sedimento sversato, dalla composizione del fondale, dalla geometria dell'apertura dello scafo e dalla rapidità dello sversamento.



Figura 2.11 - Immagini di uno sversamento al largo del tipo *dumping* (da Saremi, 2014).

2.3.3 Sversamento mediante pompaggio idraulico

Lo sversamento del materiale mediante pompaggio idraulico è un'opzione prevalentemente utilizzata in caso di ripascimento di spiaggia (emersa e/o sommersa), di interventi di ripristino morfologico in aree intertidali e di deposizione del materiale in ambiente conterminato.

L'utilizzo del materiale ai fini di ripascimento e di ripristino morfologico può essere associato a varie tecniche di deposizione/rilascio, scelte in funzione della granulometria e dei volumi complessivi dei sedimenti richiesti per l'intervento in oggetto.

Si riportano nel seguito alcune osservazioni di tipo pratico sulle tecniche di sversamento per interventi di ripascimento e ripristino morfologico mediante pompaggio idraulico (un'analisi accurata esula dall'obiettivo del presente documento).

- La velocità con la quale la miscela acqua-sedimento viene rilanciata dalle pompe e, di conseguenza, le dinamiche che avvengono all'interfaccia aria-acqua, risulta fortemente dipendente, oltre che dalla potenza delle pompe impiegate, anche e soprattutto dalla composizione della miscela (che in taluni casi può presentare un rapporto sedimento/acqua pari a 1/10) e dalla granulometria del materiale interessato.
- Gli interventi di ripascimento di spiaggia emersa e sommersa con sabbia (non grossolana) possono presentare volumi complessivi elevati³ e sono frequentemente (ma non esclusivamente) effettuati mediante sistemi di pompaggio idraulico. In questi casi il sedimento, precedentemente caricato su draghe idrauliche autocaricanti-refluenti e trattato con immissione di acqua, può essere refluito verso la spiaggia con due possibili tecniche:
 - o rilancio della miscela acqua-sedimento mediante sistema idraulico di pompe centrifughe e condotte sommerse o galleggianti (Figura 2.12, a sinistra). Il sedimento, una volta depositato nell'area oggetto del ripascimento (in genere a ridosso della battigia o direttamente in ambiente sommerso), dovrà essere distribuito e regolarizzato mediante l'ausilio di ulteriori mezzi (es. escavatori, Figura 2.13);
 - o rilancio della miscela acqua-sedimento senza l'ausilio di condotte. Per la forma arcuata che presenta il getto della miscela pompata direttamente dal natante verso la spiaggia, questa tecnica è frequentemente denominata *rainbowing* (Figura 2.12, a destra).
- Per gli interventi di ripristino morfologico in ambienti di transizione con volumetrie consistenti la tecnica più frequentemente utilizzata per la collocazione del materiale all'interno delle conterminazioni è il pompaggio idraulico (Figura 2.14).

³ Nel *D.M. 173/2016* si riporta per gli interventi di ripascimento la distinzione in: piccoli interventi annuali che comportano un apporto complessivo di sabbia inferiore a 5.000 m³, interventi di media entità con volumi complessivi annui tra 5.000 m³ e 40.000 m³ ed interventi di notevole entità con volumi complessivi superiori ai 40.000 m³ annui.



Figura 2.12 - Esempio di sistemi di sversamento con pompe centrifughe e condotte sommerse o galleggianti (a sinistra, fonte ISPRA) e di sistemi di sversamento del tipo rainbowing (a destra, fonte ISPRA).



Figura 2.13 - Esempio di redistribuzione e regolarizzazione del sedimento sversato mediante mezzi meccanici (fonte ISPRA).



Figura 2.14 - Esempi di refluentamento per ripristino morfologico in ambienti di transizione, con conterminazioni provvisorie costituite da sistemi di pali e reti filtranti (fonte ISPRA)

È opportuno altresì fare menzione a mezzi navali speciali denominati “*Fallpipe Vessel (FPV)*” frequentemente impiegati al largo per il ricoprimento di cavi e/o condotte sottomarine (*pipelines*) o per la preparazione del fondale marino a ospitare il posizionamento di strutture *offshore*. Tali mezzi sono auto-propulsi ed equipaggiati con una tubazione flessibile che viene calata al di sotto dello scafo, anche per centinaia di metri di profondità. Attraverso un opportuno sistema idraulico, una miscela di acqua e materiale (non di rado grossolano) viene veicolata attraverso la tubazione fino al fondale marino. A tali mezzi, generalmente utilizzati quando si richiede una elevata precisione nel posizionamento del materiale sul fondale marino, è spesso associato l’impiego di Veicoli a Controllo Remoto (i cosiddetti *ROV – Remotely Operated Vehicle*) per garantire un migliore posizionamento.

Meccanismi di rilascio dei sedimenti

Le tecniche di collocazione del sedimento sono generalmente associate a un meccanismo di rilascio dei sedimenti lungo l'intera colonna d'acqua: il materiale, rilasciato in corrispondenza della superficie, tende progressivamente a sedimentare con una velocità che è funzione della propria granulometria e delle condizioni idrodinamiche locali. Nel processo di migrazione del sedimento verso il fondale, parte del materiale viene progressivamente ed uniformemente perso lungo la colonna d'acqua.

La tecnica di ripascimento mediante *rainbowing* induce un'elevata dispersione del sedimento immesso nella colonna d'acqua, tanto che non di rado si riscontra un deficit significativo tra il volume di materiale sversato ed il volume effettivamente sedimentato nell'area *target*, tipicamente previsto in fase di progettazione dell'intervento. Tali differenze di volume risultano minori utilizzando tecniche che riducono drasticamente il tempo di immissione (es. *dumping*).

Gli interventi di ripristino morfologico, in virtù della granulometria generalmente medio-fine dei sedimenti sversati e dei bassi fondali degli ambiti d'intervento, possono divenire sorgenti di dispersione del materiale non ancora consolidato attraverso i varchi delle conterminazioni in casi di eventi particolare intensità (es. eccezionale alta marea).

Il fenomeno del rilascio dei sedimenti a seguito di posa di materiale mediante FPV non è stato molto studiato. In generale si può affermare che siano validi gli stessi meccanismi di rilascio illustrati per il *dumping*.

2.3.4 Sversamento con mezzi di tipo meccanico

I mezzi di tipo meccanico (es. draga a cucchiaio e a benna mordente) prelevano il materiale dalla bettolina (*barge*) e lo sversano in colonna d'acqua, secondo un procedimento meccanico inverso rispetto a quello descritto in precedenza (par. 2.2.1).

Lo sversamento con mezzi di tipo meccanico è generalmente utilizzato per interventi di ripascimento di spiaggia (emersa e sommersa) con sedimenti a granulometria grossolana (sabbia grossolana, ghiaie), o per interventi di ripristino morfologico in aree di transizione, che presentano in genere volumi complessivi limitati. In questi casi, la tecnica più frequentemente utilizzata per la collocazione del materiale è l'impiego di pontoni dotati di escavatore a benna o a cucchiaio: mediante l'escavatore il materiale, preventivamente dragato e collocato sul pontone, viene prelevato dal pontone e rilasciato sulla superficie dell'acqua sulla verticale del punto desiderato per il rilascio.

Meccanismi di rilascio dei sedimenti

I meccanismi di rilascio sono considerabili analoghi a quelli illustrati per lo sversamento attraverso aperture dello scafo (*dumping*).

2.4. Misure di mitigazione

Talvolta gli scenari delle simulazioni possono evidenziare/confermare la necessità di prevedere opportune misure di mitigazione in funzione dei volumi e della tipologia dei sedimenti da movimentare e delle criticità ambientali riscontrate.

Le misure di mitigazione, intese nel senso più ampio, comprendono gli accorgimenti tecnici e operativi utilizzabili per limitare e/o mantenere il rilascio dei sedimenti al di sotto di prestabiliti livelli di riferimento, la definizione della programmazione delle attività (es. in funzione dell'intensità delle correnti, della fase mareale, dell'intensità del vento, ecc.) e il posizionamento di barriere fisiche (antitorbidità) in corrispondenza del sito di intervento.

Nei paragrafi 2.2.1.4 e 2.2.2.4 sono descritti alcuni accorgimenti tecnici per limitare il rilascio di sedimento in colonna d'acqua e per eseguire dragaggi di tipo ambientale. A ciò si aggiunge la possibilità di limitare la produttività delle operazioni pur utilizzando le tecniche di dragaggio convenzionali.

Le varie tipologie di barriere fisiche (antitorbidità), utilizzate per confinare l'estensione del pennacchio di torbida e quindi l'area interessata dall'interazione tra i sedimenti sospesi e la colonna d'acqua, possono essere ricondotte a due categorie principali (es. Ogilvie *et al.*, 2012): barriere strutturali (costituite da palancole o da sistemi modulari portatili) e non-strutturali (*oil booms, silt curtains, silt screens, air bubbles screen*).

Un sistema di panne antitorbidità è solitamente composto di una parte emersa galleggiante con funzione portante (barriera) e da una parte immersa, opportunamente zavorrata e bilanciata, con azione di contenimento. Esistono diverse possibilità di utilizzo di tali barriere fisiche:

- inglobamento totale del sistema dragante o chiusura totale dell'area di escavo, con eventuale realizzazione di un'intercapedine per il passaggio delle imbarcazioni (es. dragaggio meccanico e di tipo stazionario);
- chiusura parziale dell'area di escavo, a valle delle operazioni, nel caso di flusso unidirezionale della corrente;
- protezione di un'area sensibile nei pressi delle attività di dragaggio.

Esula dagli obiettivi del presente Manuale la trattazione degli aspetti utili al dimensionamento strutturale delle barriere fisiche.

2.5. Generazione e sviluppo di pennacchi di torbida

Nel seguito si riportano i tratti salienti dei processi di mescolamento e trasporto che caratterizzano lo sviluppo di un pennacchio di torbida a diverse distanze dal sito di intervento (es. John *et al.*, 2000; HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003; Bridges *et al.*, 2008; Er *et al.*, 2016): dall'area di generazione (punto di rilascio o *dredging zone*), al campo vicino (o *near-field zone*) fino a quello lontano (o *far-field zone*).

In particolare, si fornisce una descrizione qualitativa dei principali processi di mescolamento e trasporto in relazione alle finalità delle operazioni di movimentazioni esaminate: escavo (o dragaggio), sversamento al largo e sversamento in aree costiere.

2.5.1 Generazione e sviluppo dei pennacchi di torbida durante il dragaggio

Nel caso della formazione di un pennacchio durante l'escavo (o dragaggio) l'area di generazione può essere considerata approssimativamente coincidente con la posizione della draga (o *dredging zone*). In tale area la dinamica trasporto del pennacchio di torbida è di natura turbolenta, caratterizzata da una scala temporale dei secondi e spaziale di pochi metri e dominata dalla forza di gravità che causa la sedimentazione immediata al fondo della frazione di sedimenti a granulometria maggiore. I meccanismi di risospensione e/o rilascio in colonna d'acqua dal mezzo dragante sono strettamente dipendenti dalle modalità tecnico-operative utilizzate (tipologia di draga, velocità, produttività e spessore del taglio durante un ciclo di dragaggio, profondità di escavo, accorgimenti operativi di tipo ambientale, ecc.), strettamente legate, a loro volta, alle caratteristiche dei sedimenti da movimentare. Il limite esterno dell'area di generazione del pennacchio di torbida generalmente individua la distanza più prossima ai mezzi di lavoro in corrispondenza della quale è possibile acquisire misure di torbidità e di concentrazione dei sedimenti sospesi e di distinguere tra i diversi meccanismi di rilascio dei sedimenti (Figura 2.15).

Nel campo vicino (o *near-field zone*), la dinamica del pennacchio è ancora di natura turbolenta, ma caratterizzata da una scala temporale dei minuti e da una scala spaziale di poche decine di metri. Qui i fenomeni di trasporto dei sedimenti sospesi sono dipendenti sia dalle modalità tecniche e operative utilizzate per la movimentazione sia dall'idrodinamica del sito di intervento. All'interno del campo vicino i sedimenti sospesi iniziano a subire processi di sedimentazione differenziale (Hadfield, 2014), per cui le frazioni più grossolane depositano allontanandosi progressivamente dal punto di rilascio e solo le frazioni granulometriche più fini contribuiscono a formare il pennacchio di torbida nel campo lontano. Più precisamente il comportamento del pennacchio tende da attivo a passivo e, pertanto, ad essere prevedibile e quantificabile.

Nel campo lontano (o *far-field zone*), infine, i processi di trasporto e deposizione sono condizionati principalmente dall'azione delle forzanti idrodinamiche (onde, maree, vento, gradienti di densità, ecc.) e la dinamica del pennacchio è essenzialmente di tipo passivo. In particolare, in questa zona le frazioni granulometriche più sottili possono rimanere in sospensione per diversi giorni ed essere trasportati anche in aree molto distanti (su scala spaziale dei chilometri) dall'area di generazione ed è possibile, pertanto, riprodurre e quantificare i fenomeni di trasporto con modelli matematici con un buon livello di affidabilità (es. HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003; John *et al.*, 2000). Sebbene i processi di trasporto e deposizione in tale area risentono principalmente dell'azione delle forzanti idrodinamiche, la loro entità varia notevolmente in funzione delle modalità con cui i sedimenti

risospesi e/o rilasciati in colonna d'acqua alimentano la formazione del campo lontano (profondità di rilascio, volume e distribuzione granulometrica iniziale, ecc.).

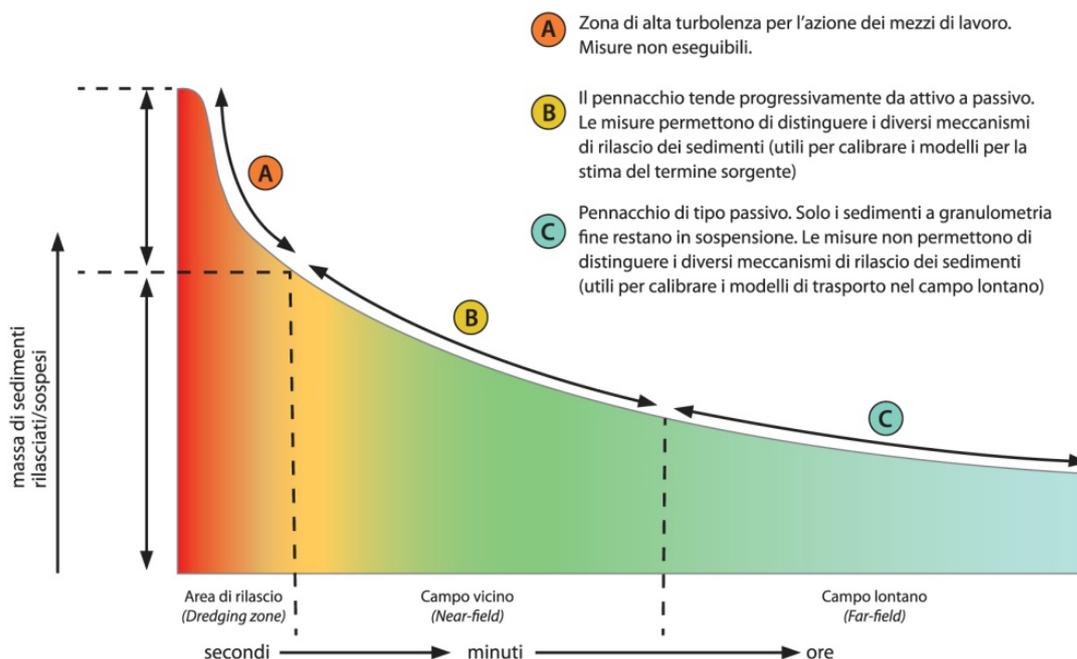


Figura 2.15 - Schema della formazione di un pennacchio di torbida durante la fase operativa di escavo (dragaggio). tratto da HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd (2003).

2.5.2 Generazione e sviluppo dei pennacchi di torbida durante lo sversamento

Lo sviluppo di un pennacchio di torbida durante le operazioni di sversamento presenta evidenti analogie con lo sviluppo di un pennacchio durante le operazioni di escavo. Anche in questo caso, infatti, sono individuabili, procedendo a distanze crescenti dal sito di sversamento (area sorgente, o *dredging zone*) le medesime aree, caratterizzate da diversi processi di mescolamento e trasporto (Figura 2.15).

Nonostante tali analogie, tuttavia, lo sviluppo del pennacchio di torbida nel campo vicino può differire notevolmente nel caso di sversamento al largo e in aree costiere.

Il caso dello sviluppo del pennacchio di torbida nel campo vicino durante sversamento al largo (o comunque in aree ove possibile utilizzare tecniche di sversamento del tipo *dumping*) è stata oggetto di approfondimenti specifici (es. Bokuniewicz *et al.*, 1978; Rahimipour & Wilkinson, 1992; Johnson & Fong, 1995; Bailey *et al.*, 2004; Howlett, 2003; Saremi, 2014; Er *et al.*, 2016).

Generalmente, nel caso possa essere ragionevolmente accettata l'ipotesi di rilascio puntuale e istantaneo (es. quando il volume di sedimento è grande), la dinamica del flusso dei sedimenti sversati è considerata differenziabile in tre fasi distinte (es. Bokuniewicz *et al.*, 1978; Rahimipour & Wilkinson, 1992; Ruggaber, 2000) schematizzati in Figura 2.16.

La fase iniziale, convettiva discendente, è influenzata principalmente dai parametri operativi e dalla forza di gravità (es. effetti di galleggiamento del flusso). Al crescere della distanza dal punto di rilascio i sedimenti, che inizialmente si muovono verso il fondo come un corpo fluido guidato dalla differenza di densità, tendono a risentire sempre più della circolazione interna e dei processi di sedimentazione in base alla velocità di sedimentazione (fase dispersiva).

In seguito all'impatto dei sedimenti sversati sul fondo si ha la fase di collasso dinamico, caratterizzata da alta turbolenza e dall'inizio dei processi di dispersione e diffusione dei sedimenti lungo l'orizzontale. Si ha infine la fase di trasporto passivo, che definisce il passaggio dal campo vicino al campo lontano, dove il trasporto dei sedimenti risente maggiormente delle correnti locali (Figura 2.16).

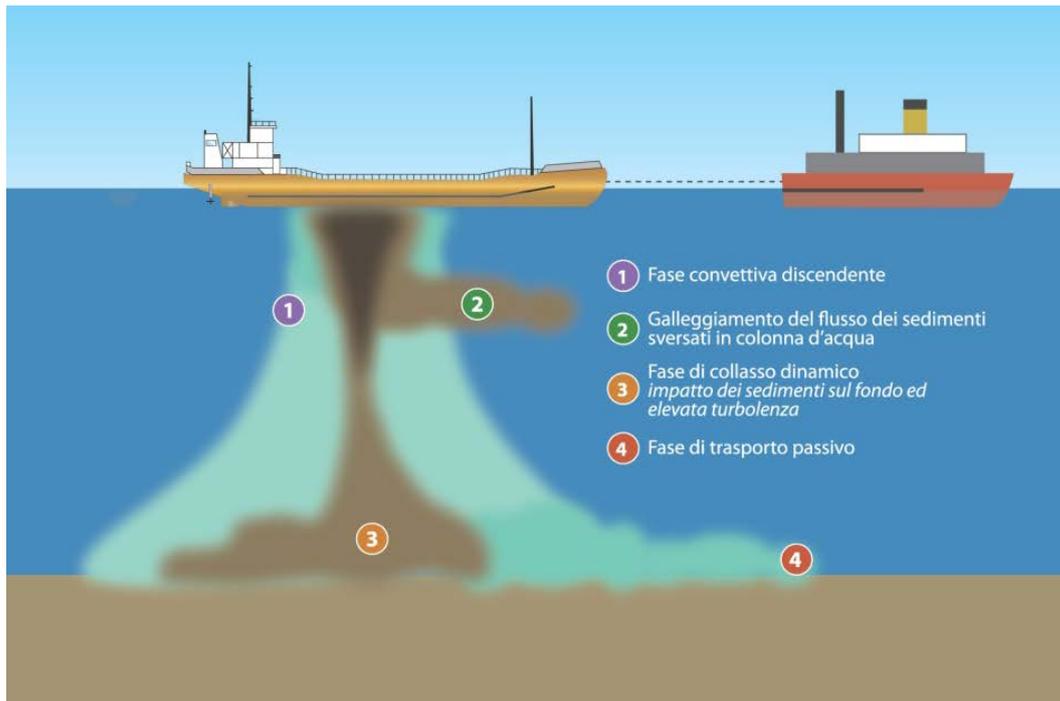


Figura 2.16 - Schema qualitativo delle fasi dello sviluppo del pennacchio nel near field dei sedimenti sversati.

Nel caso di sviluppo del pennacchio di torbida nel campo vicino durante lo sversamento in aree costiere (es. finalizzato alla redistribuzione di sabbia sulla spiaggia, in prossimità delle foci fluviali, o più in generale quando è necessaria la movimentazione di sedimenti con mezzi di lavoro con elevate capacità di carico/potenze delle pompe di scarico) l'entità degli incrementi di SSC nel campo vicino dipende principalmente dalla quantità dei sedimenti e dagli accorgimenti tecnici utilizzati sulle modalità di sversamento (es. per ridurre l'*overflow* in fase di carico e per massimizzare la densità della miscela di acqua-sedimento sversati). In particolare, la frazione dei sedimenti rimessa in sospensione rispetto al totale del sedimento deposto per l'azione di disturbo esercitata dalle locali condizioni idrodinamiche è strettamente dipendente dalla densità del nuovo materiale deposto (Roman-Sierra *et al.*, 2011). Secondo Winterwerp (2002), infatti, sullo sviluppo del pennacchio di torbida (oltre che sull'efficacia degli interventi nel tempo) incide maggiormente la densità, quindi la dinamica, della massa della miscela di acqua-sedimento sversato rispetto alla velocità di sedimentazione delle singole particelle di sedimento.

Con riferimento alla schematizzazione del pennacchio proposta in Er *et al.* (2016) (cfr. par. 3.3.3 per maggiori dettagli) nel caso di sversamento in aree costiere mediante modalità del tipo *dumping* la profondità oltre la quale il pennacchio diviene dispersivo (z_t in Figura 3.8) è considerabile maggiore della profondità dell'acqua (h in Figura 3.8). Ciò implica che le fasi iniziali dello sviluppo del pennacchio durante lo sversamento di grossi quantitativi di sedimento in aree costiere (caratterizzate da profondità limitate e, nel caso di aree litoranee, anche da alta agitazione idrodinamica) sono caratterizzabili in modo bidimensionale (2D), sia per la fase iniziale discendente sia per la fase dispersiva della dinamica nel campo vicino (cfr. par. 3.3.3). Solo successivamente il pennacchio può subire processi 3D nel campo lontano qualora raggiunga acque più profonde o stratificate.

3. MODELLI UTILIZZABILI PER UN APPROCCIO INTEGRATO

3.1. Considerazioni generali

I modelli matematici, calibrati e validati attraverso l'utilizzo di dati di letteratura e di campo, sono un valido strumento di supporto nelle diverse fasi di progettazione e gestione di un intervento di movimentazione dei sedimenti. In particolare, laddove si riconoscano possibili criticità ambientali, possono supportare la scelta comparata delle modalità tecnico-operative in grado di minimizzare gli effetti sull'ambiente conseguenti al trasporto e alla deposizione dei sedimenti finì rilasciati durante l'intero ciclo di movimentazione.

Per una stima attendibile dei processi fisici che caratterizzano la dinamica dei sedimenti (rilascio, dispersione, diffusione, deposizione e talvolta risospensione dal fondo) a diverse distanze dal sito di intervento è opportuno che la selezione dei modelli matematici, da implementare nell'ambito di un Approccio Modellistico Integrato (AMI, Cap. 0), sia effettuata in relazione al contesto ambientale dell'intervento (aree costiere⁴, bacini semi-chiusi e aree al largo) e operativo (fasi di rimozione e sversamento), ma anche in relazione alle finalità degli studi progettuali e ambientali, nonché alla tipologia di risultato desiderata e/o richiesta (Figura 3.1).

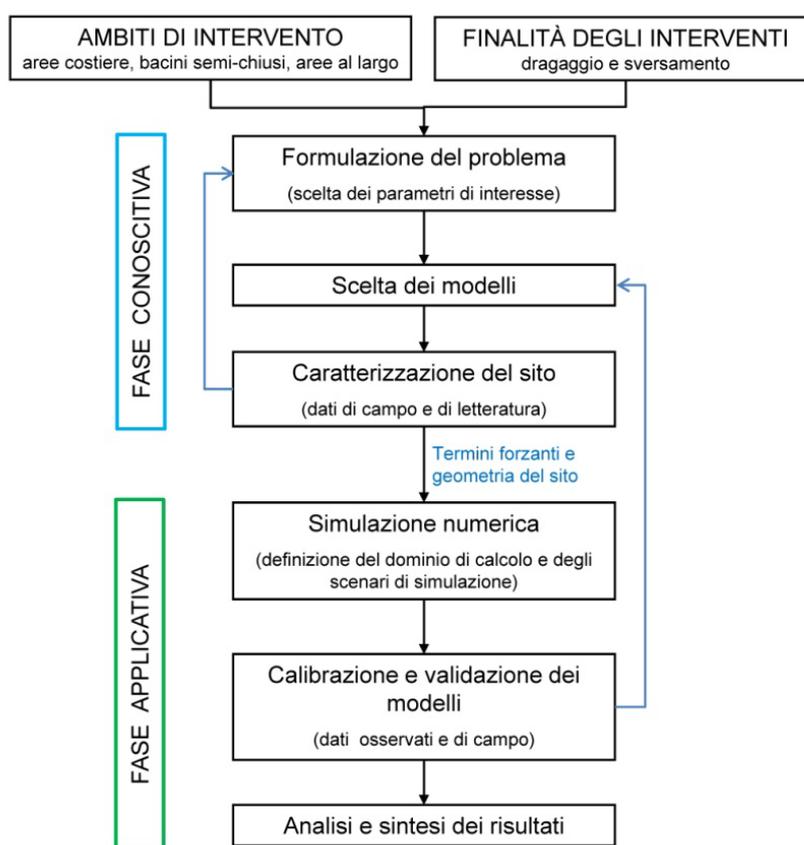


Figura 3.1 - Diagramma di flusso dell'approccio modellistico.

Pertanto, l'accuratezza della stima quantitativa dipende, ovviamente, dall'approccio modellistico utilizzato, subordinato a sua volta dal dettaglio richiesto dai risultati attesi. Vi sono modelli che, a

⁴ Ai fini del presente Manuale le aree di transizione sono trattate nell'ambito delle aree costiere (cfr. glossario della terminologia per la relativa definizione).

fronte di forti semplificazioni, permettono rapide stime di massima dell'estensione dell'area influenzata dalle attività di movimentazione.

Per contro, vi sono modelli che permettono valutazioni dettagliate anche in condizioni molto complesse. Dal livello di dettaglio del modello dipende anche il dettaglio che devono avere i dati che descrivono i termini forzanti e la geometria del sito (dati di *input*). I due approcci non sono alternativi, anzi è consigliabile la loro integrazione in quanto i modelli semplificati permettono di valutare, con un minor carico computazionale ed economico, l'eventuale necessità e la natura di approfondimenti da effettuarsi con modelli di dettaglio.

In generale, si osserva che l'esecuzione di studi modellistici, condotti nell'ambito delle diverse fasi di progettazione e gestione degli interventi (pianificazione, progettazione e verifica), è concettualmente suddivisibile in una successione di valutazioni con livelli di approfondimento crescente (Figura 3.2).

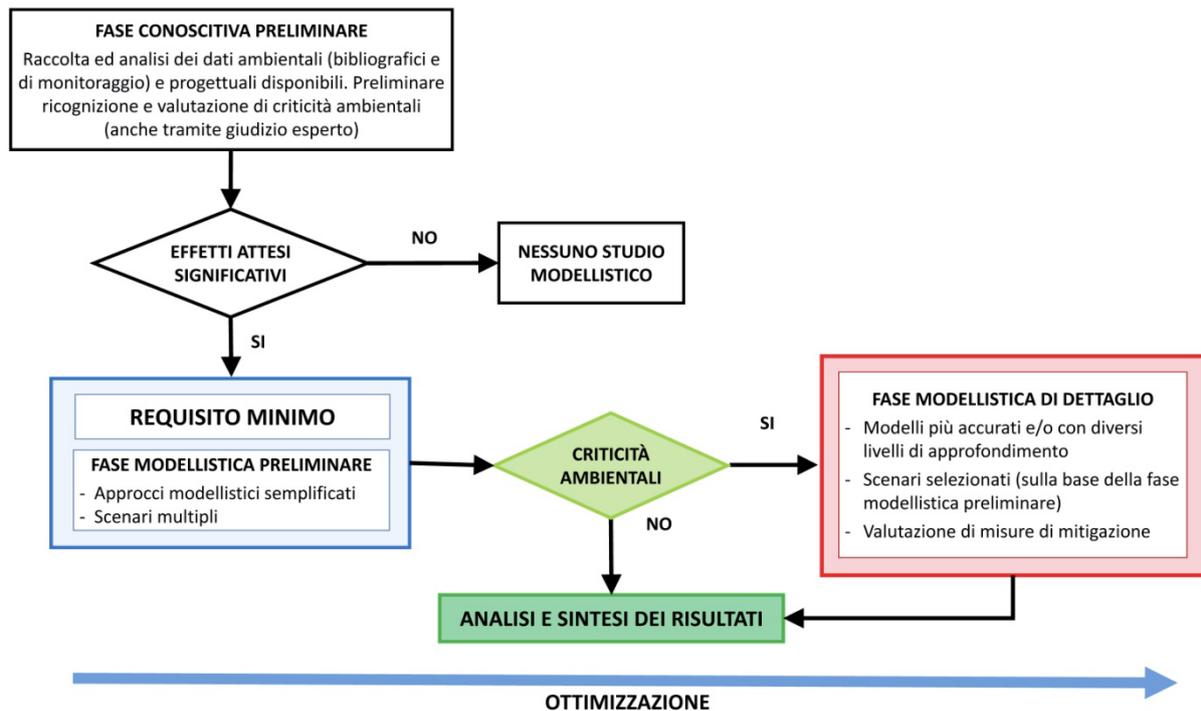


Figura 3.2 - Pianificazione dell'approccio modellistico a supporto dell'ottimizzazione e della valutazione della fattibilità ambientale degli interventi di movimentazione.

Con riferimento allo schema di Figura 3.2, si prevede una fase conoscitiva preliminare, precedente alla pianificazione dell'approccio modellistico, finalizzata ad una preliminare ricognizione e valutazione delle criticità ambientali (cfr. Cap. 1, glossario della terminologia e degli acronimi) eventualmente presenti in prossimità dell'area di intervento. L'obiettivo di questa fase è quello di evidenziare (anche attraverso giudizio esperto opportunamente motivato) la possibile insorgenza di effetti ambientali significativi riconducibili all'esecuzione delle operazioni di movimentazione e, quindi, di identificare la necessità di procedere (o meno) con l'implementazione degli studi modellistici.

Qualora la fase conoscitiva preliminare evidenzi la possibile insorgenza di specifiche criticità ambientali legate alle operazioni di movimentazione (es. volumi elevati e/o contaminati di sedimento da movimentare, presenza di vincoli ambientali e di obiettivi sensibili che potrebbero subire effetti significative in seguito a superamenti dei limiti di rilascio/esposizione prestabili, o esistenti in normativa, per le variabili di interesse, ecc.) può seguire una fase modellistica preliminare.

La fase modellistica preliminare è condotta, nelle fasi iniziali della progettazione, con modelli semplificati che permettono di stimare in prima approssimazione l'estensione dell'area interessata da alterazioni significative dei parametri di interesse (es. SSC e DEP) e di supportare la scelta delle modalità tecnico-operative da adoperare per minimizzare gli effetti attesi a fronte anche di una ottimizzazione della produttività (e quindi dei costi).

Qualora la fase modellistica preliminare confermi l'insorgere di criticità ambientali si procederà all'implementazione della fase modellistica di dettaglio volta a fornire un'analisi accurata degli effetti

ambientali attesi e ad approfondire ulteriormente, con maggiore accuratezza, specifiche condizioni (ambientali e progettuali) identificate come critiche (o ad alto rischio) nell'ambito della fase modellistica preliminare.

Lo schema di Figura 3.3 riassume i contenuti dei paragrafi seguenti, evidenziando la tipologia dei modelli utilizzabili nei diversi moduli concettuali dell'AMI (modulo di idrodinamica, modulo per la stima del termine sorgente e modulo di trasporto) e dei risultati che è possibile ottenere in relazione al contesto ambientale (aree costiere, bacini semi-chiusi e aree al largo) e operativo (dragaggio, trasporto e sversamento) dell'intervento. In particolare:

- il modulo di idrodinamica include i modelli di propagazione del moto ondoso e di circolazione;
- il modulo per la stima del termine sorgente include modelli (parametrici ed empirici) differenziati in relazione alle diverse fasi operative dell'intero ciclo della movimentazione (dal dragaggio allo sversamento);
- il modulo di trasporto include i modelli per lo studio dei fenomeni di dispersione, diffusione e deposizione dei sedimenti che alimentano il pennacchio di torbida nel campo lontano.

MODULO	MODELLI UTILIZZABILI	PARAMETRI SIMULATI
IDRODINAMICO (onde e correnti)	Moto ondoso (§3.2.1) Aree costiere/Bacini semi-chiusi/Aree al largo Modelli 2D stazionari - $H(x,y), T(x,y), h(x,y), F_x(x,y), F_y(x,y)$ Modelli 2D transitori - $H(x,y,t), T(x,y,t), h(x,y,t), F_x(x,y,t), F_y(x,y,t)$	
	Circolazione (§3.2.2): Aree costiere/Bacini semi-chiusi/Aree al largo Modelli 2DH stazionari - $U(x,y), V(x,y), h(x,y)$ Modelli 2DH transitori - $U(x,y,t), V(x,y,t), h(x,y,t)$ Modelli (Q)3D stazionari - $U(x,y,z), V(x,y,z), W(x,y,z), h(x,y)$ Modelli (Q)3D transitori - $U(x,y,z,t), V(x,y,z,t), W(x,y,z,t), h(x,y,t)$	
TERMINE SORGENTE (rilascio dei sedimenti)	Dragaggio (§3.3.1) Aree costiere/Bacini semi-chiusi/Aree al largo Formulazioni su base tabellare - $q(x,y)/q(x,y,t)/q(x,y,z)/q(x,y,z,t)$ Formulazioni empiriche - $q(x,y)/q(x,y,t)/q(x,y,z)/q(x,y,z,t)$	
	Sversamento (§3.3.2 e §3.3.3) Aree costiere/Aree al largo Formulazioni empiriche - $q(x,y)/q(x,y,t)/q(x,y,z)/q(x,y,z,t)$	
	Dragaggio, Overflow e Sversamento - §3.3.4 Aree costiere/Bacini semi-chiusi/Aree al largo Metodo generale di Becker - $q = \sigma m / t, \sigma_d, \sigma_o, \sigma_s$	
TRASPORTO (dispersione, diffusione e deposizione)	Aree costiere/Bacini semi-chiusi/Aree al largo (§3.4) Modelli semplificati - $C(x,y)/C(x,y,t)$ Modelli 2DH stazionari - $C(x,y)$ Modelli 2DH transitori - $C(x,y,t)$ Modelli (Q)3D stazionari - $C(x,y,z)$ Modelli (Q)3D transitori - $C(x,y,z,t)$	

Legenda

Variabili spaziali (x, y, z) – variabili temporali (t) - Componenti della velocità di corrente (U, V, W) - Altezza d'onda (H) - Periodo d'onda(T) – profondità dell'acqua (h) – Componenti orizzontali del *radiation stress* (F_x, F_y) - Flusso di sedimenti (q) - Concentrazione (C) – Parametri empirici associati alle fasi operative di dragaggio (σ_d), *overflow* (σ_o) e sversamento (σ_s).

Figura 3.3 - Contenuti del capitolo con evidenziazione della tipologia dei modelli utilizzabili nell'AMI e di risultato che è possibile ottenere.

Nel seguito si riportano le caratteristiche salienti dei modelli numerici utilizzabili nell'ambito dell'AMI. Si rimanda alla letteratura di settore per approfondimenti scientifici (es. Blumberg & Mellor, 1987; Pedlosky, 1996, 2003; Mei 1989; Chorin *et al.* 2000; Becker *et al.*, 2015; Shao *et al.*, 2016).

3.2. Modelli matematici per la simulazione dell'idrodinamica

3.2.1 Modelli matematici per la simulazione di onde

Il moto ondoso e il campo di corrente interagiscono e si influenzano reciprocamente (interazione onda-corrente). La presenza di moto ondoso genera alterazioni nel campo idrodinamico⁵ pressoché trascurabili al largo, ma che possono diventare prevalenti negli ambiti costieri. Nelle aree litoranee, ad esempio, il frangimento delle onde genera un sistema di correnti (tipicamente indicata come circolazione costiera) longitudinali e trasversali alla linea di riva e variazioni di livello (tipicamente indicata come circolazione costiera). Anche negli ambienti di transizione, generalmente caratterizzati da battenti limitati e talvolta influenzati dalle oscillazioni di marea, l'azione delle onde da vento produce effetti idrodinamici (e conseguentemente fenomeni di trasporto per interazione con il fondale) spesso non trascurabili.

D'altra parte anche il campo idrodinamico può generare variazioni sul campo d'onda (rifrazione dovuta al campo di corrente). Tale fenomeno, generalmente trascurabile, in alcuni casi, come negli ambienti di transizione caratterizzati dalla presenza di foci o nelle aree litoranee caratterizzate dalla presenza di intense correnti locali (es. correnti di *rip*), può assumere particolare importanza (Smith *et al.*, 2008).

Si specifica, inoltre, che, qualora il campo idrodinamico riprodotto nell'ambito delle simulazioni implementate nell'AMI non includa la riproduzione del moto orbitale delle particelle di fluido indotto dal passaggio delle onde in superficie, è talvolta necessario tenere conto della possibile ulteriore messa in sospensione di sedimenti dovuta all'intensità delle velocità associate a tali moti orbitali in corrispondenza del fondale.

I modelli per la propagazione del moto ondoso possono essere integrati nel modello idrodinamico, nell'ambito di un approccio accoppiato, oppure essere disaccoppiati. In quest'ultimo caso il risultato di tali modelli costituisce un termine forzante del modello idrodinamico e viceversa (qualora sia pertinente considerare l'effetto delle correnti sulle onde). La differenza tra i due approcci non è solo applicativa, ma sostanziale. Essendo differenti le equazioni risolte, anche la risoluzione dei processi fisici considerati, quindi del campo di corrente indotto, è differente.

Qualora la risoluzione della propagazione del moto ondoso sia integrata nel modello idrodinamico, viene descritta la dinamica di ogni singola onda, ottenendo una descrizione dettagliata della sua propagazione spazio-temporale. Al contrario nei modelli disaccoppiati con l'idrodinamica, viene descritta l'evoluzione degli stati di mare, che costituiscono una rappresentazione statistica del moto ondoso presente nell'area, basata su equazioni per la propagazione/conservazione dell'energia associata alle onde.

3.2.2.1 Modelli di larga scala

I modelli di larga scala rientrano nella tipologia di modelli disaccoppiati con il modello idrodinamico. Al fine di ridurre la complessità computazionale del sistema di equazioni da risolvere, tali modelli simulano la propagazione di onde risolvendo numericamente le equazioni che governano la conservazione dell'energia associata al moto ondoso.

La loro formulazione è basata su un'equazione per l'evoluzione dello spettro di energia o di quantità derivate, comunque ricollegabili allo spettro di energia del moto ondoso. In tale contesto concettuale la superficie del mare viene approssimata con una sovrapposizione di onde monocromatiche caratterizzate da una specifica direzione di provenienza e frequenza. In particolare, lo spettro energetico fornisce, per ogni direzione e frequenza, il contenuto energetico associato (riconducibile all'altezza d'onda significativa nel caso in cui sia nota la funzione di distribuzione di probabilità delle altezze d'onda individuali, es. *Rayleigh*). Con tale approccio che descrive l'evoluzione energetica

⁵ Nel presente Manuale i termini "campo idrodinamico" e "corrente" sono utilizzati per identificare l'agitazione idrodinamica a media non nulla negli intervalli di tempo utilizzati per l'integrazione delle equazioni che costituiscono i modelli. A titolo di esempio, nel caso di utilizzo di modelli d'onda spettrali accoppiati con i modelli idrodinamici, questi ultimi sono in grado di riprodurre il cosiddetto "drift di Stokes" (correnti residue indotte dalla propagazione delle onde), mentre non riproducono i moti orbitali delle particelle prodotti dal passaggio (istantaneo) delle onde.

dello stato di mare nel dominio di calcolo, si perde tuttavia l'informazione sulla fase dell'onda, ossia sulla posizione istantanea della superficie libera.

La dinamica del moto ondoso è ottenuta tramite la definizione di parametri derivabili dalla distribuzione in frequenza dell'energia associata al moto ondoso, che forniscono una descrizione statistica del campo d'onda presente in una determinata area di mare in un periodo temporale fissato. Generalmente tali parametri sono costituiti dall'altezza d'onda significativa, dalla direzione media di provenienza dell'onda (più raramente viene utilizzata la direzione di propagazione) e dai periodi di picco e medio.

Si citano, ad esempio, i modelli WAM, SWAN, MIKE 21 SW, STWAVE, WAVEWATCH III (es. WAMDI Group, 1988; Booij *et al.*, 1999; Smith *et al.*, 2001; Tolman, 2009; DHI, 2017a).

3.2.2.2 *Modelli di piccola scala*

I modelli citati per l'applicazione alla grande scala possono generalmente essere applicati anche nella piccola scala⁶, ma risultando poco accurati nel riprodurre gli effetti legati alla diffrazione e alla riflessione delle onde. Se ne sconsiglia l'utilizzo in ambienti ricchi di ostacoli (opere di difesa costiera, strutture portuali, ecc.). Tali situazioni vanno affrontate con modelli che simulano la propagazione di ogni singola onda, dal momento in cui entra nel dominio computazionale a quello in cui frange o ne esce. Questo approccio, teoricamente applicabile anche nella larga scala, richiede un consistente carico computazionale. Questo aspetto, unito alla adeguata funzionalità dei modelli spettrali per la larga scala, riduce l'applicazione di questo approccio ai soli ambiti in cui sono necessari studi di dettaglio e gli effetti della diffrazione delle onde sono rilevanti. Tali modelli sono tipicamente basati su formulazioni di tipo *Boussinesq* o su formulazioni non idrostatiche di tipo onda-flusso.

Si citano, ad esempio, i modelli FUNWAVE, SMS, SWASH e MIKE 21 BW (Kirby *et al.*, 1998; Demirbilek *et al.*, 2005; Zijlema *et al.*, 2011; DHI, 2017b).

3.2.2 *Modelli matematici per la simulazione della circolazione*

Per la simulazione dei livelli e delle correnti è necessario prendere in considerazione le forzanti presenti nel dominio computazionale e nell'area circostante l'area di interesse. Le prime, con rilevanza diversa a seconda dell'ambito di applicazione (aree litoranee e di transizione, bacini semi-chiusi, aree al largo), sono costituite da: azione di vento e moto ondoso, oscillazioni di marea, apporti fluidi nel dominio di calcolo eventualmente caratterizzati da diversa densità (es. foci fluviali o scarichi industriali) per i quali è necessario tenere conto degli effetti di galleggiamento. Le seconde, invece, sono costituite da forzanti di larga scala rispetto al dominio considerato, quali, correnti di larga scala (es. correnti litoranee interagenti con l'imboccatura di un bacino-semichiuso), correnti indotte dalle maree e moti propri a scala di bacino (es. *setup* da vento, *sesse*) qualora l'area di interesse ne rappresenti una porzione.

I modelli idrodinamici sono generalmente in grado di riprodurre la generazione di correnti superficiali indotte dall'azione dei venti, ma la valutazione del campo di vento (vista la complessità del fenomeno) è tipicamente definita con l'utilizzo di altri strumenti modellistici nell'ambito della definizione degli scenari di simulazione (es. risultati dell'analisi statistica di misure in campo o di dati ricostruiti tramite l'utilizzo di modelli numerici meteorologici integrati con misure satellitari, es. CMEMS, ECMWF).

In linea generale, l'azione del vento è descritta da uno sforzo di taglio agente sulla superficie libera, stimata sulla base di formulazioni di letteratura (es. Garratt, 1977) che legano l'entità e la direzione della tensione tangenziale alla velocità e direzione del vento.

Per quel che riguarda le forzanti correlate all'azione del moto ondoso, la situazione è invece diversa. Come già anticipato (cfr. par. 3.2), alcuni modelli idrodinamici risolvono direttamente la propagazione del moto ondoso, mentre altri considerano la componente ondosa una forzante esterna, che in maniera simile all'azione del vento, rappresenta un termine forzante delle equazioni risolte dal modello numerico.

Il modello deve, inoltre, tenere conto dei processi fisici legati all'interazione dell'idrodinamica con tutti i contorni (es. il fondo e l'eventuale linea di costa) nonché con eventuali elementi posti all'interno del dominio di calcolo (es. opere di difesa costiera, strutture morfologiche intertidali in ambienti

⁶ Ad eccezione del WAM che ha uno schema di risoluzione numerica che potrebbe risultare poco stabile in aree costiere e manca del termine per l'interazione non-lineare tra triadi di onde, rilevante in ambiti costieri.

lagunari, barre o scanni in aree di foce, strutture *offshore* qualora rilevabili dalla risoluzione utilizzata nel modello di largo). Ne consegue che il sistema di equazioni risolte dal modello numerico risulta piuttosto complesso. Ciò ne permette la risoluzione solo in domini di calcolo molto piccoli e per brevi periodi temporali. Al fine di ovviare tale limitazione e permettere l'applicazione su aree più vaste e per lunghi periodi di tempo si operano semplificazioni. Tali semplificazioni modificano le equazioni costitutive e quindi i processi che essi sono in grado di riprodurre numericamente. Da ciò derivano varie tipologie di modelli numerici che, a seconda della formulazione considerata, risultano più adatti per alcune applicazioni piuttosto che per altre.

Pertanto, è opportuno valutare l'influenza che un determinato processo fisico ha nella produzione del campo idrodinamico risultante e selezionare il modello idrodinamico in funzione delle caratteristiche dell'area in esame e dal dettaglio richiesto per i risultati attesi.

I modelli numerici per la simulazione dell'idrodinamica partono tutti dalla risoluzione del sistema di equazioni differenziali, composto dalla forma euleriana dell'equazione di bilancio della massa (equazione di continuità) e dalle equazioni di conservazione della quantità di moto (equazioni di Navier-Stokes).

Tale sistema di equazioni differenziali non può essere risolto tramite metodi analitici, se non per casi molto particolari che permettono di accettare forti semplificazioni (es. par. 3.4.1), si deve pertanto ricorrere a metodi numerici.

L'applicazione più immediata è quella di implementare degli schemi numerici per l'integrazione del sistema di equazioni differenziali e procedere quindi alla sua risoluzione. Tale tecnica (detta DNS – *Direct Numerical Simulation*), risolvendo direttamente il sistema di equazioni non semplificato, non è adatta per simulare in maniera estensiva casi reali, poiché come già detto necessita di una risoluzione spaziale e un passo di integrazione molto piccoli. Infatti, i fenomeni fisici rappresentati nel sistema di equazioni differenziali coinvolgono una scala spaziale minima dell'ordine del centesimo di millimetro e una scala temporale minima dell'ordine del millesimo di secondo⁷.

Nella simulazione della dispersione di sedimenti, la dimensione spaziale del dominio computazionale è generalmente dell'ordine del chilometro e quella temporale dell'ordine della settimana, pertanto è tecnicamente (ed economicamente) impossibile risolvere il sistema di equazioni con tecniche DNS.

Poiché i fenomeni legati alle scale dell'ordine della frazione di millimetro sono quelli relativi alle scale più piccole della turbolenza, l'approccio semplificativo più comune consiste nel formulare ipotesi di chiusura che hanno l'obiettivo di simularne l'effetto sulle scale più grandi. Da questa idea derivano due principali metodi di approssimazione del sistema di equazioni differenziali: il metodo RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) e il metodo LES (*Large Eddy Simulation*).

Vi sono, inoltre, modelli che considerano il flusso nella sua tridimensionalità (modelli tridimensionali e a strati) e sono quindi in grado di simulare stratificazioni e altri modelli che invece mediano sulla verticale fornendo una rappresentazione del campo di corrente bidimensionale sull'orizzontale (modelli 2DH).

Affinché il sistema di equazioni che governa il problema sia risolto numericamente è necessario fornire le condizioni iniziali delle variabili considerate e le condizioni al contorno del dominio di calcolo. Tali condizioni hanno l'effetto di tener conto delle azioni di tutte le forzanti che agiscono dall'esterno sul dominio computazionale. La loro definizione è inquadrabile nell'ambito della definizione degli scenari di simulazione (cfr. par. 4.2). Si rimanda alla letteratura di settore per approfondimenti scientifici (es. Blumberg & Mellor, 1987; Pedlosky 1996, 2003; Mei 1989; Chorin *et al.* 2000).

Nei seguenti paragrafi si illustrano sinteticamente le caratteristiche dei modelli idrodinamici suddivisi in base alla tipologia di equazioni su cui si basano.

In tabella 3.1 sono riportate le indicazioni di utilizzo più opportuno per i diversi tipi di modelli di seguito descritti.

⁷ Secondo la scala di Kolmogorov, $l/L = Re^{-3/4}$, $t/T = Re^{-1/2}$; ponendo ad esempio $U = 1$ m/s, $H = 5$ m, $T = 5$ s, $Re = 5 \cdot 10^6$, $l \sim 5 \cdot 10^{-4}$ m ; $t \sim 2 \cdot 10^{-3}$ s).

Tabella 3.1 - Applicabilità dei modelli per le principali finalità di interesse delle operazioni di movimentazione. *Legenda: ++: applicazione consigliata (anche in relazione all'economia computazionale e alla qualità dei risultati necessari); +: applicazione possibile; ○: i risultati risentono parzialmente della formulazione del modello; -: applicazione sconsigliata, i risultati risentono fortemente della formulazione del modello.*

CASO IN ESAME	TIPO DI MODELLO	
	Modello 3D, Q3D, a strati	Modello 2DH
Rilascio di sedimenti ad opera di dragaggio in profondità limitate	+	++
Rilascio di sedimenti ad opera di dragaggio in profondità rilevanti	++	-
Rilascio di sedimenti in aree litoranee	+	++
Rilascio di sedimenti in aree lagunari e stagni costieri	+	++
Rilascio di sedimenti in aree di foce fluviale	++	-
Rilascio di sedimenti in aree al largo	++	○
Influenza del vento in bacini semi-chiusi	++	+

3.2.2.1 Modelli tridimensionali

I modelli tridimensionali descritti nel seguito sono basati su approssimazioni delle equazioni tali da renderli utilizzabili nell'ambito delle applicazioni trattate in questo Manuale, seppur limitatamente a studi di estremo dettaglio.

I modelli numerici di tipo RANS si basano sull'idea che il campo di moto del fluido possa essere mediato su di un intervallo di tempo sufficientemente piccolo da poterne seguire la dinamica da un punto di vista macroscopico, ma al tempo stesso sufficientemente grande da non dover risolvere gli effetti delle scale più piccole della turbolenza, che vengono simulate attraverso opportune parametrizzazioni. In particolare, l'effetto della turbolenza (non la turbolenza stessa) è modellato tramite l'introduzione di sforzi interni (il cosiddetto tensore degli sforzi di Reynolds) che possono essere definiti mediante opportune formule di chiusura (es. modelli $k-\varepsilon$ o $k-\omega$). In tal modo si riesce a descrivere il moto medio (mediato nel tempo) potendo utilizzare scale spaziali e temporali di diversi ordini di grandezza maggiori di quelle richieste dalla tecnica DNS.

I modelli di tipo LES si fondano sulla trasformazione delle equazioni che governano il problema introducendo una media spaziale delle grandezze considerate, a cui consegue la necessità di parametrizzare i fenomeni che avvengono su scale più piccole del passo di griglia considerato. In questo modo, si introducono termini supplementari (tensore degli sforzi di sottogriglia) che ne permettono la risoluzione numerica. Rispetto ai modelli RANS, i modelli LES sono caratterizzati da un maggior carico computazionale.

Si citano, ad esempio, i modelli NEMO, MOHID, ADCIRC, MIKE3 (Luettich *et al.*, 1992; Madec *et al.*, 1998; Neves, 2013; DHI, 2017c).

3.2.2.2 Modelli 2DH, Q3D e a strati

Per semplificare ulteriormente le equazioni alla base dei modelli, una delle approssimazioni più utilizzate è quella di integrare analiticamente con opportune semplificazioni (es. approssimazione idrostatica) l'equazione di conservazione della quantità di moto lungo la direzione verticale e di includerla nelle due equazioni lungo le due direzioni orizzontali. Da un punto di vista fisico, questa approssimazione (tipicamente indicata come approssimazione delle acque basse) non rende possibile distinguere disomogeneità lungo la direzione verticale, se non quelle assegnate a priori da formulazioni parametriche (es. ipotesi di pressione idrostatica). Non sono pertanto distinguibili variazioni nella velocità della corrente lungo la verticale legate, ad esempio, agli effetti di stratificazione.

L'utilizzo di modelli 2DH è particolarmente indicato in ambienti marino-costieri nei quali la dimensione verticale del dominio, ossia la profondità, è nettamente inferiore a quella orizzontale (es. aree litoranee e di transizione).

Tuttavia, è necessario porre attenzione alle applicazioni per le quali gli effetti dei processi verticali sono importanti, quali ad esempio la stratificazione (es. foci fluviali con ingresso di acqua dolce in ambiente salato) oppure l'azione del vento sullo strato superficiale che possono portare a sensibili variazioni dei profili di corrente in funzione della profondità lungo la verticale. In tali casi, è possibile utilizzare modelli che, pur non essendo rigorosamente tridimensionali come quelli descritti nel

paragrafo 3.2.2.1, mantengono le informazioni sulla variabilità verticale delle grandezze di interesse (es. Jiang, 2014). Un approccio è quello di ipotizzare una struttura prefissata della variabilità delle grandezze lungo la profondità (modelli Quasi3D, Q3D). In alternativa è possibile, prendendo spunto dai modelli 2DH, integrare per strati sovrapposti lungo la verticale l'equazione del moto per le acque basse (modelli a strati), ricorrendo al sistema di coordinate più appropriato.

Si citano, ad esempio, i modelli SHORECIRC, DELFT3D-FLOW, MIKE21, SHYFEM, POM, ROMS (Blumberg & Mellor, 1987; Svendsen *et al.*, 2004; Shchepetkin & McWilliams, 2005; Neves, 2013; Deltares, 2014; DHI, 2017c; Umgiesser, 2017).

In Figura 3.4 si riporta un esempio di applicazione di modello idrodinamico a strati in bacino semichiuso che evidenzia il diverso andamento delle correnti a diverse quote lungo la colonna d'acqua.

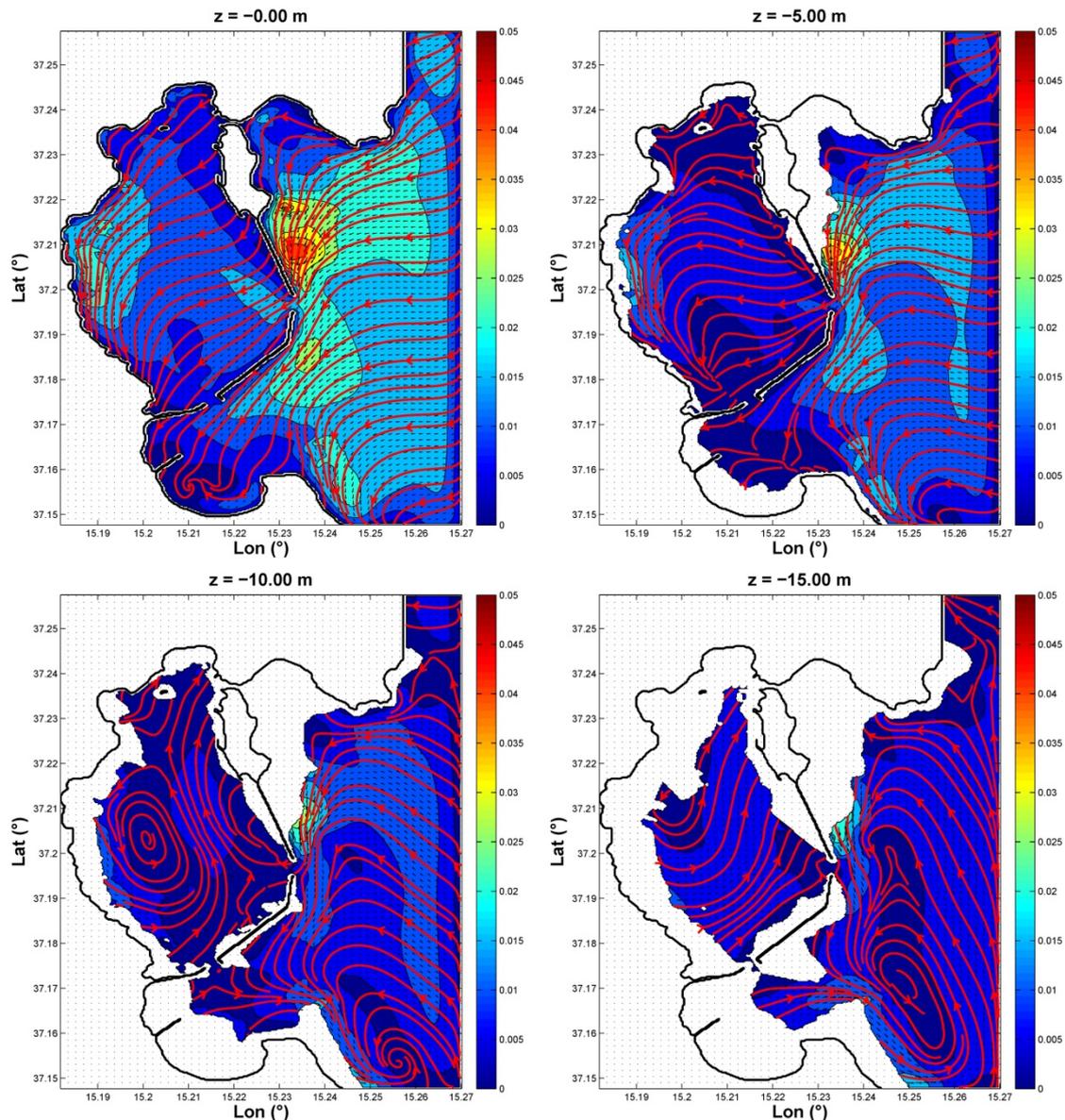


Figura 3.4 - Linee di corrente (linee continue), campo cinetico (vettori) e intensità di velocità (scala di colori) in corrispondenza della superficie e alle quote -5, -10 e -15 m (da Lisi, 2012).

3.3. Formulazioni per la stima del termine sorgente

Le operazioni di escavo e sversamento sono schematizzate come una sorgente di rilascio di sedimenti. Il termine sorgente, in particolare, dipende dalle modalità tecniche e operative impiegate, dalle caratteristiche idrodinamiche e ambientali nelle immediate vicinanze del mezzo dragante (campo vicino) e dal volume e dalle caratteristiche del sedimento movimentato (es. densità, distribuzione

granulometrica, percentuale di frazione fine; es. Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Becker *et al.*, 2015; Lisi *et al.*, 2016).

Dalla stima del termine sorgente, ossia dell'intensità del flusso (q) della massa di sedimenti fini sospesi nell'unità di tempo (kg/s) che entra nel dominio di calcolo, dipende la quantità di sedimento effettivamente disponibile per la successiva dispersione nel campo lontano. Essa si basa sull'analisi dei seguenti parametri:

- la concentrazione (C_r , kg/m^3) del sedimento risospeso e/o rilasciato in prossimità del mezzo dragante;
- la geometria (forma e dimensione) della sorgente;
- la velocità della corrente (v , m/s) in prossimità della sorgente;
- la velocità di caduta dei sedimenti;
- la percentuale di sedimento fine contenuta nel sedimento complessivo;
- la frazione di sedimento fine che abbandona la sorgente, eventualmente scomponibile nelle diverse fasi in cui l'azione di movimentazione si sviluppa (escavo, trasporto, sversamento).

In Figura 3.5 è riportata una schematizzazione esemplificativa dei possibili fenomeni di rilascio dei sedimenti in funzione di diverse modalità operative (idraulica e meccanica) e diverse fasi delle operazioni di movimentazione (dragaggio e sversamento).

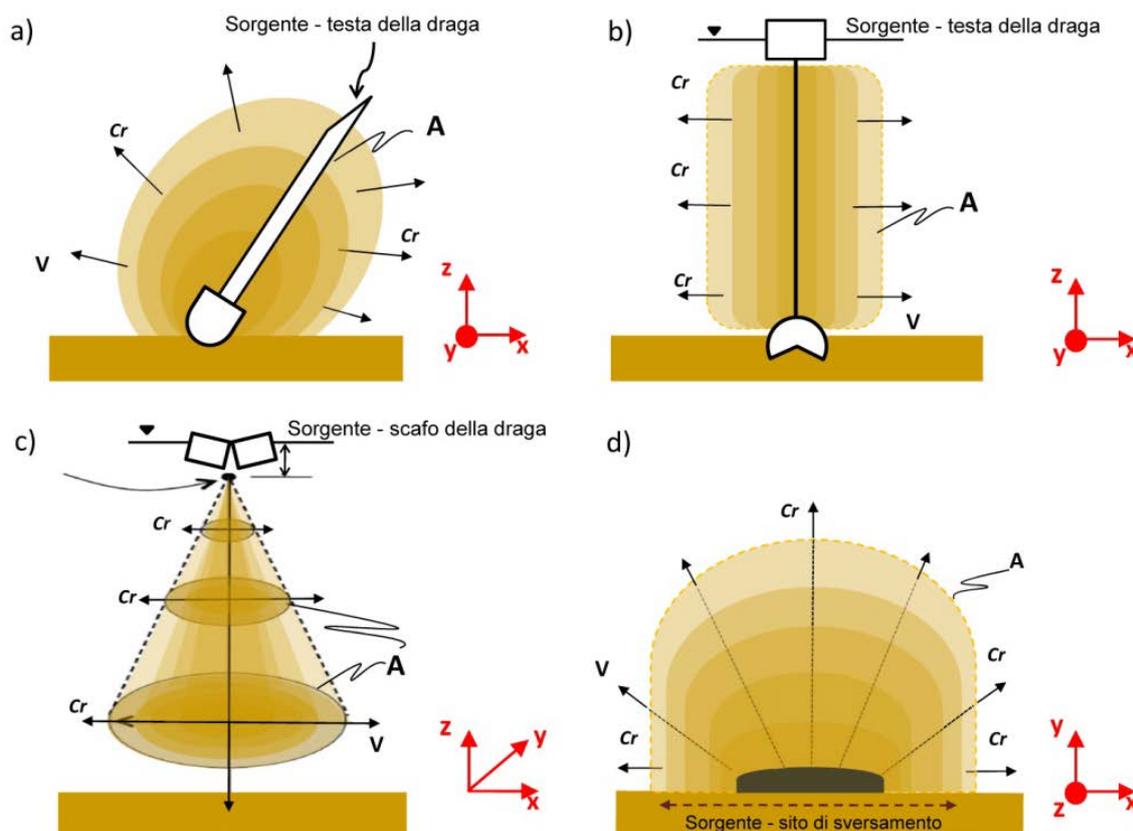


Figura 3.5 - Schema concettuale del fenomeno di rilascio di sedimenti per diverse modalità e fasi operative: a) escavo con draga idraulica; b) escavo con draga meccanica; c) sversamento tipo dumping; d) sversamento ai fini di ripascimento in aree litoranee. Il piano (o,x,y) è quello orizzontale, i piani (o,x,z) e (o,y,z) quelli verticali.

Il termine sorgente è difficile da modellare a causa dell'intima correlazione con il campo vicino. A ciò si aggiunge il fatto che, durante la fase preliminare di pianificazione e ottimizzazione degli interventi, talvolta, non si hanno informazioni certe sul volume totale dei sedimenti da movimentare oltre che sui parametri (geometrici e cinematici) rappresentativi delle modalità operative utilizzate.

È evidente che anche l'accuratezza della stima del termine sorgente dipende dal livello di dettaglio del modello utilizzato. I modelli di più semplice e comune utilizzo per lo studio della dinamica dei pennacchi di torbida su larghe scale spaziali e temporali (e quindi per le finalità del presente Manuale) sono modelli cosiddetti di campo lontano (*far-field models*). Tali modelli forniscono la stima del

sedimento che rimane disponibile per il trasporto nel campo lontano (dove la dinamica del pennacchio è di tipo passivo), ma non forniscono la stima dei sedimenti rilasciati direttamente dalla draga (*dredging zone*) e non modellano la fase dinamica del pennacchio di torbida nel campo vicino⁸ (*near-field zone*).

Pertanto è tipica la stima dell'intensità, durata e localizzazione del rilascio dei sedimenti tramite l'utilizzo di metodi empirici (Becker *et al.*, 2015) che utilizzano misure di campo relative a interventi similari.

Nel seguito sono illustrate le formulazioni esistenti in letteratura utilizzabili per definire il termine sorgente di risospensione/rilascio dei sedimenti in funzione delle finalità delle operazioni di movimentazione (dragaggio, sversamento a costa e sversamento al largo).

Si rimanda al Cap. 2 per la descrizione dei principali meccanismi di rilascio dei sedimenti per le principali modalità operative di movimentazione.

3.3.1 Termine sorgente per attività di dragaggio

La stima del termine sorgente durante la fase di escavo (o dragaggio) ha ricevuto particolare attenzione dalla letteratura tecnica di settore. Sono disponibili, infatti, diverse formulazioni per la stima della concentrazione dei sedimenti risospesi. Nel seguito si riporta una rassegna delle principali formulazioni disponibili suddivise, in relazione all'approccio utilizzato per derivare le formule, in formulazioni parametriche (utilizzabili su base tabellare) e in formulazioni empiriche (basate sull'utilizzo di gruppi adimensionali).

3.3.3.1 Formulazioni su base tabellare

Le formulazioni più comuni utilizzabili su base tabellare (parametriche) sono il metodo del TGU (*Turbidity Generation Unit*) e il metodo del Fattore di Risospensione "R" (*Resuspension Factor*).

▪ Metodo del TGU (*Turbidity Generation Unit*)

Introdotta da Nakai (1978), fornisce la massa di sedimento risospeso nell'unità di tempo (W_0 , in kg/s) per unità di volume dragato:

$$W_0 = \frac{R_0 Q_s}{R_{74}} TGU \quad (3-1)$$

dove Q_s (m^3/s) rappresenta la produttività del dragaggio, TGU (kg/m^3) un coefficiente empirico derivato da misure di campo e R_0/R_{74} il rapporto tra la frazione sedimentaria R_0 (di diametro medio inferiore a quello delle particelle per cui la velocità critica di risospensione è pari a quella della corrente locale) e la frazione sedimentaria R_{74} con diametro inferiore a $74\mu m$.

Si osserva che il prodotto $Q_s R_0$ rappresenta il flusso di sedimenti (portata volumetrica, m^3/s) con una velocità di caduta sufficientemente bassa, rispetto a quella della corrente locale, da rimanere in sospensione indefinitamente. Si fa notare che la definizione dei valori numerici del TGU osservata in campo da Nakai (1978) è basata sull'ipotesi che la frazione caratterizzata da diametro superiore a $5\mu m$ non contribuisce alla formazione del pennacchio di torbida (cioè R_0 è riferita al diametro pari a $5\mu m$).

L'utilizzo della (3-1), ai fini pratici, presuppone la conoscenza del valore di TGU a partire dalle modalità operative del dragaggio (Q_s) e delle caratteristiche del sedimento (R_0 e R_{74}). In Tabella 3.2. sono riportati i valori di TGU forniti da Nakai (1978) e successivamente integrati da Pennekamp & Quaak (1996) sulla base di ulteriori dati di campo. Sono riportate, inoltre, le velocità critiche di risospensione (calcolate da Nakai, 1978) per sedimenti di diversa granulometria.

⁸ La modellazione del pennacchio nel campo vicino richiede l'utilizzo di modelli di dettaglio (i cosiddetti *near-field models*) in grado di simulare le correnti di densità e la turbolenza causata dagli strumenti di lavoro (es. lavaggio dell'elica, ecc.) che rendono la natura del pennacchio di tipo dinamico.

Tabella 3.2 - Valori del parametro TGU ottenuti da Nakai (1978) e successivamente integrati da Pennekamp et al. (1996) e velocità critiche di risospensione (da Nakai, 1978).

VALORI DEL TGU DA NAKAI (1978)					
Tipo di draga	Potenza delle pompe o capacità della benna	Tipo di sedimento			TGU (kg/m ³)
		d<74 mm %	d<0,005 mm %	classificazione	
Draga aspirante stazionaria con disgregatore (CSD)	4.000 cv	99,0	40,0	Argilla limosa	5,3
	4.000 cv	98,5	36,0	Argilla limosa	22,5
	4.000 cv	99,0	47,5	Argilla	36,4
	4.000 cv	31,8	11,4	Sabbiosa limosa	1,4
	4.000 cv	69,2	35,4	Argilla	45,2
	4.000 cv	74,5	50,5	Sabbiosa limosa	12,1
	2.500 cv	94,4	34,5	Argilla limosa	9,9
	2.000 cv	3,0	3,0	Sabbia	0,2
	2.000 cv	2,5	1,5	Sabbia	0,3
Draghe aspiranti semoventi con pozzo di carico (TSHD)	Due pompe di 2.400 cv	92	20,07	Argilla limosa	7,1
	1.800 cv	83,2	33,4	Limo	25,2
Draghe a grappo (GD)	8 m ³	58,0	34,6	Argilla limosa	89,0
	4 m ³	54,8	412,0	Argilla	84,2
	3 m ³	45,0	3,5	Limo	15,8
	3 m ³	62,0	5,5	Limo	11,9
	3 m ³	87,5	6,0	Limo	17,1
Draga a cucchiaio (BHD)		10,2	1,5	Sabbia	17,6
		12,7	12,5	Sabbiosa limosa	55,8
VALORI DEL TGU DA PENNEKAMP et al. (1996)					
Tipo di draga	Produttività (m ³ /h)	Concentrazione media lungo la verticale sopra i valori di background (mg/l)			TGU (kg/m ³)
Draghe aspiranti semoventi con pozzo di carico (TSHD)	5.500	400			14
	5.400	150			3
	1.750	15			1-5
	2.170	60			8-22
Draghe a grappo (GD)	90	35			3
Draghe a grappo a chiusura ermetica	166	100			19
Draga a cucchiaio (BHD)	714	110			18-21
VELOCITÀ CRITICA DI RISOSPENSIONE DA NAKAI (1978)					
Tipo di sedimento		Dimensione media delle particelle (mm)		Velocità critica di risospensione (m/s)	
Argilla		0,005		0,03	
Limo		0,005-0,074		0,03-7,0	
Sabbia fine		0,074-0,42		7,0-15,0	
Sabbia grossolana		0,42-2,0		15,0-35,0	

Il TGU, sebbene sia ancora oggi molto usato, sia per draghe meccaniche (soprattutto del tipo *open clamshell*) sia per draghe idrauliche (soprattutto del tipo *cutter head* e *hopper*), presenta alcune inconsistenze formali e difficoltà di applicazione (Hayes & Wu, 2001).

In particolare:

- i valori di TGU sono definiti su base tabellare a partire dalla tipologia di draga e dei sedimenti;
- non sono fornite informazioni sulle modalità di dragaggio associate ai valori di TGU;
- i valori di TGU derivano da un numero di osservazioni di campo⁹ limitate;
- non sono fornite informazioni riguardo la presenza di *overflow*, importante soprattutto per draghe di tipo idraulico;

⁹ Sono stati effettuati campionamenti a valle (sottoflutto), a circa 30-50 m di distanza da diverse tipologie di draghe.

- inconsistenze numeriche possono derivare dall'ipotesi di base che le particelle con diametro superiore ai 5 μm depositano nelle immediate vicinanze della draga non contribuendo alla formazione del pennacchio di torbida; relativamente a questo aspetto studi recenti hanno dimostrato che anche considerevoli percentuali delle frazioni comprese tra 20 μm e 30 μm possono abbandonare la zona del campo vicino (Palermo *et al.*, 2008) e che, pertanto, una sovrastima dei valori del TGU può derivare da una sovrastima del rapporto (R_{74}/R_0).

▪ **Il metodo del fattore di risospensione (Resuspension Factor)**

Il Fattore di Risospensione “R” (*Resuspension Factor*), introdotto per superare alcune delle difficoltà di applicazione e delle inconsistenze numeriche del metodo TGU (Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001), definisce la percentuale di sedimenti persa in colonna d’acqua rispetto al totale del sedimento dragato (eq. (3-2):

$$g = R \left(\frac{R_t}{100} \right) \left(\frac{V_s C_s}{360} \right) \quad (3-2)$$

dove g (g/s) è la massa di sedimenti risospesi nell’unità di tempo che abbandona il campo vicino, R (%) è il fattore di risospensione espresso in percentuale rispetto alla massa di sedimento movimentato, V_s (m^3/h) la produttività del dragaggio, R_t (%) la frazione di particelle con un diametro inferiore al diametro più grande soggetto al trasporto nel campo lontano, C_s (kg/m^3) la concentrazione del sedimento secco *in situ*. In assenza di informazioni relative al diametro più grande soggetto al trasporto nel campo lontano, la frazione R_{74} ($< 74 \mu\text{m}$) è considerata un’accettabile approssimazione utilizzabile per la stima di R_t (Hayes *et al.*, 2007).

I valori del fattore di risospensione ottenuti per diversi progetti di dragaggio (principalmente condotti in fiumi e ambiti portuali) e per diverse condizioni ambientali sono riassunti in Hayes & Wu (2001). Gli autori osservano che anche per il Fattore di Risospensione ‘R’ permangono i limiti di applicabilità del metodo TGU relativi all’approccio tabellare richiesto ed al limitato *set* di dati utilizzato per derivare la formulazione.

Gli intervalli di validità ottenuti per il Fattore di Risospensione ‘R’ sono schematizzati in Tabella 3.3.

Tabella 3.3 - Intervalli di validità del parametro Fattore di Risospensione “R”, da Hayes *et al.* (2000).

Tipo di draga	Valori caratteristici di R(%)
Clamshell (open) Bucket dredge	0,16 - 0,66
Cutterhead dredge	0,001 - 0,51
Horizontal Auger dredge	0,6 - 56
MatchBox Dredgehead	0,1 - 10

3.3.3.2 Formulazioni empiriche

Diversamente dal metodo del TGU e del Fattore di Risospensione “R”, le formulazioni di tipo empirico permettono la stima dell’intensità del flusso di concentrazione di sedimenti ($\text{kg}/\text{m}^3/\text{s}$) rilasciati dalla superficie (geometria) della sorgente di rilascio mediante l’utilizzo di gruppi adimensionali che racchiudono informazioni sulle modalità di dragaggio e sulle condizioni ambientali del sito di intervento. La trattazione delle formulazioni empiriche è articolata nel seguito raggruppando le formulazioni esistenti per dragaggio idraulico e meccanico.

▪ **Draghe di tipo idraulico con testa disgregante**

Nel caso specifico di draghe idrauliche con disgregatore (o *cutter-head*, cfr. par. 2.2.2.2) sono state sviluppate relazioni che forniscono la concentrazione (C_r , kg/m^3) netta del sedimento rilasciato sulla base di gruppi adimensionali che tengono conto dei principali parametri operativi di tipo cinematico e geometrico dalla testa della draga (es. Hayes, 1986; Collins, 1995; Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001).

Dapprima, Hayes (1986) ha sviluppato, e successivamente aggiornato (Hayes *et al.*, 2000), una relazione basata sui principali parametri operativi di tipo cinematico della testa della draga, assumendo il rateo del rilascio di sedimento proporzionale alla velocità di rotazione in prossimità della superficie esterna delle lame del disgregatore:

$$C_r = 0.15 \left(\frac{V_s}{V_i}\right)^{2.869} \left(\frac{V_t}{V_i}\right)^{1.027} \quad (3-3)$$

nella quale, V_t (m/s) è la velocità tangenziale netta delle lame in prossimità della superficie esterna del disgregatore, risultato della somma vettoriale tra la velocità V_s (m/s) del movimento oscillatorio del braccio della draga (*swing velocity*) e della velocità V_c (m/s) di rotazione tangenziale delle lame del disgregatore rispetto al centro di rotazione ($V_t = |V_s \pm V_c|$) e V_i (m/s) è la velocità di aspirazione in prossimità delle lame del disgregatore¹⁰.

Successivamente Collins (1995) ha fornito una relazione simile alla (3-3), a meno dei valori degli esponenti, ma che include informazioni sul diametro dei sedimenti (d) e sui parametri operativi di tipo geometrico della testa della draga (lunghezza della testa dragante, L_{CH} , grado di penetrazione della testa dragante, d_f e del diametro della testa dragante, D_{CH} , Figura 3.6).

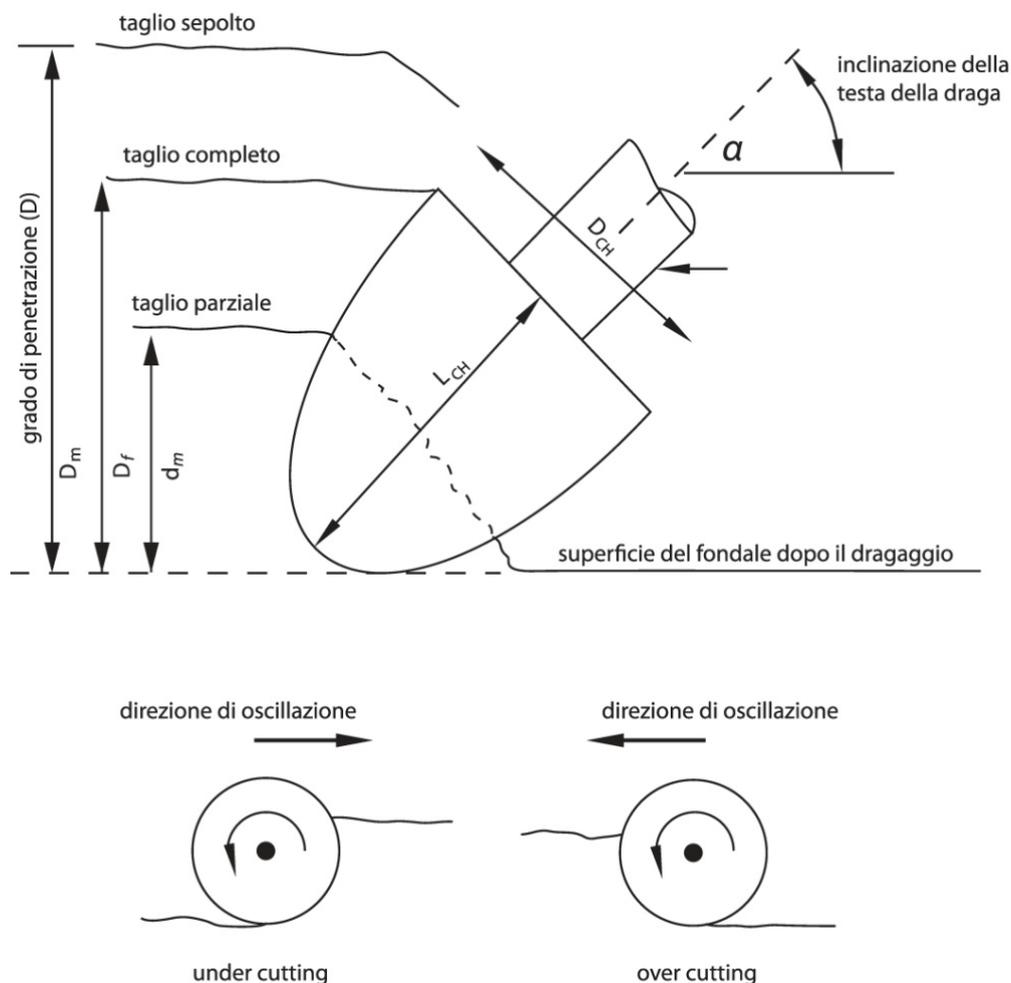


Figura 3.6 - Schema concettuale dei parametri geometrici e cinematici da considerare per draga idraulica con testa disgregante (da Collins, 1995).

In particolare, in Collins (1995) la concentrazione (C_i) di sedimenti rilasciati in prossimità del disgregatore è data dalla seguente:

$$\frac{C_r}{\rho \cdot 10^{-6}} = F_F F_D \left(\frac{V_s}{V_i}\right)^{2.848} \left(\frac{V_t}{V_i}\right)^{1.022} \quad (3-4)$$

¹⁰ Intervalli di validità: $V_s/V_i = 0.5 \div 9$; $V_t/V_i = 2.7 \div 16.2$

dove i parametri adimensionali F_F e F_D , che esprimono la dipendenza di C_r , dal grado di penetrazione della testa della draga nel fondale, sono date dalle seguenti:

$$\log_{10}(F_F) = 10 \left[10^{-4} \left(\frac{L_{CH}}{d} \right) / 13.32 \right]^{7.04} - 2.05 \quad (3-5)$$

$$F_D = 1 + 1.9039(D - 1)^2 + 0.4116(D - 1)^7 \quad (3-6)$$

In particolare, il coefficiente F_F , dipendente dai parametri L_{CH} e d , prende il nome di parametro di taglio completo (*full cut parameter*) e si riferisce a condizioni di dragaggio per cui la testa dragante penetra completamente, ma non affonda, nel fondale¹¹.

Nel coefficiente F_D , invece, detto parametro di taglio non completo (*non full cut parameter*) si introduce il parametro adimensionale $D (=d_f/D_f)$ che esprime il rapporto tra l'effettivo grado di penetrazione (d_f) della testa della draga (o spessore del taglio) e lo spessore che avrebbe il taglio se il grado di penetrazione fosse pari a D_f , ossia all'altezza verticale della testa dragante (L_{CH}). I valori di D_f e di D_{ch} sono ottenuti in relazione all'angolo α che la posizione dell'elinda forma rispetto alla superficie del fondale (Figura 3.6)¹².

Con riferimento alla Figura 3.6, il parametro F_D , tiene conto del fatto che il taglio può essere sepolto ($D > 1$, *buried cut*), parziale ($D < 1$, *partial cut*) o completo ($D = 1$, *full cut*). Il coefficiente F_D assume valore unitario per taglio completo ($D = 1$), mentre misure di campo hanno evidenziato che assume valori superiori all'unità, sia nel caso di taglio sepolto ($D > 1$) sia nel caso di taglio parziale ($D < 1$).

Tuttavia, Collins (1995) evidenzia che, in analogia con F_F , anche F_D può dipendere dal parametro L_{ch}/d , ma che non è possibile stimare tale dipendenza a causa della mancanza di misure di campo.

La Figura 3.7 mostra l'andamento di $F (=F_D \cdot F_F)$, stimato in funzione del parametro adimensionale L_{ch}/d e del parametro adimensionale D .

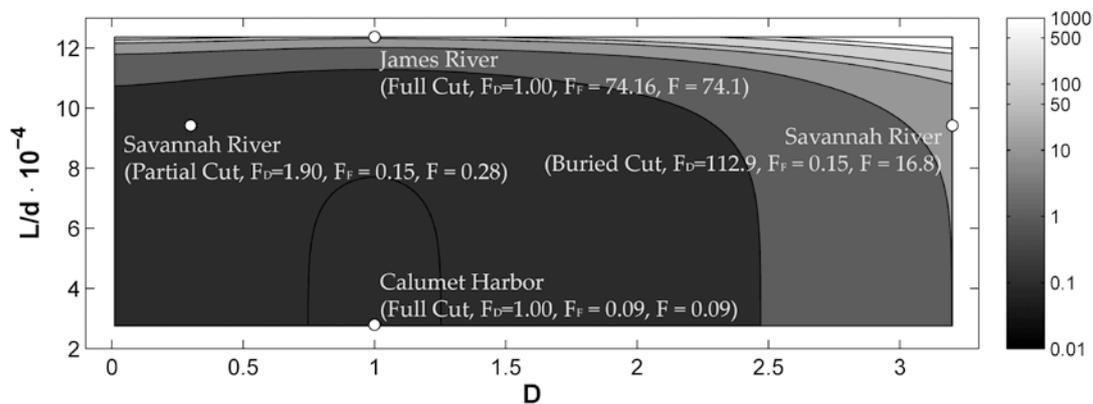


Figura 3.7 - Variazione del parametro $F (=F_D \cdot F_F)$ in funzione del parametro di taglio (D) e della dimensione caratteristica dei sedimenti (L/d). Adattato da Lisi et al. (2016).

Oltre alla concentrazione (C_r), per la stima dell'intensità della sorgente di risospensione, ossia del flusso (o portata) di sedimenti sospesi (q_s) uscenti dalla sorgente nell'unità di tempo, è necessario che sia definita anche la geometria (forma e dimensione) della sorgente.

Per il dragaggio idraulico con testa disgregante la geometria della sorgente può essere rappresentata in buona approssimazione con un semi-ellissoide (Collins, 1995), con semi-assi minori e maggiori rispettivamente dipendenti dal raggio minore (D_{ch}) e maggiore della testa disgregante (L_{ch}). Per la definizione della geometria della sorgente, tali dimensioni sono incrementate di una quantità rispettivamente pari a $(1+K_{ch})D_{ch}$ e $(1+K'_{ch})L_{ch}$, dove K_{ch} e K'_{ch} sono dei coefficienti empirici utilizzati per tenere conto del maggiore volume della nuvola di risospensione rispetto al volume occupato dalla testa disgregante. Misure di campo hanno mostrato che entrambi i coefficienti K_{ch} e

¹¹ Intervalli di validità: $L_{ch}/d = 2.8 \cdot 10^4 \div 12.4 \cdot 10^4$

¹² Intervalli di validità: $D = 0.5 \div 3$

K'_{ch} hanno valore inferiore a 1,5. Nel caso particolare di profondità limitata, allorché $(1+K_{ch})D_{ch}$ eccede l'estensione verticale del dominio fluido, l'altezza della sorgente viene posta pari al tirante idrico. In tal caso si può parlare di dragaggio idraulico in acqua bassa ($h/D_{CH} < 1+K_{CH}$).

Pertanto, è possibile definire la relazione che esprime la funzione sorgente del flusso di sedimenti sospesi, uscenti attraverso la sezione ortogonale al vettore che rappresenta la velocità di oscillazione dell'elinda¹³, come segue:

$$q_{ch} = C_r V_t (1 + K_{ch}) (1 + K'_{ch}) D_{ch} L_{ch} \quad (3-7)$$

La funzione sorgente espressa dalla (3-7) è dipendente dallo spazio e dal tempo, nel rispetto della relazione (3-4), poiché è localizzata in corrispondenza della testa disgregante della draga e funzione della modalità operativa dell'intervento.

Sempre nel caso di dragaggio idraulico Hayes *et al.* (2000) e Hayes & Wu (2001) hanno proposto e validato due ulteriori modelli empirici concettualmente simili per la stima del rateo di sedimenti sospesi (g), il primo di tipo dimensionale (g_D , *dimensional model*), il secondo di tipo adimensionale (g_{ND} , *non dimensional model*):

$$g_D = \frac{|V_s \pm \beta \pi d_c|^{1.864}}{27.4 C_s V_s t_c L_{ch}^{15.143}} \left(\frac{A_E}{D_{ch}} \right)^{14.143} \quad (3-8)$$

$$g_{ND} = \frac{(LD_{ch})^{1.966} |V_s \pm \beta \pi d_c|^{1.966} (V_s A_E)^{1.804}}{1.099 Q^{3.770}} \quad (3-9)$$

dove $g(\%)$ è il rateo di sedimento sospeso che abbandona il sito di dragaggio rispetto al volume totale di sedimento dragato, C_s (kg/m^3) è la concentrazione di sedimento secco in situ, t_c (m) è la profondità di scavo, A_E è la superficie delle lame della testa disgregante esposta all'azione dell'acqua (*washing*, m^2) così come definita da Crockett (1993), D_{ch} è il diametro della testa disgregante (m), L_{ch} è lunghezza della testa disgregante (m), Q (m^3/s) la portata volumetrica transitante attraverso la condotta di aspirazione della draga e β (rps) è la velocità di rotazione della testa disgregante e Q è la portata volumetrica (m^3/s).

Gli autori non indicano con chiarezza quale dei due modelli sia da preferire. Tuttavia evidenziano che la loro applicazione in situazioni differenti da quelle utilizzate per derivare le formulazioni (ossia al di fuori del loro campo di validità) può portare a sovrastime (pertanto conservative). In particolare, le formulazioni sono state ottenute per velocità di oscillazione tangenziale della testa dragante comprese tra 0,18 m/s e 0,38 m/s, per velocità di rotazione della testa disgregante comprese tra 7 e 40 rpm e rapporto di penetrazione (D) compreso tra 0,5 e 1.

▪ **Draghe di tipo meccanico**

Con specifico riferimento a draghe di tipo meccanico del tipo -BHD, Collins (1995) ha sviluppato un modello per la stima di C_r (g/m^3) in prossimità dell'area di dragaggio:

$$\frac{C_r}{\rho \cdot 10^{-6}} = 0.00235 \left(\frac{b}{\omega_s T} \right)^{3.033} \quad (3-10)$$

dove b (m) indica il parametro rappresentativo della dimensione del cucchiaio della draga ω_s (m/s) la velocità di caduta dei sedimenti e con T (s), la durata di un ciclo di dragaggio.

La relazione (3-10) può essere riscritta come:

$$\frac{C_r}{\rho \cdot 10^{-6}} = 0.00235 \left(\frac{b}{h} \frac{h}{\omega_s T} \right)^{3.033} = 0.0023 \left(\frac{B}{\tau} \right)^3 \quad (3-11)$$

¹³ La massa dei sedimenti risospesi uscenti dalla sorgente semi-ellissoidale nell'unità di tempo, può essere stimata come il flusso di sedimenti attraverso la sezione ortogonale al vettore che rappresenta la velocità di oscillazione dell'elinda, con superficie di larghezza $(1+K'_{ch})L_{ch}$ e altezza $(1+K_{ch})D_{ch}$.

dove h (m) è la profondità. Si evidenzia come la risospensione aumenti proporzionalmente alla dimensione relativa della draga $B(=b/h)$ e diminuisca all'aumentare della durata relativa di un ciclo di dragaggio $\tau(=\omega_s T/h)$. Tale durata esprime il tempo necessario affinché il sedimento torni sul fondo in funzione della durata di un intero ciclo di dragaggio (T)¹⁴.

In questo caso, per stimare il flusso (o portata) di sedimenti sospesi (q_{bd}) uscenti attraverso la superficie della sorgente nell'unità di tempo, si assume che la geometria della sorgente possa essere schematizzata di forma cilindrica con area di base pari all'ingombro del cucchiaio della draga (Collins, 1995) e rilascio costante lungo la colonna d'acqua¹⁵ durante la fase di risalita della benna (o del grappo). Pertanto, analogamente al caso di dragaggio idraulico, la relazione che esprime la funzione sorgente può essere scritta come segue:

$$q_{bd} = 2b^2 \left(\frac{h}{T}\right) (1 + K_{cb}) \frac{C_r}{T} \quad (3-12)$$

nella quale la concentrazione C_r è fornita dalla (3-11), il coefficiente K_{cb} è una costante empirica, compresa nell'intervallo 1-2 e T rappresenta la durata di un intero ciclo di dragaggio.

3.3.2 Termine sorgente per attività di sversamento in aree costiere

Esistono pochissime informazioni desumibili dalla letteratura tecnica relative alla distribuzione spazio-temporale della concentrazione di solidi sospesi nelle aree prossime a quelle in cui viene effettuata un'operazione di sversamento di sedimento per fini di ripascimento (es. Winterwerp, 2002; Roman-Sierra *et al.*, 2011).

Da un punto di vista fisico, la sezione terminale della condotta di restituzione della miscela acqua-sedimento è posizionata a una quota ben superiore rispetto al livello medio. Tuttavia, mentre la frazione grossolana della miscela tende a depositare (e ad essere movimentata con mezzi meccanici) nelle immediate vicinanze della restituzione, la frazione più fina tende a migrare e a formare un pennacchio di torbida, soggetto ai fenomeni di diffusione e dispersione. Molti sono i fattori che influenzano la concentrazione di solidi sospesi e l'estensione del pennacchio di torbida, quali le forzanti meteo-marine, le caratteristiche granulometriche della miscela di refluitamento (in particolare la frazione fine), oltre che la configurazione e tecnica di refluitamento.

In assenza di formulazioni affidabili per la stima del termine sorgente nel caso di refluitamento in aree litoranee, è consigliabile effettuare un'analisi di sensibilità dei risultati numerici prendendo in considerazione la massa totale di sedimento fine disponibile al trasporto nel campo lontano, così come previsto dal metodo generale proposto da Becker *et al.* (2015) riportato nel par. 3.3.4.

Le medesime problematiche sono presenti anche nel caso di operazioni di sversamento ai fini del ripristino morfologico del fondale in aree di transizione.

3.3.3 Termine sorgente per attività di sversamento al largo

Er *et al.* (2016) hanno proposto un modello, denominato *New Barged Sediments Disposal Model* (BSDM), per fornire una rappresentazione nel campo vicino (*near field*) del pennacchio dei sedimenti sversati con modalità assimilabili al *dumping*, in funzione delle dimensioni del natante utilizzato per lo sversamento e delle caratteristiche della nuvola di sedimenti che raggiunge il fondo.

Il metodo tiene conto del fatto che lo sversamento di grandi quantità di sedimento può indurre sorgenti di rilascio in alcuni casi di tipo "continuo" ed in altri di tipo "puntuale e istantaneo". La tipologia di sorgente, in particolare, dipende dalla relazione tra il volume dei sedimenti, il tempo necessario al completo svuotamento dello scafo ed il tempo che impiegano i sedimenti a raggiungere il fondo (dipendente dalla velocità di caduta).

L'ipotesi di sorgente di rilascio di tipo continuo, ad esempio, è considerata realistica quando il tempo necessario allo svuotamento dello scafo e quello necessario ai sedimenti per attraversare la colonna

¹⁴ Nella eq. (3-12) T è suddivisibile in: f_u (risalita della benna lungo colonna d'acqua; f_d (discesa della benna lungo la colonna d'acqua; f_b (quando la benna resta ferma in acqua); f_0 (quando la benna è completamente fuori dall'acqua).

¹⁵ Si assume che durante la fase di risalita la perdita di sedimenti sia uniformemente distribuita lungo la verticale, che il sedimento risospeso rimanga confinato nel cilindro a generatrice verticale e che venga totalmente espulso orizzontalmente in colonna durante la fase di discesa del cucchiaio (o del grappo).

d'acqua sono dello stesso ordine di grandezza. Inoltre, con tale metodo si vuole superare la limitazione derivante dall'assunzione, non sempre realistica, che nell'ipotesi di rilascio puntuale e istantaneo il sedimento sversato possa essere discretizzato come una sequenza di eventi di rilascio tridimensionali (3D) (Koh & Chang, 1973; Johnson & Fong, 1995; Howlett, 2003; Bailey *et al.*, 2004)¹⁶. Infatti, nella realtà, la fase iniziale discendente della nube di sedimento può essere assimilata ad un corpo bidimensionale (2D) e solo successivamente subire i processi 3D che generalmente caratterizzano la dinamica del pennacchio nel campo vicino, in maniera dipendente sia dai volumi sversati sia dalla geometria dello scafo.

Nel BSDM la schematizzazione del pennacchio è basata sulla relazione tra i principali parametri fisici rappresentativi delle lunghezze del pennacchio di torbida (Figura 3.8):

- z_e , la profondità dove si ha il passaggio del pennacchio da continuo a termico, ossia quando il flusso di corrente inizia a penetrare nella massa di sedimento sversato;
- z_t , la profondità dove si ha il passaggio da un regime di flusso 2D a 3D;
- z_d , la profondità dove il pennacchio diviene dispersivo e il sedimento inizia a depositare al fondo in funzione della velocità di sedimentazione (Rahimipour & Wilkinson, 1992);
- h , la profondità dell'acqua utilizzata per riferire la posizione di ciascun parametro lungo la colonna d'acqua.

In particolare, il modello si basa sull'analisi dimensionale delle grandezze di interesse che si traduce in una serie di formulazioni empiriche calibrate sulla base di osservazioni sperimentali a piccola scala.

Nel dettaglio, il modello proposto da Er *et al.* (2016) definisce una relazione per la stima quantitativa di z_d a partire dall'analisi dimensionale. Le variabili indipendenti utilizzate per l'analisi dimensionale includono: il volume (V_0) di sedimento sversato; il diametro medio delle particelle (d_{50}), la densità e la velocità di caduta dei sedimenti (ρ_s e ω_s), la densità dell'acqua (ρ_a), la lunghezza e la larghezza dell'apertura dello scafo (L e W).

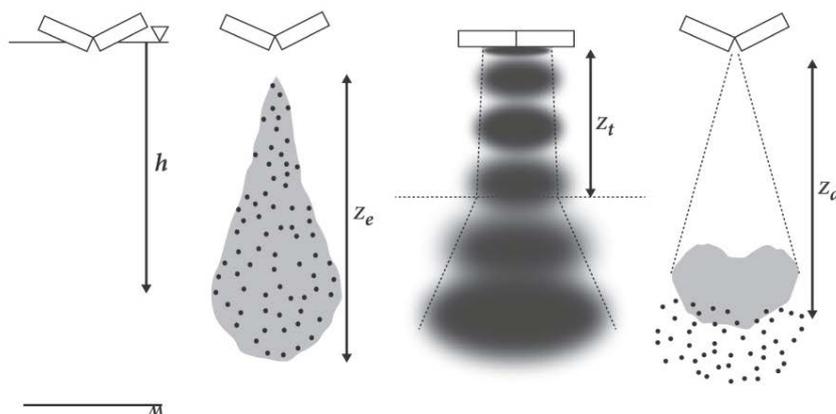


Figura 3.8 - Parametri fisici rappresentativi delle lunghezze della nuvola di torbida (tratto da Er *et al.* 2016)

Il metodo SBDM richiede la conoscenza del tempo necessario affinché il carico nello scafo sia completamente sversato (t_e). La formulazione empirica proposta si traduce nella seguente relazione:

$$t_e = 481(D^*)^{-0.96} \left(\frac{LW}{V_0^{2/3}} \right)^{-0.55} \sqrt{\frac{V_0^{1/3}}{g'}} \quad (3-13)$$

dove g' ($= g (\rho_s - \rho_a) / \rho_a$) è l'accelerazione gravitazionale adimensionale, $D^* = d_{50} \cdot g^{1/3} / \nu^{2/3}$ il diametro medio adimensionale delle particelle e ν è la viscosità cinematica. La (3-13) si basa sull'assunzione

¹⁶ Sono due gli studi di letteratura principali finalizzati alla modellazione del pennacchio dei sedimenti sversati in mare aperto nel campo vicino (*near field*) e che sono basati sulle assunzioni di sorgente puntiforme e rilascio istantaneo: il volume sversato è discretizzato come una sequenza di eventi di rilascio tridimensionali (3D). Koh & Chang (1973) hanno proposto il modello matematico (K&C Model), successivamente migliorato da Johnson & Fong (1995) con lo sviluppo del modello *Short Term FATE* (STFATE), ampiamente utilizzato per calcolare i SSC e la disposizione di fondo in studi di settore (Howlett 2003; Bailey *et al.*, 2004).

che sul tempo necessario al completo svuotamento dello scafo incida l'area dell'apertura (WL), ma non la forma (L e W separatamente).

Poiché la fase discendente iniziale del pennacchio è governata dalle caratteristiche di galleggiabilità della massa di sedimenti rilasciati dall'imbarcazione (ossia da: V_0 , g' e t_e), il valore di z_e è ottenuto come:

$$z_e = \left(\frac{t_e \sqrt{g'}}{V_0^{1/6}} \right)^{0.61} V_0^{1/3} \quad (3-14)$$

Il parametro z_t , invece, è influenzato sia dalle caratteristiche geometriche dell'apertura (L e W) sia dalla durata del rilascio (t_e), come espresso dalla seguente relazione:

$$z_t = 0.62 \left[\left(\frac{t_e \sqrt{g'}}{\sqrt{L}} \right) \log \left(\frac{L}{W} \right) \right]^{0.33} L \quad (3-15)$$

La (3-15) soddisfa le due condizioni fisicamente possibili:

- 1) quando $L/W = 1$, ossia quando i sedimenti sono rilasciati da una sorgente associabile ad una di tipo puntuale (es. in caso di scafo di forma quadrata), z_t tende a zero, e la nuvola di sedimento assume immediatamente un regime 3D;
- 2) all'aumentare del rapporto L/W il valore di z_t aumenta.

La profondità z_d , infine, è stata definita sulla base di studi precedenti sia per il caso 2D che 3D.

In particolare, Noh & Fernando (1993) hanno definito per il caso 2D la profondità in cui il pennacchio diviene di tipo dispersivo (z_{d2D}) con la seguente relazione:

$$z_{d2D} = 380 R_p \left(\frac{g' V_0}{\omega_s \nu L} \right)^{0.3} \frac{\nu}{\omega_s} \quad (3-16)$$

che include l'effetto del numero di Reynolds ($R_p = \omega_s d_{50} / \nu$).

Analogamente, nel caso 3D Bush *et al.* (2003) hanno definito la profondità in cui il pennacchio diviene di tipo dispersivo (z_{d3D}) come segue:

$$z_{d3D} = (11 \pm 2) \left(\frac{(g' V_0)^{1/2}}{\omega_s \nu L} \right)^{5/6} d_{50} \quad (3-17)$$

In questo caso la dipendenza di $z_{d(3D)}$ da R_p , attribuita all'influenza delle interazioni tra le particelle di sedimento, sussiste solo per bassi valori di R_p (per R_p compresi tra 0,1-300) e pertanto diminuisce al crescere di R_p .

Pertanto, come già anticipato, il modello BSDM può essere utilizzato per indirizzare la scelta dei parametri operativi dello sversamento (es. forma dello scafo e dell'apertura dello scafo, L/W , ecc.), in relazione alla tipologia di pennacchio che si vuole ottenere durante la fase discendente¹⁷ sulla base della tipologia e del volume dei sedimenti da sversare.

Ad esempio, in accordo con studi di letteratura (Johnson *et al.*, 2008; Gensheimer *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2013), per ridurre la possibilità che i sedimenti siano allontanati dall'area di sversamento dall'idrodinamica locale è auspicabile che la nube di sedimenti si comporti come un corpo fluido guidato dalla differenza di densità (regime termico) fino all'impatto con il fondo ($z_d > h$ sia nel caso in cui si formi una nube tridimensionale, $z_{2d} > z_t$, $z_{3d} > h$ e $z_t > h$, sia nel caso bidimensionale, $z_{2d} < z_t$, $z_{2d} > h$ e $z_t < h$).

Infine, per definire le caratteristiche e la velocità con cui il quantitativo lordo di sedimento impatta sul fondale, può essere importante definire la velocità con cui il sedimento abbandona la sorgente (ossia lo scafo) e viene immesso in acqua:

$$u_i = \frac{(\rho_{AV} g h - \rho_a g h)}{\frac{1}{2} \rho_{AV} \left[1.0 + f - \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2 \right]} \quad (3-18)$$

¹⁷ Generalmente ci si riferisce alla fase convettiva discendente, ossia alla fase iniziale dello sviluppo della nube di torbida influenzata principalmente dai parametri operativi e dalla forza di gravità (i.e. effetti di galleggiamento del flusso).

dove ρ_{AV} è la densità media del sedimento contenuto nel pozzo di carico, f è il fattore di attrito, e A_1 e A_0 sono rispettivamente l'area dell'apertura e dell'interno dello scafo. La (3-18) si basa sull'osservazione che la "galleggiabilità del volume totale di sedimento" rilasciato durante ogni singola operazione di sversamento dipende dalla "velocità di inserimento" del sedimento in acqua, che a sua volta dipende dal variare della forza di gravità determinata in funzione dello spessore di sedimento presente e/o rimante nello scafo.

Da un punto di vista qualitativo, quanto sopra riportato è utile per la scelta del valore dei parametri empirici definiti nell'ambito del metodo proposto da Becker *et al.* (2015), cfr. par. 3.3.4. Infatti, se la nuvola di sedimenti sversata raggiunge il fondo con un regime termico, allora la frazione di sedimento fine reso disponibile al campo lontano è piuttosto limitata e il parametro empirico σ_s può essere valutato considerando i valori più piccoli suggeriti in Tabella 3.4.

3.3.4 Il metodo generale di Becker *et al.* (2015)

Recentemente, Becker *et al.* (2015) hanno proposto un metodo generale, valido per ogni modalità tecnico-operativa, per stimare la sorgente di sedimento (kg/s) disponibile al campo lontano ed inserirlo adeguatamente nel dominio di calcolo. L'obiettivo del metodo, totalmente in accordo con la metodologia descritta in questo Manuale, è quello di pervenire a stime attendibili e il più possibile realistiche, senza avvalersi (almeno inizialmente) di modelli più complessi.

Il metodo nasce dalla combinazione dei diversi approcci noti nella bibliografia di settore (John *et al.*, 2000), peraltro in parte già schematizzati nei paragrafi precedenti. In particolare, Becker *et al.* (2015) integrano:

- il metodo per la stima del rateo di rilascio dei sedimenti (in kg/s) in prossimità dell'area di movimentazione dei sedimenti¹⁸ (un esempio di tale metodo è descritto al par. 3.3.3.2);
- il metodo del fattore di risospensione, in cui la massa totale di sedimenti (kg) messi in sospensione è espressa rispetto alla quantità totale di sedimenti movimentati (kg/m³, cfr. par. 3.3.3.1);
- il metodo per la stima del flusso di sedimenti (kg/m³/s) che abbandonano il campo vicino (cfr. par. 3.3.3.2).

In particolare, il metodo propone una procedura generale che prevede i seguenti passaggi:

1. l'analisi delle modalità di lavoro per la definizione della tipologia di sorgente;
2. la stima del volume totale di sedimento fine disponibile per il trasporto nel campo lontano;
3. la distribuzione del sedimento fine disponibile (frazionamento del termine sorgente) in base alle modalità ed alle tempistiche delle fasi in cui è suddivisibile l'intero ciclo di lavoro (es. dragaggio/escavo, carico/overflow, trasferimento/sversamento finale);
4. l'adeguato inserimento del termine sorgente nel dominio di calcolo (nel tempo e nello spazio) nell'ambito della modellazione numerica.

La stima della massa totale di sedimento fine (m_t , in kg di peso secco) potenzialmente disponibile al trasporto nel campo lontano può essere espressa, in prima approssimazione, in relazione al volume totale del sedimento da movimentare¹⁹:

$$m_t = (1 - n)\rho_s V_{tot} f_{63\mu m} \quad (3-19)$$

dove n è la porosità, ρ_s è la densità del grano, V_{tot} è il volume totale di sedimento movimentato (dragato o ricollocato) e $f_{63\mu m}$ è la frazione di sedimento fine (inferiore al diametro caratteristico pari a 63 μm).

Si osserva, però, che soltanto una frazione di V_{tot} è effettivamente rilasciata nel campo lontano. Pertanto, con un approccio del tutto empirico è possibile esprimere la massa totale di sedimento fine effettivamente (non potenzialmente) disponibile al trasporto nel campo lontano così come segue:

¹⁸L'affidabilità del metodo dipende dall'affidabilità della stima della quantità di sedimento fine che abbandona il campo vicino nell'unità di tempo.

¹⁹La relazione si riferisce alla percentuale di fine presente nel volume totale del sedimento da movimentare in condizioni indisturbate e non tiene conto del possibile incremento della percentuale di fine derivante dall'azione meccanica (di disturbo) esercitata dai mezzi di lavoro (soprattutto in fase di dragaggio).

$$m_{eq} = \sigma_{eq} m_t \quad (3-20)$$

nella quale il coefficiente σ_{eq} costituisce un parametro empirico associato alla tecnica di dragaggio e alla fase del ciclo di lavoro considerata, da specificare in funzione delle scelte progettuali. Si riconosce in questo approccio il concetto di fattore di risospensione (cfr. par. 3.3.3.1), seppur riferito alla massa di sedimento fine disponibile (m_{eq} , invece che alla massa totale di sedimento movimentato, m_t).

Il termine sorgente, caratterizzato da un flusso di sedimenti, può essere definito identificando la durata (Δt) di ciascuna fase del ciclo di lavoro e valutandone un valore medio:

$$q = \frac{m_{eq}}{\Delta t} \quad (3-21)$$

nella quale q è la funzione sorgente relativa alla generica fase di lavoro di durata (Δt) per la quale vi è una massa di fine disponibile pari a m_{eq} .

Il frazionamento del termine sorgente tra le diverse fasi del ciclo di lavoro per cui è ipotizzabile un rilascio significativo dei sedimenti (dragaggio/escavo, *overflow* in fase di carico/trasporto e sversamento) costituisce un passo cruciale del metodo e deve essere effettuato sulla base dell'analisi della modalità operativa impiegata.

Nel caso di operazioni di movimentazione con draghe idrauliche il termine sorgente è calcolato frazionando la massa di sedimento fine disponibile per il trasporto nel campo lontano in punti e istanti diversi rappresentativi delle fasi operative: 1) escavo/dragaggio; 2) *overflow* in fase di carico/trasporto; 3) sversamento.

In particolare, tramite relazioni concettualmente simili alla (3-21) sono calcolate:

- 1) la frazione di rilascio in fase di dragaggio (m_d):

$$m_d = \sigma_d m_t \quad (3-22)$$

- 2) la frazione di rilascio per *overflow* in fase di carico (m_o)²⁰:

$$m_o = \frac{t_2 - t_1}{t_2 - t_0} (1 - f_{sed}) (1 - f_{trap}) m_h \quad (3-23)$$

dove $m_h = (m_t - m_d)$ è la massa di sedimento fine trasportata nel pozzo di carico della draga (cioè quella totale decurtata della massa persa durante la fase di dragaggio), mentre la frazione (m_o) del sedimento fine soggetta ad *overflow* è calcolata al netto dei fenomeni di sedimentazione (f_{sed}) e intrappolamento (f_{trap}) dei sedimenti trasportati nel pozzo di carico, che accadono tra gli istanti t_0 e t_1 (sedimentazione) e t_0 e t_2 (intrappolamento). Inoltre, della frazione (m_o) del sedimento fine soggetta ad *overflow*, una parte (m_{od}) raggiunge il fondo nell'ambito di un processo di pennacchio dinamico (m_{od}):

$$m_{od} = (1 - \sigma_o) m_o \quad (3-24)$$

e solo la rimanente va ad alimentare il pennacchio di tipo passivo (m_{op}) nel campo lontano:

$$m_{op} = \sigma_o m_o \quad (3-25)$$

- 3) la frazione di rilascio in fase di sversamento, in cui la massa di sedimento fine $m_s = (m_h - m_o)$ è rilasciata in colonna d'acqua durante la fase di sversamento al netto della perdita di fine in fase di carico per *overflow*. Come per il passo precedente, della frazione rilasciata in fase di sversamento (m_s), una parte raggiunge il fondo nell'ambito di un processo dinamico (m_{sd}):

²⁰Nell'equazione (3-23) gli istanti temporali t_0 , t_1 e t_2 caratterizzano le fasi temporali del ciclo di lavoro, dove: t_0 rappresenta l'inizio del ciclo di dragaggio e l'inizio del processo di caricamento; nell'istante t_1 la draga raggiunge la piena capacità di carico ed inizia l'*overflow* e la quantità di sedimenti all'interno della draga può aumentare; nell'istante t_2 il processo di carico e l'*overflow* si interrompono. Inoltre, è possibile identificare ulteriori istanti temporali (t_3 , t_4 e t_5): il carico di ulteriore sedimento viene avviato all'istante t_3 e arrestato all'istante t_4 ; t_5 rappresenta la fine del ciclo di lavoro; gli intervalli $t_3 - t_2$ e $t_5 - t_4$ rappresentano le durate delle fasi di pieno carico e di svuotamento della draga per sversamento, rispettivamente.

$$m_{sd} = (1 - \sigma_s) m_s \quad (3-26)$$

mentre una parte va ad alimentare il pennacchio passivo nel campo lontano:

$$m_{sp} = \sigma_s m_s \quad (3-27)$$

Nel caso di movimentazione con draghe meccaniche il rilascio riconducibile all'*overflow* è trascurabile, pertanto il termine sorgente è frazionabile in due parti:

- 1) la frazione della massa di fine rilasciata in fase di dragaggio/escavo (m_d);
- 2) la frazione della massa di fine rilasciata in fase di sversamento (m_s).

La definizione delle durate delle diverse fasi che generano un flusso di sedimenti durante il ciclo di lavoro considerate per draghe di tipo idraulico (dragaggio, *overflow* e sversamento) e di tipo meccanico (dragaggio e sversamento) permette la stima dell'intensità media (kg/s) del termine sorgente.

Si osserva, infine, che la corretta definizione dei parametri empirici (σ_d , σ_o , σ_s) del termine sorgente frazionato (eq. 3-22 - 3-27), concettualmente coincidenti con σ_{eq} della 3-20, riveste un ruolo cruciale nella corretta applicazione del metodo.

Tali parametri possono essere stimati tramite le tecniche precedentemente descritte (cfr. par. 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3). Tuttavia, dedurre questi parametri con buon livello di affidabilità richiede l'esecuzione di misure di campo *ad hoc* e/o l'utilizzo di modelli di dettaglio (cfr. par. 4.4 e 5.2).

La Tabella 3.4 riporta l'ordine di grandezza dei parametri σ (dragaggio: σ_d ; *overflow*: σ_o ; sversamento: σ_s) per le diverse fasi operative, tratti da Becker *et al.* (2015).

Tabella 3.4 - Intervallo di variazione dei parametri empirici associati alle diverse fasi operative (dragaggio: σ_d ; *overflow*: σ_o ; sversamento: σ_s). Da Becker *et al.*, (2015).

FASE OPERATIVA	VALORI CARATTERISTICI
Dragaggio/escavo (σ_d)	0,00 – 0,03
Coefficiente di sedimentazione (f_{sed})	0,00 – 1,00
Coefficiente di intrappolamento (f_{trap})	0,01 – 0,05
Testa dragante con disgregatore (σ_d)	0,01 – 0,05
Draga meccanica a grappo o benna (σ_d, σ_b)	0,00 – 0,04
<i>Overflow</i> (σ_o)	0,00 – 0,20
Sversamento (dragaggio idraulico, σ_s)	0,00 – 0,10
Sversamento (dragaggio meccanico, σ_s)	0,00 – 0,05

Alcune inconsistenze nelle stime possono derivare dal fatto che:

- la definizione della dimensione dei grani per la componente fine non è univocamente definita: gli autori si riferiscono al limite di 63 μm nel rispetto della scala *Wentworth*, ma molte formulazioni relative alla fase di dragaggio utilizzano il limite di 74 μm definito nell'ambito della classificazione USCS (*Unified Soil Classification System*);
- l'equazione (3-19) può essere utilizzata per stimare la massa di sedimento appartenente a diverse classi granulometriche sostituendo la frazione $f_{63\mu\text{m}}$ con la frazione relativa alle classi desiderate, ma la definizione del numero di classi granulometriche è tipicamente arbitraria;
- la sorgente di rilascio è espressa in relazione alla percentuale di fine presente nel volume totale del sedimento da movimentare in condizioni indisturbate (V_{situ}), ma non considera il possibile incremento della percentuale di fine derivante dall'azione meccanica dei mezzi di lavoro (soprattutto in fase di escavo) e il possibile decremento causato dalla formazione di agglomerati sedimentari che favoriscono la sedimentazione del sedimento sospeso²¹.

²¹ Questi approfondimenti specifici esulano dalle finalità del presente manuale

3.4. Modelli matematici per la simulazione del trasporto e della deposizione dei sedimenti

I modelli per simulare i fenomeni di trasporto (dispersione, diffusione e deposizione) richiedono la conoscenza del campo idrodinamico (cfr. par. 3.2) e le caratteristiche del termine sorgente (cfr. par. 3.3) al fine di disporre dei necessari parametri di *input* necessari per pervenire a stime attendibili della variabilità spazio-temporale dei sedimenti in sospensione (e della eventuale contaminazione associata).

Analogamente al caso delle simulazioni idrodinamiche, l'approccio numerico per la soluzione delle equazioni che governano i fenomeni di trasporto influenza l'onere in termini di risorse e tempi di calcolo e di dati di *input* necessari.

Pertanto, da un punto di vista squisitamente pratico, è utile avere uno strumento di basso onere computazionale che possa essere utilizzato per una selezione degli scenari più critici e delle tecniche operative più indicate per il contemporaneo raggiungimento degli obiettivi progettuali e degli obiettivi ambientali. È ovvio che al basso onere computazionale di tale strumento consegue un'inevitabile semplificazione delle equazioni costitutive del modello. Quindi, alla prima fase di ottimizzazione segue di solito una seconda fase di dettaglio nell'ambito della quale vengono utilizzati modelli più raffinati per riprodurre scenari selezionati nell'ambito della prima fase (cfr. par. 4.1).

Nel seguito si descrivono sia i modelli semplificati, sia i modelli più sofisticati.

3.4.1 Modelli semplificati con soluzione analitica

Tipicamente, i modelli meno onerosi sono costituiti da soluzioni analitiche di equazioni opportunamente semplificate. Tali soluzioni sono espresse in forma chiusa (cioè utilizzabili con semplici operazioni aritmetiche) oppure integrale (cioè utilizzabili con tecniche standard di integrazione numerica) e hanno la caratteristica di essere soluzioni esatte (a differenza delle soluzioni ottenute con metodi numerici che sono approssimate). Tale ultima caratteristica è utile anche per l'utilizzo dei modelli più sofisticati, che possono essere validati per confronto con i risultati ottenuti con i modelli semplificati, nell'ambito di scenari in cui le ipotesi semplificative sono poco influenti. Si osserva a tal proposito che la validazione è volta alla verifica della accuratezza dei modelli numerici nel risolvere le equazioni che governano il problema, mentre la calibrazione è volta alla taratura dei valori dei coefficienti presenti nelle equazioni, finalizzata all'ottimizzazione dei risultati del modello rispetto a dati misurati.

In generale, i modelli semplificati di trasporto e deposizione dei sedimenti si riducono alla definizione della soluzione dell'equazione di dispersione e diffusione dei sedimenti risospesi. Con l'obiettivo di valutare l'evoluzione dell'area potenzialmente interessata dagli effetti indotti dalle attività di movimentazione, spesso è trascurabile la variabilità verticale di SSC (modelli 2DH). A questa approssimazione (alcune volte adottata anche per i modelli più raffinati), si aggiunge la semplificazione di velocità ambientali omogenee (non variabili nello spazio), ma comunque variabili nel tempo; coefficienti di diffusione omogenei e costanti (seppur con la possibilità di simulare anisotropia del mezzo e del flusso); profondità costante; velocità di deposizione costante. Risulta quindi chiaro che tali modelli possano essere utilizzati soltanto nella fase di analisi preliminare nell'ambito della quale modelli semplificati riescono comunque a descrivere le caratteristiche salienti dell'evoluzione spazio-temporale del pennacchio di torbida.

Esistono modelli semplificati in grado di valutare l'evoluzione del pennacchio di torbida con una produzione di sedimenti costante nel tempo localizzata in un'area fissa (la cosiddetta "sorgente continua", es. Shao *et al.*, 2015; Shao *et al.*, 2016). Tali modelli permettono la definizione degli scenari di caso peggiore in termini di correnti ambientali (costanti o variabili nel tempo, ma comunque omogenee nello spazio), di valori da assegnare ai coefficienti di diffusione e alla velocità di deposizione, nonché al termine sorgente. In questi casi, è possibile utilizzare il modello semplificato per la definizione degli scenari di simulazione che, nella fase modellistica di dettaglio, possono essere analizzati con l'impiego di modelli numerici più sofisticati. Si evidenzia che nel caso di una sorgente continua è possibile ottimizzare l'intervento variando (al più parametricamente) i valori della produzione di sedimenti, ma non la successione temporale di rilascio di sedimenti, dipendente dalle tecniche operative relative all'intervento. A tal fine sono stati proposti metodi in grado di simulare la variabilità spazio temporale della sorgente di risospensione (es. Di Risio *et al.*, 2017; Figura 3.9).

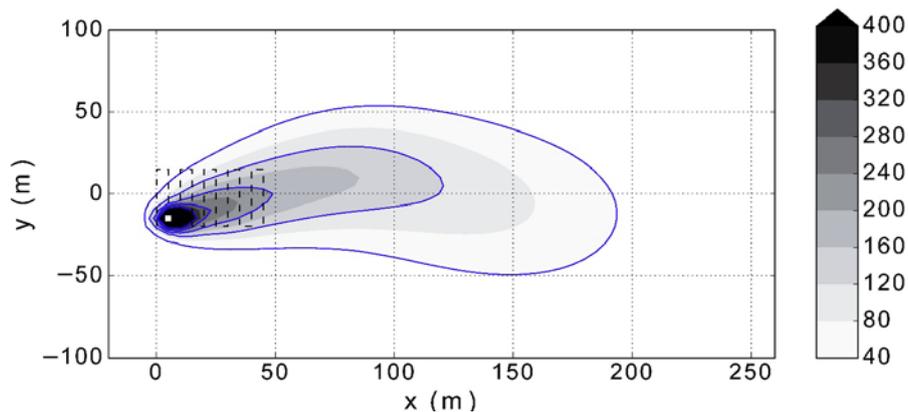


Figura 3.9 - Evoluzione del pennacchio di torbida indotto da attività di dragaggio idraulico effettuato in un canale (la corrente è diretta verso la destra del grafico) in corrispondenza del percorso indicato dalla linea tratteggiata [adattato da Di Risio et al., 2017].

3.4.2 Modelli con soluzione numerica

I modelli numerici per lo studio dei fenomeni di trasporto (dispersione, diffusione e deposizione) dei sedimenti sospesi si distinguono prevalentemente in base all'approccio risolutivo scelto per trasformare in formule matematiche il problema fisico: modelli Euleriani (diffusione) (i risultati mostrati in Figura 3.9 ne sono un esempio) e Lagrangiani (i risultati mostrati in Figura 3.10 ne sono un esempio).

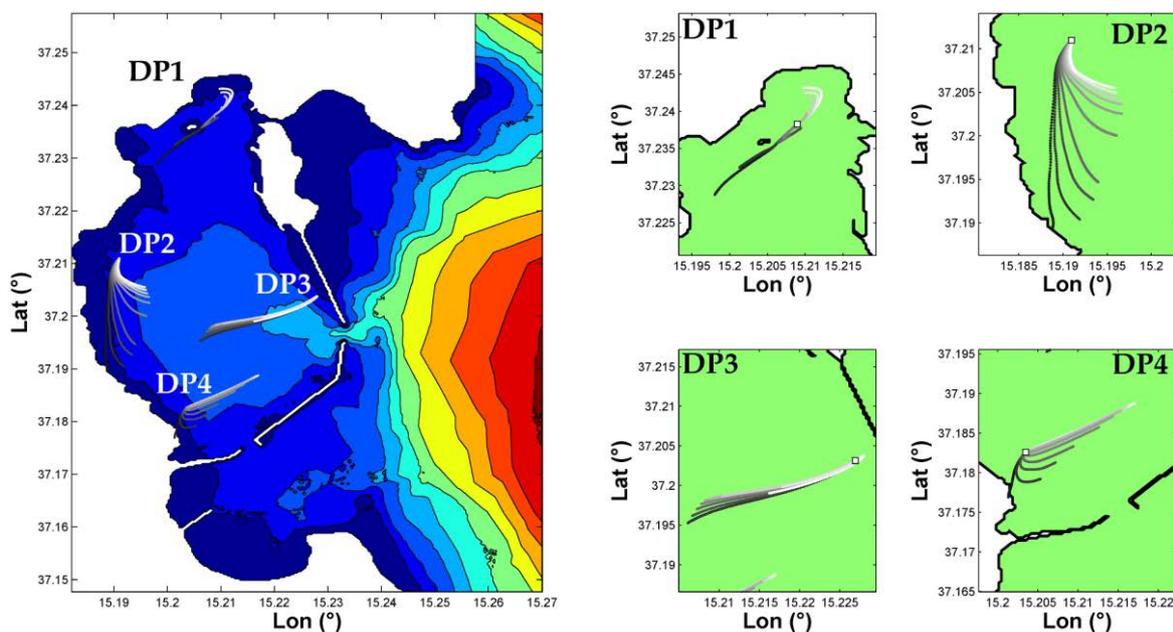


Figura 3.10 - Evoluzione del pennacchio di torbida indotto da attività di dragaggio meccanico simulati con modello lagrangiano in quattro ipotetici punti di dragaggio [adattato da Lisi et al., 2012, 2016].

L'approccio Euleriano segue una formulazione basata sulla descrizione della concentrazione del sedimento punto per punto, volta alla risoluzione dell'equazione di convezione/. Definite le condizioni iniziali, le condizioni al contorno e l'evoluzione spazio-temporale del termine sorgente, la risoluzione dell'equazione che governa il fenomeno permette di valutare l'evoluzione spazio temporale della concentrazione del sedimento in sospensione (SSC) in funzione del campo idrodinamico e delle caratteristiche specifiche del fenomeno (presenza di sorgenti, processo di deposizione, ecc.). Analogamente ai modelli idrodinamici, anche in questo caso l'equazione descrittiva del fenomeno può essere definita mediando sulle piccole scale temporali o spaziali (rispettivamente secondo gli approcci RANS o LES) introducendo parametri che rappresentano il ruolo della turbolenza (es. coefficienti di diffusività turbolenta).

La differenza sostanziale tra il metodo lagrangiano e quello euleriano è che, il primo è basato su una formulazione che segue l'evoluzione spaziale e temporale della posizione di ogni singola particella, a cui è associata una data concentrazione, mentre con il secondo, come sopra esposto, viene calcolata la concentrazione del sedimento sospeso in ogni punto del dominio di calcolo.

La peculiarità della formulazione matematica per i processi di dispersione lagrangiani è che il campo di velocità è costituito da una parte deterministica (il campo medio di velocità del fluido) e da una parte stocastica che tiene conto degli effetti della turbolenza. In questo caso si parla di modelli lagrangiani a cammino casuale (*random walk models*).

Esistono, inoltre, formulazioni ibride tra metodo euleriano e lagrangiano (Zheng & Bennett, 2002).

Al fine di migliorare l'accuratezza dei risultati ottenuti dai modelli numerici è possibile considerare diverse classi granulometriche. In questo caso è necessario risolvere le equazioni (euleriane o lagrangiane) separatamente per ognuna delle classi granulometriche considerate. In particolare, tale approccio risulta utile per separare e meglio ricostruire la dinamica della frazione più fine del sedimento che è soggetta a processi di trasporto per aree più estese.

Generalmente si può considerare il sedimento come un tracciante passivo, ossia si ipotizza che esso non possa alterare l'idrodinamica, ma sia semplicemente trasportato dal campo di corrente e si disperda progressivamente in colonna d'acqua. Maggiore è la concentrazione di sedimento, minore è la validità di tale ipotesi, poiché varia il comportamento reologico (cioè il legame costitutivo) della miscela sedimento-acqua. Di conseguenza tale approssimazione è verosimilmente più accettabile nel campo lontano rispetto alla sorgente di rilascio del sedimento. L'utilizzo di questa ipotesi permette di descrivere il processo di diffusione e trasporto del sedimento in maniera disaccoppiata dal modello idrodinamico, risolvendolo quindi a posteriori sulla base del campo di corrente ottenuto. In alternativa si può tenere conto di tale aspetto alterando il valore locale della densità dell'acqua (dipendente anche da temperatura e salinità). Se si ipotizza ci siano diverse classi granulometriche che costituiscono il fondale, il valore di densità in un punto della miscela è dato dalla seguente:

$$\rho_{miscela} = \rho_{acqua} + \sum_{n=1}^{ntot} c_{(n)} \left(1 - \frac{\rho_{acqua}}{\rho_{s(n)}} \right) \quad (3-28)$$

In cui $c_{(n)}$ è la concentrazione locale della n-esima frazione di sedimento e $\rho_{s(n)}$ la sua densità.

Poiché in tal modo il valore di concentrazione del sedimento altera il valore della densità considerata nelle equazioni del moto, è necessario che le equazioni di trasporto siano risolte contestualmente a quelle per l'idrodinamica nell'ambito della modellazione di correnti di densità.

Molti dei già citati modelli per l'idrodinamica (cfr. par. 3.2) includono specifici moduli per la simulazione del trasporto di sedimenti (MOHID, 2003; Fachin & Sancho, 2006; Warner *et al.*, 2008; Deltares 2014; DHI 2017c; 2017d; Umgiesser, 2017).

3.4.3 Processi di deposizione e risospensione del sedimento

Questo Manuale non è direttamente finalizzato alla stima del contributo al termine sorgente di fenomeni non direttamente correlabili alle attività di movimentazione dei sedimenti marini. Tuttavia, si segnala l'importanza dei processi di sedimentazione (intesi come sottrazione sedimentaria) e della successiva risospensione del sedimento movimentato (intesi come alimentazione sedimentaria) a causa dell'agitazione idrodinamica (onde e correnti). Tali processi, infatti, possono influire notevolmente sull'entità dei termini sorgente e quindi sulla modellazione del trasporto dei sedimenti. Pertanto, anche se alcuni modelli matematici non ne includono esplicitamente la riproduzione, la loro conoscenza è basilare perché può incidere sulla scelta della tipologia e delle modalità di implementazione dei modelli.

È prassi distinguere tra sedimenti²² di tipo non-coesivo (es. sabbiosi) e di tipo coesivo, ossia caratterizzati da una coesione di tipo fisico-chimico tra le particelle di sedimento principalmente fine (es. argilla). Tuttavia, la classificazione dei sedimenti in coesi e non coesi è generalmente effettuata sulla base del grado di complessivo consolidamento al fondo e non sulla composizione delle singole particelle. Infatti, è il grado complessivo di consolidamento al fondo che si riflette direttamente sul

²² I limiti delle classi granulometriche (es. argilla, limo, sabbia, ...) sono comunemente definiti dalle scale dell'*International Organization for Standardization* (ISO) di riferimento per indagini geotecniche (es. ISO 14688).

trasporto sedimentario in seguito alla risospensione causata dalle condizioni ambientali e antropiche locali (Mehta & McAnally, 2008).

Ai fini del presente Manuale è importante considerare il comportamento dei sedimenti coesivi come rilevante ai fini della valutazione dei possibili impatti ambientali conseguenti alle operazioni di movimentazione. I sedimenti coesivi, infatti, essendo caratterizzati da ridotte velocità di sedimentazione e da una maggiore suscettibilità alla risospensione del sedimento rideposto al fondo, sono trasportati per periodi e distanze maggiori. Inoltre, causano una maggiore attenuazione della luce e sono veicolo di trasporto di contaminanti adsorbiti sulla superficie. Nel seguito sono esplicitate le problematiche e descritti gli strumenti tecnici per l'analisi e la modellazione dei processi di deposizione e di risospensione.

- *Deposizione e flocculazione*

Sono disponibili molte formulazioni in letteratura recentemente sviluppate per la stima della velocità di deposizione di sedimenti (es. Özer, 1994; Ahrens & John, 2000; Ranieri, 2002; Jiménez *et al.*, 2003; Ferguson & Church 2004; Je & Chang, 2004; Mehta & McAnally, 2008). Limitatamente alla deposizione dei sedimenti non coesivi, è possibile riferirsi alla formulazione proposta da Stokes, basata sull'assunzione che il flusso sia in regime viscoso (numero di Reynolds definito mediante il diametro delle particelle di valore basso, $Re_p \sim 1$) e che le particelle di sedimento siano approssimabili a sfere impermeabili e incompressibili:

$$w_s = \frac{(\rho_p - \rho_w)gd^2}{18\mu} \quad (3-29)$$

dove ρ_p e ρ_w rappresentano rispettivamente la densità dei granuli di sedimento e dell'acqua, g l'accelerazione di gravità, d il diametro medio delle particelle e μ il coefficiente di viscosità dinamica. In generale, le formulazioni di tipo Stokesiane sono valide per sedimenti non-coesivi, ma tendono a sottostimare la deposizione (e di conseguenza a sovrastimare i SSC) quando tale ipotesi non è rispettata. Pertanto, è necessario ricorrere a formulazioni che tengano conto della presenza di sedimento coesivo, che può generare flocculi per l'attrazione tra particelle che ne causa l'aggregazione (es. Milburn & Krishnappan, 2003; Je *et al.*, 2007; Winterwerp & van Kesteren, 2004).

Facendo riferimento all'eq. 3-28, la flocculazione influenza non solo il diametro delle particelle, ma anche la densità, in quanto, a parità di diametro, un flocculo ha densità minore rispetto ad una particella di sedimento (Sun *et al.*, 2016).

Al fine di tenere in considerazione tali effetti ma anche per superare la limitazione derivante dall'assunzione di particelle molto piccole (o di bassa densità relativa) nella eq. 3-28, sono state sviluppate altre formulazioni. In particolare, Soulsby *et al.* (2013) propone formulazioni empiriche per la stima delle velocità di sedimentazione rispettivamente dei macroflocculi (con diametro maggiore di 160 μ m, individuati con pedice M nell'eq. 3-29) e dei microfloculi (con diametro minore di 160 μ m, individuati con pedice μ nell'eq. 3-30):

$$w_{sM} = B_M(\bar{s}_{e\mu} - 1)(\epsilon \bar{d}_\mu^4)^{0.166} g c^{2.672k} \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2} \exp\left[-\left(\frac{u_{*sM}}{u_* \epsilon^{1/2}}\right)^N\right] \quad (3-30)$$

$$w_{s\mu} = B_\mu(s - 1) \left(\frac{\epsilon d_\mu^4}{\nu}\right)^{0.39} g \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2} \exp\left[-\left(\frac{u_{*s\mu}}{u_* \epsilon^{1/2}}\right)^n\right] \quad (3-31)$$

dove B_M , k , u_{*sM} , N , B_μ , $u_{*s\mu}$ e n sono coefficienti ottimizzabili, d_I e d_μ sono il diametro medio il diametro medio dei granuli di sedimento e dei microfloculi rispettivamente, $\epsilon = I - z/h$ con z coordinata verticale rispetto alla posizione del fondo e h altezza della colonna d'acqua, u_* è la velocità di attrito, ν è la viscosità cinematica, c è il rapporto tra la massa del sedimento in sospensione e la densità dell'acqua, $s = \rho_s/\rho$ è il rapporto tra la densità dei granuli di sedimento e la densità dell'acqua e infine $\bar{s}_{e\mu} = \rho_{e\mu}/\rho$ è la densità media effettiva dei microfloculi con $s_{e\mu} = \rho_{e\mu}/\rho$ con $\rho_{e\mu}$ densità effettiva del microfloculo.

Definita la velocità di sedimentazione, i tassi di deposizione del sedimento non coesivo (eq. 3-31) e non coesivo (eq. 3-32) sono dati dalle seguenti:

$$D = w_s C \quad (3-32)$$

$$D = w_s C \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_c}\right) \quad (3-33)$$

con C concentrazione del sedimento al fondo, τ_b sforzo di attrito al fondo e τ_c sforzo di attrito critico per la deposizione.

Si osserva che la relazione (3-32) ha l'intento di tener conto del fenomeno della risospensione anche nel processo di sedimentazione. Infatti, nel caso di assenza di agitazione idrodinamica ($\tau_b = 0$), la deposizione coincide, almeno formalmente (poiché la velocità di sedimentazione è in generale diversa), con quella relativa a sedimento non coesivo. Pertanto, si osserva che è necessario tener conto non soltanto degli effetti direttamente correlati alla movimentazione del sedimento, ma anche alla risospensione indotta dal campo idrodinamico riconducibile alla presenza di onde e correnti.

- **Risospensione (o erosione) al fondo**

La risospensione dovuta alla potenziale erodibilità dei sedimenti che costituiscono il fondo è un problema studiato da lungo tempo, che ancora oggi riceve particolare attenzione (es. Valipour *et al.*, 2017; Gabel *et al.*, 2017; Moriarty *et al.*, 2017). È di notevole importanza sottolineare le differenze intrinseche nel processo di risospensione in funzione delle caratteristiche del sedimento, in particolare in funzione delle caratteristiche di coesività dell'ammasso.

Infatti, per i sedimenti non-coesivi i principali fattori che influenzano la risospensione sono la dimensione e la densità delle particelle. Per contro, i sedimenti coesivi (di granulometria particolarmente fine) a seconda della composizione e dei livelli di coesione possono essere schematizzati da due diverse tipologie. Da una parte, esistono i sedimenti coesivi che tendono ad aggregarsi in flocculi in seguito alla risospensione e a non formare una miscela fluida che fluisce in prossimità del fondo. In questo caso la densità della massa dei sedimenti (o la porosità delle particelle delle diverse classi di sedimento) diventa un fattore più importante della dimensione delle particelle. Dall'altra parte, esistono sedimenti la cui la risospensione si verifica come una miscela fangosa, e l'interfaccia acqua-sedimento non è definibile con esattezza (si veda ad es. Winterwerp & van Kasteren 2004).

I sedimenti coesivi e non-coesivi, inoltre, sono caratterizzati generalmente da diversi processi di consolidamento. I sedimenti non-coesivi tendono a consolidare più rapidamente e a formare uno strato di fondo caratterizzato da erodibilità costante alle medesime profondità. I sedimenti coesivi, al contrario, tendono a consolidare molto più lentamente (a causa della difficoltà di drenaggio) e a formare strati di fondo coesi caratterizzati da erodibilità variabile nel tempo e nello spazio con la profondità. Ciò può portare a differenti livelli di risospensione anche per l'azione di un medesimo valore della tensione tangenziale al fondo su sedimenti caratterizzati dalla medesima composizione. Ad esempio, anche in condizioni di sforzo di taglio costante il rateo di risospensione può diminuire nel tempo al diminuire dell'erodibilità con la profondità (es. l'erodibilità dello strato di fondo derivante dalla deposizione del sedimento precedentemente messo in sospensione diminuisce con la compattazione), ma la risospensione tende a rimanere costante se l'erodibilità non cambia con la profondità (es. successivamente alla ricompattazione del fondo in seguito ad una deformazione).

La risospensione dei sedimenti coesivi è per lo più studiata nel caso di correnti unidirezionali o lentamente variabili (ad esempio di marea), anche se l'azione delle onde superficiali (o l'azione combinata di onde e correnti) riveste talvolta un ruolo importante nello studio del processo fisico in acque poco profonde. In particolare, la fluttuazione dei valori di pressione indotta dal passaggio delle onde può indebolire e fluidificare il sedimento al fondo (Mehta, 1996). Ciò implica che non esiste un modo generale per parametrizzare gli effetti della risospensione. Per il fango fluido, la risospensione può essere modellata trattando il flusso delle particelle di sedimento in prossimità del fondo come un fluido a diversa densità (es. Winterwerp & van Kasteren, 2004), ma ciò richiede una risoluzione verticale alta in prossimità del fondo per tenere conto della stratificazione.

In sintesi, è spesso necessario includere l'azione delle onde nei modelli di risospensione; tuttavia si osserva che la difficoltà di questo approccio risiede nel fatto che i parametri dipendono non solo dalle caratteristiche del sedimento, ma anche dalle condizioni d'onda. Un altro approccio è quello di correlare l'altezza delle onde (o una sua misura statistica) con il tasso di risospensione (es. Lambrechts *et al.*, 2010), ma questo approccio risulta poco generalizzabile perché tipicamente ottenuto a partire da un numero limitato di dati di laboratorio.

Ovviamente l'erodibilità può variare molto anche in relazioni ad altri fattori fisico-chimici e biologici, come, la composizione mineralogica, la presenza ed il pH dell'acqua interstiziale, la composizione

ionica, la quantità e la tipologia di materia organica nei diversi tipi di sedimento (es. Winterwerp & van Kasteren, 2004). Infine, anche l'attività biologica può stabilizzare/destabilizzare i diversi tipi di sedimento e causare una grande variabilità temporale e spaziale dell'erosività (es. Grabowski *et al.*, 2011), ad esempio per la creazione di bio-film dei processi di bioturbazione.

Da un punto di vista pratico, le formulazioni di letteratura finalizzate alla stima del tasso di risospensione (cioè alla stima del termine sorgente) fanno agio sul confronto tra la tensione tangenziale (sul fondo) dovuta all'agitazione idrodinamica riconducibili alla presenza di onde e correnti e un valore critico della tensione tangenziale oltre il quale il sedimento viene risospeso. Mentre il primo valore (la tensione esercitata dal flusso) può essere definita sulla base di argomentazioni squisitamente idrauliche, il secondo (la tensione critica) richiede la modellazione delle caratteristiche geotecniche del sedimento che costituisce il fondale che, come già sottolineato, può variare nel tempo a causa dei processi di drenaggio nel caso di sedimenti coesivi. In altre parole, la difficoltà nel disporre di una relazione tra la tensione critica e il tasso di risospensione mostra l'importanza di disporre di dati campo (es. Valipour *et al.*, 2017). Infatti, rispetto al passato, la stima di una relazione tra la tensione tangenziale al fondo e il rateo di risospensione mediante l'utilizzo di dati di campo è diventata più agevole grazie ai recenti progressi tecnologici degli strumenti commercialmente disponibili.

Alla luce di quanto esposto, senza pretesa di completezza, ma con l'intento di conservare il tenore applicativo del presente Manuale, si riportano nel seguito alcune formulazioni che possono essere applicati nella pratica.

La risospensione causata dall'erosività dei sedimenti coesi al fondo può essere espressa in funzione della tensione tangenziale esercitata dalla corrente (τ_b) e un valore critico oltre il quale è possibile la risospensione (τ_c , Gularte *et al.*, 1980; Parchure & Mehta, 1985):

$$E = (E_0 \tau_b / \tau_c - 1)^n \quad (3-34)$$

$$E = M(\tau_b - \tau_c)^n \quad (3-35)$$

dove: E è il rateo di risospensione, τ_b è tensione esercitata dal flusso sui sedimenti, τ_d è un valore critico di tensione al fondo oltre il quale si verifica la risospensione, E_0 , M, n, sono parametri numerici.

Da un punto concettuale, le formulazioni (3-33) e (3-34) sono del tutto simili alla storica formulazione basata sulla definizione del numero di Shields, che confronta le azioni destabilizzanti (la tensione esercitata sul fondo dal flusso) con quelle stabilizzanti (sostanzialmente il peso proprio dei sedimenti). L'applicabilità delle relazioni (3-33) e (3-34), tuttavia, è possibile soltanto se è possibile il calcolo della tensione esercitata dal flusso sui sedimenti (τ_b) e se è possibile la definizione del valore critico (τ_d) oltre il quale si verifica la risospensione.

Per quanto riguarda il primo aspetto, cioè la stima di τ_b è possibile utilizzare una serie di strumenti di onere via via crescente, partendo da formulazioni empiriche arrivando ai risultati di modelli numerici di dettaglio (il cui utilizzo è in generale non applicabile ai casi in esame). In estrema sintesi, la tensione τ_b può essere stimata in funzione delle caratteristiche sintetiche del moto ondoso e delle correnti (indotte dal moto ondoso, dalle maree, ambientali, ecc.). A solo titolo di esempio, è possibile considerare l'effetto combinato di onde e correnti nel caso di sedimenti non coesivi (es. Glosch *et al.*, 2001):

$$\tau_b = \frac{1}{8} \left[\log \left(12 \frac{d}{\gamma_c} \right) / \log \left(12 \frac{d}{3d_{90}} \right) \right]^2 \rho f_c V^2 + \frac{0.8}{4D} \rho f_w u^2 \quad (3-36)$$

nella quale d è la profondità, γ_c è il coefficiente di scabrezza del fondo (secondo Nikuradse, in m), d_{90} è il diametro passante al 90% del sedimento non coesivo, f_c è il coefficiente di resistenza relativo alla corrente, D ($=d_{50}(\Delta g/v^2)^{1/3}$) è un coefficiente adimensionale, f_w è il coefficiente di resistenza relativo all'azione delle onde, u è la velocità orbitale al fondo indotta dalle onde.

Con lo stesso spirito, il valore critico della tensione tangenziale è spesso valutato su base empirica. A titolo di esempio, per sedimenti coesivi, è possibile scrivere (es. Mitchener & Torfs, 1996):

$$\tau_d = 0.015(\rho_s - 1000)^{0.73} \quad (3-37)$$

nella quale ρ_s è la densità apparente dell'ammasso sedimentario.

A causa della difficoltà nello stimare il tasso di risospensione e di disporre di una relazione tra stress critico di risospensione e la risospensione la possibilità di disporre di dati campo è un'opzione importante. Rispetto al passato, la stima di una relazione tra lo *stress* al fondo e il rateo di risospensione mediante dati di campo è diventata più agevole grazie ai recenti progressi tecnologici degli strumenti commercialmente disponibili (Sun *et al.*, 2016).

3.5. Cenni sull'impiego dei modelli negli studi di morfodinamica

La previsione degli effetti sulla morfodinamica in seguito ad operazioni di movimentazione dei sedimenti rende necessario il ricorso ad approcci modellistici, spesso diversi, in funzione delle finalità (interventi di difesa del litorale, approfondimento di bacini portuali, ricostruzione morfologiche in aree di transizione, ecc.) e degli ambiti di intervento (aree costiere, bacini semichiusi e aree al largo).

La modellazione degli effetti che possono verificarsi sulla morfodinamica per le diverse alternative di progetto (quali le variazioni indotte sul trasporto solido litoraneo e sulla morfologia del fondale, le variazioni indotte dalla modificazioni della batimetria sull'idrodinamica locale a diverse distanze dal sito d'intervento, ecc.) richiede generalmente l'utilizzo combinato di modelli (3D, Q3D, 2DH, 1D a una linea, ibridi 2DH/1D) caratterizzati da diversi limiti spaziali e temporali (es. Hanson & Kraus, 1989; Stive *et al.*, 2002; Moksness *et al.*, 2009) in relazione alla tipologia di effetti attesi (di breve e lungo periodo, Figura 3.11).

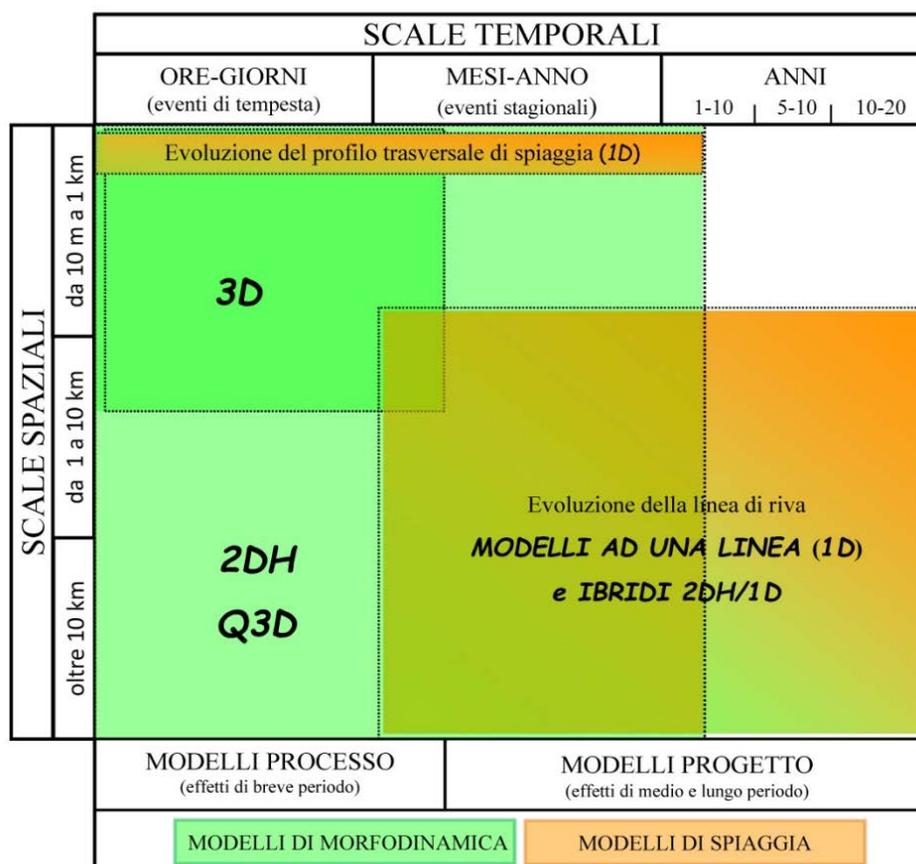


Figura 3.11 - Schematizzazione della diversa tipologia dei modelli di trasporto utilizzabili in relazione al variare delle scale spaziali e temporali. Da Hanson & Kraus (1989) modificato.

Per completezza di trattazione, si sottolinea che anche l'impiego di modelli 2DH e Q3D può essere esteso a scale temporali dell'ordine degli anni. I risultati ottenuti mediante tale pratica, che prevede simulazioni basate sull'accelerazione artificiale dei processi fisici o l'estrapolazione dei risultati di un periodo limitato di simulazione, risultano tuttavia soggetti ad un elevato grado di incertezza e possono essere utilizzati solo per valutazioni speditive, che consentono di ottenere stime qualitative, nell'ambito dell'implementazione della fase modellistica (o di analisi) preliminare.

Nel caso di aree costiere, la buona pratica prevede la necessità di riferire gli studi alla scala dell'Unità Fisiografica²³ (Lisi *et al.*, 2010) con approfondimenti di dettaglio alla scala delle Unità Gestionali²⁴ costiere (MATTM-REGIONI, 2017).

A tal proposito si specifica che le aree di transizione confinate (es. stagni costieri e lagune), se non particolarmente estese, sono assimilabili a bacini-semichiusi. Nel caso di bacini semi-chiusi, infatti, si considerano domini computazionali di estensione pari all'intero bacino.

Nel caso di applicazioni modellistiche in aree al largo, invece, la modellazione morfodinamica è necessaria solo in casi particolari, come ad esempio lo studio delle interazioni con infrastrutture *offshore*, delle variazioni dei tassi di deposizione e della morfologia del fondo nei pressi di aree sottoposte a vincoli (cfr. glossario della terminologia).

3.5.1 Modelli negli studi di morfodinamica costiera

La previsione degli effetti di lungo periodo sulla morfodinamica di spiaggia nella pianificazione di interventi che prevedono la movimentazione di sedimenti o che, più in generale, ne modificano i processi di trasporto solido in ambito costiero, è importante al fine di valutarne l'entità dei cambiamenti indotti sulla dinamica costiera e degli effetti, ad essi correlati, sugli ecosistemi marino-costieri.

Sebbene una trattazione dettagliata della modellazione della dinamica litoranea esuli dallo scopo del presente Manuale, considerata la rilevanza del tema ai fini gestionali, si riportano di seguito le principali relazioni esistenti tra i modelli (circolazione, onda e trasporto) ed i dati necessari per lo studio dei processi fisici, caratterizzati da diverse scale spaziali e temporali, che influiscono sulla morfodinamica di spiaggia (Figura 3.12).

Di seguito si riportano i tratti salienti delle fasi principali in cui generalmente è articolato uno studio modellistico per l'analisi della morfodinamica costiera (Mangor *et al.*, 2017).

1. Caratterizzazione delle condizioni meteo marine

Partendo dai dati meteo-marini al largo (siano essi registrati o ricavati da database di ricostruzione storica – *wind/wave hindcast*, cfr. 5.2.1.2) è necessario procedere alla propagazione del moto ondoso, da largo verso costa. Generalmente ciò è possibile attraverso una modellistica bidimensionale che tenga conto delle trasformazioni subite dall'onda quando si propaga verso costa (*shoaling*, diffrazione e rifrazione), degli effetti del frangimento, del *white capping*, dell'attrito con il fondo ed eventualmente del vento locale che contribuisce a modificare (anche significativamente) lo spettro di energia del moto ondoso tra il largo e la costa e del campo di corrente che potrebbe indurre modificazioni del campo d'onda.

Il modello di propagazione largo-riva può essere impiegato per la propagazione di una serie sintetica di eventi rappresentativi del clima meteo-marino locale o dell'intera serie temporale di dati d'onda al largo, in modo da garantire un'accurata ricostruzione del clima meteo-marino in diversi punti sottocosta.

²³ Per le finalità modellistiche del presente Manuale si definisce Unità Fisiografica "l'area naturalmente identificabile sulla linea di costa, nella quale esistono dei rapporti funzionali tra le diverse caratteristiche fisiche attraverso cui avvengono scambi di materia e di energia. Più comunemente si identifica un'unità fisiografica come un tratto di costa, che sottende uno o più corsi d'acqua, nel quale i movimenti di sedimento sono confinati all'interno dell'unità stessa e, conseguentemente, gli scambi di sedimenti tra unità fisiografiche adiacenti sono da considerarsi nulli" (Lisi *et al.*, 2010).

²⁴ Tratto di costa, caratterizzato da un bilancio sedimentario proprio anche per eventi con "tempi di ritorno brevi", che rappresenta l'unità territoriale di riferimento minima per l'analisi della dinamica sedimentaria litoranea (MATTM-REGIONI, 2017). I limiti delle Unità Gestionali possono essere costituiti, oltre che da opere marittime interferenti di medie dimensioni o da elementi morfologici naturali, anche da punti singolari di trasporto solido che risultino accertati e fissi (punti di convergenza, punti di divergenza, punti di perdita dei sedimenti come fosse e canyon sommersi).

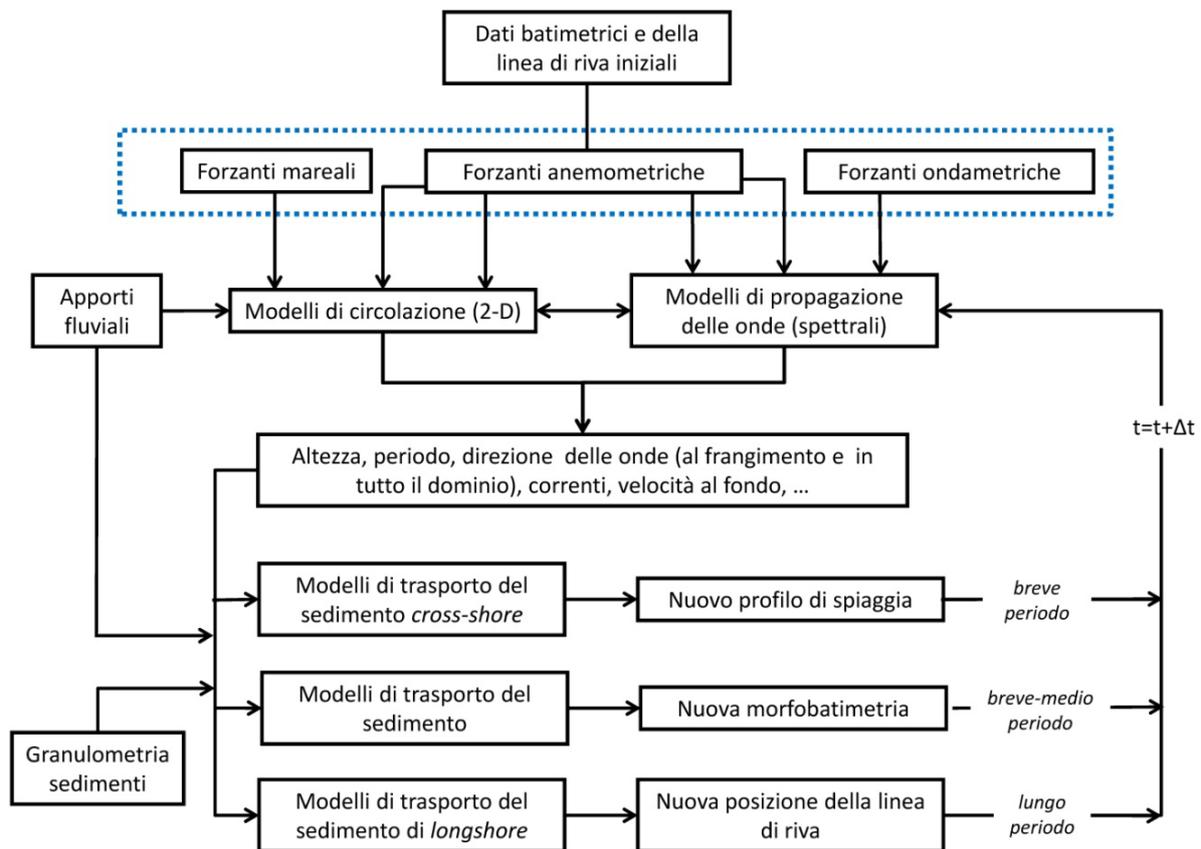


Figura 3.12 - Schematizzazione della modalità di approccio per l'implementazione dei modelli per lo studio dei processi fisici che incidono sulla dinamica di spiaggia, con evidenziati le forzanti ed i risultati ottenibili a diverse scale spaziali e temporali.

2. Modellazione bidimensionale di dettaglio

A valle della propagazione del moto ondoso sottocosta e delle analisi di base sul trasporto litoraneo, per poter comparare l'efficacia di diverse possibili soluzioni progettuali nella difesa dai processi erosivi (es. pennelli trasversali, scogliere sommerse o emerse) ed ottimizzarne la forma e/o la localizzazione è necessario predisporre una modellazione bidimensionale di dettaglio, con una combinazione di modelli di propagazione del moto ondoso, idrodinamici e di trasporto sedimentario che sono in grado di fornire la distribuzione della capacità di trasporto nel dominio di calcolo in termini di trasporto combinato della componente longitudinale (*long-shore*) e trasversale (*cross-shore*).

Se dinamicamente accoppiato al modello d'onda ed al modello idrodinamico, il modello di trasporto sedimentario bidimensionale è in grado di fornire la variazione della batimetria nel breve termine (simulazioni a fondo mobile, generalmente a scala di mareggiata) e quindi disporre di dati alla base della valutazione degli effetti sugli ecosistemi marino-costieri ad essi correlati.

3. Modellazione dell'evoluzione a lungo termine della linea di riva

Unitamente ai modelli bidimensionali di dettaglio descritti fino ad ora, in grado di fornire informazioni sugli effetti locali delle strutture costiere, può risultare utile l'applicazione di modelli più semplificati, che permettano, con tempi di calcolo ragionevoli, la simulazione dell'evoluzione della linea di riva a lungo termine.

Modelli del tipo ad una linea possono essere impiegati per simulare l'evoluzione della linea di riva nelle condizioni di stato di fatto e a seguito delle ipotesi di realizzazione di strutture atte alla difesa del litorale. La valutazione dell'evoluzione della linea di riva mediante modellazione 1D è tuttavia possibile solo in caso di tratti di costa aperta e uniforme. In caso di strutture in grado di indurre una circolazione (e conseguente capacità di trasporto) complessa e/o in tratti di costa caratterizzati da batimetrie irregolari, l'impiego di un modello ibrido 1D/2DH è senz'altro da preferire, a fronte di un aumento del costo computazionale. I modelli ibridi, mantenendo le assunzioni tipiche dei modelli ad

una linea (traslazione rigida del profilo trasversale, evoluzione della linea di riva funzione del solo gradiente di trasporto longitudinale) sono in grado di considerare la distribuzione dell'onda, delle correnti e del trasporto in 2D.

3.6. Cenni sulla modellazione dei contaminanti

Sebbene una trattazione dettagliata della modellazione della contaminazione eventualmente presente in colonna d'acqua o nella matrice sedimento esuli dallo scopo del presente Manuale, si ritiene tuttavia opportuno riportare di seguito alcune considerazioni sul tema. Esse non rappresentano linee di indirizzo per la modellazione, ma soltanto considerazioni qualitative sugli aspetti legati alla contaminazione.

Indipendentemente dalla tipologia di contaminante considerato (metalli pesanti, composti organici aromatici, altro) va tenuto conto che per un'accurata modellazione della movimentazione del contaminante in ambiente marino devono essere utilizzati strumenti sofisticati in grado di tenere in conto, oltre alle variabili già ampiamente trattate nel Manuale relativamente a:

- moto ondoso;
- idrodinamica (correnti e livelli marini);
- trasporto di sedimenti (processi di avvezione-dispersione, sedimentazione, risospensione, ecc.);

anche altre variabili quali, ad esempio:

- le proprietà chimico fisiche del contaminante;
- la concentrazione del contaminante in colonna d'acqua;
- la concentrazione del contaminante eventualmente adsorbito sul particolato presente in colonna d'acqua;
- la concentrazione del contaminante nel sedimento costituente il fondale;
- la concentrazione del contaminante nell'acqua interstiziale del sedimento costituente il fondale.

Le dinamiche di trasferimento del contaminante tra la matrice sedimento e la matrice acqua (desorbimento) e viceversa (adsorbimento), al pari dei processi di trasformazione del contaminante (degradazione, reazioni chimiche, decadimento) possono variare significativamente in funzione del tipo di contaminante considerato e, pertanto, lo strumento modellistico deve essere in grado di considerare le specificità del singolo contaminante.

Con riferimento alla tipologia di contaminanti dei metalli pesanti, la Figura 3.13 schematizza, in modo molto generico, i processi di trasferimento della contaminazione tra matrice acqua e sedimento.

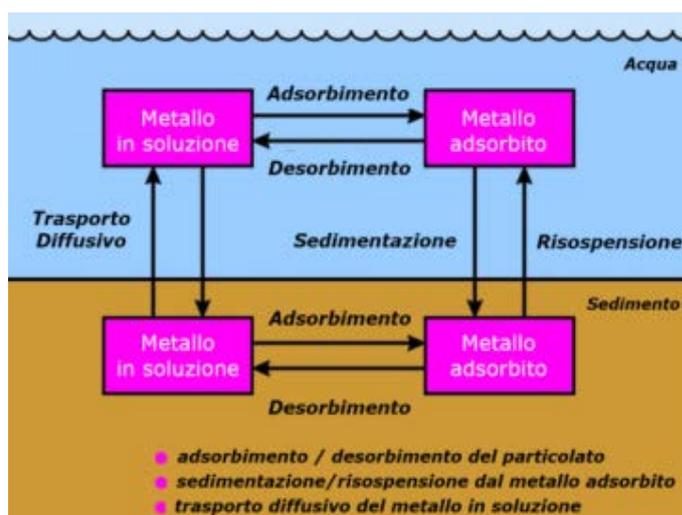


Figura 3.13 - Schema dei processi di trasferimento della contaminazione tra matrice acqua e sedimento nel caso dei metalli pesanti

PARTE II - GUIDA ALL'APPLICAZIONE

4. INDICAZIONI PER L'APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO MODELLISTICO INTEGRATO

4.1. Considerazioni generali

Questo capitolo fornisce indicazioni sulle modalità di implementazione dell'Approccio Modellistico Integrato (AMI) per supportare i processi decisionali in relazione alle finalità degli interventi e alle peculiarità fisiche ed ambientali delle aree interessate. Ciò nasce dalla necessità di rispondere alla crescente attenzione che le politiche di gestione pongono sugli aspetti ambientali (normative internazionali e nazionali, coinvolgimento degli *stakeholder*, ecc.) e di agevolare ed uniformare le procedure di implementazione e verifica delle valutazioni degli effetti ambientali durante le diverse fasi di progettazione e gestione di interventi.

L'AMI è costituito da quattro moduli concettuali (Figura 4.1). Il Modulo di Idrodinamica e il Modulo per il Termine Sorgente, insieme, forniscono le informazioni necessarie al Modulo di Trasporto per lo studio dei processi di dispersione, diffusione e deposizione dei sedimenti messi in sospensione. Ognuno dei moduli è costituito dai modelli numerici illustrati nel capitolo 3. Segue il Modulo di Analisi e Sintesi dei Risultati per la valutazione della significatività degli effetti.

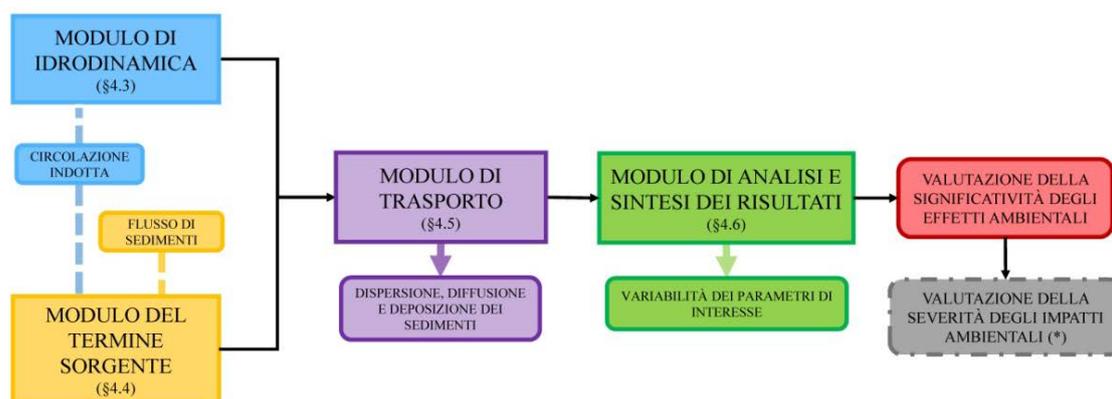


Figura 4.1: Schema concettuale dell'Approccio Modellistico Integrato (AMI). Il campo contrassegnato da (*) non è oggetto del presente Manuale.

Gli strumenti matematici utilizzati nell'ambito dei moduli concettuali (idrodinamica, termine sorgente e trasporto) possono avere livelli di dettaglio e di accuratezza diversi in funzione degli obiettivi degli studi.

Il livello di dettaglio degli studi modellistici (es. processi fisici considerati nella formulazione, risoluzione del dominio di calcolo, numero e durata degli scenari, ecc.) dovrà essere adeguato ed eventualmente rimodulato in funzione degli obiettivi da perseguire e alla tipologia degli effetti attesi e/o riscontrati nelle diverse fasi di progettazione e gestione degli interventi. A tal proposito è opportuno distinguere tra i potenziali effetti attesi e/o riscontrati nel breve periodo (durante la realizzazione di un intervento, quali alterazione della qualità dell'acqua e fenomeni di ricoprimento) e nel lungo periodo (ossia legati alla configurazione finale di progetto, quali modifiche della morfologia dei fondali, dell'idrodinamica e dei fenomeni di erosione e deposizione).

Con riferimento allo schema di Figura 4.2 (già introdotto nel cap. 3), si prevede una fase conoscitiva preliminare durante la quale viene identificata la necessità di procedere (o meno) con

l'implementazione degli studi modellistici sulla base dell'analisi delle informazioni e dei dati (ambientali e progettuali) disponibili²⁵.

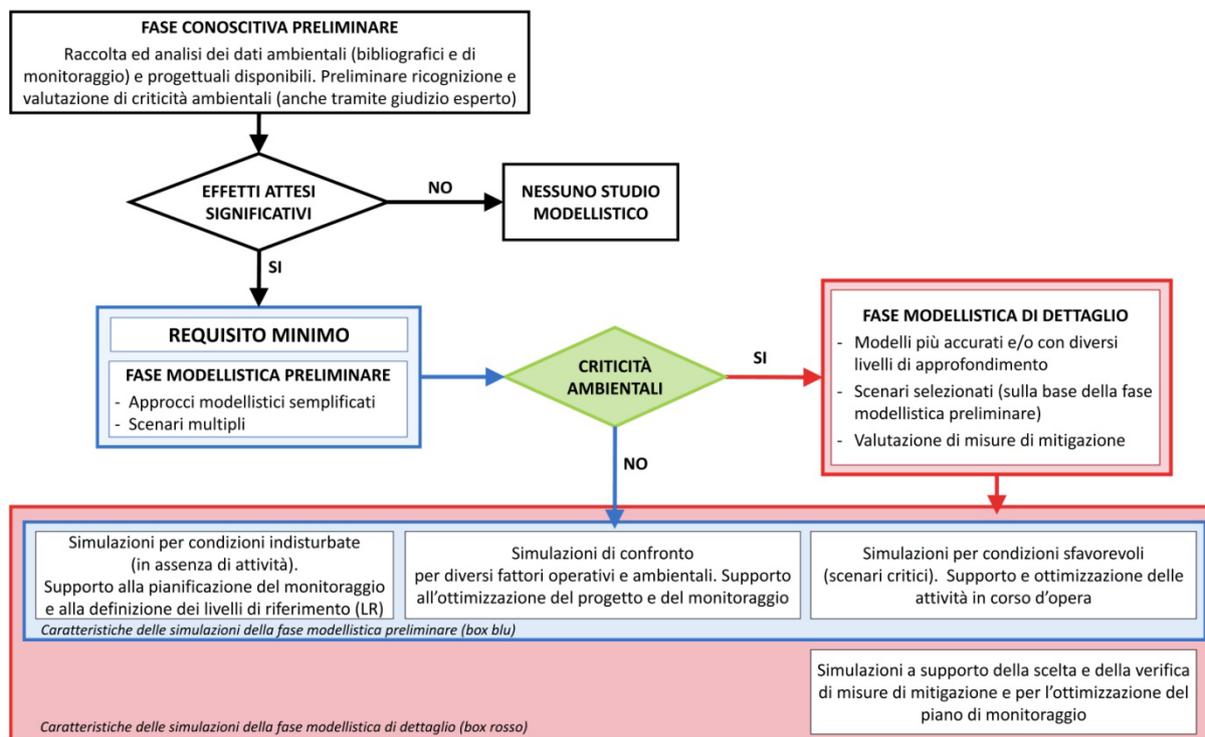


Figura 4.2: Schema del livello di dettaglio da utilizzare nell'implementazione dello studio modellistico in relazione alla presenza di criticità ambientali.

L'obiettivo della fase conoscitiva preliminare è quello di effettuare una preliminare ricognizione e valutazione delle criticità ambientali (cfr. Cap. 1, glossario della terminologia e degli acronimi) eventualmente presenti in prossimità dell'area di intervento e di evidenziare (anche attraverso giudizio esperto, opportunamente motivato) la possibilità che insorgano effetti ambientali significativi durante l'esecuzione degli interventi. Ulteriore obiettivo di tale fase è la verifica della disponibilità e dell'idoneità dei *set* di dati per implementare, calibrare e validare i modelli matematici e dell'eventuale necessità di pianificare nuove misure per aggiornare (o ampliare) i *set* di dati disponibili.

Nel caso in cui la fase conoscitiva denoti la necessità di procedere con studi modellistici si distinguono due fasi modellistiche contraddistinte da livelli di dettaglio e accuratezza crescente nelle diverse fasi progettuali, in relazione ai potenziali effetti attesi. In particolare, si prevedono una fase modellistica preliminare (nella fase di progettazione iniziale) e una fase modellistica di dettaglio (nelle fasi di progettazione più avanzate).

La fase modellistica preliminare, che prevede l'implementazione di scenari multipli mediante l'uso di modelli semplificati (a ridotto onere computazionale ed economico), costituisce il requisito minimo di uno studio modellistico. Essa è funzionale a fornire una panoramica generale dei possibili effetti attesi e a quantificarne l'entità in maniera speditiva.

Qualora la fase modellistica preliminare confermi l'insorgere di criticità ambientali o evidenzi la necessità di approfondire ulteriormente, con maggiore accuratezza, specifiche condizioni (ambientali e progettuali) identificate come critiche (o ad alto rischio) in relazione ai potenziali effetti che

²⁵ È auspicabile che la congruità della scelta iniziale di procedere o meno con studi modellistici di supporto alla progettazione e gestione degli interventi, effettuata sulla base di preliminari osservazioni/criticità emerse durante la fase conoscitiva preliminare (previo giudizio esperto e applicazioni di approcci concettuali e/o semplificati) sia condivisa con le Autorità Competenti. In tal senso, prevedere una fase di condivisione dell'approccio che il Proponente intende adottare con le Autorità Competenti già durante la fase conoscitiva preliminare, potrebbe andare a beneficio dell'ottimizzazione dell'iter progettuale.

potrebbero scaturire sulla qualità dell'ambiente marino, è necessario procedere con l'implementazione di una fase modellistica di dettaglio.

Si sottolinea, inoltre, l'utilità della fase modellistica di dettaglio per simulare scenari utili alla pianificazione di misure di mitigazione (Figura 4.2), come ad esempio per supportare il posizionamento e la definizione del pescaggio delle barriere fisiche, nonché per l'implementazione scenari di rottura (*failure*).

Lo schema di Figura 4.3 evidenzia le principali interazioni tra i moduli concettuali dell'AMI appena descritti e l'importanza di disporre di idonei dataset di campo (linee blu nello schema) sia in fase di implementazione e calibrazione di ciascun modulo sia in fase di verifica (validazione) dell'affidabilità dei risultati numerici.

Un passo cruciale, oltre alla scelta degli strumenti matematici, è la definizione degli scenari da simulare. Tale selezione deve tener conto degli ambiti in cui avviene la movimentazione del sedimento (aree costiere, bacini semichiusi e aree al largo), al fine di impostare correttamente le forzanti e le condizioni al contorno (vento, onde, maree, batimetria, parametri idrologici, ecc.) che principalmente influenzano la circolazione a grande e piccola scala ed il trasporto del pennacchio dei sedimenti nel campo lontano.

Per pervenire a stime realistiche dei sedimenti messi in sospensione dalle operazioni di movimentazione è importante caratterizzare in maniera adeguata il termine sorgente in considerazione degli specifici fattori tecnico-operativi (tipo di draga, velocità, durata e produttività del ciclo di dragaggio, andamento e durata delle operazioni di movimentazione, ecc.) e ambientali (profondità dell'acqua, correnti, tipologia del sedimento, ecc.) del sito d'intervento.

Per la corretta riproduzione dei fenomeni di trasporto a diverse distanze dal sito di intervento, inoltre, occorre che in fase di implementazione dei modelli di trasporto si differenzi tra le sorgenti di rilascio/risospensione imputabili alle operazioni di movimentazione ed altre eventuali sorgenti naturali e antropiche (es. eventi estremi, apporti fluviali, scarichi a mare, traffico di imbarcazioni, ecc.).

Infine, si sottolinea l'importanza della metodologia di analisi e sintesi dei risultati, per valutare la significatività delle alterazioni dei parametri ambientali d'interesse indotte dalle operazioni di movimentazione rispetto alle condizioni ambientali indisturbate (o 'disturbate' da fattori estranei ai lavori stessi). In particolare, nel caso in cui l'analisi preliminare indichi il verificarsi di criticità ambientali o la necessità di approfondire specifiche condizioni (ambientali e progettuali) con studi di dettaglio, si evidenzia l'importanza di produrre mappe che sintetizzino i risultati dell'andamento della concentrazione dei sedimenti sospesi (SSC) e dei tassi di deposizione al fondo (DEP), ottenuti per un periodo sufficientemente esteso e statisticamente significativo, non soltanto in termini di intensità ma anche di durata e probabilità (frequenza) di superamento di livelli di riferimento sito-specifici (es. Feola *et al.*, 2016), eventualmente stabiliti in relazione a livelli di tolleranza dei recettori sensibili presenti.

Si precisa, inoltre, che i risultati di SSC e DEP ottenuti dall'applicazione dell'AMI, potrebbero essere interpretati ed utilizzati anche nell'ambito di più complesse analisi di rischio ambientale²⁶ (Becker, 2011; Dupuits, 2012; Erfemeijer *et al.*, 2012; Manap & Voulvoulis, 2014), che esulano dalle finalità dirette del presente Manuale.

Nel seguito vengono fornite indicazioni generali per l'utilizzo dei modelli matematici per lo studio dei processi di trasporto associati alle differenti fasi operative della movimentazione di sedimenti (escavo, trasporto e sversamento) nei diversi ambiti d'intervento (aree costiere, bacini semichiusi e aree al largo).

Nelle sottosezioni, laddove necessario, sono fornite, inoltre, indicazioni differenziate per:

1. escavo, trasporto e sversamento in bacini semichiusi;
2. escavo, trasporto e sversamento in aree costiere (litoranee e di transizione);
3. escavo, trasporto e sversamento al largo (*offshore*).

²⁶ L'incertezza sulla risposta degli ecosistemi (o dei recettori sensibili) alle alterazioni indotte per la messa in sospensione del sedimento su SSC e DEP (e più in generale sui parametri di interesse), e la mancanza di dati in merito, ostacolano una trasposizione univoca della valutazione del rischio ambientale.

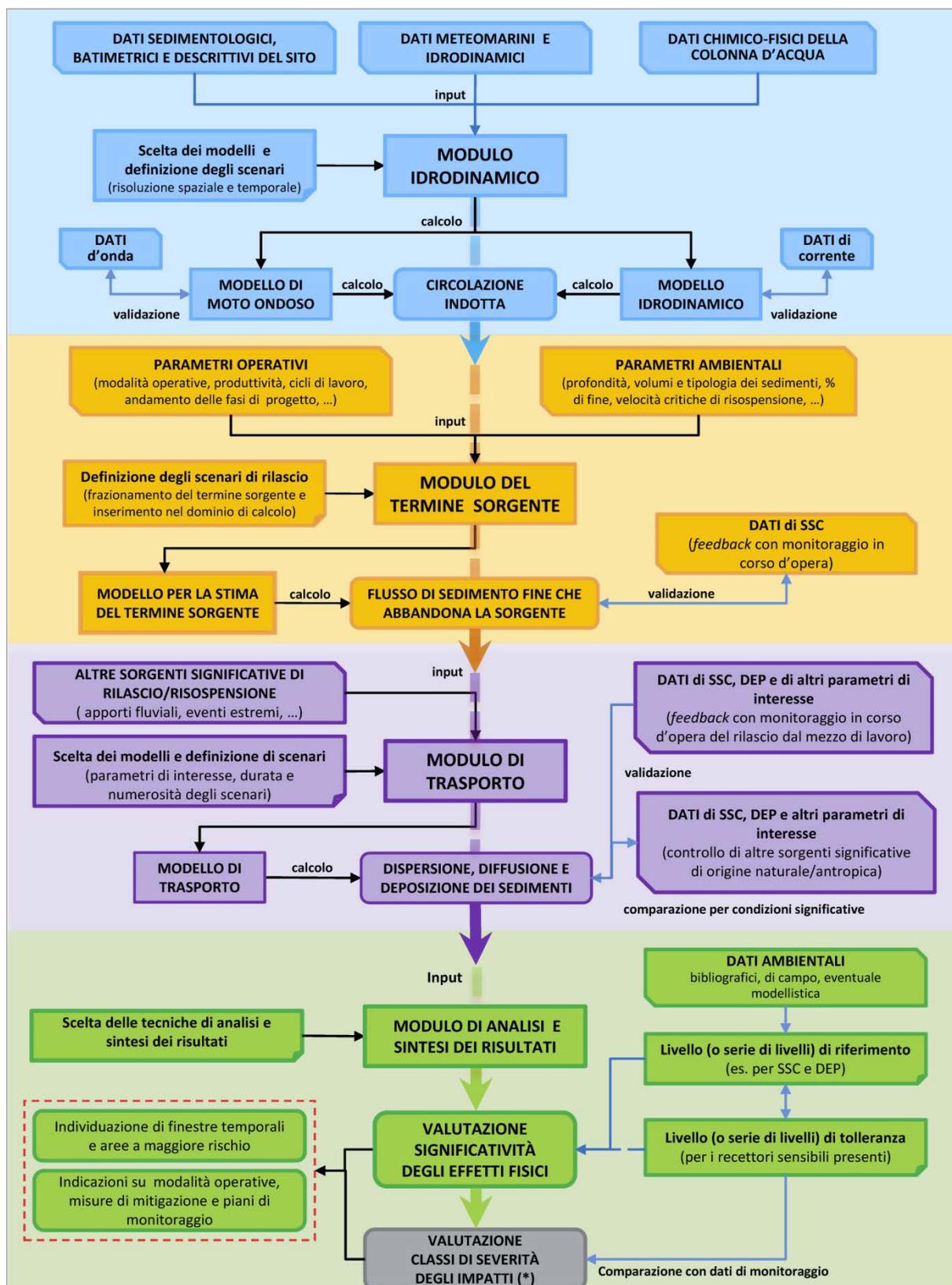


Figura 4.3 - Schema di dettaglio dell'Approccio Modellistico Integrato (AMI).

(*) Non oggetto del presente Manuale

4.2. Definizione degli scenari di modellazione

L'analisi e la definizione degli scenari, così come degli strumenti modellistici da adottare, riveste un ruolo fondamentale per il conseguimento degli obiettivi dello studio. A tal fine si deve innanzitutto stabilire quali fenomenologie fisiche sia strettamente necessario considerare per una realistica rappresentazione delle condizioni locali e quali possano essere ritenute secondarie.

Tali considerazioni derivano, in particolare, da aspetti legati a:

- caratteristiche locali (es. meteo-marine, morfobatimetriche e idrodinamiche) e distanza dalla costa;
- scale spazio-temporali (dipendenti sia dai fenomeni fisici che caratterizzano il sito, che dai parametri operativi e ambientali dell'intervento).

È necessario, inoltre, considerare che:

- la componente di dispersione e trasporto dei sedimenti legata al moto ondoso assume una rilevanza maggiore proporzionalmente alla vicinanza alla costa;
- la caratterizzazione della componente idrodinamica non deve mai prescindere dalla valutazione della circolazione generale di larga scala, salvo casi particolari (es. bacini semichiusi, aree di ripascimento), per i quali l'eventuale disconnessione tra circolazione al largo e circolazione di piccola scala deve comunque essere adeguatamente motivata.

In ogni caso, la selezione dei processi fisici ritenuti significativi nella definizione degli scenari deve essere sempre e comunque supportata da evidenze analitiche che ne giustificano la scelta. In generale, il livello di dettaglio fornito dai modelli matematici ne aumenta il grado di aderenza alla realtà, ma deve essere valutato caso per caso, anche in relazione all'identificazione di eventuali criticità ambientali nell'ambito delle fasi conoscitiva e modellistica preliminari, cercando il giusto bilanciamento tra la capacità del modello di essere aderente alla realtà e le risorse necessarie.

Nel seguito le metodologie di approccio per la definizione degli scenari di modellazione di possibile adozione nell'AMI sono raggruppate in quattro categorie generali.

Le categorie sono state definite in relazione ai vari obiettivi degli studi (approccio climatologico, approccio realistico a scenari, approccio realistico di lungo periodo e approccio in modalità previsionale-operativa, Tabella 4.1).

Tabella 4.1 - Schema di confronto delle principali caratteristiche degli approcci modellistici descritti

APPROCCIO MODELLISTICO	FINALITÀ DI UTILIZZO	CONDIZIONI E LIMITI DI APPLICABILITÀ	DATI NECESSARI
Climatologico	Scenari specifici rappresentativi di condizioni da analizzare in maniera più dettagliata, ad esempio: <ul style="list-style-type: none"> - condizioni statisticamente più ricorrenti; - condizioni stagionali; - condizioni estreme (es. mareggiate, intensi apporti fluviali); - condizioni climatiche non estreme, ma comunque sfavorevoli (ad esempio, forzanti che inducono correnti in uscita dalle imboccature portuali, o dirette verso recettori sensibili). 	Non riproduce fedelmente gli effetti dovuti all'interazione tra le forzanti, in quanto ognuna di esse è selezionata sulla base di caratteristiche statistiche e non della loro effettiva contemporaneità. Non permette la possibilità di calibrare/validare il modello con dati di campo. <p>Utilizzabile prevalentemente nella fase modellistica preliminare ed eventualmente nella fase di dettaglio per approfondimenti specifici</p>	Statistiche per: <ul style="list-style-type: none"> - forzanti atmosferiche; - forzanti idrodinamiche
Realistico a scenari	Scenari rappresentativi di: <ul style="list-style-type: none"> - condizioni statisticamente più ricorrenti; - condizioni stagionali; - condizioni estreme (es. mareggiate, intensi apporti fluviali); - condizioni climatiche non estreme, ma comunque sfavorevoli (ad esempio, forzanti che inducono correnti in uscita dalle imboccature portuali, o dirette verso ricettori sensibili). <p>Rispetto allo scenario climatologico permette una riproduzione più realistica dell'interazione tra le diverse forzanti fisiche, basata su dati reali. Inoltre, permette il riscontro dei risultati modellistici con i dati di campo.</p>	Non sempre è possibile reperire dati realistici corrispondenti a particolari situazioni di interesse (es. eventi estremi con particolari tempi di ritorno). <p>Indicato nella fase modellistica preliminare per valutazioni speditive d'insieme e nella modellazione di dettaglio per approfondimenti specifici</p>	Dati osservati o ricostruiti tramite database modellistici

Realistico di lungo periodo	Riproduce situazioni realistiche per lunghi periodi, così da rappresentare la variabilità intra-annuale, e, nel caso di simulazioni pluriennali, inter-annuale. Permette di riprodurre la completa variabilità fisica dei processi idrodinamici e di condurre una analisi dei risultati di carattere statistico, ad esempio - 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, fornendo utili informazioni sui periodi più o meno indicati nel corso dell'anno per le attività di dragaggio.	È necessario verificare che le forzanti corrispondenti al periodo scelto siano rappresentative della variabilità climatica del sito, sia in termini di condizioni medie che estreme. Indicato nell'ambito di studi di dettaglio.	Dati osservati o ricostruiti tramite database modellistici
Previsionale-operativo	Previsione in corso d'opera delle condizioni meteorologiche, idrodinamiche e di trasporto per intervenire tempestivamente in caso di condizioni ambientali ritenute particolarmente avverse in relazione alle modalità operative selezionate e stabilire se e quando adottare accorgimenti operativi al fine di evitare i rischi evidenziati nella fase di progettazione.	L'adozione di tale approccio richiede una adeguata pianificazione delle attività modellistiche in corso d'opera per rendere fruibili i risultati in tempi compatibili con lo svolgimento delle operazioni di movimentazione.	Dati previsionali da modelli di larga scala

4.2.1 Approccio climatologico

L'approccio climatologico, utilizzabile prevalentemente nella fase modellistica preliminare, è un approccio di tipo sintetico. Esso è basato su forzanti di carattere statistico che sintetizzano le condizioni rappresentative di un *dataset* (composto da dati osservati o ricostruiti) relativo ad uno specifico intervallo temporale. Per tale motivo, è adatto alla definizione di scenari rappresentativi di specifiche condizioni dello stato del mare, ad esempio quelle statisticamente più ricorrenti (scenario più frequente), quelle stagionali (scenari invernale, primaverile, estivo, autunnale) o quelle relative a condizioni estreme (es. mareggiate, intensi apporti fluviali).

Questo approccio, inoltre, è utile per analizzare (sia nella fase preliminare che in quella di dettaglio) specifiche condizioni per cui si prevedono particolari situazioni ambientali sfavorevoli (o scenari critici), anche se queste non sono corrispondenti ad eventi presenti nel *dataset* dei dati disponibili. Ad esempio il verificarsi di eventi estremi, o di condizioni non estreme, ma comunque sfavorevoli (es. forzanti che inducono correnti in uscita dalle imboccature portuali, o dirette verso ricettori sensibili).

È evidente che un approccio di questo genere non consente la riproduzione delle interazioni di tutti i fenomeni che concorrono alla dinamica. Ciò può essere particolarmente limitante per l'analisi degli effetti dovuti all'interazione tra le forzanti, in quanto ognuna di esse è selezionata sulla base di caratteristiche statistiche e non in relazione alla loro effettiva contemporaneità e sequenzialità durante l'evento. Non è possibile rappresentare o ricostruire eventi realistici con specifiche combinazioni di eventi atmosferici e condizioni idrodinamiche. In conseguenza di ciò, tale approccio non permette neanche la possibilità di calibrare/validare il modello con dati di campo.

Nell'adottare questo metodo occorre calcolare, sulla base di un'adeguata disponibilità di dati, valori statisticamente rappresentativi per:

- forzanti atmosferiche;
- dati idrodinamici al contorno aperto del dominio di calcolo del modello (in continuo);
- condizioni idrodinamiche iniziali sul dominio di calcolo del modello (*una tantum*, all'inizio di ciascuna finestra temporale simulata).

Il modello idrodinamico così implementato viene poi integrato per periodi di durata variabile, a seconda delle scale temporali tipiche del problema da investigare.

4.2.2 Approccio realistico a scenari

A differenza di quello climatologico, questo approccio si basa su dati osservati o ricostruiti tramite database modellistici. Esso permette quindi di riprodurre attraverso la modellazione matematica le condizioni meteo-marine di specifici periodi o eventi di interesse. Come per l'approccio climatologico, anche questa tipologia di scenari può essere utilizzata per approfondire lo studio di specifiche

situazioni in cui si prevedono particolari condizioni sfavorevoli o scenari critici (cfr. par. 4.2). Tuttavia, in questo caso è possibile una riproduzione più realistica dell'interazione tra le diverse forzanti fisiche, basata su dati reali. D'altra parte, non sempre è possibile reperire dati realistici corrispondenti a particolari situazioni di interesse (es. eventi estremi con particolari tempi di ritorno) ed è proprio in tali casi che si ricorre all'approccio climatologico.

In questo caso il modello recepisce in *input* i seguenti dati realistici, provenienti da osservazioni o da modelli, relativi a:

- forzanti atmosferiche;
- condizioni idrodinamiche al contorno aperto del dominio di calcolo (in continuo);
- condizioni iniziali idrodinamiche (*una tantum* all'inizio di ciascuna finestra temporale simulata).

Si evidenzia, infine, che nella scelta delle finestre temporali da simulare sono da privilegiare i periodi per i quali siano disponibili anche osservazioni utilizzabili per calibrare e validare il modello.

Questo approccio, volto ad approfondire solo specifiche condizioni considerate sfavorevoli, ossia che possono indurre situazioni di criticità (scenari critici), è indicato nella fase di modellistica preliminare.

4.2.3 Approccio realistico di lungo periodo

In questo approccio, indicato nell'ambito di studi modellistici di dettaglio, il modello viene integrato per lunghi periodi, così da rappresentare la variabilità intra-annuale e, nel caso di simulazioni pluriennali, inter-annuale. È opinione oramai condivisa a livello internazionale (SKM, 2013) che, almeno in termini generali, la modellistica applicativa preveda un approccio di tipo realistico. La migliore pratica consiglia simulazioni di durata non inferiore a un anno per una corretta comprensione della variabilità naturale del sistema. Ovviamente è necessario verificare che le forzanti corrispondenti al periodo scelto siano sufficientemente rappresentative della variabilità climatica del sito, sia in termini di condizioni medie che estreme.

Il grande vantaggio dell'adozione di tale approccio risiede nel fatto che permette di riprodurre la completa variabilità fisica dei processi idrodinamici e di condurre una analisi dei risultati di carattere statistico.

Attraverso l'implementazione di scenari multipli con modulo sorgente/di trasporto accoppiato all'idrodinamica risultante, è possibile, ad esempio, stabilire in termini statistici:

- la frequenza di superamento di determinati livelli di riferimento per le variabili di interesse (es. SSC);
- il tempo di superamento di determinati livelli di riferimento per le variabili di interesse;
- le intensità medie raggiunte dalle variabili su un periodo rappresentativo;
- l'evoluzione spazio-temporale delle variabili simulate, collegata alla variabilità delle correnti, fornendo quindi anche utili informazioni sui periodi più o meno indicati nel corso dell'anno per le attività di dragaggio.

4.2.4 Approccio in modalità previsionale-operativa

L'utilizzo di dati di *input* provenienti da modelli a larga scala utilizzati in modalità previsionale consente un approccio realistico operativo della modellistica, utile per ottimizzare l'intervento e per ridurre il rischio di potenziali impatti conseguenti alla movimentazione di sedimenti. Infatti, tale approccio consente di prevedere, sulla base degli studi modellistici preliminarmente eseguiti, quali siano le eventuali criticità a cui probabilmente si andrà incontro.

Più precisamente, i risultati ottenuti in modalità previsionale permettono di intervenire tempestivamente sulle modalità operative selezionate al fine di evitare i rischi associati alle condizioni ambientali ritenute avverse (es. adozione tempestiva di accorgimenti tecnico-operativi o interruzione delle operazioni di movimentazione) e di ottimizzare le attività di monitoraggio pianificate per il controllo degli effetti attesi (es. posizionamento e numerosità delle stazioni di monitoraggio).

Ad esempio, se il modello prevede condizioni critiche per le misure di mitigazione adottate, sarà possibile controllarne l'efficienza e lo stato di integrità preliminarmente all'accadimento dell'evento stesso (es. nel caso di posizionamento di panne antitorbidità sarà possibile verificarne tempestivamente la corretta installazione e la tenuta al fine di limitare il rischio di rotture).

È necessario sottolineare che l'adozione di tale approccio richiede un'adeguata pianificazione delle attività modellistiche in corso d'opera per rendere fruibili i risultati in tempi compatibili con lo svolgimento delle operazioni di movimentazione.

4.3. Modelli idrodinamici

L'utilizzo del modulo idrodinamico, primo elemento della catena modellistica, è funzionale alla valutazione dei parametri meteo-marini e idrodinamici (onde, livelli, correnti, ecc.) che influenzano i processi di trasporto e deposizione dei sedimenti movimentati. Tale influenza può essere molto differente in funzione delle tecniche di dragaggio e delle modalità operative.

Il dominio di calcolo deve includere le aree oggetto di eventuali criticità ambientali (PIANC, 2010) e coprire un'area sufficientemente estesa in modo da evitare effetti di bordo dovuti all'imposizione delle condizioni al contorno si verifichino anche a ridosso dell'area di intervento.

L'intero dominio deve essere discretizzato con una risoluzione adeguata per la riproduzione della complessità dei flussi di corrente e dei diversi processi fisici che riguardano le dinamiche del pennacchio di torbida (dispersione, diffusione e processi di sedimentazione) dal sito di movimentazione al campo lontano (Bridges *et al.*, 2008).

È auspicabile, inoltre, un'analisi di sensitività per valutare se la discretizzazione scelta per il dominio di calcolo sia adeguata a rappresentare i fenomeni in gioco.

Il dominio di calcolo deve anche includere eventuali apporti di portata fluida e solida (es. immissioni fluviali in bacini o aree litoranee, scarichi industriali all'interno di porti, ecc.) ritenuti significativi in relazione alle dinamiche di interesse.

In caso di corpi idrici stratificati è necessario considerare le variazioni tridimensionali del campo di moto e i loro effetti sui processi di trasporto del pennacchio di torbida, tramite l'utilizzo di modelli tridimensionali (es. Davies *et al.*, 2002; Bai *et al.*, 2003; Lumborg, 2005; De Marchis *et al.*, 2014; DHI, 2017c). In tali casi, l'intero dominio deve essere discretizzato, con una risoluzione adeguata, sia in termini planimetrici che lungo la direzione verticale²⁷ (Bridges *et al.*, 2008) e la modellazione deve includere il calcolo dei parametri di salinità e temperatura, opportunamente inseriti come condizioni al contorno e condizioni iniziali.

Nel seguito sono fornite indicazioni per la discretizzazione del dominio di calcolo e la definizione delle forzanti da considerare per i diversi ambiti di applicazione (aree costiere, bacini semi-chiusi, aree di largo).

4.3.1 Modellazione idrodinamica in aree costiere

Nelle aree costiere, comprensive di aree litoranee e di transizione, le forzanti che maggiormente incidono sulle dinamiche di circolazione (e conseguentemente sul trasporto del sedimento) sono:

- vento locale;
- moto ondoso;
- oscillazione di marea;
- eventuali apporti fluviali e scarichi significativi.

Tali aree sono caratterizzate da profondità limitate, generalmente non superiori a 15 metri²⁸.

In generale, nei casi in cui la dimensione verticale del dominio sia nettamente inferiore a quella orizzontale (ad esempio negli ambienti di transizione, quali aree lagunari e lacustri, caratterizzati da profondità dell'ordine del metro), l'utilizzo di modelli 2DH è particolarmente indicato (cfr. par.3.2.2). Tuttavia, è necessario porre attenzione ai casi in cui possono aversi sensibili variazioni dei profili di corrente lungo la verticale, quali ad esempio gli ambienti caratterizzati da importanti processi di stratificazione (es. foci fluviali con ingresso di acqua dolce in ambiente salato oppure aree in cui si ha una rilevante azione del vento sullo strato superficiale).

Nel caso di utilizzo di un modello d'onda disaccoppiato dal modello idrodinamico, qualora ci si trovi in ambiti di intervento caratterizzati dalla presenza di foci o da correnti di *rip*, è importante fornire in

²⁷ Si citano ad esempio i sistemi di discretizzazione verticale a strati basati sulle coordinate di tipo sigma (particolarmente adatti per seguire l'andamento della morfologia di fondo in acque poco profonde) e Z (particolarmente adatti per la zona più profonda o in mare aperto), utilizzabili anche in maniera combinata.

²⁸ Si specifica che per l'individuazione delle aree litoranee si deve fare riferimento alla profondità locale piuttosto che alla distanza dalla costa del sito. Infatti, in base alla pendenza locale del fondale due siti a pari distanza da costa potrebbero essere considerati appartenenti ad aree costiere o non costiere ed essere caratterizzati da forzanti idrodinamiche diverse.

input al modello d'onda anche il campo di corrente, affinché siano riprodotti correttamente i fenomeni di interazione onda-corrente (cfr. par. 3.2.1).

La caratterizzazione meteo-marina può essere effettuata attraverso la ricostruzione storica delle serie temporali di marea, anemometriche (intensità e direzione del vento) e ondamiche (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione) a partire dai dati misurati in prossimità del sito di interesse (stazioni mareografiche, anemometri, boe ondamiche, ecc.). I dati ondametrici possono essere utilizzati come riferimento anche ad una certa distanza dal sito di interesse, qualora l'esposizione alle mareggiate per i diversi settori direzionali possa essere considerata simile tra il sito in esame ed il sito che ospita la boa ondamica.

Non è sempre possibile fare affidamento su misure di vento e di onda a causa della frammentarietà delle serie temporali, dovuta a malfunzionamenti o a periodi di manutenzione della strumentazione, alla mancanza o alla non rappresentatività del paraggio in esame a causa della distanza dal sito di interesse, o della copertura di un intervallo di tempo esiguo non sufficiente a rappresentare le condizioni climatiche dell'area (rappresentatività statistica delle osservazioni tipicamente accettabili per periodi di osservazione superiori ai 5-10 anni). Si rimanda al paragrafo 5.2.1.2 per una descrizione di maggiore dettaglio circa la tipologia dei dati e della strumentazione disponibile.

Per ovviare alla mancanza di serie di dati rappresentative si fa spesso ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteo-marine attraverso modellistica matematica. Tale approccio, comunemente definito come "*wind/wave hindcast*" permette di disporre di serie temporali (intensità e direzione del vento; altezza, periodo e direzione delle onde) nel punto desiderato. Nel caso si ricorra a tale tipologia di dati, va sottolineata l'importanza di disporre di ricostruzioni modellistiche robuste, accurate e validate con osservazioni *in situ* o da remoto (cfr. par.5.2.3).

Per la caratterizzazione dei livelli, in particolare in relazione alla componente meteorologica della marea, sorgono le medesime problematiche citate per i dati di onda e vento, talvolta riconducibili alla limitata copertura spaziale dei mareografi presenti nei pressi del sito di studio e/o alla disponibilità di serie di dati eccessivamente frammentate a causa di malfunzionamenti o manutenzioni. Si rimanda ai paragrafi 5.2.1.2 e 5.2.2 per una descrizione di maggiore dettaglio della tipologia di dati e della strumentazione disponibile.

Anche in questo caso si può in parte ovviare alla mancanza di misure di campo facendo ricorso alla modellistica matematica. In particolare, esistono numerosi *software* di *hindcast* e previsione mareale gratuiti, accessibili al pubblico, e di facile implementazione che permettono di ricostruire serie di marea astronomica, sia passata che futura, in qualsiasi punto del globo a frequenze anche inferiori all'ora. La qualità di questi prodotti è oramai molto elevata, e l'errore commesso è normalmente ampiamente inferiore al 10% rispetto al dato misurato. I *software* normalmente reperibili forniscono, oltre all'oscillazione della superficie libera, anche la velocità mareale barotropica, parametro che risulta di grande importanza per un corretto annidamento dei modelli idrodinamici ad alta risoluzione.

4.3.2 Modellazione idrodinamica in bacini semichiusi

Nei bacini semichiusi (che comprendono tra l'altro tutte le zone portuali) le dinamiche di circolazione e la conseguente eventuale dispersione di sedimento presente in colonna d'acqua sono prevalentemente associate alla combinazione tra vento locale e oscillazione di marea (quest'ultima generalmente in misura minore) in maniera dipendente dall'estensione del bacino (Jouon *et al.*, 2006). Se il bacino è di piccole dimensioni e caratterizzato da profondità superiori a 5 metri (è il caso della maggior parte dei porti) l'effetto del moto ondoso sulla circolazione è in genere secondario. Per questa tipologia di siti resta generalmente valido quanto riportato per le aree costiere.

Per bacini portuali con profondità elevate la circolazione presenta caratteristiche tipicamente tridimensionali, che dovranno essere adeguatamente rappresentate nei modelli numerici.

4.3.3 Modellazione idrodinamica in aree al largo

Nelle aree al largo il regime idrodinamico è influenzato principalmente dalla circolazione di grande scala e dalle modalità con cui quest'ultima si modifica localmente, sia per effetto della batimetria sia per l'insorgenza di processi di sub-mesoscala (es. vortici di piccola scala).

Le forzanti che maggiormente influenzano la circolazione nelle aree di largo sono:

- vento;
- circolazione termalina di larga scala dovuta ai gradienti di temperatura e salinità;
- effetto della rotazione terrestre (la forza di *Coriolis* determina, insieme all'azione della gravità, moti inerziali);

-
- marea;
 - effetti di eventuali apporti fluviali sulla circolazione (se significativi).

Si rende dunque necessario l'utilizzo di una forzante atmosferica adeguata dal punto di vista della risoluzione spazio-temporale, che permetta di risolvere i processi legati ai flussi di quantità di moto e calore, includendo così le dinamiche da vento e, a meno degli apporti di acqua dolce al contorno del dominio di calcolo, quelle termoaline.

Per quanto riguarda le componenti di marea astronomica e gli apporti di acqua fluviale esse sono tanto più influenti sulla circolazione quanto più vicino a costa è collocato il dominio di interesse. È comunque sempre maggiormente diffusa la consapevolezza che il contenuto energetico connesso alla marea sia dello stesso ordine di grandezza rispetto a quello legato ai venti, quindi tutt'altro che trascurabile anche in zone a largo (Guarnieri *et al.*, 2013). Essa, inoltre, agisce anche in maniera indiretta sulle dinamiche marine inducendo, attraverso onde interne, una re-distribuzione di calore e salinità e influenzando, quindi, la circolazione generale.

Si specifica, inoltre, che nelle aree al largo il ruolo della componente diffusiva è generalmente poco influente a scale medio-grandi, e quindi trascurabile rispetto alla componente di trasporto. Tale considerazione è comunque dipendente dalle modalità operative e dall'intensità locale delle correnti e va quindi valutata caso per caso.

È importante sottolineare che la maggior parte dei processi fisici che caratterizzano le aree di largo agiscono su scale spaziali e temporali abbastanza ampie. Si deve, quindi, fare riferimento ad un modello idrodinamico di larga scala per riprodurre correttamente l'evoluzione di tali processi fisici. L'applicazione del modello su scale spaziali più ampie, comporta in genere (nell'ottica di ottimizzare le risorse computazionali disponibili) una riduzione della risoluzione spaziale e temporale. Al fine di ottenere la accuratezza spaziale e temporale desiderata, nonché di riprodurre gli effetti di quelle forzanti fisiche che agiscono su scale più piccole (es. batimetria locale, *plume* di apporti fluviali, ecc.) si procede con l'operazione di *nesting*, ossia nell'annidamento di un modello idrodinamico a più alta risoluzione all'interno del dominio computazionale del modello di larga scala. Il modello di larga scala fornirà in tal modo le corrette condizioni al contorno del modello annidato.

In linea di principio, i modelli di larga scala possono essere direttamente utilizzati come forzante idrodinamica dei modelli di trasporto di sedimento, evitando così la predisposizione modelli annidati. Tuttavia, tale scelta induce una riduzione dei processi e delle scale spaziali risolti, e deve essere adeguatamente argomentata.

Durante questo processo i prodotti di larga scala esistenti (cfr. par. 5.2.2) o di relativi servizi di *downstreaming*, possono essere utilizzati, oltre che nelle modalità sopra esposte, come valido supporto alla scelta ottimale del dominio del modello a più alta risoluzione.

4.4. Definizione del termine sorgente

La definizione del termine sorgente richiede l'adeguata quantificazione del flusso di rilascio di sedimento fine (kg/s) che, partendo dal campo vicino, alimenta il trasporto di sedimenti nel campo lontano.

Sull'accuratezza della stima del termine sorgente, però, incidono la complessità degli effetti dinamici nel campo vicino, specifici per le diverse tipologie di dragaggio idraulico e meccanico (es. Hayes *et al.*, 2000; Van Eekelen, 2007; Henriksen *et al.*, 2012; De Wit *et al.*, 2014a; De Wit *et al.*, 2014b) e la mancanza di informazioni complete e certe sui parametri tecnico-operativi (es. tecnica di movimentazione, programma delle lavorazioni con entità almeno presunta di tassi di produzione) nelle fasi di progettazione iniziali e di valutazione preliminare degli effetti. Questo grado di incertezza si riflette ovviamente sull'accuratezza delle previsioni e sulla bontà delle misure di mitigazione proposte in fase di pianificazione (Savioli *et al.*, 2013).

Pertanto, le ipotesi iniziali usate per l'implementazione dei modelli, spesso basate su informazioni non certe, possono essere riviste in seguito al confronto delle risultanze modellistiche ottenute in fase preliminare (par. 4.1). A tal proposito, è importante il confronto dei risultati modellistici relativi a diverse scelte tecnico-operative (tipologia della tecnica di movimentazione, finestra temporale delle attività, ecc.) per l'ottimizzazione della progettazione degli interventi in relazione agli effetti ambientali attesi.

Riprendendo i concetti descritti in Becker *et al.* (2015), nel seguito si propongono delle linee di riferimento metodologico per limitare le incertezze legate alla definizione del termine sorgente in relazione alle diverse fasi del ciclo di movimentazione (dragaggio/escavo, eventuale *overflow* in fase

di carico e sversamento) per cui, in base alle tecniche di dragaggio (idrauliche o meccaniche) ed al programma delle lavorazioni (cfr. par. 3.3 e 3.3.4) pianificate, è ragionevole ipotizzare un flusso di sedimento. In particolare, la metodologia è articolata nei seguenti passaggi:

1. analisi delle modalità di lavoro, da cui dipendono la tipologia del termine sorgente e le tempistiche delle operazioni di movimentazione;
2. quantificazione del volume totale di sedimento fine effettivamente disponibile per il trasporto nel campo lontano;
3. frazionamento del termine sorgente (ossia distribuzione del volume totale di sedimento fine disponibile) nell'intero ciclo della movimentazione (fasi di dragaggio/escavo, l'eventuale *overflow* in fase di carico e sversamento).

Per ciascuno dei passaggi si riportano alcune considerazioni di tipo pratico, funzionali all'adeguata implementazione del termine sorgente nell'AMI.

Le linee di riferimento vogliono delineare una procedura uniforme e replicabile per le diverse modalità tecniche e operative, per rendere confrontabili i risultati ottenuti nelle diverse fasi di progettazione e gestione di un intervento, o nell'ambito di diversi progetti.

Per la corretta definizione del termine sorgente, si consiglia una condivisione con l'impresa di dragaggio, al fine di disporre tempestivamente di informazioni più accurate e complete sulle specifiche modalità tecnico-operative da considerare per la stima del termine sorgente.

4.4.1 Analisi delle modalità di lavoro per la definizione di tipologia di sorgente

L'analisi delle modalità operative è un requisito imprescindibile per la definizione del termine sorgente. Le diverse fasi operative dell'intero ciclo di movimentazione (escavo, carico/trasporto con eventuale *overflow*, e sversamento), infatti, possono essere considerate come sorgenti di risospensione "frazionate e/o multiple" fino al completamento delle operazioni di movimentazione.

Il termine sorgente deve essere caratterizzato in termini di variazione nello spazio (lungo la verticale e nel piano) e nel tempo in funzione delle modalità operative utilizzate.

Per quanto riguarda la caratterizzazione spaziale, la sorgente può essere schematizzata come:

- sorgente di tipo puntiforme: se occupa un'area piccola rispetto alla dimensione delle maglie del dominio di calcolo;
- sorgente di tipo distribuito: se occupa un'area di estensione non trascurabile rispetto alla dimensione delle maglie dominio di calcolo e, di conseguenza, deve essere schematizzata considerando la sua intera estensione.

Per quanto riguarda la caratterizzazione temporale della sorgente è necessario considerare sia la variazione della sua posizione sia l'eventuale variazione della sua intensità (e conseguentemente della sua durata) nel tempo.

Più precisamente, in termini di variazione temporale della posizione della sorgente è possibile identificare le seguenti possibilità:

- sorgente di tipo stazionario (fissa nel tempo): se la dimensione caratteristica della traslazione della sorgente di risospensione/rilascio è inferiore rispetto alla dimensione delle maglie del dominio di calcolo, ad esempio nel caso di immersione al largo o per ripascimento e di dragaggi localizzati (De Lange, 2011);
- sorgente di tipo non stazionario (variabile nel tempo): se la dimensione caratteristica della traslazione della sorgente di risospensione/rilascio è confrontabile con la dimensione delle maglie del dominio di calcolo e la sua posizione può essere descritta anche nella sua variabilità nel tempo, ad esempio nel caso di dragaggio idraulico con draga semovente del tipo TSHD.

In termini di variazioni dell'intensità della sorgente nel tempo è possibile identificare, in relazione alla tipologia di effetti da valutare, le seguenti possibilità:

- se la simulazione ha l'obiettivo di valutare gli effetti a lungo termine, e pertanto la durata delle operazioni è sensibilmente inferiore alla durata della simulazione, l'intensità può essere considerata costante e di durata finita (pari alla durata delle operazioni);
- se la simulazione ha l'obiettivo di valutare gli effetti a breve termine, cioè la durata delle operazioni è confrontabile con la durata della simulazione, a seconda delle modalità operative utilizzate l'intensità della sorgente può essere considerata costante nel tempo (es. nel caso di un dragaggio idraulico con draga semovente del tipo TSHD) o variabile nel tempo (es. nel caso di

dragaggio idraulico con disgregatore per il quale si può verificare una variazione dell'intensità della sorgente durante l'*overcutting* e l'*undercutting*).

Una medesima tecnica operativa può essere schematizzata in modo diverso in relazione alle finalità delle simulazioni, dunque della durata, del passo di integrazione temporale e della discretizzazione spaziale (sia planimetrica che verticale) del dominio di calcolo. A titolo esemplificativo, un dragaggio di tipo meccanico può essere schematizzato come localizzato, stazionario e di durata finita e intensità costante nel caso in cui si vogliono valutare gli effetti a lungo termine e a grande scala in aree al largo. Lo stesso tipo di tecnica operativa, invece, può essere schematizzata come di estensione finita, di tipo non stazionario, di durata finita e intensità variabile (intermittente) nel caso in cui si vogliono valutare gli effetti a breve termine in bacini semichiusi (es. Di Risio *et al.*, 2017).

In questo paragrafo si pone l'attenzione su alcune considerazioni di tipo pratico funzionali all'adeguata implementazione del termine sorgente nell'AMI relativamente alle principali tecniche di dragaggio convenzionali:

- Per la stima realistica del flusso dei sedimenti fini rilasciati dalla sorgente (frazionata) è importante considerare in maniera appropriata la durata media di ogni fase del ciclo di lavoro (escavo, *overflow* in fase di carico e sversamento, cfr. par. 4.4.3), identificata come una significativa sorgente di risospensione in base alle modalità tecniche utilizzate (draga idraulica o meccanica).
- Le draghe meccaniche convenzionali sono generalmente contraddistinte da:
 - o un ciclo di dragaggio di tipo aperto e discontinuo;
 - o una densità dei sedimenti movimentati prossima a quella di origine;
 - o livelli significativi di rilascio in fase di escavo, per l'azione meccanica del grappo (o della benna) sul fondale e durante la sua risalita in superficie;
 - o trascurabile *overflow* in fase di carico.

Il rilascio in sospensione della frazione fine dei sedimenti è ritenuto generalmente costante e omogeneo lungo la verticale (cfr. par. 3.3.3.2). La definizione delle durate delle diverse fasi del ciclo di lavoro considerate per draghe di tipo meccanico (escavo e sversamento) permette la stima dell'intensità media ($\text{kg/m}^3/\text{s}$) del termine sorgente.

- Le draghe idrauliche convenzionali sono generalmente contraddistinte da:
 - o un ciclo di dragaggio chiuso e continuo (il materiale è rimosso come una miscela di acqua e sedimento e trasportato direttamente nello scafo della draga o nel sito di destinazione attraverso pompe centrifughe);
 - o una densità dei sedimenti movimentati inferiore a quella di origine (la miscela di acqua e sedimento è costituita tipicamente dal 5-25% in fase di escavo e trasporto, ma può essere incrementata, con appositi accorgimenti tecnici, in relazione alla destinazione finale del sedimento);
 - o livelli significativi di rilascio in fase di escavo, che possono verificarsi in prossimità del fondo perché parte del sedimento sfugge dalle pompe di aspirazione;
 - o un significativo *overflow* in fase di carico delle draghe.

Il flusso dei sedimenti rilasciati in prossimità della sezione terminale della condotta di aspirazione durante la fase di escavo è generalmente ritenuto costante²⁹ e localizzato in prossimità del fondo, con dimensioni dell'area di rilascio ottenibili in funzione delle dimensioni dei parametri geometrici e cinematici della testa della draga (cfr. par. 3.3.3.2). La definizione della durata di ciascuna fase del ciclo di lavoro (escavo, *overflow* e sversamento), per cui si presume un rilascio dei sedimenti da draghe di tipo idraulico, permette la stima dell'intensità media (kg/s) del termine sorgente. È necessario considerare che l'eventuale *overflow* si ha quando la draga raggiunge la massima capacità di carico, e che durante i cicli di dragaggio si passa alternativamente da periodi di pieno carico a periodo di svuotamento dello scafo.

- Nel rispetto del principio di conservazione della massa, la quantità totale di sedimento fine presente nel volume totale di sedimento da movimentare e disponibile al trasporto nel campo lontano deve essere interamente ripartita (frazionata) tra il termine sorgente rappresentativo delle fasi di escavo e/o dell'*overflow* in fase di carico e/o dello sversamento in cui può essere

²⁹ Soprattutto nel caso di dragaggio di sedimenti omogenei (Collins, 1995; IADC, 1998; Eisma, 2006; Bridges *et al.*, 2008; Palermo *et al.*, 2008).

scomposto l'intero ciclo della movimentazione in funzione delle tecniche di dragaggio e del programma dei lavori³⁰.

4.4.2 Quantificazione del volume totale di sedimento fine disponibile

È prassi consolidata stimare il flusso di sedimenti rilasciati dalla sorgente a partire da relazioni che forniscono il volume totale di sedimento fine (in m³) disponibile per il trasporto nel campo lontano in funzione del volume totale (in m³) e delle caratteristiche (es. densità e distribuzione granulometrica) del sedimento da movimentare (es. Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Becker *et al.*, 2015).

La massa potenzialmente disponibile che alimenta il campo lontano può essere, in linea di principio, stimata sulla base della misura della frazione fine presente nel volume totale da movimentare. In tal modo si trascura il possibile incremento (altrimenti di difficile quantificazione) derivante dall'azione di disturbo esercitata dal mezzo dragante³¹. In quest'ultimo caso è possibile ricorrere a formulazioni empiriche che mirano a fornire direttamente l'intensità del termine sorgente in funzione, tra l'altro, delle caratteristiche del sedimento e della tecnica di movimentazione (cfr. Cap.3 per lo stato dell'arte delle formulazioni disponibili). Ai fini dell'applicazione dell'AMI, si suggerisce che la quantificazione del volume totale di sedimento fine disponibile al trasporto sia effettuata, almeno inizialmente, mediante l'utilizzo del metodo generale di Becker *et al.* (2015), diffusamente descritto nella sezione 3.3.4 del Manuale.

In questo paragrafo si pone l'attenzione sulle seguenti considerazioni di tipo pratico.

- È importante disporre, in fase di pianificazione degli interventi, di informazioni attendibili circa la quantità e la tipologia del sedimento da movimentare (spesso ricavabili solo mediante l'esecuzione di specifiche indagini).
- La dimensione dei grani che rappresenta la componente fine non è univocamente definita e può variare in funzione del dato disponibile. Tipicamente il limite utilizzato per discriminare la componente di fine varia tra 63 μm (nel rispetto della scala *Wentworth*) e 74 μm (nel rispetto della classificazione USCS - *Unified Soil Classification System*).
- La velocità di sedimentazione è un parametro importante per quanto riguarda la potenziale dispersione dei sedimenti in sospensione; pertanto, è consigliabile tener conto di un numero limitato di frazioni granulometriche di sedimento specificandone le corrispondenti velocità di sedimentazione. Si deve tenere a mente che, diversamente da un modello 3D, in un modello 2DH la velocità di sedimentazione è spesso utilizzata come parametro di calibrazione, quindi richiede apposite analisi che permettano aggiustamenti del valore per pervenire a stime attendibili delle concentrazioni di SSC nel campo lontano.
- È necessario riferirsi alla massa di sedimento asciutta (peso secco) per ridurre possibili errori dovuti alla conversione tra valori di concentrazione, densità e volume.
- Le relazioni utilizzate (es. Becker *et al.*, 2015) si basano spesso sull'ipotesi che la frazione di sedimento fine presente nei sedimenti da movimentare in condizioni indisturbate (V_{situ}) sia costante nel tempo, mentre, nella realtà la frazione di sedimento fine disponibile per il trasporto nel campo lontano può variare in relazione alle tecniche utilizzate per la movimentazione nelle diverse fasi di un ciclo di lavoro ed alle caratteristiche sedimentologiche in differenti sub-aree di intervento. Generalmente, la frazione di sedimento fine può aumentare per la produzione di ulteriore volume a causa dell'azione meccanica dei mezzi di lavoro durante le operazioni (in misura maggiore durante l'escavo per l'azione diretta del disgregatore al fondo); al contrario può decrescere per la formazione di agglomerati argillosi dei sedimenti messi in sospensione.

³⁰ In linea con il principio di conservazione di massa, la frazione fine disponibile al trasporto nel campo lontano nelle diverse fasi di un ciclo di movimentazione può subire variazioni qualora si utilizzino accorgimenti tecnici per limitare il rilascio dei sedimenti in colonna d'acqua (es. limitando la risospensione in prossimità della testa della draga e/o l'*overflow* in fase di carico, aumenta la quantità di sedimento fine disponibile al trasporto trasferita nel sito di sversamento).

³¹ Al termine sorgente può contribuire anche la messa in sospensione di sedimenti ad opera degli stessi mezzi draganti (es. a causa delle eliche per draghe del tipo TSHD). Approfondimenti specifici in merito a tali aspetti non rientrano tra gli obiettivi del presente Manuale. Tuttavia, si evidenzia che la stima di tale contributo è generalmente considerata un ostacolo nella definizione del termine sorgente (es. Van Eekelen, 2007; De Wit, 2010; De Wit *et al.*, 2014b) per la difficoltà nel modellare la fase dinamica del pennacchio in questi casi (principalmente a causa dell'interazione del pennacchio con il flusso longitudinale delle correnti, la velocità di navigazione e con la formazione di aria nella miscela acqua-sedimento per l'azione delle eliche e/o del propulsore attorno allo scafo).

- Qualora lo spessore dei sedimenti da rimuovere sia disomogeneo (caso frequente), questo deve essere suddiviso in strati omogenei (ossia con simili caratteristiche sedimentologiche) e il volume di sedimento fine disponibile deve essere stimato per ciascuno strato, sommando/mediando tutti i contributi ottenuti.
- Le relazioni esistenti possono essere utilizzate per stimare la quantità di sedimento appartenente a diverse classi granulometriche, sostituendo la frazione $f_{63\mu m}$ (ovvero f_{fine}) con la frazione relativa alle classi desiderate. Per la definizione del numero di classi granulometriche si può fare riferimento alle classificazioni di Shepard (1954) e Nota (1958).
- È importante che in fase di carico su draghe autocaricanti il processo di analisi si basi sul volume da movimentare e non sul volume dei pozzi di carico, poiché il livello di compattazione può essere notevolmente diverso.

4.4.3 Frazionamento del sedimento fine disponibile al campo lontano

Secondo quanto riportato nel presente capitolo (e nel paragrafo 3.3.4) l'analisi delle modalità di lavoro (in termini fisici e di durata) permette il frazionamento del termine sorgente tra le diverse fasi delle operazioni di movimentazione in relazione alle tecniche di dragaggio ed al programma delle lavorazioni. In particolare, per ogni possibile sorgente di risospensione devono essere definite la frazione della massa totale di sedimento fine disponibile al trasporto nel campo lontano e il flusso di sedimenti fini che abbandona la sorgente nel tempo e nello spazio (cfr. par. 3.3).

Per la stima dell'intensità e della geometria della sorgente sono disponibili in letteratura, seppur per un numero limitato di tecniche di dragaggio (generalmente dragaggio idraulico con disgregatore e dragaggio meccanico), relazioni e formulazioni empiriche facilmente utilizzabili, basate su osservazioni di campo (cfr. par. 3.3). È possibile, inoltre, utilizzare semplicemente una serie di coefficienti empirici che forniscono la quantità di sedimento disponibile al campo lontano che, insieme alla definizione della durata delle singole operazioni, permettono una stima dell'intensità della sorgente.

In questo paragrafo si pone l'attenzione sulle seguenti considerazioni di tipo pratico.

- Ci sono incertezze intrinseche nella stima del termine sorgente legate al suo frazionamento; in particolare l'utilizzo di parametri delle formule derivati empiricamente può portare a stime suscettibili di inesattezze di circa un ordine di grandezza. In questo ambito sono, quindi, auspicabili successivi monitoraggi di verifica in corso d'opera (cfr. par. 5.2.4.2).
- Le ore di lavoro settimanali (dipendenti dalla durata di un ciclo di lavoro) e la produttività delle tecniche adoperate (dipendente dal volume di sedimento movimentato per ciclo di lavoro) possono incidere sul numero di cicli settimanali; tuttavia, questi aspetti non sono considerati critici nelle fasi iniziali del processo decisionale se le informazioni fornite sul volume totale dei sedimenti sono corrette (Becker *et al.*, 2015).
- Per quanto riguarda la durata delle fasi operative dell'intero ciclo di movimentazione in cui può essere frazionato il termine sorgente, è importante evidenziare che:
 - o al termine sorgente riconducibile alla risospensione dal fondo per azione diretta della testa della draga deve essere applicata una durata pari all'intera durata della fase di escavo;
 - o al termine sorgente riconducibile all'*overflow* in fase di carico deve essere applicata una durata pari all'intervallo compreso tra il momento in cui la draga raggiunge la piena capacità di carico (ed inizia l'*overflow*) ed il momento in cui il processo di carico (quindi l'*overflow*) si interrompono. Per simulare il processo con un buon livello di precisione, si suggerisce che il termine sorgente correlato all'*overflow* sia dapprima modellato come un valore medio piuttosto che variabile tempo. Considerate le numerose incertezze e l'assenza di informazioni dettagliate in fase di progettazione dell'intervento, infatti, raramente è giustificabile lo sforzo di inserire il termine sorgente per l'*overflow* come variabile nel tempo a garanzia dell'accuratezza dei risultati (Becker *et al.*, 2015). Si vedano a tal proposito anche le considerazioni riportate al par. 4.4.1.
- Sono disponibili modelli complessi per ricavare valori più attendibili circa la sedimentazione (f_{sed}) nella miscela di acqua e sedimento caricata nello scafo (o nella chiatte) e il contributo

dell'*overflow* al pennacchio passivo (σ_0 , es. Van Rhee, 2002; De Wit, 2010; De Wit *et al.*, 2014a; Saremi, 2014)³².

- In generale, è auspicabile l'esecuzione di campagne di monitoraggio in fase *ante operam* (cfr. par. 5.2.4.1) per supportare le ipotesi di definizione del termine sorgente ai fini della modellazione e campagne di monitoraggio in corso d'opera (cfr. par. 5.2.4.2) per verificare le ipotesi fatte ed i risultati previsionali ottenuti. Campagne di monitoraggio specifiche in corso d'opera costituiscono una fonte preziosa per arricchire i database utilizzati per derivare le formulazioni empiriche per la stima del termine sorgente ed ampliarne gli intervalli di validità (USACE, 2002; VBKO, 2003; Aarninkhof *et al.*, 2008; Van Koningsveld *et al.*, 2010, 2013; Lisi *et al.*, 2016; Di Risio *et al.*, 2017). In questo contesto, la misurazione presso stazioni mobili da imbarcazioni è considerato un valido metodo per la verifica del flusso di sedimenti che abbandona la sorgente di rilascio (o *dredging zone*).
- Misurazioni *ad hoc*, in corso d'opera, di densità e velocità in prossimità della testa della draga e delle condotte di aspirazione, permettono di verificare e/o modificare (se necessario) le stime ottenute sulla produttività (in kg/m³) espressa in relazione alla durata ed al numero di cicli di dragaggio/lavoro necessari per completare le operazioni di movimentazione.
- Se vi è la necessità di modellare il termine sorgente (frazionato) con maggiori livelli di dettaglio è auspicabile, oltre alla verifica mediante apposite attività di monitoraggio, fare ricorso a una modellazione di dettaglio del campo vicino (Becker *et al.*, 2015).
- Sulla base delle raccomandazioni precedenti, grande attenzione deve essere posta in tutti i casi in cui le formule per la stima del termine sorgente (frazionato) non sono basate su una vasta gamma di esperienze e/o misurazioni di campo. In particolare, se i progetti devono essere eseguiti in prossimità di aree a grande valenza/sensibilità ambientale, si suggerisce di applicare un approccio precauzionale vagliando le ipotesi peggiori (Sunstein, 2003).

Nel seguito si riporta una sintesi dei principali parametri numerici da considerare per la stima del flusso di sedimenti che abbandona la sorgente (frazionata) durante l'esecuzione di operazioni di movimentazione con draghe meccaniche (Tabella 4.2) e idrauliche (Tabella 4.3).

Tabella 4.2 - Elenco di alcuni parametri da considerare per la definizione del termine per draghe meccaniche

FASE OPERATIVA	PARAMETRI	SIMBOLO	UNITÀ DI MISURA
DRAGAGGIO	Volume totale <i>in situ</i> da movimentare	V_{situ}	m ³
	Densità del sedimento secco	ρ_d	kg/m ³
	Percentuale del sedimento fine	$f < 63\mu$	%
	Produttività	P_{situ}	m ³ /h
	Durata del dragaggio	T	gg
	Numero di draghe		
	Tempo di carico della betta		min/draga
	Numero di bette a pieno carico	n_c	
	Volumi per betta a pieno carico		m ³ /betta
	Volume totale di sedimento fine movimentato	V_f	m ³
	Percentuale di fine rilasciato dalla benna (grappo)	σ_b	%
	Massa di fine disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_b	Kg
	Flusso di sedimenti che abbandona la sorgente in fase di escavo	q_{dp}	kg/s
SVERSAMENTO	Massa di fine trasportato nella betta a pieno carico	m_h	Kg
	Percentuale di fine sversato dalla benna (grappo)	σ_s	%
	Massa di fine disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{sp}	kg/betta
	Massa di fine non disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{sd}	kg/betta
	Flusso di sedimenti che abbandona la sorgente in fase di sversamento	q_{sp}	kg/s

³² In alcuni studi di dettaglio si suppone che la percentuale di perdita per *overflow*, stimabile con regole semplici, sia relativa alla frazione di sedimenti superiore a 75 μ m (Vlasblom, 2003).

Tabella 4.3 - Elenco di alcuni parametri da considerare per la definizione del termine sorgente per draghe idrauliche

FASE OPERATIVA	PARAMETRI	SIMBOLO	UNITÀ DI MISURA
DRAGAGGIO	Volume totale in situ da movimentare	V_{situ}	m^3
	Densità del sedimento secco	ρ_d	kg/m^3
	Percentuale del sedimento fine	$f < 63\mu$	%
	Produttività	P_{situ}	m^3/h
	Durata del dragaggio	T	gg
	Durata dell'intero ciclo della movimentazione		Min
	Frazione di fine rilasciato in prossimità della testa della draga	σ_d	%
	Flusso di sedimenti che abbandona la sorgente in fase di escavo	Q_{dp}	kg/s
OVERFLOW	Tempo di carico		min/ciclo
	Numero cicli di carico	n_c	
	Durata del singolo ciclo		min
	Volume totale di fine caricato		m^3
	Produttività per ciclo	P_c	m^3/s
	Massa di fine disponibile per il trasporto	m_t	kg
	Sedimento fine caricato nello scafo della draga	m_h	kg/ciclo
	Frazione del sedimento fine che deposita nello scafo	f_{sett}	%
	Sedimento fine trattenuto nello scafo	m_r	kg/ciclo
	Sedimento fine disponibile all' <i>overflow</i>	m_o	kg/ciclo
	Frazione di fine disponibile per <i>overflow</i>	σ_o	%
	Durata dell' <i>overflow</i>		min/ciclo
	Massa di fine disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{op}	kg/ciclo
	Massa di fine non disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{od}	kg/ciclo
	Flusso di sedimenti che abbandona la sorgente in fase di overflow	Q_{op}	kg/s
SVERSAMENTO	Frazione di fine disponibile per lo sversamento	σ_s	%
	Massa di fine disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{sp}	kg/ciclo
	Massa di fine non disponibile per il trasporto nel campo lontano	m_{sd}	kg/ciclo
	Flusso di sedimenti che abbandona la sorgente in fase di sversamento	Q_{sp}	kg/s

In Appendice 1 è riportata una serie di schede esemplificative (SE) contenenti esempi di applicazione del metodo descritto per la stima del flusso di sedimenti che abbandona la sorgente (frazionata) rappresentativa di operazioni di movimentazione condotte con diverse finalità (dragaggio/sversamento) e in diversi ambiti di intervento (aree costiere, bacini semichiusi e al largo), mediante utilizzo dei parametri numerici sopra elencati (Tabelle 4.2 e 4.3).

4.5. Modelli di trasporto dei sedimenti

L'AMI si presta alla simulazione di molteplici scenari di movimentazione, al variare delle condizioni meteo-climatiche e al variare delle scelte tecnico-operative. In tal modo è possibile valutare e comparare l'influenza delle condizioni ambientali (definite nell'ambito della selezione degli scenari di simulazione) sui processi di trasporto del pennacchio di torbida generato dalla movimentazione dei sedimenti.

Generalmente, in fase di pianificazione non è noto l'esatto cronoprogramma dei lavori. Pertanto, è auspicabile la riproduzione di molteplici scenari di simulazione che tengano conto della stagionalità delle condizioni ambientali e aventi una durata sufficiente alla valutazione della sedimentazione della gran parte dei sedimenti risospesi a causa delle attività di movimentazione.

Un'adeguata modellazione dei fenomeni di trasporto del pennacchio di torbida (dispersione, diffusione, deposizione e talvolta risospensione) richiede la definizione delle forzanti ambientali (cfr. par. 4.2), il calcolo delle caratteristiche idrodinamiche nel dominio di interesse (cfr. par. 4.3) e un'adeguata definizione del termine sorgente (cfr. par. 4.4). A ciò si aggiunge l'importanza della definizione della velocità di deposizione (cfr. par. 3.4).

Si riportano nei paragrafi successivi, a favore di sintesi, alcune considerazioni di tipo pratico circa l'applicazione del termine sorgente nel dominio di calcolo ed alcune indicazioni operative per la modellazione dei fenomeni di trasporto nei diversi ambiti di intervento considerati.

Si sottolinea che nella fase di modellistica preliminare è possibile l'utilizzo di un approccio semplificato, che preveda ad esempio l'uso di modelli con soluzione analitica (cfr. par. 3.4.1). Nel seguito del testo si farà prevalentemente riferimento a modelli con soluzione numerica, indicati per gli studi di dettaglio, ma utilizzabili anche nella fase modellistica preliminare.

Per la corretta definizione degli scenari di modellazione deve essere ipotizzata una durata realistica delle operazioni di escavo e/o sversamento. Anche la torbidità naturale del sito deve essere opportunamente considerata, soprattutto qualora specifiche indagini preliminari (bibliografiche o di campo) evidenzino l'utilità di comparare la variabilità della torbidità indotta dalle operazioni di movimentazione con quella indotta da altre cause naturali (es. apporti fluviali, polle d'acqua in presenza di falde, azione del moto ondoso, ecc.) e antropiche (es. altri progetti già realizzati). Nei casi in cui non vi sia disponibilità di dati è opportuno modellare, utilizzando approcci "a scenario" (es. Liu *et al.*, 2002), le condizioni ritenute rappresentative sulla base di una preliminare caratterizzazione dell'area (es. modellazione di scenari di risospensione indotta da condizioni estreme, piene fluviali, ecc.).

Si precisa che in ambienti a limitato battente idrico o soggetti ad oscillazioni di marea (es. ambienti lagunari) un qualsiasi mezzo, indipendentemente dalla sua attività in corso (es. natante, bettolina, pontone) può divenire sorgente di risospensione (Erm & Soomere, 2006) interagendo in modo più o meno consistente con il fondo (es. risospensione per azione delle eliche, strisciamento in condizioni di bassa marea, risucchio per spostamento di volumi di acqua).

4.5.1 Applicazione del termine sorgente nel dominio di calcolo

L'andamento della concentrazione dei sedimenti sospesi nel campo lontano dipende dal tipo di sorgente (fissa/mobile e continua/variabile nel tempo) e dal flusso di sedimenti rilasciato in determinati punti del dominio di calcolo e per determinati istanti temporali dello scenario di simulazione (es. Shao *et al.* 2015, 2016; Di Risio *et al.*, 2017).

Gli aspetti da considerare per la modellazione del termine sorgente e, quindi, dei fenomeni di trasporto dei sedimenti rilasciati/risospesi nel campo lontano sono molteplici, così come dettagliato nel seguito.

- La durata del passo temporale di calcolo, che deve essere selezionata con attenzione per evitare l'introduzione di SSC irrealistiche in alcuni istanti temporali e in alcuni punti della griglia di calcolo, che possono influenzare i livelli di concentrazione simulati dal modello. In particolare, la quantità di sedimento fine disponibile al campo lontano introdotto in una cella della griglia durante un passo temporale di calcolo è pari al flusso di sedimento (in kg/s) stimato per quella cella integrato per la durata del passo temporale. Utilizzando un passo temporale di tipo dinamico (ossia variando la durata del passo temporale durante una simulazione) si può aumentare la precisione di simulazione, riducendo al contempo il tempo di simulazione, in base a criteri di stabilità numerica.
- La dimensione delle celle della griglia di calcolo, che deve essere scelta in modo da caratterizzare adeguatamente i processi di dispersione, diffusione e sedimentazione di un pennacchio generato durante una specifica operazione di movimentazione. In particolare, se le celle della griglia sono troppo larghe, si può generare un termine artificiale di diffusione numerica, mentre nel caso in cui siano troppo piccole, potrebbero crearsi zone con livelli di concentrazione irrealistici (soprattutto per sorgenti fisse e continue).

-
- L'eventuale movimento della draga all'interno dell'area di lavoro, che deve essere rappresentato con una risoluzione spaziale adeguata (es. per la valutazione di effetti di breve termine in bacini semichiusi). Infatti, se da una parte, per una operazione di movimentazione esprimibile come una sorgente di tipo fisso/stazionario il flusso di sedimento rilasciato (in kg/s) è specificato in una posizione particolare del domino (anche su di una sola cella della griglia) per un determinato passo, dall'altra l'introduzione di sorgenti non stazionarie (in movimento) è più complessa.

Il corretto flusso di sedimenti in sospensione dovrebbe essere ripartito sulle diverse celle della griglia in maniera proporzionale al tempo di permanenza del termine sorgente (debitamente frazionato) su ogni cella durante un determinato intervallo temporale; pertanto, è necessario caratterizzare la sorgente tramite la successione delle coordinate delle posizioni sulle celle occupate dalla testa dragante allo scorrere del tempo. Il tempo di permanenza della testa dragante sulla medesima area dipende dalla produttività oraria della specifica macchina operatrice (es. una draga meccanica con produttività di 2.400 m³/giorno impiega poco più di un giorno per dragare una superficie unitaria media di 2.500 m² e spessore di dragaggio pari ad 1 m).

- L'applicazione nella griglia di calcolo del termine sorgente, che deve essere condotta ponendo attenzione alla possibile introduzione di una significativa incertezza dovuta ad effetti diffusivi indesiderati, talvolta generati (anche per termini sorgenti accuratamente stimati) dallo schema numerico utilizzato per risolvere le equazioni. In particolare, tra le condizioni al contorno imposte dal modello, la scelta della dimensione minima degli elementi della griglia in prossimità del termine sorgente è fondamentale perché può influenzare l'affidabilità dei risultati di trasporto nel campo lontano (maglie di grandi dimensioni provocano una "immediata diffusione numerica" che inficia il livello di dettaglio degli passaggi numerici successivi).
- Per ottenere risultati affidabili il termine sorgente deve essere applicato quando il modello idrodinamico è giunto ad una soluzione stazionaria, a meno che non si voglia analizzare il comportamento transitorio dovuto a campi idrodinamici ambientali non stazionari.
- Le differenti modalità di rilascio lungo la verticale devono essere opportunamente implementate nella definizione del modello di trasporto in funzione della discretizzazione verticale prescelta.
- La stima dell'impronta areale della sorgente permette di stimare il flusso di concentrazione di sedimenti (es. g/m³/s) da utilizzare come termine forzante dell'equazione di conservazione del sedimento in sospensione (cfr. par. 3.3.3.2).

In Appendice 1 è riportata una serie di schede esemplificative (SE) contenenti esempi di applicazione del metodo descritto per la caratterizzazione del termine sorgente rappresentativo di diverse operazioni (cfr. par. 4.4) e di discretizzazione del termine sorgente nel dominio di calcolo.

4.5.2 Attività di movimentazione in aree costiere

Sui fenomeni di trasporto del sedimento sversato in aree costiere incidono le modalità operative utilizzate (cfr. par. 2.3) e le forzanti responsabili dell'idrodinamica, rappresentate prevalentemente dall'azione del moto ondoso, dal vento e dalle maree (es. Wilber & Clarke, 2006; Smith *et al.*, 2008; Kim & Lim, 2009).

Poiché vi è incertezza sulla stima dei coefficienti empirici definiti nell'ambito del metodo generale proposto da Becker *et al.* (2015), è auspicabile un'analisi di sensitività rispetto alla frazione di sedimento fine resa disponibile al trasporto nel campo lontano. Pertanto, si evidenzia l'importanza dell'analisi delle modalità di lavoro per la definizione della frazione di sedimento fine effettivamente disponibile in fase di sversamento in aree costiere (litoranee o di transizione), al netto delle perdite della frazione fine in seguito ai fenomeni di *overflow* che avvengono durante la fase di carico al largo, nei pressi della cava di prestito. Particolare attenzione dovrebbe essere rivolta alla valutazione di accorgimenti tecnici volti a massimizzare la densità del volume da sversare al fine di ridurre la dispersione del sedimento immesso in colonna d'acqua e/o il *deficit* tra il volume di sedimento sversato ed il volume effettivamente sedimentato nell'area *target* a conclusione dell'intervento³³.

³³ Per ridurre la dispersione del sedimento immesso nella colonna d'acqua e il deficit tra il volume di sedimento sversato ed il volume effettivamente sedimentato nell'area *target* a conclusione dell'intervento possono essere utilizzati accorgimenti

Infine, si sottolinea che, in virtù dell'azione dell'idrodinamica sul sedimento deposto, generalmente contraddistinto da un minore grado di compattazione, la valutazione dell'aumento temporaneo della torbidità si deve protrarre oltre la conclusione degli interventi del tempo necessario al raggiungimento del nuovo profilo di equilibrio (es. profilo di spiaggia in aree litoranee).

In Appendice 1 (nella scheda esemplificativa SE1) si riporta un esempio di applicazione del metodo per la definizione del termine sorgente, derivato dal metodo generale di Becker *et al.* (2015) e dai parametri empirici (σ) desumibili dalle formulazioni empiriche di letteratura (cfr. par. 3.3.4 e 3.3.1 rispettivamente).

4.5.3 Attività di movimentazione in bacini semichiusi

Nel caso di bacini semichiusi (o in aree comunque confinate) i fenomeni di trasporto sono correlati alle attività di movimentazione (definizione del termine sorgente) ed alla circolazione idrodinamica indotta principalmente dal vento locale e dalle oscillazioni di marea (es. Bilgili *et al.*, 2005; Lumborg, 2005), generalmente in misura minore e dipendente dall'estensione del bacino e della relativa dinamica. Rispetto alle dimensioni caratteristiche tipiche dei bacini confinati ove si attuano movimentazioni di sedimento, il moto ondoso tende a giocare un ruolo minore (es. Lisi *et al.*, 2009). In questi casi va attentamente valutata la significatività della tridimensionalità dei fenomeni di trasporto (es. Bai *et al.*, 2003; De Marchis *et al.*, 2014; Feola *et al.*, 2015).

In Appendice 1 (nella scheda esemplificativa SE2) si riporta un esempio di applicazione del metodo per la definizione del termine sorgente, derivato dal metodo generale di Becker *et al.* (2015) e dai parametri empirici (σ) desumibili dalle formulazioni empiriche di letteratura (cfr. par. 3.3.4 e 3.3.1 rispettivamente).

4.5.4 Attività di movimentazione al largo

Nel caso di attività di sversamento al largo, è necessario tener conto dell'idrodinamica a grande scala, così come descritto nel paragrafo 4.3.3, dove sono di interesse le forzanti relative al vento, ai gradienti di temperatura e salinità, alle oscillazioni di marea, tutte influenzate anche dalla forza di *Coriolis*. Il moto ondoso gioca un ruolo piuttosto marginale.

Così come sottolineato nel paragrafo precedente, anche in questo caso è cruciale l'analisi delle modalità di lavoro per la stima affidabile del sedimento fine effettivamente disponibile al campo lontano. In tal senso è importante la definizione delle modalità di escavo e carico, da cui dipende la frazione fine che viene trasportata fino all'area di sversamento. Particolare attenzione deve essere rivolta alla valutazione di accorgimenti tecnici volti a massimizzare la densità del volume da sversare al fine di ridurre la dispersione del sedimento immesso in colonna d'acqua e/o il *deficit* tra il volume di sedimento sversato ed il volume effettivamente sedimentato nell'area *target* a conclusione dell'intervento³⁴.

È altrettanto importante la definizione delle operazioni di sversamento, che influenzano in misura sostanziale le caratteristiche dinamiche della nuvola di torbida, e delle modalità con cui il sedimento giunge sul fondo. Infatti, così come descritto nel paragrafo 4.4.3, le caratteristiche geometriche del natante (dimensioni e volume di carico per ogni ciclo di sversamento) utilizzato per il rilascio, nonché le caratteristiche del sedimento sversato, influenzano il valore della frazione fine effettivamente disponibile al campo lontano e i fenomeni di generazione e sviluppo della nube di torbida nel campo lontano.

In Appendice 1 (scheda esemplificativa SE3) si riporta un esempio di applicazione del metodo per la definizione del termine sorgente, derivato dal metodo generale di Becker *et al.* (2015) e dai parametri

tecnic per massimizzare la densità del volume da sversare (es. ridurre il tempo di immissione, regolare la velocità con la quale la miscela acqua-sedimento viene rilanciata dalle pompe in relazione alla composizione della miscela e alla granulometria del materiale interessato, o effettuare una parziale disidratazione del sedimento prima del refluito a costa).

³⁴ Per ridurre la dispersione del sedimento immesso in colonna d'acqua e il deficit tra il volume di sedimento sversato e il volume effettivamente sedimentato nell'area *target* a conclusione dell'intervento possono essere utilizzati accorgimenti tecnici per massimizzare la densità del volume da sversare (es. ridurre il tempo di immissione, regolare la velocità con la quale la miscela acqua-sedimento viene rilanciata dalle pompe in relazione alla composizione della miscela e alla granulometria del materiale interessato).

empirici (σ) desumibili dalle formulazioni empiriche di letteratura (cfr. par. 3.3.4 e 3.3.1 rispettivamente).

4.6. Elaborazione e presentazione dei risultati

Nel seguito sono fornite alcune indicazioni, basate sulla letteratura di settore (cfr. par. 1.2), relative alle tecniche di analisi e di rappresentazione dei risultati ottenuti nell'ambito degli studi modellistici, che agevolino l'individuazione e il confronto delle aree esposte ai fenomeni di sviluppo e trasporto dei pennacchi di torbida in diverse condizioni progettuali e ambientali.

Come riportato nei paragrafi precedenti, l'Approccio Modellistico Integrato (AMI) deve poter supportare la scelta delle modalità operative in grado di limitare il rilascio della frazione sedimentaria fine in colonna d'acqua. Pertanto, i risultati modellistici devono essere analizzati ed elaborati in maniera tale da essere funzionali alla valutazione della significatività degli effetti ambientali sul comparto fisico conseguenti agli incrementi di SSC e DEP. Tali valutazioni sono propedeutiche a valutazioni della severità degli impatti, e a più specifiche analisi di rischio, da effettuare quando sia accertata la presenza di recettori ambientali sensibili.

La letteratura di settore evidenzia la mancanza di criteri condivisi per l'analisi e la rappresentazione dei risultati modellistici con tecniche standardizzate (es. SKM, 2013; Feola *et al.*, 2016). In particolare, emerge che le risultanze modellistiche sono spesso presentate attraverso mappe che riportano situazioni istantanee e ritenute critiche in termini di:

- specifici scenari di condizioni meteo-climatiche (medie e/o estreme);
- quantificazione della sola intensità massima del fenomeno di dispersione senza valutazioni di durata o frequenza;
- eventuale quantificazione della durata totale di eventi di eccedenza di livelli di riferimento senza valutazioni dell'effetto cumulato di più eventi di intensità e durata differenti.

Si riconosce, invece, l'importanza di:

- verificare la disponibilità di livelli di riferimento sito-specifici (cfr. cap.1, glossario della terminologia e degli acronimi) cui riferirsi per quantificare la variabilità dei parametri di interesse e valutare la significatività degli effetti conseguenti alla formazione del pennacchio di torbida;
- un'analisi di sintesi dei risultati numerici mediante un'elaborazione combinata di indici e indicatori statistici tesi a rappresentare la complessità spaziale e temporale dei fenomeni di interesse.

Nel successivo paragrafo 4.6.1 sono riportate indicazioni per la definizione dei livelli di riferimento. Nel paragrafo 4.6.2 si riporta, invece, una descrizione delle tecniche di analisi ed elaborazione al fine di pervenire ad una valutazione integrata degli effetti/impatti mediante l'implementazione dell'Approccio Modellistico Integrato (AMI). Tali elaborazioni sono da ritenersi necessarie quando l'analisi preliminare evidenzia l'insorgere di eventuali criticità ambientali.

4.6.1 Definizione di livelli di riferimento sito specifici

Un passo importante nella valutazione della compatibilità ambientale di un progetto che prevede la movimentazione di sedimenti è la definizione di livelli (singoli o multipli) di riferimento (LR) rappresentativi della variabilità dei parametri di interesse (es. SSC, DEP) prima dell'avvio delle attività (o, successivamente, in aree non influenzate dai lavori). Essi devono essere funzionali a quantificare la significatività degli scostamenti durante l'esecuzione del progetto in esame e possono essere differenziati in una successione di livelli a crescente criticità ambientale per pervenire ad una caratterizzazione (spaziale e temporale) della significatività degli effetti conseguenti alla formazione del pennacchio di torbida (es. Sofonia & Unsworth, 2010).

Tale livello (o serie di livelli) di riferimento è da stabilire sulla base dei dati di letteratura e di campo disponibili, anche in funzione della tipologia del progetto (es. estensione, durata, volumi movimentati) delle finalità e delle sue previste interazioni con il sistema (es. intensità delle correnti locali, tipologia e distanza di criticità e recettori ambientali sensibili) ed è rivedibile, durante l'esecuzione degli interventi, sulla base dei risultati modellistici e dei dati di nuovi monitoraggi.

Sebbene esuli dalle finalità del presente Manuale, si specifica che in fase di analisi e sintesi dei risultati, il livello (o serie di livelli) di riferimento scelto per la quantificazione dei cambiamenti dei

parametri fisici di interesse (es. SSC e DEP) può essere determinato anche sulla base di livelli di tolleranza (cfr. cap.1, glossario della terminologia e degli acronimi), derivati da specifiche curve "stress-risposta", eventualmente disponibili per i recettori sensibili di interesse individuati in prossimità dell'area di intervento, al fine di correlare la valutazione della significatività degli effetti ad una stima della severità di eventuali impatti sullo specifico recettore.

In Figura 4.4 si riporta uno schema logico per la valutazione della significatività degli effetti indotti sul sistema fisico e per la definizione delle classi di severità degli impatti che potrebbero conseguire sul comparto biologico, in funzione della presenza delle criticità ambientali attese e/o riscontrate (cfr. cap.1, glossario della terminologia e degli acronimi), della loro localizzazione (rispetto al sito di intervento e alle correnti locali), della loro natura e del loro stato ecologico.



Figura 4.4 - Schema logico per la valutazione della significatività degli effetti sul comparto fisico (obiettivo del Manuale) e della severità degli impatti sul comparto biologico in funzione della presenza e dello stato di criticità ambientali e recettori sensibili (es. specie sensibili e habitat protetti). I livelli di riferimento sito-specifici per i parametri di interesse (e i livelli di tolleranza recettore-specifici eventualmente disponibili) sono stabiliti, in relazione allo specifico progetto, prima dell'avvio delle operazioni di movimentazione e possono essere successivamente verificati e/o aggiornati sulla base di ulteriori dati di monitoraggio e giudizio esperto.

In particolare, la Figura 4.4 evidenzia l'importanza di individuare una scala di severità degli impatti sulla base di curve di "stress-risposta" che correlano l'intensità dei cambiamenti indotti sui parametri fisici di interesse ai livelli di tolleranza di specifici recettori sensibili ad essi esposti.

Nel caso in cui non siano disponibili informazioni di letteratura o dati di campo rappresentativi dell'area di studio (nel tempo e nello spazio) per la definizione dei livelli di riferimento (LR) può essere utilizzato, nell'ambito dello studio preliminare, l'Approccio Modellistico Integrato (AMI) per caratterizzare l'intervallo di variabilità dei parametri in gioco ed effettuare un'analisi di variabilità dei risultati finalizzata alla definizione di più valori sito-specifici a crescente significatività.

In particolare, qualora non sia possibile definire i livelli di riferimento sulla base di informazioni di letteratura o dati di monitoraggio, nella fase di modellistica preliminare è auspicabile una stima conservativa di tali valori. Questa può essere raffinata nelle successive fasi modellistiche di dettaglio (PIANC, 2010) anche sulla base delle osservazioni desunte dalla mutua integrazione tra i risultati modellistici e i dati delle attività di monitoraggio condotte nelle diverse fasi di progettazione degli interventi (cfr. cap. 5).

EPA (2016) ha proposto la classificazione riportata schematicamente in Figura 4.5 per descrivere l'estensione spaziale degli effetti indotti dalle attività di movimentazione sul comparto fisico e definire classi di impatto (in funzione della severità e della durata degli impatti) sulla base della previsione degli scostamenti dei valori simulati per i parametri di interesse rispetto ai livelli di riferimento (LR) stabiliti prima dell'avvio delle operazioni di movimentazione. In particolare, dall'involuppo degli effetti registrati per diversi fattori ambientali (es. idrodinamica) ed operativi (es. tipo di draga), viene proposta l'individuazione delle seguenti zone:

- zona di influenza: dove gli effetti dell'evento perturbativo sono distinguibili rispetto alla variabilità naturale osservata in condizioni precedenti all'evento perturbativo (variabilità di *background*); oltre tale zona le variazioni dei parametri di interesse non si discostano significativamente dalla naturale variabilità di *background* e l'entità degli effetti ambientali previsti non è sufficiente a causare impatti sui recettori sensibili presenti;
- zona di impatto moderato: dove le alterazioni della qualità dell'ambiente (es. stato delle comunità bentoniche e degli habitat presenti) rispetto alle condizioni precedenti all'evento perturbativo sono recuperabili dopo un determinato arco temporale dal completamento degli interventi;

- zona di impatto elevato: dove gli impatti previsti sull'ambiente sono considerati irreversibili, ossia non vi è possibilità di ritornare allo stato di qualità dell'ambiente (es. per i popolamenti e gli habitat presenti) rappresentativo delle condizioni precedenti all'evento perturbativo, dopo il completamento degli interventi.

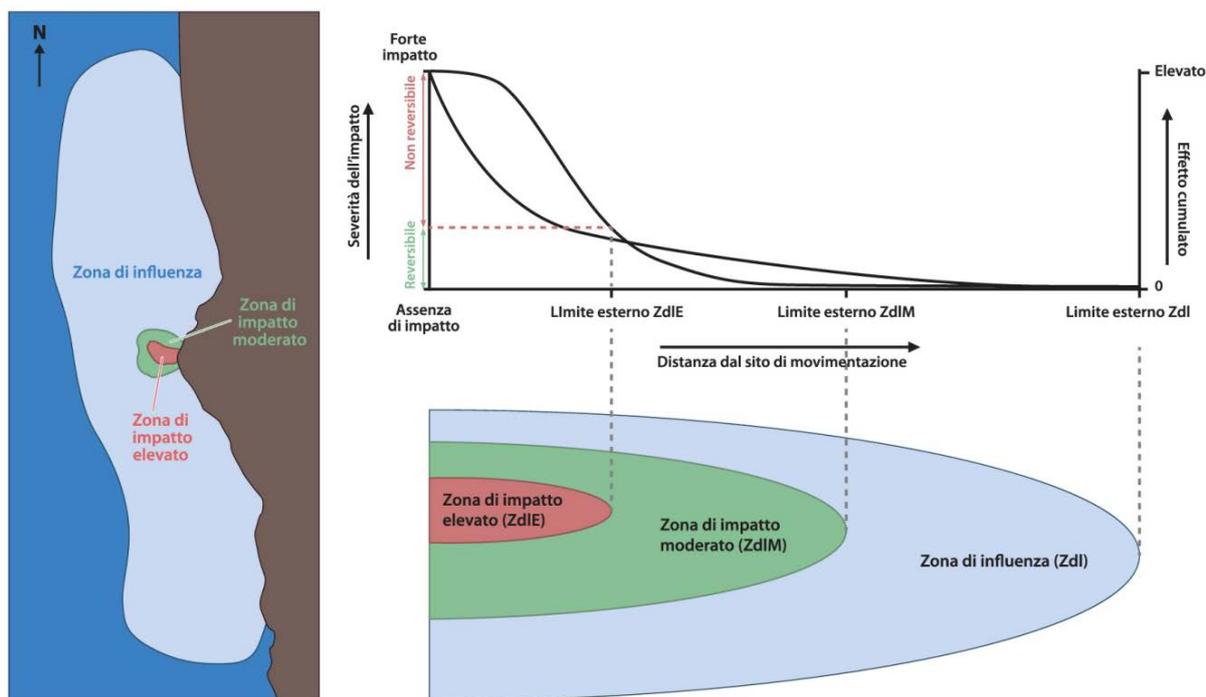


Figura 4.5 - Schema della zonizzazione di un'area in funzione della presenza di una perturbazione. Sono delimitate una zona di influenza, dove gli effetti associati ad una attività di movimentazione sono distinguibili dalla variabilità di background (precedente all'evento perturbativo) e, al crescere della severità dell'impatto, una zona di impatto moderato ed una zona di impatto elevato (adattato da EPA, 2016).

Questo tipo di classificazione suggerisce l'individuazione di un livello (o serie di livelli) di tolleranza, a partire da un approccio del tipo "stress-risposta" per valori a crescente criticità ambientale, in corrispondenza del quale gli effetti indotti dal superamento di un livello (o serie di livelli) di riferimento prestabilito per uno specifico parametro fisico di interesse sono correlabili all'intensità del disturbo (*stress*) in corrispondenza del quale si ha un cambiamento di stato del recettore che comporta un possibile effetto/impatto (effetto accettabile, impatto moderato, impatto elevato).

In merito alla possibile identificazione della zona di influenza si rimanda al successivo par. 4.6.2.

Al fine di individuare i livelli di tolleranza (o sensibilità) per gli incrementi dei parametri di interesse (es. SSC e DEP) risulta rilevante la conoscenza dell'ecologia di specie e *habitat* presenti in prossimità dei siti di intervento e la verifica del loro stato prima dell'avvio delle operazioni di movimentazione.

La valutazione della significatività degli effetti, e quindi la definizione della severità degli impatti, sui recettori sensibili deve necessariamente considerare diversi aspetti delle perturbazioni indotte, quali intensità, durata e frequenza dell'incremento della concentrazione di solidi sospesi e dei tassi di deposizione (es. Clarke & Wilber, 2000; Wilber & Clarke, 2001; Feola *et al.*, 2016; Fraser *et al.*, 2016; Jones *et al.*, 2016; Fisher *et al.*, 2017).

In letteratura (PIANC, 2010) è stato osservato che esposizioni a perturbazioni (*stress*) di differente intensità, durata e frequenza possono provocare effetti (e impatti) molto diversi in relazione alla tipologia ed allo stato dei recettori³⁵ (es. cambiamenti in termini di diversità e/o mortalità per alcune specie).

³⁵ Esposizioni ad elevati incrementi di SSC e DEP di breve durata, ma che si ripetono frequentemente durante l'esecuzione delle attività, possono portare alla mortalità di alcune specie (effetti di breve periodo). Inoltre, incrementi moderati, ma persistenti nel tempo, possono portare alla graduale sostituzione delle specie più sensibili con quelle più tolleranti (effetti di lungo periodo). Per contro, talune specie e *habitat* (es. la *P. Oceanica*) si trovano spesso a coesistere con elevati valori di SSC e DEP deposizione per cause naturali (es. per l'azione di onde, correnti e apporti fluviali).

In Figura 4.6 è illustrata la relazione generale tra l'intensità di una generica perturbazione (*stress*) rispetto ad una condizione indisturbata e per esposizioni di intensità crescente in termini di durata e effetto/impatto su un possibile recettore (PIANC, 2010).

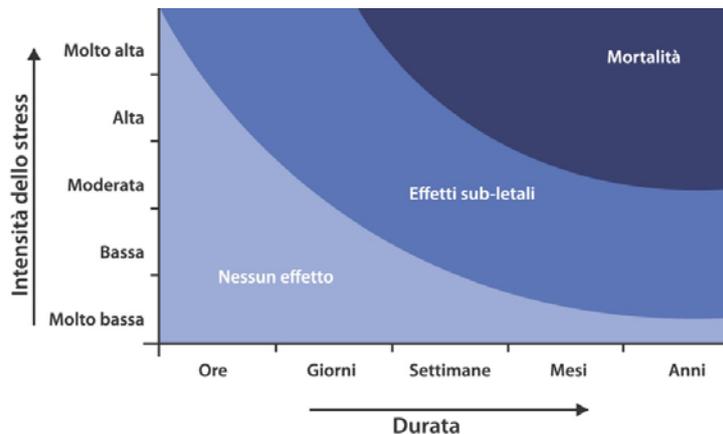


Figura 4.6 - Relazione generale tra crescenti livelli di intensità di una perturbazione (es. aumento di torbidità o dei tassi di sedimentazione), durata e effetto/impatto sul possibile recettore (PIANC, 2010).

L'individuazione delle curve di delimitazione delle zone del diagramma, che associano valori d'intensità e durata della perturbazione ai corrispondenti effetti ambientali sullo specifico recettore, può essere effettuata sulla base di dati sito-specifici, su dati di letteratura o mediante giudizio esperto. Nel caso in cui non siano disponibili informazioni di letteratura o dati di campo rappresentativi dell'area di studio (nel tempo e nello spazio), i LR possono essere eventualmente definiti utilizzando modellistici al fine di effettuare un'analisi degli intervalli di variabilità dei parametri di interesse.

La valutazione della variabilità spaziale dei parametri modellati fornisce elementi a supporto della definizione della localizzazione delle stazioni in corrispondenza delle quali effettuare il monitoraggio funzionale a stabilire/verificare i valori sito-specifici dei parametri di interesse.

Si rimanda ai successivi paragrafi 4.6.2 e 5.3 per maggiori dettagli relativi alla modellazione numerica e alla restituzione dei risultati di tali attività. Per maggiori approfondimenti sull'individuazione di livelli di tolleranza sito-specifici per i diversi recettori ecologici si rimanda a studi di settore (es. PIANC, 2010; Gilmour *et al.*, 2006).

4.6.2 Analisi e sintesi dei risultati

La letteratura di settore evidenzia l'importanza di disporre di mappe che sintetizzino i risultati modellistici di dispersione del sedimento (GBRMPA, 2012). In Feola *et al.* (2016) vengono fornite indicazioni sulle tecniche di sintesi, facilmente standardizzabili e replicabili, per lo studio degli effetti (durante ed al termine delle operazioni di movimentazione) dovuti all'incremento dei livelli di SSC e DEP considerabili significativi non soltanto rispetto ai valori di intensità, ma anche di durata e probabilità di superamento (frequenza) di prestabiliti livelli di riferimento.

Nel seguito si forniscono indicazioni in merito alle tecniche di analisi ed elaborazione dei risultati modellistici ottenuti dagli scenari di modellazione per supportare l'identificazione e una valutazione agevole dell'entità dei potenziali effetti in relazione a intensità, tempo di permanenza e frequenza con cui si verificano gli scostamenti rispetto ai livelli di riferimento individuati nella fase conoscitiva preliminare.

Per la sintesi dei risultati modellistici deve essere definito un numero discreto di punti di controllo omogeneamente distribuiti all'interno del dominio di calcolo, eventualmente collocati a profondità diverse (sia l'area di intervento un bacino semi-chiuso, un tratto di litorale o un'area al largo), in corrispondenza dei quali estrarre le serie temporali dei parametri idrodinamici e di trasporto ottenuti dalle simulazioni modellistiche. La distanza tra i punti deve essere definita in base alla variabilità dei risultati numerici per la specifica area di indagine, ragionevolmente superiore alla dimensione della griglia di calcolo. A titolo di esempio, eventuali variazioni localizzate di batimetria devono essere riprodotte nella griglia di calcolo poiché importanti da un punto di vista idrodinamico, ma non necessariamente rappresentate nelle mappe di sintesi prodotte ad una risoluzione spaziale maggiore.

Per ogni punto di controllo, sono note le serie temporali dei parametri di interesse (es. intensità di corrente, SSC, DEP, ecc.) ottenute da simulazioni numeriche che permettono una caratterizzazione

della variabilità spaziale e temporale dei parametri idrodinamici nonché degli effetti associati alle attività di movimentazione dei sedimenti. Le serie temporali devono essere opportunamente analizzate al fine di produrre indici statistici relativi a specifiche finestre temporali con l'obiettivo di sintetizzare i risultati.

A titolo di esempio, per quanto riguarda l'idrodinamica, per ogni punto di controllo possono essere stimati alcuni parametri, quali velocità media e massima raggiunta dalla corrente. Per quanto riguarda le variazioni in termini di incremento di torbidità indotto dalle attività di movimentazione, è possibile valutare l'intensità media e massima del parametro sull'intero dominio (rispettivamente SSC_{medio} e SSC_{max}).

La Figura 4.7 mostra un esempio in cui, sulla base della definizione di un livello ipotetico di intensità di riferimento (SSC_{LR} pari a 5 mg/l), vengono identificati i diversi superamenti in termini di durata (t_{j_LR}) e intensità media (SSC_{medio,j_LR}). La durata totale degli eventi di superamento (t_{tot_LR}) è data dalla somma delle durate dei singoli eventi (t_{j_LR}), mentre un parametro di frequenza (M_{LR}) è derivato dal numero di eventi di eccedenza per ogni specifico scenario di simulazione (N_i).

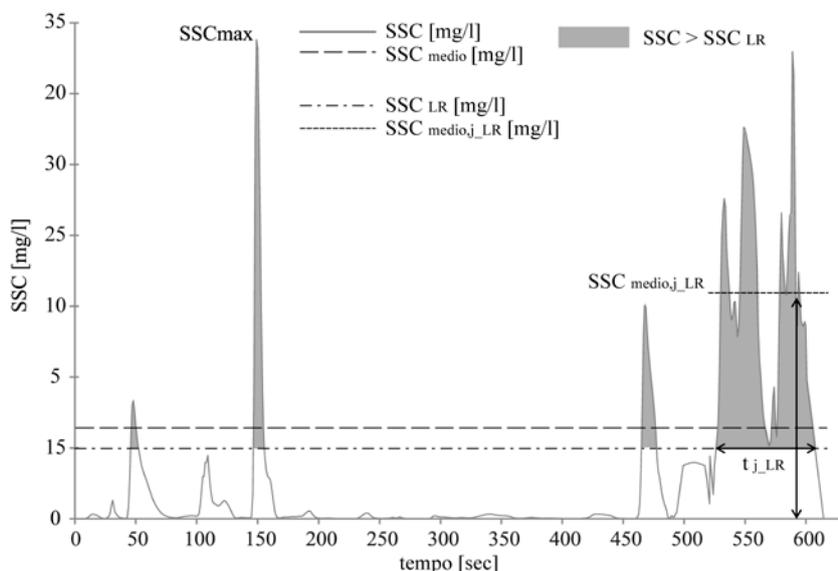


Figura 4.7 - Esempio di una serie temporale di SSC relativa a generici punti di controllo e profondità sulla verticale e ad un generico scenario di simulazione. Valutazione dei valori medi e massimi e identificazione di eventi di eccedenza di livelli di riferimento in termini di intensità (SSC_{medio,j_LR}) e durata (t_{j_LR}), per un livello di riferimento arbitrariamente stabilito pari a 5 mg/l.

Al fine di sintetizzare i risultati ottenuti, il parametro scelto come indicatore degli effetti della movimentazione dei sedimenti può essere restituito su mappe facilmente replicabili per ognuno degli scenari considerati. Se il parametro selezionato è di tipo idrodinamico, sarà possibile identificare, per ciascun scenario sia su base stagionale che annuale, zone a differente regime correntometrico, così come sarà possibile rappresentare la variabilità spaziale della dispersione della nube di torbida in colonna d'acqua (SSC) e della deposizione dei sedimenti al fondo (DEP).

In Figura 4.8 è riportato un esempio di rappresentazione di diversi parametri statistici volti alla sintesi delle variazioni spaziali e temporali associate alla dispersione (es. intensità, SSC_{media} ; durata media di permanenza sopra il livello di riferimento, T_{medio_LR} ; frequenza di eventi di superamento del livello di riferimento, M_{LR}) e deposizione (es. DEP_{max}) del pennacchio di torbida indotto da attività di movimentazione (nel caso specifico attività di dragaggio) per uno specifico scenario di simulazione o per periodi aggregati stagionali o dell'intero anno, valutati a specifiche profondità (al fondo, in superficie).

Per rendere conto dell'effetto combinato di durata e intensità, che non possono singolarmente descrivere in modo esaustivo la significatività dei superamenti dei livelli di riferimento stabiliti, si possono utilizzare diversi approcci metodologici.

Un primo approccio di definizione di significatività degli effetti fisici prevede l'utilizzo di una serie di livelli di riferimento (LR), il superamento dei quali porta all'individuazione di intensità medie (SSC, mg/l) e durate di persistenza. In base a considerazioni biologiche e sull'ecologia di specie sito-specifiche, è possibile correlare tali livelli di riferimento (LR) a livelli di tolleranza specifici ai quali associare classi di impatto caratterizzate da crescenti gradi di severità (cfr. par. 4.6.1).

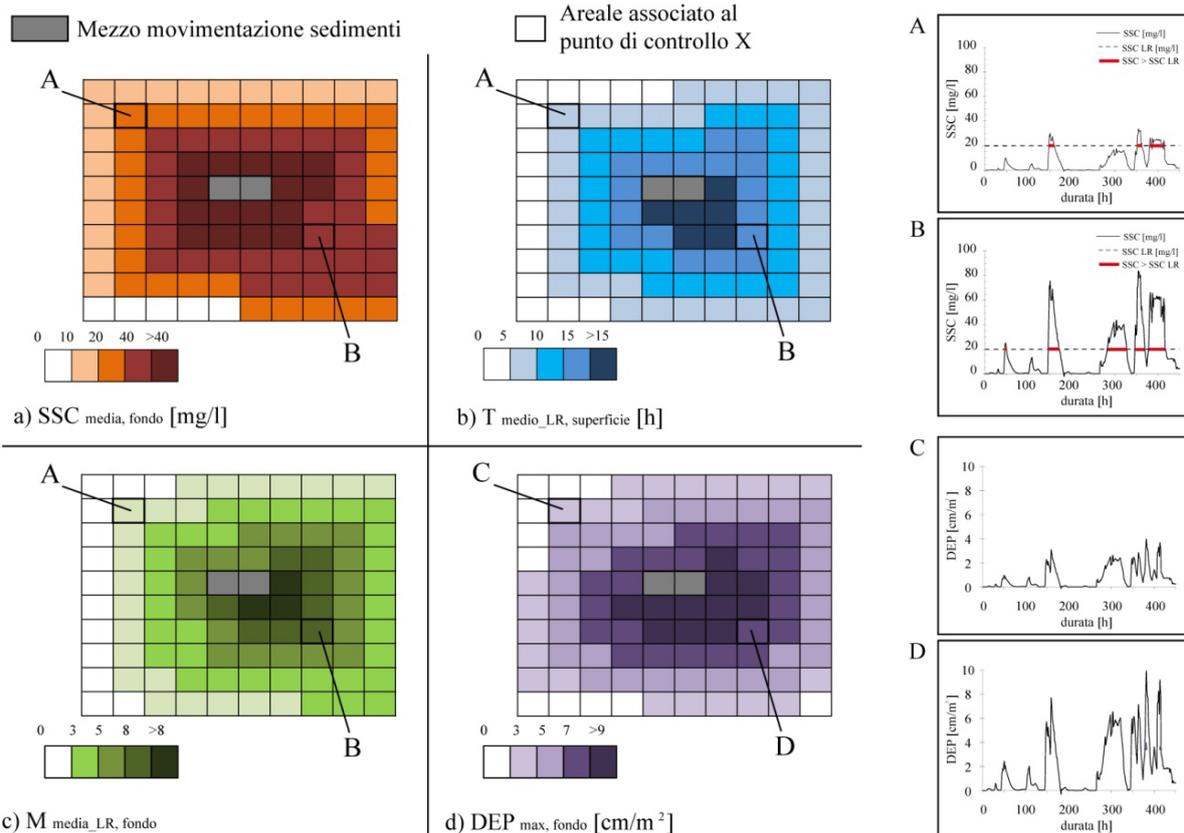


Figura 4.8 - Esempio di mappa di parametri statistici derivati dall'analisi delle serie temporali estratte dal modello (a profondità e per scenari diversi) per la rappresentazione spaziale e temporale del pennacchio di torbida simulata per un intero anno: a) SSC_{media} al fondo per lo scenario N; b) Tempo medio di superamenti, T_{medio_LR} in superficie per le condizioni primaverili; c) Frequenza media di superamenti, M_{media_LR} , al fondo degli scenari distribuiti sull'intero anno; d) DEP_{max} al fondo per i mesi estivi.

In Tabella 4.4 si riportano, a titolo esemplificativo, alcuni livelli indicativi di riferimento per l'intensità (SSC_{LR}) e intervalli di durata crescenti, dalla combinazione dei quali è possibile associare corrispondenti valori di significatività di effetto crescente.

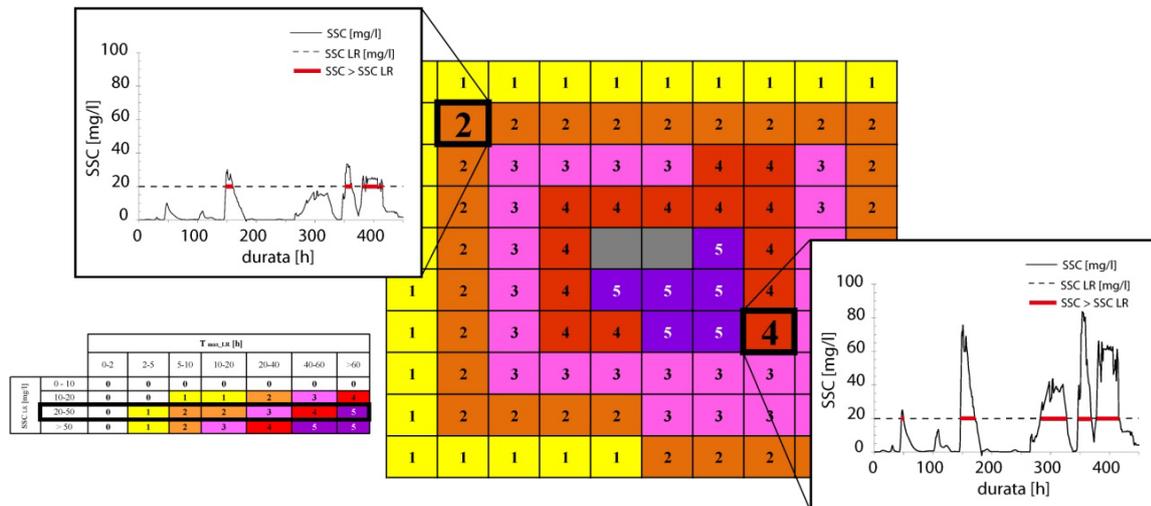
Tabella 4.4 - Esempio di significatività (0 – 5) di effetti associati a crescenti intensità dei livelli di riferimento LR di SSC (in mg/l) e della persistenza degli eventi di superamento. La scelta degli specifici LR può essere fatta in base a considerazioni sito-specifiche e recettore-specifiche. In tal caso dalla definizione di significatività di effetto è possibile arrivare alla corrispondente severità dell'impatto per lo specifico recettore sensibile.

		T_{max_LR} [h]						
		0-2	2-5	5-10	10-20	20-40	40-60	>60
SSC_{LR} [mg/l]	0 - 10	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	0	0	1	1	2	5. 3	6. 4
	20-50	0	1	2	2	3	4	5
	> 50	0	1	2	3	4	5	5

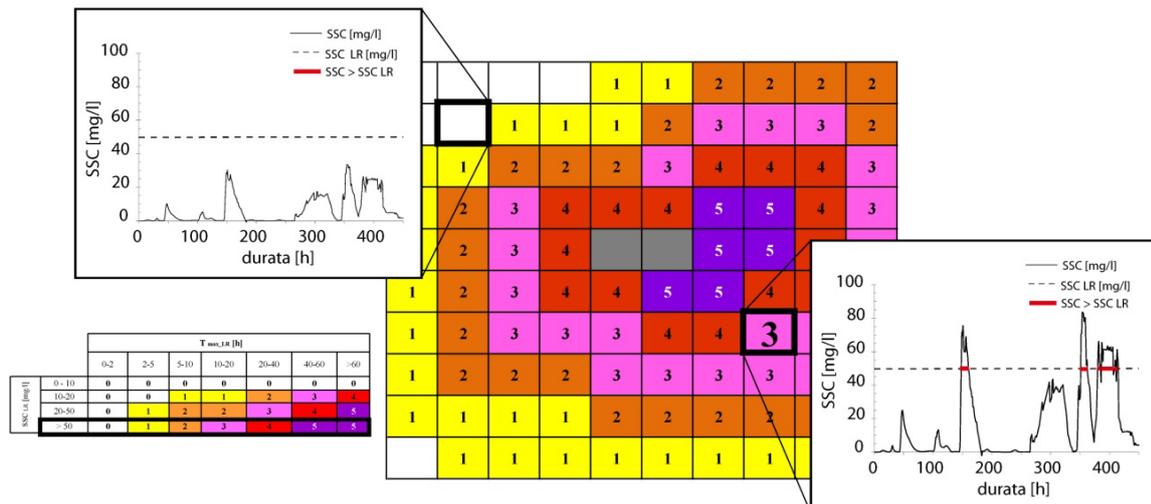
Nell'esempio riportato la durata della perturbazione è intesa come massimo di persistenza ininterrotta dei singoli eventi al di sopra dello specifico SSC_{LR} (T_{max_LR}). La medesima valutazione può essere estesa ad altre coppie di parametri (es. SSC_{max_LR} , T_{medio_LR}) ritenute significative sulla base di valutazioni sito-specifiche e/o recettore-specifiche. È opportuno inserire anche criteri di frequenza di accadimento degli eventi nella assegnazione dei valori di significatività (Wilber & Clarke, 2001).

Vengono prodotte mappe di sintesi per ogni livello di riferimento in termini di intensità (es. SSC_{LR} = 10, 20, 50 mg/l) memorizzando in corrispondenza del singolo punto di controllo il valore di significatività dell'effetto associato alla durata massima di persistenza ininterrotta della concentrazione

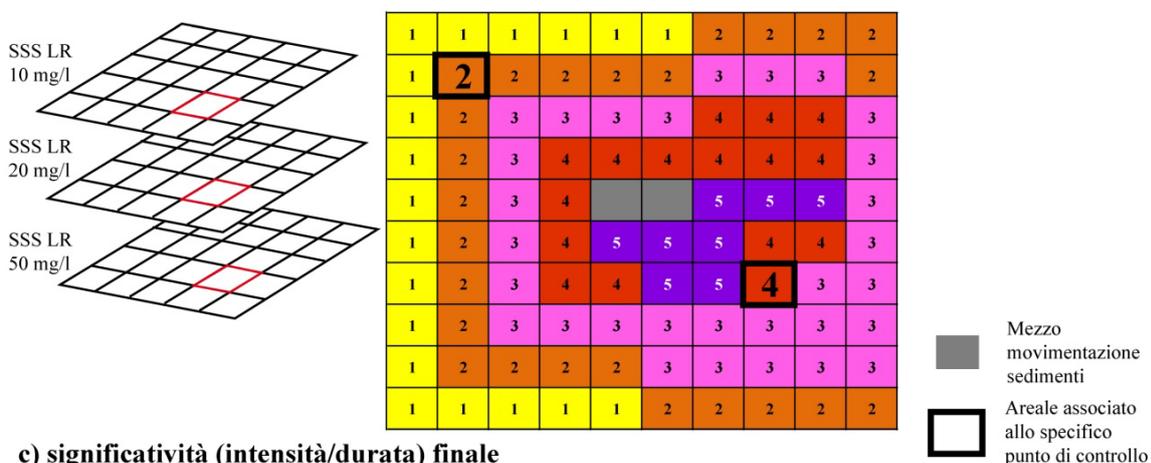
di solidi sospesi sopra lo specifico valore. Dalla sovrapposizione delle mappe si ricava per ogni specifico punto di controllo il massimo valore di significatività registrato (Figura 4.9).



a) significatività (intensità/durata) per persistenza oltre SSC LR = 20 mg/l



b) significatività (intensità/durata) per persistenza oltre SSC LR= 50 mg/l



c) significatività (intensità/durata) finale

Figura 4.9 - Esempio di mappe di significatività di un effetto (intensità/durata) correlato ad eventi di superamento di livelli di riferimento (LR) di SSC crescenti (SSC_{LR} = 10, 20, 50 mg/l). Le classi di significatività sono definite valutando le coppie di intensità e durata della persistenza ininterrotta al di sopra dei singoli LR. La significatività dell'effetto finale è data dalla sovrapposizione delle mappe ottenute per LR crescenti. Sono riportate in termini esemplificativi le mappe per SSC_{LR}: a) 20 mg/l; b) 50 mg/l.

Il formato a “mappa”, inoltre, restituisce informazioni fruibili e facilmente sovrapponibili ad altre informazioni ambientali, quali la presenza e l'estensione di recettori sensibili (es. *habitat*, allevamenti di mitili, praterie di fanerogame, etc.).

Un secondo approccio prevede l'utilizzo di un unico indice, il cosiddetto “*SSC number*” (SSC_{num} ; mg s/l), calcolato come l'area integrale dei superamenti del valore di riferimento (Erm & Soomere, 2006; Rapaglia *et al.*, 2011, Feola *et al.* 2016). Tale parametro integra intensità, durata e frequenza dei superamenti, poiché può essere approssimato per ogni scenario di simulazione e per ogni punto di controllo, come la somma dei prodotti dell'intensità media degli eventi ($j=1..M_i$) di superamento del livello di riferimento e delle relative durate:

$$SSC_{num,i} = \sum_{j=1}^{M_i} SSC_{medio_VR,j} \cdot t_j \quad (4.1)$$

Un'ulteriore possibile analisi dei risultati numerici consiste nella definizione del semi-variogramma (Matheron, 1963) adatto a quantificare la variabilità spaziale e temporale degli effetti associati alla dispersione del pennacchio di torbida in funzione della distanza dall'area in cui la movimentazione ha luogo. In particolare, è possibile definire la misura della variabilità spaziale $\gamma(h)$ del generico parametro Z :

$$\gamma(\vec{s}, \vec{h}) = \frac{1}{2} Var[Z(\vec{s} + \vec{h}) - Z(\vec{s})] \quad (4.2)$$

che sintetizza la variabilità spaziale tramite la stima della varianza del parametro Z (es. SSC_{max} , SSC_{num}), calcolato in tutte le coppie di punti (di controllo) posti tra loro a distanza pari a $|h|$.

È necessario scegliere l'opportuno modello di variogramma (es. lineare, esponenziale, sferico, ecc.) che meglio interpola i punti del variogramma empirico (Figura 4.10).

Molti modelli di semi-variogramma sono definiti dai parametri:

- *Nugget*: microscala di variazione o errore di misura, $\gamma(0)$;
- *Sill*: varianza del campo stocastico per elevate distanze;
- *Range*: distanza oltre la quale i valori della variabile campionata in corrispondenza di due punti casuali non risultano più correlati.

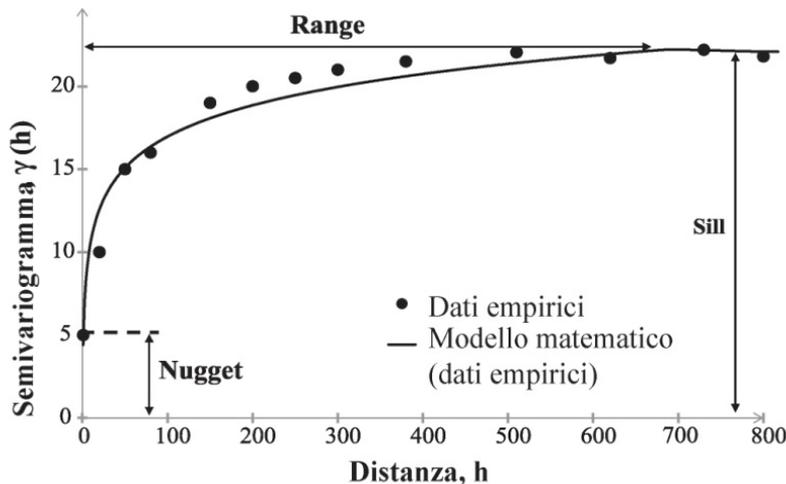


Figura 4.10 - Semi-variogramma ($\gamma(h)$) empirico (punti) e modello matematico (curva) che meglio interpola i dati e suoi parametri caratteristici (*Nugget*, *Sill*, *Range*).

Con gli strumenti geostatistici attualmente disponibili è possibile scegliere il più opportuno modello di variogramma (es. sferico, esponenziale, lineare, gaussiano) includendo poi l'eventuale anisotropia del parametro considerato (direzionalità nella distribuzione spaziale del dato). L'analisi del variogramma permette la misura diretta della scala spaziale dei fenomeni di trasporto conseguenti alla generazione del pennacchio di torbida e può essere utilizzato per comparare quantitativamente l'estensione delle aree influenzate dalle attività di movimentazione (zona di influenza, cfr. par. 4.6.1) correlate a differenti scenari di simulazione.

In Figura 4.11 è riportata, a titolo esemplificativo, la sovrapposizione di molteplici semi-variogrammi del parametro SSC_{num} nel caso di operazioni di escavo effettuate con tecniche di dragaggio diverse (per semplicità riportate come meccanica e idraulica). L'estensione spaziale della correlazione statistica è la distanza a cui il modello del semi-variogramma raggiunge valori costanti. Per distanze superiori a questa estensione la variabilità del parametro considerato Z non è più statisticamente significativa. Il semi-variogramma può pertanto dare una misura quantitativa della scala spaziale degli effetti "non trascurabili" legati alla dispersione del pennacchio. Se si considera a livello esemplificativo l'utilizzo delle due tecniche operative (draga meccanica e draga idraulica) nelle diverse stagioni, l'estensione spaziale della variabilità di SSC_{num} può essere identificata intorno a 2250 m (compresi tra 2000 e 2400) nel caso di utilizzo di draga meccanica e circa 1250 m per di draga idraulica.

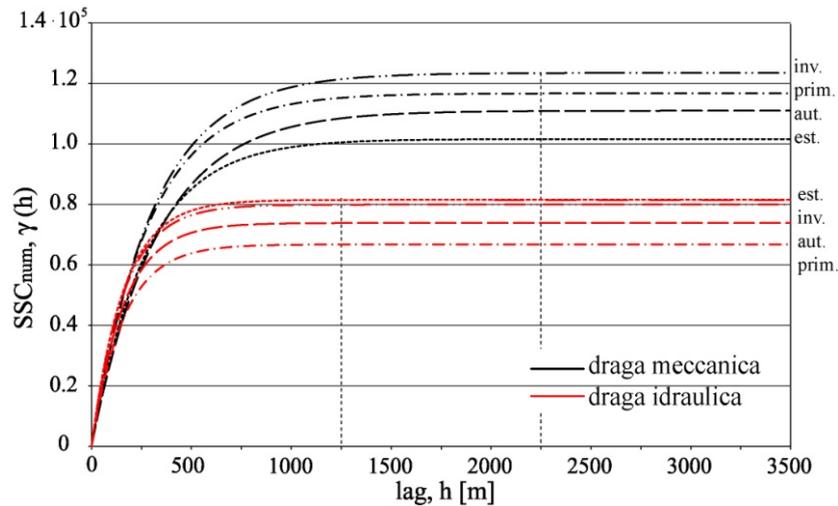


Figura 4.11 - Esempio di semi-variogrammi ottenuti per i valori del parametro SSC_{num} estratti in corrispondenza di coppie di punti posti a distanza h e mediati nel tempo per le diverse stagioni, dalle risultanze della dispersione del pennacchio di torbida prodotto da due differenti tecnologie di dragaggio (qui per semplicità riportate come meccanica e idraulica) e aggregati per stagione.

L'utilizzo del semi-variogramma fornisce un'ulteriore informazione legata al valore del limite superiore di ogni curva. Esso rappresenta la stima della varianza (alterazione rispetto al valore indisturbato) della variabile stocastica (Z) e l'intensità fisica delle alterazioni rispetto al valore indisturbato. Nell'esempio riportato in Figura 4.11 si osserva che le condizioni più gravose sono raggiunte in inverno e primavera per movimentazioni eseguite con draga meccanica.

5. RELAZIONE TRA MODELLISTICA E MONITORAGGIO AMBIENTALE

Un pre-requisito basilare per il corretto utilizzo dei modelli matematici a supporto degli studi ambientali nelle diverse fasi di progettazione e gestione degli interventi che comprendono la movimentazione dei sedimenti è la mutua-interazione con il monitoraggio ambientale. I modelli, infatti, sono di ausilio per la corretta pianificazione, ed eventuale revisione in corso d'opera, di reti di monitoraggio ambientali "sito-specifiche", supportando sia l'individuazione della corretta area da monitorare (cfr. par. 4.6.1 e 4.6.2) sia l'ottimizzazione della strategia di monitoraggio in termini di numerosità, posizionamento delle stazioni e frequenze di campionamento (ad esempio, in funzione di valutazioni idrodinamiche e morfologiche). Il monitoraggio, d'altro canto, fornisce dati importanti e necessari all'implementazione, calibrazione e validazione dei modelli numerici, oltre che alla verifica dell'attendibilità delle semplificazioni modellistiche attuate e degli effetti previsti in fase di valutazione della fattibilità degli interventi.

5.1. Considerazioni generali

Il monitoraggio ambientale può essere svolto con finalità differenti nelle diverse fasi progettuali di un intervento (pianificazione, esecuzione e verifica).

In linea con quanto riportato dal *Central Dredging Association* (CEDA, 2015a) e dall'*International Association of Dredging Companies* (IADC), dalle convenzioni internazionali in materia (IMO London Convention 1972 e London Protocol 1996; UNEP- MAP Dumping Protocol 1995) e nel rispetto di quanto previsto nel D.lgs. 152/2006, nel D.M. 172/2016 e nel D.M. 173/2016, il monitoraggio, in funzione delle diverse fasi di progetto, viene denominato come:

- monitoraggio *ante operam* (o *baseline monitoring*), attuato nella fase di caratterizzazione preliminare per costituire una base di riferimento per i parametri ambientali di interesse prima dell'avvio dei lavori, in condizioni indisturbate (o comunque 'disturbate' solo da fattori estranei ai lavori stessi);
- monitoraggio in corso d'opera eseguito durante le fasi di cantiere per confrontare gli scostamenti indotti dalle operazioni di movimentazione sui parametri di interesse simulati e/o monitorati nella fase *ante operam*;
- monitoraggio *post operam*, eseguito dopo il completamento degli interventi, fino alla verifica del ripristino delle condizioni ambientali o del raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio stabile (sulla base delle indicazioni fornite dagli Enti di Controllo).

In CEDA (2015a) il monitoraggio finalizzato a confrontare gli scostamenti indotti dalle operazioni di movimentazione sui parametri di interesse simulati e/o monitorati nella fase *ante operam* prende il nome di monitoraggio di sorveglianza (*surveillance monitoring*). Nell'ambito della *London Convention* e del *London Protocol* è definito il monitoraggio sul campo (*field monitoring*), eseguito al fine di verificare l'ipotesi di impatto, ovvero valutare se le assunzioni alla base della scelta del sito di destinazione dei materiali di dragaggio sono corrette in termini di protezione dell'ambiente marino e della salute umana. Tale attività di monitoraggio deve essere attuata comprendendo la fase *ante operam* (il citato *baseline monitoring*), in corso d'opera e *post operam*.

Viene denominato monitoraggio di conformità (o *compliance monitoring*) quello finalizzato alla verifica dell'adeguamento alle prescrizioni e della compatibilità ambientale delle operazioni durante l'esecuzione (in corso d'opera) e dopo il completamento degli interventi (*post operam*).

In Figura 5.1 si riporta uno schema delle principali interazioni tra le attività modellistiche e le attività di monitoraggio nelle diverse fasi di progettazione e gestione delle operazioni di movimentazione dei sedimenti.

Si specifica che lo schema riporta la totalità delle interazioni tra le attività di monitoraggio e modellistiche da eseguire qualora gli studi condotti nelle fasi iniziali della progettazione (fase *ante operam*), nell'ambito della fase conoscitiva e della fase modellistica preliminare, per verificare la fattibilità/compatibilità ambientale degli interventi evidenzino criticità ambientali che richiedono di essere investigate con maggiore dettaglio.

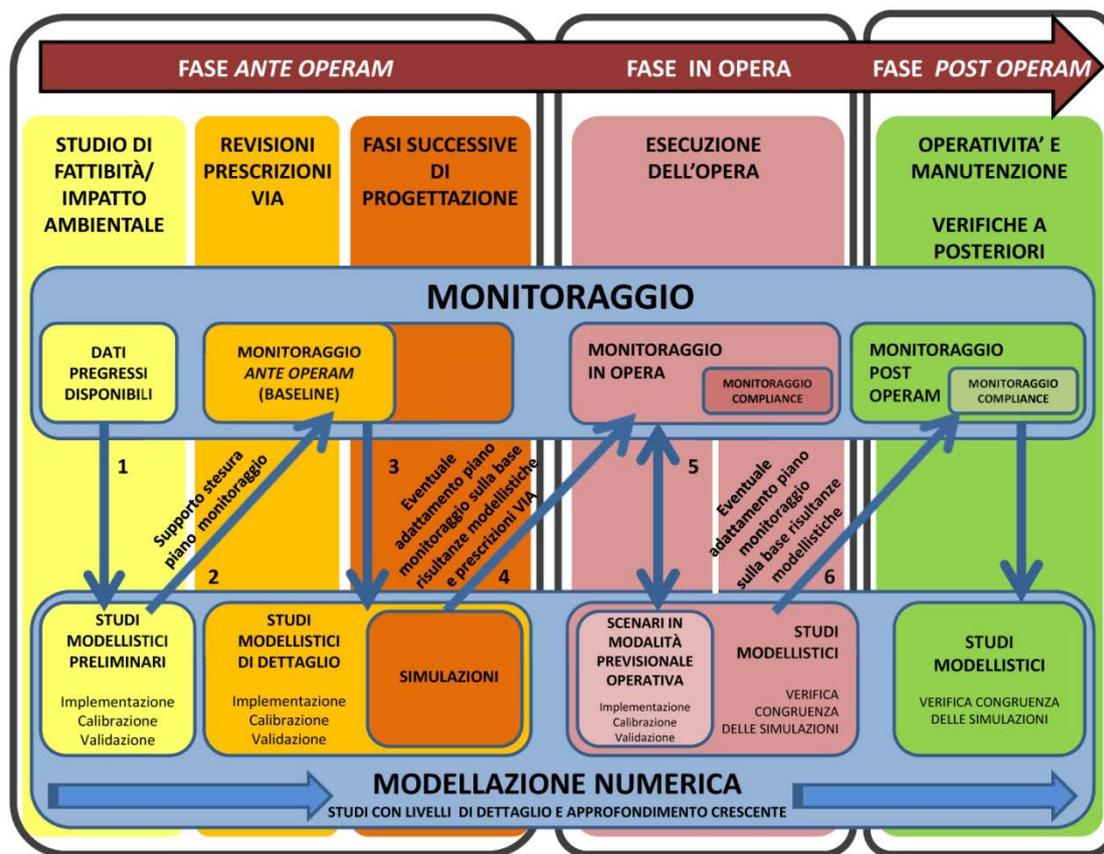


Figura 5.1 - Schema di mutua-interazione tra attività di monitoraggio e attività modellistica nelle diverse fasi di progettazione, esecuzione e gestione delle operazioni di movimentazione.

Considerando le molteplici finalità, nel dettaglio, il monitoraggio ambientale può essere svolto al fine di:

- supportare la definizione degli scenari di modellazione per condizioni indisturbate e per diverse ipotesi progettuali selezionate al fine di valutare la fattibilità degli interventi (nelle diverse fasi di progettazione e degli studi di Valutazione di Impatto Ambientale condotti nell'*ante operam*);
- verificare la conformità del progetto alle normative di settore e/o a eventuali prescrizioni (nelle diverse fasi di progettazione e degli studi di Valutazione di Impatto Ambientale della fase *ante operam*);
- individuare/correggere la corretta disposizione delle stazioni di monitoraggio 'di controllo', in aree ipotizzabili come non influenzate dai lavori, per i parametri ambientali di interesse (nelle diverse fasi *ante operam*, in corso d'opera e *post operam*);
- individuare e quantificare i cambiamenti prodotti dalle operazioni di movimentazione rispetto alla condizione indisturbata (o precedentemente alterata), e fornire elementi utili per la tempestiva introduzione e per la verifica dell'efficacia delle misure di mitigazione eventualmente introdotte (nelle fasi in corso d'opera);
- calibrare e validare i modelli numerici implementati per la previsione degli effetti, per la verifica a posteriori delle ipotesi modellistiche adottate e la verifica/valutazione dei risultati modellistici (nelle diverse fasi *ante operam*, in corso d'opera e *post operam*);
- acquisire misure in prossimità dei mezzi di lavoro al fine di contribuire all'aggiornamento dei *data-set* utilizzati per derivare le formulazioni esistenti per la stima del termine sorgente ed ampliarne gli intervalli di validità (in corso d'opera)³⁶.

³⁶ Sebbene tale finalità non sia strettamente legata all'intervento di movimentazione, mettere a disposizione nuovi dati di SSC misurati in prossimità dei mezzi di lavoro è importante per il miglioramento delle formulazioni esistenti per la stima del termine sorgente oltre che per la calibrazione dei modelli in corso d'opera.

Lo schema di Figura 5.1 mette in evidenza come, sulla base delle risultanze del monitoraggio e delle analisi modellistiche condotte nelle diverse fasi di progettazione, esecuzione e gestione degli interventi, sia possibile approfondire la comprensione del sistema, le sue risposte alle pressioni indotte dall'esecuzione degli interventi e, di conseguenza, apportare modifiche alle scelte progettuali effettuate.

D'altro canto, anche la crescente accuratezza delle informazioni disponibili in fase di esecuzione del progetto (es. maggiori dettagli su modalità tecniche e operative, cronoprogramma, produttività, entità della movimentazione) può fornire elementi utili alla revisione del piano di monitoraggio. Tale approccio di gestione prende il nome di *Adaptive Management* (da CEDA, 2015b, Figura 5.2).



- *Pianificazione*: definizione degli obiettivi di progetto e valutazione delle possibili alternative in base ai risultati attesi e ai vincoli ambientali;
- *Progettazione*: identificazione di una strategia flessibile per il raggiungimento degli obiettivi;
- *Implementazione*: realizzazione della strategia;
- *Monitoraggio*: verifica dei risultati conseguiti;
- *Valutazione*: interpretazione dei risultati ottenuti e confronto con i risultati attesi;
- *Adattamento*: riadattamento, se necessario, delle attività per il raggiungimento degli obiettivi.

Figura 5.2 - Approccio di gestione adattativa (*adaptive management*) nei progetti di dragaggio (adattato da CEDA, 2015b).

Nei successivi paragrafi vengono descritte le possibili funzioni del monitoraggio a supporto della modellistica (cfr. par. 5.2, link 1, 3, 5 in Figura 5.1) e viceversa (cfr. par. 5.3, link 2, 4, 6 in Figura 5.1).

5.1.1 Processo di condivisione tra proponente e Autorità Competenti

Le attività di monitoraggio sono generalmente finalizzate al controllo di variabili ambientali (chimico-fisiche e biologiche) opportunamente selezionate per l'area di interesse, perché in grado di fornire informazioni utili per la quantificazione e la valutazione dei cambiamenti indotti sull'ecosistema dalle operazioni di movimentazione dei sedimenti.

In generale, il proponente ha la responsabilità di assicurare che il rilascio di sedimenti in colonna d'acqua (*spill*) resti entro certi limiti (prestabiliti o esistenti in normativa), nello spazio e nel tempo, in relazione alle peculiarità e agli obiettivi ambientali e alle diverse finestre temporali (es. per cui sono previsti eventi avversi). Come precedentemente descritto (cfr. par. 4.6), questi limiti dovrebbero essere definiti preliminarmente all'avvio delle attività attraverso il supporto di modelli matematici.

In linea teorica, il solo rispetto dei criteri operativi selezionati per non superare i limiti considerati ammissibili nel rilascio dei sedimenti in colonna d'acqua può essere sufficiente per garantire che gli impatti indotti dalle operazioni siano mantenuti entro livelli accettabili. Tuttavia, a causa dell'imprevedibilità della variabilità naturale del regime idrodinamico e meteorologico nelle aree di intervento e di possibili anomalie/imprevisti riscontrabili in corso d'opera, è necessario monitorare lo stato di qualità dell'ambiente marino-costiero durante l'intera durata delle operazioni di movimentazione. Pertanto, sono generalmente impegnate molte risorse per la pianificazione di attività di monitoraggio, al fine di assicurare che i livelli di qualità/esposizione per le variabili di interesse si mantengano entro i livelli di riferimento prestabiliti (o esistenti in normativa) o che, qualora il monitoraggio evidenziasse criticità ambientali in termini di mancato rispetto degli stessi, siano

tempestivamente intraprese specifiche azioni correttive e/o di mitigazione sulle modalità operative selezionate (es. Eisma, 2006; CEDA/IADC, 2018).

In questo contesto è auspicabile programmare un processo di condivisione tra Proponente e Autorità Competente in merito alle attività modellistiche e di monitoraggio da prevedere nelle diverse fasi di progettazione ed esecuzione degli interventi. In particolare, l'interazione tra i modelli e i risultati del monitoraggio (sia prima della conclusione degli studi specialistici sia in corso d'opera) dovrebbe essere funzionale all'ottimizzazione della progettazione e della gestione degli interventi e consentire di prescrivere per tempo le necessarie modifiche e/o restrizioni operative.

Il processo di condivisione e interazione dovrebbe includere (Figura 5.3, Eisma, 2006):

- la valutazione e l'approvazione delle tecniche e del programma dei lavori prima dell'avvio delle attività;
- la possibile definizione e applicazione, in via precauzionale, di livelli di riferimento sito-specifici, eventualmente rivedibili durante il processo di condivisione programmato;
- la pianificazione e la verifica tempestiva della rispondenza ambientale delle operazioni.

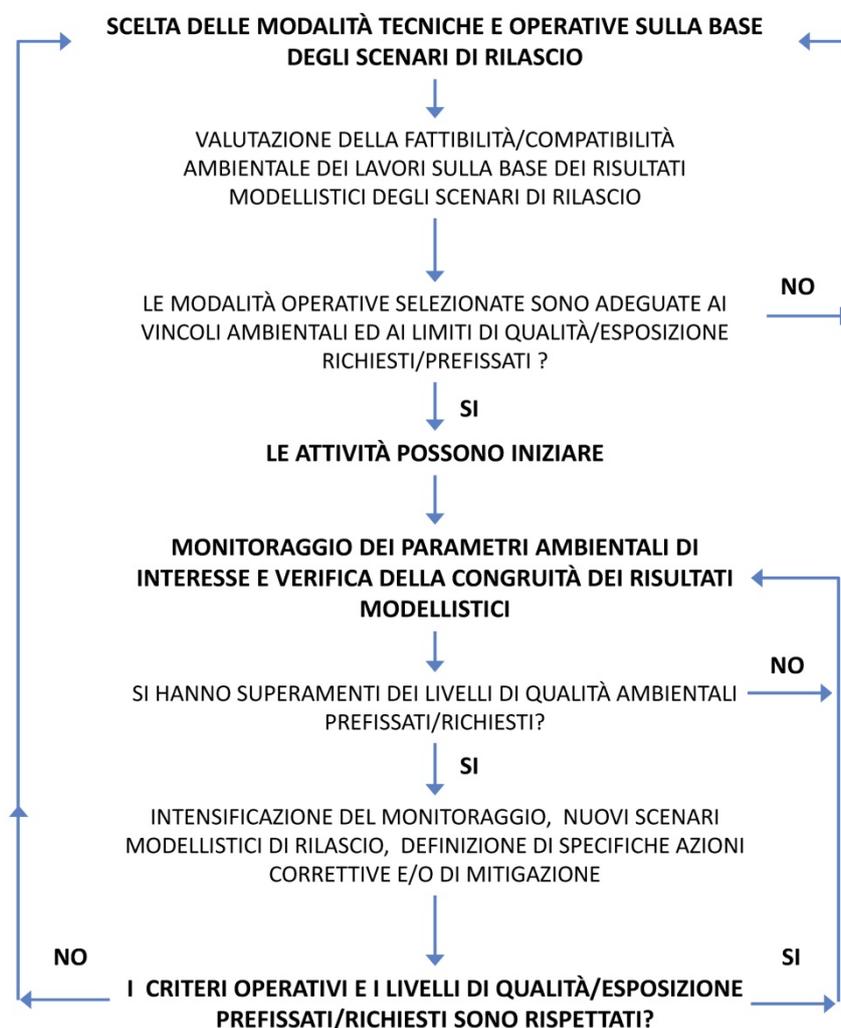


Figura 5.4 - Schema delle principali interazioni tra attività di monitoraggio e modellistiche (modificato da Eisma 2006).

5.2. Il monitoraggio a supporto della modellistica

La corretta applicazione dei modelli necessita di dati di campo rilevati nell'ambito di studi pregressi e attività di monitoraggio generalmente previste prima, durante e dopo l'esecuzione degli interventi che prevedono movimentazione di sedimenti.

5.2.1 Dati di campo a supporto della modellistica

5.2.1.1 Dati sedimentologici, batimetrici e descrittivi del sito

Ai fini della tutela ambientale, in caso di movimentazione la normativa vigente (D.M. 7 novembre 2008 e ss.mm.ii. e D.M. 173/2016) richiede di eseguire indagini chimico-fisiche, microbiologiche ed ecotossicologiche sul comparto sedimenti, nonché indagini geo-morfo-batimetriche dei fondali, per stabilire sia lo spessore e tipologia del sedimento da rimuovere sia il livello dei contaminanti eventualmente presenti e della tossicità ad essi associata.

Le caratteristiche granulometriche dei sedimenti dell'area di intervento sono fondamentali nella pianificazione delle operazioni di movimentazione perché danno informazioni importanti circa l'ambiente di deposizione e i parametri sedimentologici che ne governano le dinamiche di sedimentazione. Anche i dati acquisiti mediante il posizionamento di trappole sedimentarie (deposimetri), inoltre, rivestono un ruolo cruciale per la calibrazione/validazione dei modelli di trasporto qualora vi sia la necessità di un'analisi accurata dei tassi di deposizione dei sedimenti.

Il dato batimetrico delle aree di intervento è essenziale per tutte le tipologie di modelli di idrodinamica e trasporto con soluzione numerica descritti precedentemente (cfr. Cap. 3), nonché per disporre di rilievi di precisione in fase progettuale e di collaudo degli interventi.

Tali dati possono essere ricavati da carte nautiche, da indagini precedentemente effettuate per la gestione del territorio (es. rilievi per ripascimenti o per la realizzazione di nuove strutture), o altro.

Nel caso di aree costiere litoranee, qualora la batimetria non descriva dettagliatamente il tratto di costa fino alla riva, è possibile ricavare una linea di riva di dettaglio da ortofoto, immagini satellitari o rilievi di campo. In tal modo è possibile interpolare i dati di profondità dalla batimetria più vicina alla riva disponibile (almeno la -5 m in caso di mari e laghi) e la linea di riva. È evidente che tale operazione va eseguita utilizzando dati batimetrici e rilievi della linea di riva quanto più recenti e relativi a periodi temporali vicini tra loro.

L'implementazione di studi modellistici a media/larga scala richiede la disponibilità di *set* di dati batimetrici omogenei ed in grado di garantire un'ampia copertura spaziale (cfr. par. 5.2.2 per i dettagli sui *database* liberamente accessibili).

Per l'applicazione di modelli a piccola scala, utili per gli studi che rientrano nelle finalità del presente Manuale, e qualora vi sia la necessità di un'analisi accurata dei processi idrodinamici e dei fenomeni della generazione e del trasporto dei sedimenti sospesi vi è la necessità di dataset di dettaglio. Gli strumenti generalmente utilizzati per la ricostruzione di batimetrie sono ecoscandagli tipo *Singlebeam* o *Multibeam* e dati da laser scanner tipo *LiDAR*. La tecnologia *Multibeam* permette di rilevare i fondali marini con risoluzione anche di pochi centimetri, sebbene non sia adatta ad operare su profondità inferiori ai 10 m, dove, invece, possono essere utilizzati *Singlebeam* o *Multibeam* interferometrici. I primi rilevano il fondale solo lungo dei transetti, perdendo però parte della risoluzione spaziale, i secondi invece sono un adeguamento della tecnologia *Multibeam* per rilievi in acque basse. La tecnologia *LiDAR*, invece, è basata sulla riflessione da parte del fondale di impulsi laser. Tale caratteristica implica che la profondità massima rilevabile con tale strumento dipenda dalla torbidità dell'acqua e comunque non può essere estesa oltre profondità di circa 50 m. Similmente al *Multibeam* produce campi spaziali ad altissima risoluzione, sebbene necessiti di misure *in situ* per una calibrazione delle misure ed una corretta elaborazione della batimetria.

È, infatti, necessario fornire in ingresso ai modelli il valore della profondità all'interno del dominio computazionale in ogni punto di griglia ed è essenziale che la risoluzione del dato batimetrico sia sufficientemente rappresentativa rispetto alla variabilità del fondale in funzione della risoluzione utilizzata. Qualora il fondale marino in una certa area, ad esempio di largo, abbia un limitato gradiente spaziale sono sufficienti dati batimetrici a risoluzione idonea a rappresentare la variabilità naturale dei fondali, a prescindere dalla risoluzione della griglia utilizzata.

Infine, è utile disporre anche della conformazione e della posizione di tutte le infrastrutture (porti, opere di difesa, ecc.) presenti. Tali opere, infatti, interagiscono con l'idrodinamica e quindi con i processi di trasporto dei sedimenti sospesi (e dei contaminanti se presenti) e vanno adeguatamente inserite all'interno del dominio computazionale.

5.2.1.2 *Dati meteo-marini e idrodinamici*

- *Onde*

Nel caso in cui il modello adottato sia in grado di gestire direttamente la propagazione del moto ondoso e i suoi effetti, si deve fornire una stima del campo di moto ondoso in ingresso ai bordi del dominio computazionale. L'informazione sul campo di moto ondoso di largo in un punto è generalmente rappresentativa delle condizioni di area vasta. Considerando le dimensioni tipiche delle applicazioni considerate, ciò significa che l'informazione in un punto di largo può essere sufficiente a caratterizzare le condizioni di largo per l'intero dominio computazionale. Nei casi di vicinanza alla costa, o di sensibili effetti di schermatura dovuti alla presenza di promontori, isole o infrastrutture, è necessario, invece, caratterizzare il moto ondoso in maniera più dettagliata, o tramite un modello matematico che parte dalle condizioni di largo o da un sistema di misure adeguato.

La misurazione dei parametri relativi al moto ondoso può essere eseguita tramite radar costieri (prevalentemente radar in banda X), satelliti (prevalentemente sensori altimetrici e SAR, ma anche scatterometri radar), ADCP, sensori di pressione o boe ondometriche. Radar e Satelliti possono produrre campi di moto ondoso su aree marine estese. In particolare, i dati radar sono caratterizzati da un'alta risoluzione sia spaziale che temporale, mentre, quelli satellitari da risoluzioni più basse e una maggiore estensione della copertura spaziale (sebbene siano poco affidabili vicino alla costa). ADCP, sensori di pressione e boe ondometriche producono invece dati puntuali, comunque generalmente sufficienti, specialmente in mare aperto, a caratterizzare il moto ondoso in una vasta area. Al fine di rappresentare correttamente il fenomeno, le serie storiche devono avere una discretizzazione temporale non superiore alle 6 ore.

- *Vento*

Sebbene siano di primaria importanza, i dati di vento risultano spesso complessi da trattare. Infatti, assai raramente si dispone di misure di vento sul corpo idrico e generalmente i modelli numerici per la meteorologia tendono a sottostimare l'intensità del campo di vento in mare, in particolare nelle vicinanze della costa. Inoltre a differenza del campo di onde e correnti, il campo di vento non è mai risolto dal modello idrodinamico, pertanto, non ci si può limitare a fornire le condizioni al contorno ma, sono necessari valori di intensità e direzione del vento all'interno dell'intero dominio computazionale.

Il dato cui si fa riferimento nei modelli numerici è quello del vento a 10 m s.l.m. Similmente al caso della variabilità dei dati di onda, il dato relativo al campo di vento può essere rappresentativo di aree vaste, anche se ciò non può essere considerato valido nel caso in cui siano presenti caratteristiche morfologiche (es. presenza di promontori) in grado di modificare a scala locale il campo di vento.

Gli strumenti utilizzabili per tali misurazioni sono satelliti (prevalentemente scatterometri radar ma anche sensori altimetrici e SAR), radar (radar in banda X) e anemometri (di varie tipologie).

- *Livello marino*

Il valore del livello marino è influenzato da forzanti astronomiche, venti e variazioni di pressione atmosferica (es. Pasquali *et al.*, 2015). Nell'ambito di bacini chiusi o semi-chiusi possono, inoltre, instaurarsi processi di oscillazione (sesse) con periodi ed effetti assimilabili a quelli delle maree astronomiche. In prossimità delle coste il livello marino è, inoltre, influenzato dal sovrizzo indotto dalla presenza di moto ondoso.

Il livello del mare è un parametro sostanzialmente uniforme per ampie aree. Non è generalmente necessario, pertanto, per aree delle dimensioni tipiche di quelle utilizzate negli studi numerici che riguardano processi di movimentazione di sedimenti, acquisirne il valore in maniera spazializzata.

Una caratterizzazione spaziale risulta necessaria nel caso di aree caratterizzate da significative variazioni spaziali e temporali dei livelli dovute alla propagazione di marea, come nelle lagune che presentano un'elevata complessità morfologica, o agli effetti del vento su ampie superfici libere.

Per le aree assimilabili a bacini semichiusi se il dominio computazionale include l'intero bacino è importante che il dato di livello marino provenga da un punto di misura sufficientemente rappresentativo del livello presente nei pressi delle bocche di comunicazione del bacino con il mare aperto. Se il dominio computazionale rappresenta solo una parte del bacino stesso, allora è necessario che il punto di misura sia interno al bacino e vicino ai bordi del dominio computazionale. La frequenza temporale con cui viene acquisito il dato deve essere rappresentativa della variabilità del fenomeno che è su scala diurna o semidiurna per le maree, e dell'ordine di qualche ora per i fenomeni relativi a

storm surge e *set up* da moto ondoso, con un conseguente ordine di grandezza dell'ora per gli intervalli temporali tra le misure.

Gli strumenti utilizzabili per la misura del livello marino sono satelliti (sensori altimetrici radar) e mareografi (ve ne sono di varie tipologie, meccanici, a ultrasuoni, radar, ecc.).

- *Correnti*

Le correnti possono essere indotte da diverse forzanti (vento, onde, marea, ecc) e caratterizzate da diverse dimensioni di scala. A seconda delle dimensioni del dominio computazionale, alcuni tipi di corrente potranno essere inseriti come forzante nel processo di calcolo, includendo la causa generatrice (es. vento, onde) nella formulazione del modello, mentre altri dovranno essere simulati come forzanti esterne (es. circolazione termalina a livello di bacino, maree, sesse, ecc.).

Nel primo caso non è necessario disporre di informazioni specifiche di campo rispetto al dato di corrente, in quanto queste saranno calcolate nel modello numerico a partire dai dati di altri parametri fisici. Nel secondo caso è invece necessario disporre del dato di corrente prodotto da una specifica misurazione o simulazione numerica.

Gli strumenti utilizzabili per ottenere misure di velocità e direzione di corrente sono vari. Per misurare la corrente superficiale sono disponibili dati satellitari (prevalentemente sensori altimetrici e SAR, ma anche scatterometri radar) e dati rilevati dai radar costieri (prevalentemente in banda HF). Questi strumenti offrono il vantaggio di produrre informazioni per un'area spaziale estesa, seppur limitatamente allo strato superficiale. I profili verticali di corrente sono, invece, prodotti da altri strumenti che eseguono misure tendenzialmente puntuali (possono eventualmente essere ripetute in punti diversi per avere un'informazione spaziale). Tra questi possono essere citati gli ADCP (strumenti che sfruttano l'effetto Doppler), *drifter* ARGO (che sfruttano il posizionamento GPS), correntometri meccanici equipaggiati su boe galleggianti o sonde calate in acqua da natante. Nello specifico i *drifter* ARGO vengono utilizzati per acquisire dati in mare aperto ed hanno il vantaggio di raggiungere anche grandi profondità, ma la produzione di dati è disomogenea sia nello spazio che nel tempo. L'utilizzo di radar costieri produce campi con una buona frequenza temporale e con copertura di aree marine sufficientemente estese, ma le misurazioni si limitano agli strati superficiali della colonna d'acqua. Le informazioni da satellite producono campi di corrente superficiale generalmente più estesi di quelli prodotti dai radar ma con più bassa risoluzione spaziale e temporale. Infine, gli ADCP e i correntometri meccanici stazionari producono dati in continuo di intensità e direzione della corrente in un punto (particolarmente indicati per la misurazione della corrente alla foce di fiumi o di scarichi), mentre, se equipaggiati a bordo di imbarcazioni possono produrre informazioni spaziali a scapito però della continuità temporale.

Per quanto riguarda gli intervalli di campionamento, le correnti di largo legate alla circolazione termalina hanno una variabilità che può essere rappresentata anche da dati mensili o giornalieri. Nel caso in cui il dato di corrente debba tener conto anche degli effetti legati alla presenza di vento o onde (perché non inseriti direttamente nella formulazione del modello) è allora necessario che l'intervallo di campionamento sia in grado di rappresentare la variabilità di questi altri fenomeni (si rimanda ai singoli paragrafi per la descrizione).

5.2.1.3 Dati chimico-fisici della colonna d'acqua

- *Temperatura e salinità dell'acqua*

L'acquisizione di dati di temperatura e salinità lungo la colonna d'acqua è importante per verificare l'eventuale presenza, anche nel caso di fondali poco profondi, di stratificazioni dovute a masse d'acqua di diversa densità. In questi casi sarà necessario utilizzare un modello 3D o quasi-3D per descrivere anche la densità variabile lungo la colonna d'acqua. Ciò si ottiene tramite l'inserimento in input al modello dei valori di temperatura e salinità, sia come condizioni iniziali che al contorno. Generalmente tali valori possono essere ottenuti da modelli numerici oceanografici, sebbene per studi di dettaglio sia importante tenere conto anche di eventuali foci o scarichi di acque a diversa densità (es. acque dolci). Purtroppo i prodotti dei modelli numerici relativi a temperatura e salinità sono spesso vicini alla realtà in superficie perché possono assimilare il dato satellitare, ma lungo la colonna d'acqua possono verificarsi divergenze notevoli. Al fine di porre rimedio a tale limite è spesso opportuno dotarsi di misure di salinità e temperatura lungo la verticale che possano ben rappresentare la situazione all'interno del dominio computazionale (generalmente ciò corrisponde al considerare misure eseguite all'interno dell'area coperta dal dominio stesso).

Le misure di temperatura superficiale sono prodotte con un buon grado di precisione da sensori satellitari, mentre il prodotto relativo alla salinità, essendo di più recente introduzione, è meno preciso. Lungo la colonna d'acqua è necessario utilizzare invece strumenti come sonde multiparametriche CTD e ADCP che possono acquisire misure in continuo in una posizione fissata o, se equipaggiati su imbarcazioni, fornire misure in più punti del dominio a scapito della continuità temporale.

Nel caso di aree marine al largo la variazione dei parametri di temperatura e salinità è molto lenta e dati con cadenza mensile o giornaliera possono essere sufficientemente rappresentativi del fenomeno (es. i *drifter* ARGO sopra descritti per le correnti). Nei pressi della costa invece tali variazioni, soprattutto nel caso della presenza di stratificazioni, possono mostrare una variabilità maggiore a causa dei processi di mixing innescati prevalentemente dalla presenza del moto ondoso. In generale, la stratificazione viene considerata soltanto per la creazione della condizione iniziale prima dell'avvio del modello. Fanno eccezione i modelli particolarmente avanzati che assimilano durante l'esecuzione i dati misurati per correggere *in itinere* i campi da essi prodotti.

▪ *Torbidità e sedimenti in sospensione*

Nel presente Manuale viene generalmente fatto riferimento alla concentrazione di solidi sospesi (SSC) come parametro correlato alla frazione sospesa e generalmente utilizzato dal modello di trasporto.

Le misure di torbidità e della concentrazione di solidi sospesi in colonna d'acqua non sono parametri direttamente utilizzati per l'implementazione di modelli numerici, ma sono di primaria importanza in fase di verifica dei risultati modellistici e per la loro eventuale successiva ricalibrazione, al fine di garantire una maggiore aderenza con i dati di campo.

La sostanza solida sospesa è composta di frazione organica e inorganica, che possono essere separate attraverso trattamento termico. Per definizione, i solidi sospesi totali (TSS) rappresentano il materiale presente in sospensione in un campione d'acqua che può essere separato attraverso filtri o membrane di dimensioni standardizzate. Per la stima della concentrazione della componente inorganica (ISS), i solidi raccolti sul filtro vengono essiccati ad una temperatura di 103 - 105°C fino a peso costante.

Il parametro TSS, che richiede la raccolta e l'analisi di campioni di acqua e pertanto risulta non agevole da misurare, viene spesso sostituito dal parametro più generale di torbidità. Per la misura di torbidità possono essere utilizzate diverse tipologie di sonda che permettono l'acquisizione di misure (dirette e indirette) della torbidità. Si citano, ad esempio, sonde basate su tecnologie di tipo ottico (es. OBS), acustico (es. ADCP) o laser (es. LISST). A partire da misure di campo e da operazioni di calibrazione, è possibile derivare una correlazione tra i due parametri. Tale correlazione che deve essere aggiornata durante le attività di movimentazione poiché fortemente dipendente dalle caratteristiche del sedimento risospeso (diametro delle particelle, composizione, indice di rifrazione, etc.).

I valori di concentrazione dei solidi sospesi totali possono essere quantificati anche attraverso altre indagini di utilizzo meno frequente, quali ad esempio, attraverso misure di densità della miscela di acqua e sedimenti (ma tale metodo è funzionale solo in presenza di alte concentrazioni di sedimenti in sospensione) e tramite lettura indiretta dalla rilevazione dei parametri di pH e DO (Ossigeno Disciolto) i cui valori sono alterati dalla presenza dei solidi sospesi.

Infine, vi è la possibilità di utilizzare strumenti da remoto (come foto aeree o dati da sensori multi spettrali da satellite) per ottenere una rappresentazione dell'estensione superficiale del pennacchi di torbida.

5.2.2 *Alcuni database liberamente accessibili per la raccolta di dati*

Per quel che riguarda il territorio nazionale si segnalano i seguenti servizi che producono e diffondono liberamente alcuni dei dati sopra elencati.

Per la disponibilità di dati meteo-marini e idrodinamici è possibile fare riferimento a:

- servizio CMEMS (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*), realizzato nell'ambito del Programma Copernicus della UE, che distribuisce liberamente campi relativi ai principali processi fisici connessi con la circolazione generale di larga scala, su tutti i mari italiani. Ciò costituisce una solida e rilevante base di partenza per l'analisi e la caratterizzazione meteo-marina di largo e per la conseguente selezione degli scenari di modellistica. I dati a disposizione attraverso questo servizio sono inclusivi dei valori di corrente, temperatura dell'acqua, salinità e recentemente anche di moto ondoso, sia da modello che da misure *in situ*. La modalità del loro utilizzo va quindi valutata attentamente a seconda delle esigenze spazio-temporali specifiche. I

dati di larga scala del servizio marino europeo CMEMS o di relativi servizi di *downstreaming* esistenti forniscono lunghe serie temporali continue (dell'ordine delle decine di anni) a partire dalle quali è possibile creare le climatologie idrodinamiche necessarie ai modelli numerici di maggiore dettaglio (approccio climatologico) o utilizzare direttamente i dati medi giornalieri (o orari) per l'impiego dei modelli secondo l'approccio realistico (a scenari o di lungo periodo). Attualmente la risoluzione del modello nella regione mediterranea è di 1/16 di grado (sia per la latitudine che per la longitudine) che corrisponde a maglie di circa 6/7 km, sebbene sia in corso un programma di sviluppo che prevede un aumento della risoluzione. Lungo la verticale sono disponibili 72 livelli.

- ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*) è un'organizzazione europea non governativa che produce previsioni meteorologiche a medio termine. Tra i *dataset* che produce ve ne sono alcuni di libero accesso. Il prodotto ERA INTERIM contiene dati da modello per onde e vento a partire dal 1979 con risoluzione spaziale di circa 80 km, mentre il prodotto ERA 20C contiene invece dati di vento *in situ* per il periodo 1900-2010 con risoluzione di circa 125 km.
- ISPRA gestisce le reti mareografica (RMN) ed ondometrica (RON) nazionali. La Rete Mareografica Nazionale (RMN) fornisce dati di elevazione della superficie libera del mare, di vento, temperatura ed altri parametri di tipo fisico-chimici dell'acqua con un elevato grado di attendibilità. La data di inizio della disponibilità dei dati è variabile ma include generalmente diverse decine di anni per ogni strumento. La frequenza di campionamento è variata nel tempo ed è attualmente ad un intervallo di 10 minuti. La Rete Ondometrica Nazionale (RON) fornisce misurazioni di parametri relativi allo stato del mare (altezza d'onda significativa, direzione media, periodo di picco e periodo medio) per periodi temporali che a seconda della boa considerata possono partire dal 1989 o da anni successivi. La risoluzione temporale dei dati più vecchi è di 3 ore con frequenza ridotta a 30 minuti in caso di valori di altezza d'onda superiori a una data soglia. A partire dal 2002, invece, tutte le boe hanno iniziato ad acquisire i dati con frequenza costante di 30 minuti, sebbene non siano attualmente attive dal 2014 circa.
- Aeronautica Militare Italiana, che gestisce stazioni anemometriche che presentano caratteristiche di affidabilità e (in genere) significativa estensione temporale del periodo di registrazione, risultando pertanto adeguati per la caratterizzazione anemometrica di un sito. La disponibilità di tali dati è subordinata all'autorizzazione da parte del gestore (Tabella 5.1).

Per la disponibilità di dati batimetrici a media/larga scala ad oggi si può fare riferimento a:

- dati topo-batimetrici estratti da carte dell'Istituto Idrografico della Marina Militare (IIMM, in scala 1:25.000/1:50.000/1:100.000), dell'Istituto Geografico Militare (IGM, in scala 1:25.000/1:50.000/1:100.000) o da Carte Tematiche Regionali (1:10.000) (es. <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/>);
- dati provenienti da EMODNET (*EMODnet Digital Bathymetry DTM*), progetto finanziato dalla Comunità Europea, che mette a disposizione dati batimetrici sia in forma di rilievi puntuali che di batimetrie a risoluzione omogenea di 250m circa; i dati sono aggiornati al 2017;
- dati prodotti da campagne di misura di GEBCO (<http://www.gebco.net>) riferiti all'anno 2014 e aventi una risoluzione di 500m circa.

Tabella 5.1 - Schema di sintesi delle fonti di dati topo-batimetrici e meteo-marini di libero accesso disponibili

TIPO DI DATO	FONTE DEL DATO	LINK/GESTORE DEL DATO
Dati topo-batimetrici nazionale	Cartografia IIM in scala: 1:25.000/1:50.000/1:100.000	Istituto Idrografico della Marina Militare (IIM)
	Cartografie IGM in scala: 1:25.000/1:50.000/1:100.000	Istituto Geografico Militare (IGM)
	Batimetria EMODNET	http://portal.emodnet-bathymetry.eu/help/help.html
	CTR regionali in scala 1:100.000	
	Batimetria GEBCO	http://www.gebco.net
	Fogli della "Carta degli Elementi di Pericolosità Geologica dei Mari Italiani" in scala 1:50000 del progetto MaGIC	http://www.magicproject.it/index.php/it
Dati LiDAR	http://www.pcn.minambiente.it/geoportal/	
Immagini satellitari SAR (Sentinel)	http://copernicus.eu/main/sentinels	

Correnti	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
Onde	ECMWF	http://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets
	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
	KASSANDRA	http://www.ismar.cnr.it/kassandra
	RON	http://dati.isprambiente.it/dataset/ron-rete-ondametrica-nazionale/
Vento	NOAA	http://www.noaa.gov/
	ECMWF	http://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets
	Aeronautica Militare	http://www.meteoam.it/dati_in_tempo_reale
	RMN	http://dati.isprambiente.it/dataset/rmn-la-rete-mareografica-nazionale/
Livelli marini	RON	http://dati.isprambiente.it/dataset/ron-rete-ondametrica-nazionale/
	KASSANDRA	http://www.ismar.cnr.it/kassandra
	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
Temperatura e salinità	RMN	http://dati.isprambiente.it/dataset/rmn-la-rete-mareografica-nazionale/
	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
Vincoli ambientali	SIN	http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/siti-contaminati/siti-di-interesse-nazionale-sin/
		http://www.bonifiche.minambiente.it/
	SIC, ZSC E ZPS	http://www.minambiente.it/pagina/sic-zsc-e-zps-italia/
	Aree Protette (parchi e aree marine protette)	http://www.minambiente.it/pagina/aree-naturali-protette/
	Aree archeologiche e storico-architettoniche	http://www.beniculturali.it/mibac/opencms/MiBAC/sito-MiBAC/MenuPrincipale/LuoghiDellaCultura/Ricerca/index.html#/

5.2.3 Utilizzo dei dati di monitoraggio per la verifica dell'accuratezza dei modelli

La raccolta di dati *in situ* è utile non solo per fornire alcuni parametri essenziali per la definizione delle condizioni iniziali e al contorno per la corretta implementazione del modello, ma anche per la verifica dei risultati del modello stesso.

Le formulazioni semplificate o parametriche alla base dei modelli matematici includono numerose ipotesi che non permettono di rappresentare pienamente la complessità dei fenomeni fisici considerati. Pertanto, anche un modello correttamente implementato può portare a risultati non coerenti con la realtà, qualora le parametrizzazioni utilizzate non rappresentino le principali peculiarità del caso in esame (es. risoluzione del modello non adatta a riprodurre le caratteristiche batimetriche). Discorso analogo si applica alle modellazioni che fanno ricorso a formulazioni empiriche atte a descrivere un fenomeno. In molti casi esistono diverse formule empiriche per la rappresentazione dello stesso fenomeno. In tali casi è necessario selezionare la più opportuna, adeguandone i parametri.

Pertanto, per garantire e verificare l'affidabilità dei risultati modellistici, si possono utilizzare i dati di campo per effettuare opportune procedure di calibrazione e validazione.

La calibrazione è il procedimento di comparazione dei risultati del modello con corrispondenti osservazioni e misure, al fine di identificare e modulare l'insieme di parametri che consente di ricostruire le osservazioni nel modo migliore.

Per validazione si intende, invece, il procedimento utilizzato per verificare che il modello sia in grado di realizzare delle predizioni accurate. Questo implica che il modello, precedentemente calibrato, venga applicato per la ricostruzione di un nuovo insieme di osservazioni (o sottoinsieme del set di dati originali, dataset di validazione) mantenendo inalterata la scelta dei parametri. Lo scopo della validazione è la stima del grado di approssimazione con cui il modello riesce a riprodurre i valori osservati/misurati. Pertanto, il modello è detto validato quando è accertato che l'accuratezza e la capacità predittiva rimangono all'interno di prefissati limiti di accettabilità nel periodo di validazione.

La fase combinata di calibrazione/validazione del modello permette di adattare gli strumenti di modellazione impiegati per ottenere una maggiore capacità di riproduzione della realtà. Pertanto, essa è tesa a verificare l'accettabilità delle ipotesi alla base del modello utilizzato e l'affidabilità dei valori

numerici dei parametri necessari a risolvere il modello. La validazione dei modelli utilizzati si traduce nella valutazione dell'errore, o intervallo di confidenza, da considerare nell'analisi dei risultati da essi prodotti.

È necessario che l'AMI sia in grado di riprodurre correttamente i principali fenomeni fisici considerati, sia per la simulazione del campo idrodinamico, che per i processi di dispersione e sedimentazione del pennacchio di torbida generato durante la movimentazione di sedimenti. Pertanto, ognuno dei modelli che costituiscono l'AMI deve essere sottoposto ad un processo di calibrazione/validazione.

Da un punto di vista operativo, il procedimento di calibrazione/validazione può essere effettuato utilizzando varie tecniche basate sul confronto tra il risultato numerico e il corrispondente dato misurato nella realtà.

In linea generale, la verifica può essere effettuata sulla specifica grandezza (es. livelli idrici, intensità di corrente, concentrazione, ecc.), calcolata e osservata, oppure su grandezze derivate da valori calcolati e osservati (numero di superamenti di SSC rispetto ad un livello di riferimento, prisma di marea di un bacino semichiuso, distribuzione empirica di probabilità della specifica grandezza, ecc.).

L'analisi più immediata consiste nella stima della differenza media (anche quadratica) tra i valori calcolati e i valori osservati. A tal fine, è opportuno selezionare con attenzione la discretizzazione numerica del dominio di calcolo in modo tale che sia possibile estrarre il risultato numerico nell'esatto punto di misura senza la necessità di interpolazioni spaziali.

La differenza tra il campo misurato e quello da modello può fornire diversi elementi utili alla verifica della capacità del modello di rappresentare la realtà con il grado desiderato di approssimazione. Il valore delle differenze medie assolute indica la discrepanza media tra i valori del campo misurato e quello prodotto dal modello. Una differenza media semplice invece permette di valutare se mediamente il modello produce valori inferiori o superiori a quelli misurati. Una differenza semplice o assoluta solo per alcuni valori del campo fornisce elementi di dettaglio per la valutazione di fenomeni di particolare interesse.

Tuttavia, spesso è necessario ricorrere ad analisi più approfondite per valutare l'affidabilità dei modelli numerici. A titolo di esempio, si osserva che il semplice confronto sincrono tra dati osservati e dati misurati risente molto della capacità del modello di riprodurre correttamente la celerità di propagazione della grandezza considerata. Può, infatti, accadere che un modello sia in grado di riprodurre con un buon grado di precisione i valori di intensità dei parametri di interesse, seppur contraddistinti da una sfasatura temporale rispetto alle condizioni reali.

Si consiglia, quindi, di basare l'analisi dei risultati sul confronto di grandezze derivate (si veda, ad esempio, gli SSC_{medio} e SSC_{max} descritti al par. 4.6.2) in grado di valutare l'affidabilità dello strumento modellistico nel riprodurre i fenomeni di interesse volti alla valutazione degli impatti di tipo fisico dovuti alle attività di movimentazione. Per ulteriori approfondimenti sulle tematiche relative al processo di calibrazione e validazione degli strumenti modellistici si rimanda alla letteratura di settore (es. Oreskes *et al.*, 1994; Taylor, 2001; Stow *et al.*, 2009; Jiang, 2014; Olsen *et al.*, 2016).

5.2.4 Il monitoraggio nelle diverse fasi di progettazione e gestione

5.2.4.1 Monitoraggio ante operam (o di base)

Il monitoraggio *ante operam* (o di base) viene effettuato per definire le condizioni ambientali locali prima dell'inizio delle attività di cantiere e fornisce i dati necessari per valutare, nelle successive fasi in corso d'opera e *post operam*, le variazioni indotte sui parametri ambientali considerati, nonché per rispondere alle eventuali prescrizioni ambientali formulate. Durante la fase *ante operam* sono raccolti i dati necessari per l'implementazione di studi modellistici preliminare e di dettaglio (es. dati idrodinamici e rilievi batimetrici aggiornati) e per investigare la sussistenza di una relazione di causa/effetto collegabile alla realizzazione dell'opera.

Il monitoraggio *ante operam* è talvolta implementato in due fasi differenti:

- una prima fase a supporto della progettazione e degli studi di impatto ambientale;
- una seconda fase, prima dell'inizio delle attività di cantiere, per caratterizzare nel dettaglio la naturale variabilità delle condizioni ambientali "sito-specifiche" anche ai fini di stabilire livelli di riferimento per i parametri fisici, chimici e biologici di acqua e sedimento (es. livello, correnti, onde, temperatura e salinità, solidi sospesi, torbidità, ossigeno, contaminanti, clorofilla, biomassa di organismi, ecc.) come riportato nel par. 4.6.

Anche se le attività di movimentazione possono indurre cambiamenti sul sistema fisico (es. variazione dell'integrità del fondale, aumento della concentrazione della frazione sedimentaria fine in sospensione, variazioni della batimetria e dell'idrodinamica locale, variazione del tasso di erosione e deposizione al fondo, ecc.), a questi potrebbe non corrispondere alcun effetto ambientale (o impatto) significativo se non sono rilevate criticità ambientali in prossimità dell'area di intervento.

In ambienti confinati e/o caratterizzati da bassa energia (es. bacini portuali e aree di transizione), inoltre, si deve prestare particolare attenzione, sia al controllo della frazione solida sospesa in uscita verso il mare aperto, sia alla presenza di contaminanti associati alla frazione sottile dei sedimenti sospesi. Questi ambienti, infatti, sono generalmente contraddistinti dalla sedimentazione di un'alta percentuale della frazione sedimentaria sottile, spesso veicolo dei contaminanti in virtù del forte potere adsorbente della frazione organica.

Pertanto, durante la fase *ante operam* è importante effettuare una preliminare analisi dei potenziali effetti attesi sul sistema acquatico in relazione alle peculiarità del contesto ambientale in cui si svolgono gli interventi (es. presenza di vincoli e criticità ambientali³⁷), mediante l'implementazione di un modello concettuale. Ciò al fine di individuare un livello (o una serie di livelli) di riferimento e definire una scala di significatività degli effetti attesi anche in relazione ai recettori sensibili recettori sensibili presenti (cfr. par. 4.6).

Qualora non siano disponibili informazioni relative al tipo di risposta dei recettori sensibili alle alterazioni indotte dall'incremento di SSC e DEP sulla qualità del sistema acquatico, in via precauzionale è possibile definire, sulla base dei dati pregressi ed acquisiti durante il monitoraggio *ante operam*, un livello (o una serie di livelli) di riferimento sito-specifico legato alla variabilità naturale dell'area. In virtù dell'arbitrarietà con cui spesso sono stabiliti tali valori, questi devono essere necessariamente verificati ed eventualmente corretti sulla base dei dati acquisiti in corso d'opera.

Infine, durante la fase *ante operam* deve essere definito il numero, l'ubicazione e la frequenza di campionamento di stazioni di controllo, ubicate in aree presumibilmente non soggette agli effetti di cantiere. Il monitoraggio in tali stazioni è utile a discriminare gli effetti legati alla naturale variabilità del sito dagli effetti correlabili, in *corso d'opera*, alle attività di cantiere.

In tale ottica, l'implementazione di modelli matematici prima dell'inizio dei lavori, consentendo di prevedere le aree e le finestre temporali critiche in relazione ai potenziali effetti attesi, può costituire un valido supporto per la pianificazione della strategia di monitoraggio, nella scelta dell'ubicazione e della frequenza di campionamento delle stazioni.

5.2.4.2 Monitoraggio in corso d'opera

Il monitoraggio in corso d'opera è finalizzato al confronto dei parametri misurati durante le attività di movimentazione con quelli pregressi (durante il monitoraggio *ante operam*) per verificare la natura e l'entità dei cambiamenti ambientali indotti dalle attività (monitoraggio in corso d'opera). Sulla base dei dati raccolti in corso d'opera viene condotta anche la verifica della conformità (*compliance*) rispetto al contesto normativo e ad eventuali prescrizioni formulate in relazione agli specifici obiettivi ambientali e di progetto.

Le attività di monitoraggio condotte in questa fase possono essere utilizzate in relazione all'attività modellistica per:

- valutare/verificare i contenuti e la congruenza dello studio modellistico condotto in fase di progetto;
- valutare/verificare la correttezza della definizione del termine sorgente in termini di quantità e modalità di rilascio del materiale;
- garantire in qualsiasi momento, anche posteriormente alle operazioni di movimentazione, la disponibilità di dati funzionali a ricostruire attraverso la modellistica numerica il regime idrodinamico e di trasporto durante le operazioni;
- implementare un sistema di modellazione operativa previsionale a supporto delle operazioni (cfr. par. 5.3.1).

Il monitoraggio durante le attività di cantiere può essere periodico o in continuo. Da un punto di vista spaziale, esso può essere (es. HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003; Cutruneo *at al.*, 2012):

³⁷ Cfr. cap. 1, Glossario della terminologia e degli acronimi.

-
- mobile, in quanto condotto per mezzo di imbarcazione nelle vicinanze dei mezzi di movimentazione del sedimento per la caratterizzazione della sorgente del pennacchio di torbida;
 - stazionario, in quanto basato sull'utilizzo di stazioni fisse per la valutazione nel tempo delle variazioni del sistema eventualmente collegate alle attività di movimentazione;
 - localizzato in corrispondenza delle stazioni di controllo e/o di recettori sensibili.

Qualora i parametri misurati in corso d'opera discostino significativamente da quelli rilevati nell'*ante operam* è possibile attivare specifiche procedure di controllo e/o di allerta.

Osservazioni in tempo reale, un rapido processamento del dato e sistemi di valutazione standardizzati possono essere utilizzati per individuare gli effetti dell'opera, intensificare e/o rimodulare la strategia di monitoraggio (es. localizzazione delle stazioni ubicate nella fase *ante operam* e frequenza di campionamento per il controllo dei processi in atto), attivare una procedura di allerta in caso del superamento di livelli di riferimento prestabiliti per i parametri di interesse (es. interruzioni delle attività nel caso di anomalie significative di SSC riconducibili alle operazioni di movimentazione), o per intervenire tempestivamente sulle modalità operative con opportune misure di mitigazione in base alle scelte effettuate in fase di pianificazione.

5.2.4.3 Monitoraggio post operam

Il monitoraggio *post operam* è finalizzato alla verifica, nel medio e lungo termine, del ripristino delle condizioni ambientali *ante operam* o, alternativamente, del raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio stabile sulla base delle indicazioni fornite dall'Ente di Controllo.

Sulla base dei dati raccolti in *post operam* è possibile verificare anche la conformità (*compliance*) degli effetti a medio/lungo termine, previsti nelle antecedenti fasi di progetto, alle prescrizioni normative e formulate in fase di valutazione della conformità ambientale. La finalità di tale monitoraggio è quella di verificare/ottimizzare le azioni correttive o di mitigazione comunque previste in fase di progettazione/esecuzione degli interventi.

Il monitoraggio *post operam* risulta particolarmente importante anche per verificare gli effetti a breve/lungo termine individuati sulla morfodinamica e gli effetti sugli ecosistemi ad essi correlati.

5.3. La modellistica a supporto delle attività di monitoraggio

Come già descritto (cfr. par. 5.2), nelle prime fasi di pianificazione del monitoraggio è necessario considerare:

- la localizzazione dei recettori rispetto alle attività di movimentazione;
- i tipi di effetti ambientali;
- i possibili percorsi tra sorgente e recettori;
- i fattori (parametri) ai quali i ricettori risultano sensibili;
- i possibili livelli di riferimento in funzione della definizione della significatività degli effetti, ed eventualmente della valutazione della severità degli impatti.

In particolare, in funzione delle previsioni modellistiche e dei risultati ottenuti nelle diverse fasi di monitoraggio, è possibile individuare/verificare le aree entro cui posizionare stazioni (fisse e mobili) per il controllo del pennacchio di torbida e aree in cui posizionare stazioni fisse di controllo per l'acquisizione di misure di *background*, ossia in aree presumibilmente non soggette alle variazioni indotte dalle attività di cantiere.

Come riportato in CEDA (2015a), è possibile utilizzare un modello Sorgente – Percorso - Recettore (S-P-R) per rappresentare a livello teorico il legame tra la sorgente (attività di movimentazione) e i recettori che potrebbero essere coinvolti dagli effetti indotti dai lavori. In Figura 5.5 è illustrato in modo schematico come il modello S-P-R possa essere applicato ad attività di movimentazione di sedimenti.

Nello schema la sorgente (attività di movimentazione) genera una nube di torbida che, attraverso processi di dispersione e deposizione meccanica, produce effetti ambientali quali variazioni della concentrazione di solidi sospesi in colonna d'acqua e variazioni di spessore di sedimento depositato al fondo. Il recettore sensibile è rappresentato da una specifica area potenzialmente impattata. Il monitoraggio dei recettori ha lo scopo di identificare i possibili cambiamenti e assegnare, in termini qualitativi possibilmente quantitativi, un livello di significatività.

La significatività degli effetti ambientali è legata sia all'intensità che alla durata e alla frequenza della perturbazione oggetto di monitoraggio.

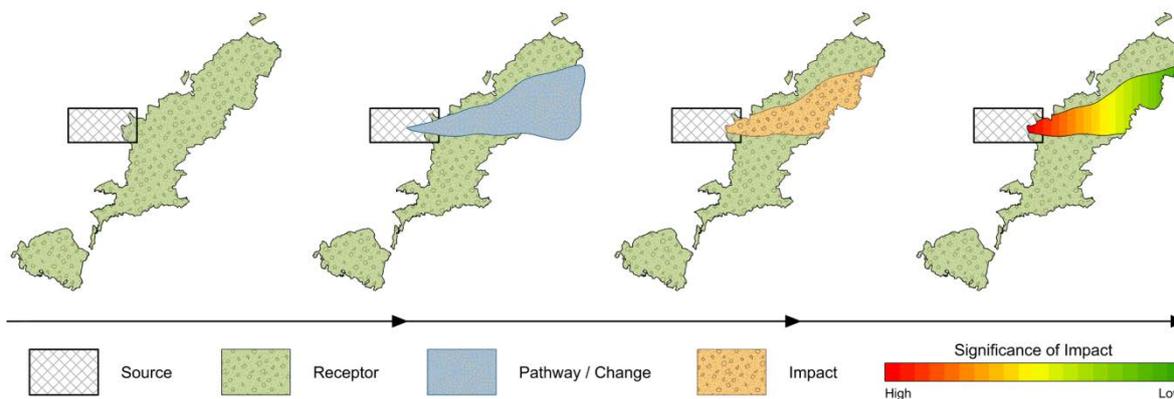


Figura 5.5 - Illustrazione schematica dell'applicazione del modello sorgente-percorso-ricettore (S-P-R) alle attività di movimentazione di sedimenti (da CEDA, 2015a)

Come diffusamente trattato nel Manuale, poiché i modelli matematici permettono di prevedere l'andamento, l'estensione spaziale, l'intensità e la persistenza nel tempo del pennacchio di torbida (e quindi le variazioni spaziali e temporali dei parametri ambientali simulati) in funzione dell'idrodinamica locale e per selezionati scenari di movimentazione, essi possono fornire elementi utili anche per supportare la pianificazione della numerosità, localizzazione e frequenza di campionamento delle stazioni di monitoraggio.

Dalle risultanze modellistiche è possibile pertanto derivare una descrizione spaziale dell'entità dei cambiamenti ambientali ai quali associare una "severità di impatto", in funzione di valutazioni sito-specifiche sulla presenza e sensibilità di recettori (cfr. par. 4.6).

5.3.1 Modellazione operativa in fase di cantiere

Per interventi di notevole estensione e particolare delicatezza potrebbe essere utile implementare i modelli in modalità operativa/previsionale al fine di reperire informazioni, durante le operazioni, quali ad esempio:

- previsione di vento, onda e correnti per le ore/giorni di attività;
- previsione della distribuzione della concentrazione di sedimento sospeso e della distribuzione della deposizione del materiale al fondo, entrambe indotte dalle operazioni di movimentazione del materiale.

Sulla base delle previsioni dello strumento modellistico operativo, che deve necessariamente essere calibrato/validato sui dati del monitoraggio via via acquisiti (cfr. par. 5.2.4.2), risulta possibile definire o ottimizzare un Piano delle Operazioni a breve termine (*Short Term Operations Plan – STOP*) utile sia all'operatore (es. la conoscenza anticipata delle finestre temporali per cui sono previsti eventi avversi in corso d'opera risulta fondamentale per l'ottimizzazione dell'impiego dei mezzi coinvolti) sia agli Enti preposti al controllo.

Ad esempio, qualora fosse previsto il superamento di prestabiliti livelli di riferimento di SSC (livello di allerta) in uno o più punti target, il Piano delle Operazioni potrebbe prevedere l'attivazione di una procedura di allerta, l'interruzione delle operazioni o la modifica delle stesse (misure di mitigazione), al fine di abbassare l'effetto/impatto a livelli accettabili.

5.4. Gestione dei dati di monitoraggio e del flusso di informazione

La Direttiva 2007/2/CE del Parlamento europeo e del Consiglio che ha istituito INSPIRE (*IN*frastructure for *S*patial *I*nfoRmation in *E*urope) è stata recepita nell'ordinamento italiano con il D.lgs. 32/10 del 27 gennaio 2010, con lo scopo di rendere omogenee e condivisibili, all'interno dell'Unione europea, le informazioni ambientali, affinché queste siano di supporto alle politiche e alle attività che possano avere ripercussioni sull'ambiente.

In questo contesto, nell'ambito dei suoi compiti istituzionali e del Sistema Nazionale a rete per la protezione dell'ambiente (SNPA, istituito con legge 28 giugno 2016, n. 132), ISPRA assicura la raccolta sistematica, l'elaborazione, l'armonizzazione, l'integrazione di dati e delle informazioni ambientali.

Si ritiene auspicabile, anche nell'ambito delle diverse fasi di progettazione e gestione di interventi che prevedono la movimentazione dei sedimenti, che si possa arrivare alla raccolta sistematica e ad un'adeguata divulgazione di dati e di informazioni ambientali attraverso il coordinamento degli Enti preposti al controllo (o di altri soggetti), coerentemente con le normative vigenti.

In linea generale, le informazioni ambientali (bibliografiche, sperimentali e derivanti dalle applicazioni modellistiche) dovrebbero essere raccolte e organizzate in uno specifico formato standardizzato al fine di poter disporre di dati omogenei e facilmente gestibili in tutte le fasi di progettazione e gestione degli interventi. In particolare, per ogni progetto è opportuna l'implementazione di un Sistema di Gestione delle Informazioni Ambientali (*Project Environmental Data Management System*) per raccogliere, nell'ambito di una stessa "piattaforma", sia le informazioni relative alle modalità operative utilizzate per l'esecuzione dei lavori (es. dettaglio dei mezzi di lavoro, tipologia e produttività del ciclo di lavoro, cronoprogramma dei lavori, caratteristiche di eventuali misure di mitigazione e della loro modalità operativa di impiego, ecc.), sia i dati ambientali acquisiti durante le diverse fasi di monitoraggio e modellazione.

In linea con quanto previsto dalle principali Direttive europee in ambito marino (es. *Marine Strategy e Maritime Spatial Planning*) il Sistema di Gestione delle Informazioni Ambientali dovrebbe essere realizzato in modo da poter essere fruibile dagli Enti e dai tecnici coinvolti (Enti di controllo, Università, ecc.). Nel DM 172/2016, inoltre, viene inserito l'obbligo di prevedere la rapida divulgazione e valutazione dei risultati del piano di monitoraggio, prevedendo la predisposizione di una banca dati ambientale specifica, preferibilmente basata su Sistemi Informativi Territoriali.

In tale ottica la banca dati deve essere georiferita (*geodatabase*), consentire un'agevole archiviazione dei dati ambientali e prevedere la restituzione del dato sotto forma di output specifici (tabelle, grafici, cartografie e report) in modo da essere facilmente consultabile e agevolare sia la visualizzazione sia il confronto dei risultati ottenuti. Nel caso in cui si utilizzino strumenti per acquisizioni in continuo ai fini del monitoraggio in corso d'opera (es. di onde, correnti e SSC) il sistema dovrebbe prevedere la gestione del dato trasmesso nella banca dati in tempo reale.

Una delle possibilità è lo sviluppo di un sistema del tipo Web-GIS (Pinho *et al.*, 2004; Grande *et al.*, 2015, Nicoletti *et al.*, 2017) con possibilità di gestire, in modalità integrata, e di divulgare le informazioni contenute nel *geodatabase* in rete mediante specifiche applicazioni WEB per rendere maggiormente fruibile lo strumento proposto.

In generale, la buona pratica di contribuire all'implementazione di un unico sistema di gestione del dato ambientale (*Environmental Data Management System*) è auspicabile per un uso efficiente ed ottimale della grande quantità di dati raccolti durante il monitoraggio (prima, durante e al termine dell'esecuzione).

Nel caso specifico delle operazioni di movimentazione dei sedimenti in ambito marino-costiero, l'applicazione di una metodologia condivisa di raccolta e gestione dei dati (di monitoraggio, operativi e modellistici) è sicuramente funzionale alle procedure di autorizzazione di nuovi progetti e allo sviluppo di progetti di ricerca.

In letteratura, infatti, sono disponibili diversi set di dati di campo acquisiti durante l'esecuzione di operazioni di dragaggio e sversamento non utilizzabili in maniera sistematica negli studi di settore perché acquisiti mediante utilizzo di metodologie diverse (quindi disponibili in formati non standardizzati) o perché contenute in rapporti riservati (Hayes *et al.*, 2007; Kemps & Masini, 2017). Ciò si riflette ad esempio sull'affidabilità della stima del termine sorgente mediante l'utilizzo di formulazioni empiriche derivate da un numero limitato di dati di campo (sito-specifici e progetto-specifici) e sulla necessità di ricorrere arbitrariamente ad ipotesi di base spesso "eccessivamente conservative" per ovviare a problematiche ambientali conseguenti ad eventuali sottostime del termine sorgente.

A tal proposito, Kemps & Masini (2017) evidenziano l'importanza di disporre di *database* condivisi (*data library*) da aggiornare costantemente con nuove misure progetto-specifiche (eseguite in siti e per finalità progettuali diverse) e di adottare protocolli/approcci standardizzati per l'esecuzione delle misure e la compilazione dei database. In particolare, al fine di omogeneizzare e massimizzare l'utilità dei dati acquisiti, raccomandano la compilazione di una scheda informativa, specifica per il progetto in esame, che contenga almeno informazioni circa:

- le caratteristiche geotecniche e la distribuzione granulometrica dei sedimenti (PSD) dei fondali da movimentare (fondamentali per la convalida del set di dati);
- la distribuzione granulometrica dei sedimenti al fondo, a conclusione delle operazioni di movimentazione, nelle aree che possono aver risentito significativamente dell'esecuzione dei lavori e/o dell'azione dei mezzi di lavoro;
- le specifiche sul tipo di dati e sulle metodologie utilizzate per la raccolta degli stessi (es. posizione dei punti di campionamento/raccolta dati rispetto al mezzo di lavoro, profondità dei campionamenti/misurazioni lungo la colonna d'acqua, spessore dei sedimenti prelevati al fondo, ecc.);
- le specifiche sulle modalità tecnico e operative utilizzate (es. tipo di draga, velocità del ciclo di dragaggio, produttività oraria e giornaliera, cronoprogramma delle attività, eventuale suddivisione in lotti operativi, ecc.);
- le proprietà fisiche della frazione dei sedimenti in sospensione (es. velocità di sedimentazione e distribuzione granulometrica) durante le operazioni di movimentazione;
- il flusso (o del rateo) di risospensione/rilascio in prossimità del mezzo di lavoro, specificando chiaramente l'unità di misura in cui è espresso (es. percentuale rispetto alla frazione di fine, kg/s, ecc.) e il limite utilizzato per definire la frazione sedimentaria fine (es. 63 µm nel rispetto della scala *Wentworth* o 74 µm in accordo con la classificazione USCS);
- i dati sulle condizioni meteorologiche e i parametri chimico-fisici della colonna d'acqua da acquisire, per una migliore interpretazione dei dati acquisiti in corso d'opera, a partire dal periodo antecedente l'avvio delle operazioni di movimentazione (e quindi delle previste attività di monitoraggio) in corso d'opera.

In Appendice 2 si riporta un esempio di scheda informativa di progetto (SIP), specifica per ogni progetto ed articolata nelle fasi *ante operam* (Tabella SIP-AO), in corso d'opera (Tabella SIP-IO) e *post operam* (Tabella SIP-PO), contenente le principali informazioni (ambientali e operative) che possono essere raccolte (prima, durante e dopo l'esecuzione degli interventi) per una migliore applicazione degli studi modellistici.

In particolare, la compilazione delle schede informative di progetto (SIP) nelle diverse fasi del progetto in esame, ha le seguenti finalità (Tabella 5.2):

- standardizzare la tipologia delle informazioni e delle metodologie di raccolta di dati, al fine di arricchire costantemente i database disponibili e utilizzabili, nell'ambito di studi modellistici condotti per valutare la fattibilità/compatibilità di progetti futuri, per incrementare l'attendibilità delle stime (es. del termine sorgente, cfr. par. 3.3 e 5.2) ottenibili con l'implementazione dell'AMI;
- permettere un migliore utilizzo della modellistica e delle procedure di calibrazione e verifica dei risultati (e degli eventuali livelli cautelativi adottati), nell'ambito delle diverse fasi di progettazione e gestione del progetto in esame (es. qualora sia stato avviato un sistema decisionale di supporto alla verifica della rispondenza ambientale delle operazioni di movimentazione che comprenda anche l'utilizzo di modellistica in corso d'opera, cfr. par. 4.4, 4.5, 5.1.1, 5.2, 5.2.3.2).

La Tabella 5.2 evidenzia che la compilazione delle singole schede informative di progetto (SIP) nelle diverse fasi *ante operam* (Appendice 2, Tabella SIP-AO), in corso d'opera (Appendice 2, Tabella SIP-IO) e *post operam* (Appendice 2, Tabella SIP-PO) possono essere considerate svincolate l'una dall'altra, poiché sono caratterizzate da finalità diverse, sia nell'ambito della progettazione e gestione del progetto in esame sia nell'ambito della verifica della fattibilità/compatibilità di progetti futuri.

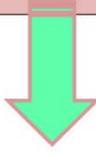
RACCOLTA DI INFORMAZIONI E DATI (AMBIENTALI E OPERATIVI) NELLE DIVERSE FASI DI MONITORAGGIO E NELLE DIVERSE SESSIONI DEI LAVORI		UTILITÀ AI FINI MODELLISTICI NELLE DIVERSE FASI PROGETTUALI	
		PROGETTO IN ESAME	PROGETTI FUTURI
INFORMAZIONI AMBIENTALI (Misure in situ e ricognizione dati disponibili)		MIGLIORE UTILIZZO DELLA MODELLISTICA E DELLE PROCEDURE DI CALIBRAZIONE E VERIFICA DEI RISULTATI PRELIMINARMENTE L'ESECUZIONE DEGLI INTERVENTI	
SCHEDA INFORMATIVA ANTE OPERAM (*) (§. Appendice 2, SIP. AO)	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE, MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI OGGETTO (E IN PROSSIMITÀ) DEGLI INTERVENTI CONDIZIONI METEO-MARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA		
INFORMAZIONI AMBIENTALI E OPERATIVE Relative alle diverse sessioni (o lotti funzionali - LF) dei lavori		VERIFICA DELL'ATTENDIBILITÀ DEGLI STUDI MODELLISTICI IMPLEMENTANTI NELL'ANTE OPERAM E VERIFICA/AGGIORNAMENTO DEGLI EVENTUALI LIVELLI CAUTELATIVI ADOTTATI	AGGIORNARE E ARRICCHIRE I DATABASE UTILIZZABILI A SUPPORTO DI PROGETTI CARATTERIZZATI DA PECULIARITÀ AMBIENTALI E PROGETTUALI SIMILI, PER MIGLIORARE L'AFFIDABILITÀ DELLE STIME DEL TERMINE SORGENTE E AMPLIARE GLI INTERVALLI DI VALIDITÀ DELLE FORMULAZIONI EMPIRICHE DISPONIBILI
SCHEDA INFORMATIVA IN CORSO D'OPERA (**) (§. Appendice 2, SIP. IO)	LF.1 LF.2 -----> LF.n		
	CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI INTERESSATI DALLA RIDEPOSIZIONE/RISOSPENSIONE DEL SEDIMENTO MOVIMENTATO CONDIZIONI METEO-MARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA (*) CONDIZIONI DI UTILIZZO E MODALITÀ TECNICHE E OPERATIVE		
INFORMAZIONI AMBIENTALI (Misure in situ e ricognizione dati disponibili)		VERIFICA DELL'ATTENDIBILITÀ DEGLI STUDI MODELLISTICI IMPLEMENTANTI NELL'ANTE OPERAM E IN CORSO D'OPERA E VERIFICA/AGGIORNAMENTO DEGLI EVENTUALI LIVELLI CAUTELATIVI ADOTTATI	
SCHEDA INFORMATIVA POST OPERAM (***) (§. Appendice 2, SIP. PO)	CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI INTERESSATI DALLA RISPENSIONE/RIDEPOSIZIONE DEL SEDIMENTO MOVIMENTATO CONDIZIONI METEO-MARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA		

Tabella 5.2 - Schema di sintesi delle principali finalità della compilazione delle singole schede informative di progetto (SIP) nelle diverse fasi ante operam, in corso d'opera e post operam (si rimanda all'Appendice 2 per il dettaglio delle informazioni auspicabilmente da acquisire durante ciascuna fase)

- (*) Per massimizzare l'utilità della SIP-AO è auspicabile la sua compilazione con una frequenza (o numero di campagne di monitoraggio) adeguata a fornire informazioni statisticamente rappresentative della torbidità naturale dell'area di intervento (quindi per le principali condizioni meteo-marine e di eventuale traffico dei natanti che caratterizzano il paraggio in esame)
- (**) Per massimizzare l'utilità della SIP-IC (per il progetto in esame e per progetti futuri) è auspicabile la sua compilazione ad ogni cambio della sessione dei lavori (e delle modalità operative) e di rilevanti variazioni delle condizioni meteo-marine.
- (***) Da compilare solo se previsto monitoraggio nel *post operam* in funzione delle finalità ambientali e progettuali delle operazioni e dei risultati degli studi, al fine di verificare il ripristinarsi delle condizioni ambientali iniziali o di nuove condizioni di equilibrio.

BIBLIOGRAFIA

- Aarninkhof S.G.J., Rosenbrand W.F., Van Rhee C., Burt T.N., 2008. The day after we stop dredging: a world without sediment plumes?. *Terra et Aqua*, 110 – March 2008, 15-24.
- Anchor Environmental C.A. L.P., 2003. Literature review of effects of resuspended sediments due to dredging operations. Prepared for Los Angeles Contaminated Sediments Task Force - Los Angeles, California, June 2003, pp. 140.
- Ahrens J. P., 2000. A fall-velocity equation. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* 126.2 (2000): 99-102.
- APAT-ICRAM, 2007. Manuale per la movimentazione di sedimenti marini. Versione aggiornata 2007, pp. 72.
- Bai Y., Wang Z., Shen H., 2003. Three-dimensional modelling of sediment transport and the effects of dredging in the Haihe Estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 56(1), 175-186.
- Bailey S.E., Schroeder P., Ruiz C., 2004. Design of CAD pits in San Jos e Lagoon, San Juan, Puerto Rico. Second LACCEI International Latin American and Caribbean Conf. for Engineering and Technology (LACCEI'2004), Challenges and Opportunities for Engineering Education, Research and Development, 2-4.
- Becker J.H., 2011. Dredge Plumes: Ecological Risk Assessment. Delft University of Technology. Master's thesis. <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uid:98e64038-86f4-4588-92ae-40b09783f251/>.
- Becker J.H., van Eekelen E., van Wiechen J., De Lange W., Damsma T., Smolders T., van Koningsveld M., 2015. Estimating source terms for far field dredge plume modelling. *J. Environ. Manag.*, 149, 282–293.
- Bell R.G., Reeve G., 2010. Sediment plume dispersion modelling: Comparison of a larger dredger and the New Era NIWA Client Report HAM2010–119 prepared for Port Otago Ltd, pp. 57.
- Bilgili A., Proehl J., Lyncl D., Smith K., Swift M.R., 2005. Estuary/Ocean exchange and tidal mixing in a Gulf of Maine Estuary: A Lagrangian modeling study. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 65(4), p. 607-624.
- Blumberg A.F., Mellor G.L., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in *Three-dimensional Coastal Ocean Models* (N. Heaps, ed.), American Geophysical Union, Washington, DC, 1-16.
- 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.*, C4, 104, 7649-7666.
- Bray, R.N., 2008. Environmental aspects of dredging. CRC Press. pp. 396.
- Bray R.N., Bates A.D., Land J.M., 1996. *Dredging: A Handbook for Engineers*, Butterworth-Heinemann Ed. pp. 448.
- Bridges T.S., Ells S., Hayes D., Nadeau S., Palermo M.R., Patmont C., Schroeder P., 2008. The Four Rs of environmental dredging: Resuspension, Release, Residual, and Risk. Technical Report ERDC/EL TR-08-4, Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, January 2008, pp. 64.
- Bokuniewicz H.J., Gebert J., Gordon R.B., Higgins J.L., Kaminsky P., 1978. Field study of the mechanics of the placement of dredged material at open-water disposal sites. Technical Rep. D-78-7.
- Burt T.N., Roberts W., Land J.M., 2000. Assessment of sediment release during dredging - A new initiative called TASS. In: *Proceedings of the Western Dredging Association (WEDA XX) and 32nd Texas A&M Annual Dredging Seminar (TAMU)*, USA, June 2000. Pub. Texas A&M University, Texas 77843-3136 (CDS Report No 72).
- Bush J.W.M., Thurber B.A., Blanchette F., 2003. Particle clouds in homogeneous and stratified environments. *J. Fluid Mech.*, 489, 29–54.
- Capello M., Cutroneo L., Ferranti M.P., Budillon G., Bertolotto R.M., Ciappa A., Cotroneo Y., Castellano M., Povero P., Tucci S., 2014. Simulations of dredged sediment spreading on a *Posidonia oceanica* meadow off the Ligurian coast, Northwestern Mediterranean. *Marine Pollution Bulletin*, 79, 196-204.
- Chorin A.J., Marsden J.E., 2000. *A Mathematical Introduction to Fluid Mechanics*, 3rd edition, Springer, New York. pp. 172.

-
- CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment, 2001. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, Technical Report. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, pp. 146.
- CEDA, 2015a. Integrating Adaptive Environmental Management Into Dredging Projects. Central Dredging Association - CEDA, Marzo 2015, The Netherlands, pp. 20.
- CEDA, 2015b. Environmental Monitoring Procedures. Central Dredging Association-CEDA, Aprile 2015, Rotterdamseweg-The Netherlands, pp. 24.
- CEDA/IADC (2018). Dredging for Sustainable Infrastructure. CEDA/IADC, The Hague, The Netherlands. Revision no. 1021 logged at 2017-10-05 13:35., *in press*.
- Chao X., Shankar N.J., Fatt C.H., 1999. A three-dimensional multi-level turbulence model for tidal motion. *Ocean Engineering*, 26, 1023-1038.
- Clarke D.G., Wilber D.H., 2000. Assessment of potential impacts of dredging operations due to sediment resuspension. DOER Technical Notes Collection (ERDC TN-DOER-E9), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, pp. 14 www.wes.army.mil/el/dots/doer.
- Collins M., 1995. Dredging Induced Near Field Resuspended Sediment Concentration and Source Strengths. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, pp. 232.
- Crockett T.R., 1993. Modelling Near Field Sediment Resuspension in Cutterhead Suction Dredging Operation. M.S. Thesis, University of Nebraska-Lincoln, NE.
- Cutroneo L., Castellano M., Pieracci A., Povero P., Tucci S., Capello M., 2012. The use of a combined monitoring system for following a turbid plume generated by dredging activities in a port. *J. Soils Sediments*, 12 (5), 797–809.
- Davies A.M., Xing J., Huthnance J.M., Hall P., Thomsen L., 2002. Models of near-bed dynamics and sediment movement at the Iberian margin. *Progress in Oceanography*, 52 (2-4), 373-397.
- De Marchis M., Freni G., Napoli E., 2014. Three-dimensional numerical simulations on wind- and tide-induced currents: The case of Augusta Harbour (Italy). *Computers & Geosciences*. 72, 65–75.
- Deltares, 2009. Modelling of sediment dispersion due to maintenance dredging. Lough Foyle, North Ireland. Technical Report Prepared for Londonderry Port & Harbour Commissioners. August 2008 - May 2009, pp. 4.
- Deltares, 2014. Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments - User Manual. pp. 684.
- De Lange W., 2011. Probabilistic Design of Settling Basins for Environmental Compliance. Development and Evaluation of a Risk-based Approach. Delft University of Technology. Master's thesis. <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:0fe4643f-d868-4849-90af-579fb543a8b2/>.
- Demirbilek Z., Zundel A.K., Nwogu O., 2005. BOUSS-2D wave model in SMS: 2. Tutorial with examples. Coastal and Hydraulics Laboratory Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN I-70. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. pp. 17.
- De Wit L., 2010. Near field 3D CFD Modelling of overflow plumes. In: Proceedings of WODCON XIX, Beijing, China, p. 712-723. http://www.svasek.com/news/WODCON_paper_LdeWit.pdf.
- De Wit L., Talmon A.M., Van Rhee C., 2014a. 3D CFD simulation of trailing suction hopper dredge plume mixing: a parameter study of near field conditions influencing the suspended sediment source flux. *Mar. Pollut. Bull.*, 88 (1-2), 47-61.
- De Wit L., Van Rhee C., Talmon A., 2014b. Influence of important near field processes on the source term of suspended sediments from a dredging plume caused by a Trailing Suction Hopper Dredger: the effect of dredging speed, propeller, overflow location and pulsing. *Environ. Fluid Mech.*, 1-26.
- DHI, 2017a. MIKE 21 Spectral Wave Module - Scientific documentation. Release 2017. pp. 5.
- DHI, 2017b. MIKE 21 Boussinesq Wave Module - Scientific documentation. Release 2017. pp. 8.
- DHI, 2017c. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module - Scientific documentation. Release 2017. pp. 2.
- DHI, 2017d. MIKE 3 Flow Model – Mud Transport Module – User guide. Release 2017. pp. 35
- Di Risio M., Pasquali D., Lisi I., Romano A., Gabellini M., De Girolamo P., 2017. An analytical model for preliminary assessment of dredging-induced sediment plume of far-field evolution for

-
- spatial non homogeneous and time varying resuspension sources. *Coastal Engineering*, Volume 127, September 2017, pp. 106-118.
- Dupuits E.J.C., 2012. Stochastic Effects of Dredge Plumes. Development and Application of a Risk-based Approach to Assess Ecological Effects of Dredge Plumes on Sensitive Receivers. Delft University of Technology. Master's thesis. <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:0fef7506-3bfe-4ec1-8f35-a00d4eb24246/>.
- Edwards K.P., Hare J.A., Werner F.E., Blanton B.O., 2006. Lagrangian circulation on the Southeast US Continental Shelf: Implication for larval dispersal and retention. *Continental Shelf Research*, 26,1375-1394.
- Eisma D., 2006. *Dredging in Coastal Water*. Published by Taylor & Francis plc., London, UK, ISBN: 978-0-415-39111-5, pp. 244.
- EPA, Environmental Protection Agency, 1993. *Selecting Remediation Techniques for Contaminated Sediment*. Office of water WH 585, EPA-823-B93-C81, pp. 226.
- EPA, Environmental Protection Agency, 2004. *Evaluation of dredged material proposed for disposal in New England waters*, EPA Region 1, New England, Boston, pp. 62.
- EPA, Environmental Protection Agency, 2011. *Environmental Assessment Guideline for Marine dredging proposals*, Environmental protection Authority, Western Australia, pp. 36.
- EPA, Environmental Protection Agency, 2016. *Environmental impact assessment of marine dredging proposals - Technical guidance*, Environmental protection Authority, Western Australia, pp. 26.
- EPA/USACE, 1991. *Evaluation of dredged material proposed for ocean disposal-Testing manual*. (The green book). EPA 503/8-91-001, pp. 214. <http://www.epa.gov/owow/oceans/gbook/gbook.pdf>.
- EPA/USACE, 1998. *Dredged material proposed for discharge in waters of the U.S. (Inland testing manual)*. EPA 823-B-98-004, Washington, DC, pp. 176.
- EPA/USACE, 2004. *Evaluating Environmental Effects Of Dredged Material Management Alternatives - A Technical Framework*. United States Environmental Protection Agency Office of Water (4504F), Department of The Army U.S. Army Corps of Engineers. EPA842-B-92-008 Revised, May 2004, pp. 95.
- Er J.W., Law A.W.K, Adams E.E., ASCE M., Zhao B., 2016. Open-Water Disposal of Barged Sediments. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*,142(5), © ASCE, ISSN 0733-950X.
- Erfteimeijer P.L.A., Lewis R.R., 2006. Environmental impacts of dredging on seagrasses: A review. *Marine Pollution Bulletin* 52 (12), p. 1553-1572.
- Erfteimeijer P.L.A., Riegl B., Hoeksema B.W., Todd P.A., 2012. Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: a review. *Mar. Pollut. Bull.* 64 (9), 1737-1765.
- Erm A., Soomere T., 2006. The impact of fast ferry traffic on underwater optics and sediment resuspension. *Oceanologia*, 48 (S), 283–301.
- Fachin S., Sancho F., 2006. M-SHORECIRC: A Morphodynamic Model. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 39 Proceedings of the 8th International coastal Symposium (ICS 2004), Vol III (Winter 2006), pp. 1363-1367
- Feola A., Lisi I., Venti F., Salmeri A., Pedroncini A., Romano E., 2015. A methodological modelling approach to assess the potential environmental impacts of dredging activities. In *Proc. Of CEDA. Dredging Days, Innovative Dredging Solutions for Ports*, Rotterdam
- Feola A., Lisi I., Salmeri A., Venti F., Pedroncini A., Gabellini M., Romano E., 2016. Platform of integrated tools to support environmental studies and management of dredging activities, *J. Environ. Manag.* 166, 357–373.
- Ferguson, R.I., Church M., 2004. A simple universal equation for grain settling velocity. *Journal of sedimentary Research* 74.6 (2004): 933-937.
- Fisher R., Walshe T., Bessell-Browne P., Jones R., 2017. Accounting for environmental uncertainty in the management of dredging impacts using probabilistic dose– response relationships and thresholds. *Journal of Applied Ecology*; 00: 1–11.
- Fitzpatrick N., Burling M., Bailey M., 2009. Modelling the marine environmental impacts of dredge operations in cockburn Sound, WA. In: *Proceedings of the Coasts and Ports 2009*, Ellington, New Zealand.
-

-
- Fraser M.W., Short J., Kendrick G., McLean D., Keesing J., Byrne M., Caley M.J., Clarke D., Davis A.R., Erfemeijer P.L.A., Field S., Gustin-Craig S., Huisman J., Keough M., Lavery P.S., Masini R., McMahon K., Mengersen K., Rasheed M., Statton J., Stoddart J., Wu P., 2017. Effects of dredging on critical ecological processes for marine invertebrates, seagrasses and macroalgae, and the potential for management with environmental windows using Western Australia as a case study. *Ecological indicators.*, vol. 78, 229-242.
- Garratt J., 1977. Review of drag coefficients over oceans and continents. *Mon. Weather Rev.* 105, 915-929.
- GBRMPA, Great Barrier Reef Marine Park Authority, 2012. Guidelines: The use of Hydrodynamic Numerical Modelling for Dredging Projects in the Great Barrier Reef Marine Park, pp. 8.
- Gensheimer R.J., Adams E.E., Law, A.W., 2012. Dynamics of particle clouds in ambient currents with application to open-water sediment disposal. *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000659, 114–123.
- Ghosh, L.K., Prasad, N., Joshi, V.B., Kunte, S.S., 2001. A study on siltation in access channel to a port, *Coastal Engineering*, 43(1), 59-74.
- Gómez A.G., García Alba J., Puente A., Juanes J.A., 2014. Environmental Risk Assessment of dredging processes – application to Marin harbour (NW Spain), *Adv. Geosci.*, 39, p. 101–106.
- Grabowski R.C., Droppo I.G., Wharton G., 2011. Erodibility of cohesive sediment: the importance of sediment properties. *Earth-Science Rev.*, 105: 101-120.
- Grande V., Proietti R., Fogliani F., Remia A., Correggiari A., Paganelli D., Targusi M., Franceschini G., La Valle P., Berducci M.T., La Porta B., Lattanzi L., Lisi I., Maggi C., Loia M., Pazzini A., Gabellini M., Nicoletti L., 2015. Sistema Informativo per il monitoraggio ambientale della risorsa sabbia offshore nei progetti di protezione costiera: geodatabase env_Sand. ISPRA, Manuali e Linee guida, 127/2015: 63 pp.
- Guarnieri A., Pinardi N., Oddo P., Bortoluzzi G., Ravaioli M., 2013. Impact of tides in a baroclinic circulation model of the Adriatic Sea. *Journal Of Geophysical Research, Oceans*, Vol. 118, p. 166–183.
- Gularte R.C., Kelly W.E., Nacci V.A., 1980. Erosion of cohesive sediments as a rate process. *Ocean Engng.*, 7:539-551.
- Hadfield M.G., 2014. South Taranaki Bight Sediment Plume Modelling: the Effect of Revised Source Particle-Size Distributions. Report prepared for Trans-Tasman Resources Ltd, submitted to EPA, pp. 11.
- Hayes D.F., Engler R.M., 1986. Environmental Effects of Dredging. Technical Notes, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, pp. 11.
- Hayes D., Crockett T.R., Ward T.J., Averett D., 2000. Sediment resuspension during Cutterhead dredging operation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 126 (3), ASCE.
- Hayes D., Wu P.Y., 2001. Simple Approach to TSS Source Strength Estimates. In: Proceedings of Western Dredging Association WEDA XXI, Houston.
- Hayes DF., Borrowman TD., Schroeder PR., 2007. Process-based estimation of sediment resuspension losses during bucket dredging. Proceedings of the World Dredging Congress 2: 1191-1208. World Dredging Congress; WODCON XVIII
- Hanson H., Kraus N.C., 1989. GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Report 1. Technical Reference (No. CERC-TR-89-19-1). Coastal Engineering Research Center Vicksburg MS, pp. 185.
- Henriksen J., Randall R., Socolofsky S., 2012. Near-field resuspension model for a cutter suction dredge. *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.* 138 (3), 181–191.
- Herbich J.B., Brahme S.B., 1991. Literature Review and Technical Evaluation of Sediment Resuspension during Dredging. Contract Report HL-91–1 U.S. Army. Corps of Engineers. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Hydraulics Laboratory (U.S.), pp. 152.
- Howlett E., 2003. GIS-based tools in support of dredging operations. *Sea Technol.*, 44 (3), 42-44.
- HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003. Protocol for the Field Measurement of Sediment Release from dredges. Produced for VBKO TASS, Issue 1, August 2003, pp. 83.

-
- IADC, International Association of Dredging Companies, 1998. Environmental Aspects of Dredging – Guide 4: Machines, Methods and Mitigation. International Association of Dredging Companies (IADC), The Netherlands, pp. 80.
- IMDC, International Marine & Dredging Consultants, 2012. Environmental Impact Assessment windmill farm Rentel, Numeric modelling of dredging plume dispersion. Prepared for Rentel NV, 18 June 2012 - version 2.0.
- Je C.H., Hayes D.F., Kim K., 2007. Simulation of resuspended sediments resulting from dredging operations by a numerical flocculent transport model. *Chemosphere*. 70(2), 187–195.
- Je C.H., Chang S., 2004. Simple approach to estimate flocculent settling velocity in a dilute suspension. *Environ. Geol.*, 45, 1002 – 1009.
- Jiang J., Fissel D.B., 2011. Modeling Sediment Disposal in Inshore Waterways of British Columbia, Canada. *Estuarine and Coastal Modeling*. American society of Civil Engineers (ASCE), p. 392-414.
- Jiang J., 2014. Investigation of Key Parameters for 3-D Dredging Plume Model Validation. *Journal of Shipping and Ocean Engineering* 4, p. 129-139.
- Jiménez J.A., Ole S.M., 2003. A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments." *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* 129.2 (2003): 70-78.
- John S.A., Challinor S.L., Simpson M., Burt T.N., Spearman J., 2000. Scoping the assessment of sediment plumes arising from dredging. CIRIA Report C547, London 2000, pp. 192.
- Johnson B.H., Fong M.T., 1995. Development and verification of numerical models for predicting the initial fate of dredged material disposed in open water, Technical Report DRP-93-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, pp. 76.
- Johnson B.H., Pachure T.M., 1999. Estimating Dredging Sediment Resuspension Sources. DOER Technical Notes Collection, TN DOER-E6, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. pp. 9.
- Johnson B.H., Andersen E., Isaji T., Teeter A.M., Clarke D.G., 2000. Description of the SSFATE numerical modeling system, DOER Technical Notes Collection (ERDC TN-DOER-E10), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, pp. 12.
- Johnson M.R., Boelke C., Chiarella L.A., Colosi P.D., Greene K., Lellis-Dibble K., Ludemann H., Ludwig M., McDermott S., Ortiz J., Rusanowsky D., Scott M., Smith J., 2008. Impacts to marine fisheries habitat from nonfishing activities in the Northeastern United States. National Oceanographic and Atmospheric Administration Technical Memorandum NMFS-NE-209, NOAA, Silver Spring, MD, pp. 339.
- Jones R., Bessell-Browne P., Fisher R., Klonowski W., Slivkoff M., 2016. Assessing the impacts of sediments from dredging on corals. *Marine Pollution Bulletin*. 102, 9-29.
- Jouon A., Douillet P., Ouillon S., Fraunie P., 2006. Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. *Continental Shelf Research*. 26(12-13), 1395-1415.
- Kemps H., Masini R., 2017. Estimating dredge source terms - a review of contemporary practice in the context of Environmental Impact Assessment in Western Australia. WAMSI Dredging Science Node Report Theme 2, Project 2.2. Western Australian Marine Science Institution, pp. 23.
- Kim K., Je C., 2006. Development of a framework of automated water quality parameter optimization and its application. *Environ. Geol.*, 49 (3), 405-412.
- Kim C.S., Lim H.S., 2009. Sediment dispersal and deposition due to sand mining in the coastal waters of Korea. *Continental Shelf Research*, 29 (1), 194-204.
- Kirby J.T., Wei G., Chen Q., Kennedy A.B., Dalrymple R.A., 1998. FUNWAVE 1.0. Fully nonlinear Boussinesq wave model. Documentation and user's manual, Report CACR-98-06, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware, pp. 80.
- Koh R.C.Y., Chang, Y.C., 1973. Mathematical Model for barged ocean disposal of wastes. Environmental Protection Technology Series EPA 660/2-73-029, U.S. EPA, Washington, D.C., December 1973, pp. 597.
- Kraus N.C., Larson M., Wise R. A., 1998. Depth of Closure in Beach-fill Design. Coastal Engineering Technical Note, CETN II-40 3/98, pp.13

-
- Lambrechts J., Humphrey C., McKinna L., Gourge O., Fabricius K. E., Mehta A.J., Lewis S., Wolanski E., 2010. Importance of wave-induced bed liquefaction in the fine sediment budget of Cleveland Bay, Great Barrier Reef. *Estuarine, Coast. and Shelf Sci.* 89, 154-162.
- Lisi I., 2012. Development of an integrated system to the estimation and the environmental management of resuspension induced by dredging activities. [tesi in italiano]. Univ. of L'Aquila, Italy.
- Lisi I., Taramelli A., Di Risio M., Cappucci S., Gabellini M., 2009. Flushing efficiency of Augusta Harbour (Italy). *Journal of Coastal Research*, SI 56, 841-845.
- Lisi I., Bruschi A., Del Gizzo M., Archina M., Barbano A., Corsini S., 2010. Le Unità Fisiografiche e le Profondità di Chiusura della costa italiana, *L'ACQUA*, 2/2010, 35-52.
- Lisi I., Di Risio M., De Girolamo P. and Gabellini M., 2016. Engineering tools for the estimation of dredging-induced sediment resuspension and coastal environmental management, In: Intech, (Ed), *Applied Studies of Coastal and Marine Environment*, 55–83.
- Liu J.T., Chao S., Hsu R.T., 2002. Numerical modeling study of sediment dispersal by a river plume. *Continental Shelf Research*, 22 (11-13), 1745–1773.
- Lumborg U., 2005. Modelling the deposition, erosion, and flux of cohesive sediment through Øresund. *Journal of Marine Systems* 56 (1-2), 179–193.
- Luettich R.A., Westerink J.J., Scheffner, N.W., 1992. ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries, Report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, Technical Report DRP-92-6, pp. 143.
- Madec G., Delecluse P., Imbard M., Levy C., 1998. “OPA 8 Ocean General Circulation Model - Reference Manual”, Technical report, LODYC/IPSL Note 11, pp. 97.
- Manap N., Voulvoulis N., 2014. Risk-based decision-making framework for the selection of sediment dredging option. *Sci. Total Environ.* 496, 607–623.
- Mangor K., Kaergaard K.H., Drønen N.K., Kristensen S.E., 2017. *Shoreline Management Guidelines*. DHI, Hørsholm, Denmark, pp.450.
- Manzanera M., Pérez M., Romero J., 1998. Seagrass mortality due to oversedimentation: an experimental approach. *Journal of Coastal Conservation*, 4: 67-70.
- MATTM-Regioni, 2017. Linee Guida per la Difesa della Costa dai fenomeni di Erosione e dagli effetti dei Cambiamenti climatici. Documento elaborato dal Tavolo Nazionale sull'Erosione Costiera. MATTM-Regioni con il coordinamento tecnico di ISPRA, pp. 309.
- Matheron G., 1963. Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246–1266.
- Mehta A.J., 1996. Interaction between fluid mud and water waves. In V. P. Singh and W. H. Hager (eds.), *Environmental Hydraulics*, Kulwer Academic, pp. 153-187.
- Mehta A.J., McAnally W.H., 2008. Fine-grained sediment transport. In ASCE Manual No. 110, *Sedimentation Engineering*, pp.253-306.
- Mei C.C., 1989. *The applied dynamics of ocean surface waves*, World Scientific. pp. 768
- Milburn D., Krishnappan B.G., 2003. Modelling erosion and deposition of cohesive sediments from Hay River in Northwest Territories, Canada. *Nordic Hydrol.* 34(1-2), 125-138.
- Mitchener H., Torfs H., 1996. Erosion of mud/sand mixture. *Coastal Eng.*, 29: 1-25. Moksness E., Dahl E., Stottrup J., 2009. *Integrated Coastal Zone Management*. Wiley-Blackwell, ISBN: 978-1-4443-1629-2, pp. 376.
- MOHID, 2003. MOHID Description: Description of the 3D water modeling system Mohid. pp. 112. http://wiki.mohid.com/index.php?title=Mohid_Bibliography#Manuals
- Moksness E., Dahl E., Stottrup J., 2009. *Integrated Coastal Zone Management*. Wiley-Blackwell, ISBN: 978-1-4443-800 1629-2, pp. 376.
- Nakai O., 1978. Turbidity generated by dredging projects. In management of bottom sediments containing toxic substances. In: *Proceedings of the 3rd U.S.–Japan Experts Meeting*. US Army Engineer Water Resources Support Center.
- Neves R., 2013. The Mohid concept. Case studies with MOHID, M. Mateus & R. Neves (eds.), IST Press, pp. 1-11
- Nicoletti L., Paganelli D., Gabellini M., 2006. Environmental aspects of relict sand dredging for beach nourishment: proposal of monitoring protocol. *Quaderno ICRAM n.5*, pp.155.

-
- Nicoletti L., La Valle P., Paganelli D., Lattanzi L., La Porta B., Lisi I., Marco Loia, Targusi M., Maggi C., Pazzini A., Proietti R., 2017. Aspetti ambientali del dragaggio di sabbie relitte a fini di ripascimento: protocollo di monitoraggio “area di dragaggio”. Manuali e Linee Guida ISPRA. In stampa.
- Noh Y., Fernando H.J.S., 1993. The transition in the sedimentation pattern of a particle cloud. *Phys. Fluids A Fluid Dyn.*, 5 (12), 3049–3055.
- Nota D.J.G., 1958. Sediments of the western Guyana shelf. Report of Orinoco shelf expedition, 2, Mendedel. Landbomvhogedrool, Wegeningera, pp. 98.
- Ogilvie J.C., Middlemiss D., Lee M.W., Crossouard N., Feates N., 2012. Silt curtains - a review of their role in dredging projects. CEDA Dredging Days, 12-13 December, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 17 pp.
- Olsen E., Fay G., Gaichas S., Gamble R., Lucey S., Link J.S., 2016. “Ecosystem Model Skill Assessment. Yes We Can!”. *PLoS ONE* 11(1): e0146467, pp. 1-24.
- OMOE, Ontario Ministry of the Environment and Energy, 1994. Evaluating construction activities impacting on water resources - Part III B - Handbook for dredging and dredged material disposal in Ontario - Dredging Transport and Monitoring. Report prepared by Standards Development Branch Ontario Ministry of the Environment, ISBN 0-7778-3292-5, pp. 31.
- Oreskes N., Shrader-Frechette K., Belitz K., 1994. Verification, Validation and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science*, vol 263. pp.641-646.
- Özer A., 1994. Simple equations to express settling column data, *J. Environ. Eng.* 120, 1994, 677-682.
- Paganelli D., La Valle P., Ercole S., Lisi I., Teofili C., Nicoletti L., 2014. Guidelines for environmental studies related to the construction of coastal defence works. ISPRA, Handbooks and Guidelines 105-bis/2014, pp. 69.
- Palermo M.R., Averett D.E., 2003. Environmental dredging – a state of the art review. 2nd International Symposium on Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, Management Strategy Performance, Quebec City, Canada, pp. 12-17.
- Palermo M.R., Schroeder P.R., Estes T.J., Francingues N.R., 2008. Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments. ERDC/EL TR-08-29. U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, USA, pp. 302.
- Parchure T.M., Mehta A.J., 1985. Erosion of soft cohesive deposits. *J. Hydraul. Eng.*, 111: 1308-1326.
- Pasquali D., Di Risio M., De Girolamo P., 2015. A simplified real time method to forecast semi-enclosed basins storm surge. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 165, 61–69.
- Pedlosky J., 1996. *Ocean Circulation Theory*, Springer, Berlin, pp. 456.
- Pedlosky J., 2003. *Waves in the Ocean and Atmosphere*, Springer, Berlin, pp. 264.
- Pennekamp J.G.S., Eskamp R.J.C., Rosenbrand W.F., Mullie A., Wessel G.L., Arts T., Decibel I.K., 1996. Turbidity caused by dredging; viewed in perspective. *Terra et Aqua*, 64, 10-17.
- Pennekamp J.G.S., Quaak M.P., 1996. Impact on the Environment of Turbidity Caused by Dredging. *Terra et Aqua*, 42,10-20.
- Phillips M.R., Williams A.T., 2007. Depth of Closure and Shoreline Indicators: Empirical Formulae for Beach Management. *Journal of Coastal Research*, 23 (2), pp. 487-500.
- PIANC, Permanent International Association of Navigation Congresses, 2006. Environmental risk assessment of dredging and disposal operations. Report of Working Group 10 of the Environmental Commission. pp.40
- PIANC, Permanent International Association of Navigation Congresses, 2010. Dredging and port construction around coral reefs, PIANC EnviCom, Report 108, pp. 94.
- Pinho J.L.S., Pereira Vieira J.M., Antunes do Carmo J.S., 2004. Hydroinformatic environment for coastal waters hydrodynamics and water quality modelling *Advances in Engineering Software* 35 (2004) 205–222.
- Rahimipour H., Wilkinson D., 1992. Dynamic behaviour of particle clouds. Eleventh Australasian Fluid Mechanics Conf., Vols. 1 and 2, Univ. of Tasmania, Hobart, Australia, pp. 743–746.
- Ranieri, G., 2002. A standard method for measuring the average fall velocity of sands. In: *Proceedings of the Hydraulic Measurements and Experimental Methods Conference*, Estes Park CO, EWRI-ASCE.
-

-
- Rapaglia J., Zaggia L., Ricklefs K., Gelinas M., Bokuniewicz H., 2011. Characteristics of ships depression waves and associated sediment resuspension in Venice Lagoon, Italy. *Journal of Marine Systems*, 85(1-2), 45–56.
- Roman-Sierra J., Navarro M., Muñoz-Perez J.J. e Gomez-Pina G., , 2011. Turbidity and Other Effects Resulting from Trafalgar Sandbank Dredging and Palmar Beach Nourishment. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 137, No. 6., pp. 332-343.
- Ruggaber G.J., 2000. Dynamics of Particle Clouds Related to Open-water Sediment Disposal. Doctoral dissertation Massachusetts Institute of Technology. Dept. Of Civil and Environmental Engineering, pp. 241.
- Saremi S., 2014 Density-Driven Currents and Deposition of Fine Materials. PhD Thesis, Technical University of Denmark Department of Mechanical Engineering. Section of Fluid Mechanics, Coastal and Maritime Engineering, April 30, 2014, 148 pp.
- Savioli J.C., Magalhaes M., Pedersen C., Van Rijmenant J., Oliver M.A., Fen C.J., Rocha C., 2013. Dredging - how can we manage it to minimise impacts. *Proceedings of 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts*, Bali, Indonesia. p.6.
- Schoellhamer D.H., 2002. Comparison of the Basin-scale Effect of Dredging Operations and Natural Estuarine Processes on Suspended Sediment Concentration. *Estuaries*, 25(3), 488–495.
- Shankar N.J., Cheong H.F., Sankaranarayanan S., 1997. Multilevel finite-difference model for three-dimensional hydrodynamic circulation. *Ocean Engineering*, 24(9), 785-916.
- Shao D., Purnama A., Sun T., 2015. Modeling the temporal evolution of dredging-induced turbidity in the far field. *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.* 117, 610–623.
- Shao D., Gao W., Purnama A., Guo J., 2016. Modeling dredging-induced turbidity plumes in the far field under oscillatory tidal currents. *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.* Vol. 143, Issue 3 May 2017.
- Shchepetkin A.F., McWilliams J.C., 2005. The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, *Ocean Modelling*, 9, 347-404.
- Shepard F.P., 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios: *Journal of Sedimentary Petrology*, 24, 151-158.
- Smith J. M., Sherlock A. R., Resio D. T., 2001. “STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model, user’s guide for STWAVE Version 3.0,” ERDC/CHL SR-01-01, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Smith GG; Weitz N.; Soltau C.; Viljoen A.; Luger S., Maartens L., 2008. Fate of fine sediment from dredger-based mining in a wave-dominated environment at Chameis Bay, Namibia. *Journal of Coastal Research*, 24(1), 232–247. West Palm Beach (Florida).
- SKM, Sinclair Knight Merz Pty Ltd, 2013. Improved dredge material management for the Great Barrier Reef Region, Great Barrier Reef Marine Park Authority, Townsville.
- Sofonia J.J., Unsworth R.K., 2010. Development of water quality thresholds during dredging for the protection of benthic primary producer habitats. *Journal of Environmental Monitoring* 12(1), 159-163.
- Soulsby R.L., Manning A.J., Spearman J. E Whitehouse R.J.S., 2013. Settling velocity and mass settling flux of flocculated estuarine sediments. *Journal of Marine Geology* 339, pp 1-12.
- Stive M.J.F., Aarninkhof S.G.J., Hamm L., Hanson H., Larson M., Wijnberg K.M., Nicholls R.J., Capobianco M., 2002. Variability of shore and shoreline evolution, *Coastal Engineering*, 47(2), 211-235
- Stow C.A., Jolliff J., McGillicuddy D.J. Jr., Doney S.C., Allen J.I., Friedrichs M.A.M., Rose K.A., Wallhead P., 2009. Skill assessment for coupled biological/physical models of marine systems. *J. of Marine Systems*, 76, 4-15.
- Sun C., Shimizu K., Symonds G., 2016. Numerical modelling of dredge plumes: a review. Report of Theme 3 - Project 3.1.3. Dredging Science Node, Western Australian Marine Science Institution, Perth, Western Australia, 55 pp.
- Sunstein C.R., 2003. Beyond the precautionary principle. *U. Penn. Law Rev.* 151, 1003-1058.
- Svendsen I.A., Haas K., Zhao Q., 2004. Quasi-3D Nearshore Circulation Model SHORECIRC: Version 2.0, Research Report, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.

-
- Taylor K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, pp. 7183-7192.
- Tolman H.L., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 pp.
- Umgiesser G., 2017, SHYFEM – Finite Element Model for Coastal Seas – User Manual – Version 7.5.40, The SHYFEM Group, 7 Dicembre, 2017. <https://github.com/SHYFEM-model/shyfer>
- USACE, US Army Corps of Engineers, 1983. Dredging and Dredged Material Disposal, US Army Corps of Engineers. Engineer Manual 1110-2-5025: Chapter 3, 25, 34 pp.
- USACE, US Army Corps of Engineers, 2002. Field Evaluation of Hopper Dredge Overflow . for the Delaware River. Technical Note Erdc/EI-Tr 02/17. 178 pp.
- USACE, US Army Corps of Engineers, 2003. A review of environmentally improved techniques for dredging contaminated mud. TECHNICAL NOTE TN 3/2003. Fill Management Division GEO, pp. 29.
- Valipour R., Boegman L., Bouffard D., Rao Y.R., 2017. Sediment resuspension mechanisms and their contributions to high-turbidity events in a large lake. *Limnology and Oceanography*, 62(3), 1045-1065.
- Van Eekelen E.M.M., 2007. Experimental Research on Dynamic Dredge Overflow Plumes. Delft University of Technology. Master's thesis. <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:54829c36-b70d-48e1-a47f-cd8be008ca6c/>
- Van Koningsveld M., De Boer G.J., Baart F., Damsma T., Den Heijer C., Van Geer P., De Sonnevile B., 2010. OpenEarth - inter-company management of: data, models, tools & knowledge. In: Proceedings of WODCON XIX, Beijing, China, p. 14.
- Van Koningsveld M., Damsma T., Van der Hout R., Van Wiechen J., De Boer G.J., 2013. Openearth: a knowledge management workflow for dredging projects. *Terra Aqua*, 131 (1), 3-14.
- Van Rhee C., 2002. On the Sedimentation Process in a Trailing Suction Hopper Dredger. Delft University of Technology. Ph.D. Thesis. <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:c16d25e7-7b02-43ff-8ec8-e6069f8a1ce2/>
- VBKO, 2003. Protocol for the Field Measurements of Sediment Release from Dredgers, 1, pp. 1e83. VBKO report.
- Vlasblom, W.J., 2003. Lecture notes on dredging equipment and technology. University lecture notes. Delft University of Technology, pp. 323.
- WAMDI Group., 1988. The WAM model – a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810.
- Warner J.C., Sherwood C.R., Signell R.P., Harris C.K., Arango H.G., 2008. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences*, 34, p. 1284-1306.
- Wilber DH., Clarke DG., 2001. Biological Effects of Suspended Sediments: A Review of Suspended Sediment Impacts on Fish and Shellfish with Relation to Dredging Activities in Estuaries. *North American Journal of Fisheries Management* 21(4). 855-875.
- Wilber DG., Clarke DG., 2006. Suspended sediment concentrations associated with a beach nourishment project on the northern coast of New Jersey. *Journal of Coastal Research*, 22(5), 1035–1042. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- Winterwerp J. C., 2002. Near-field behaviour of dredging spill in shallow water. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 128(2), 96–98.
- Winterwerp J.C., van Kesteren W.G.M., 2004. Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment. *Developments in Sedimentology*, 56, 1-466.
- Zheng C., Bennett G.D., 2002. Applied Contaminant Transport Modeling. John Wiley and Sons, Inc., 605 Third Ave., New York, NY 10158, 621 pp.
- Zhao B., Law A., Huang Z., Adams E., Lai A., 2013. Behavior of sediment clouds in waves. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000167, 24–33.
- Zijlema M., Stelling G., Smit P., 2011. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coast. Eng.*, 58, 992-1012.

APPENDICE 1: SCHEDE ESEMPLIFICATIVE PER LA DEFINIZIONE DEL TERMINE SORGENTE

Si riportano nel seguito una serie di schede esemplificative (SE) contenenti esempi applicativi del metodo descritto per la definizione del termine sorgente, in relazione a operazioni di movimentazione con diverse finalità (cfr. par. 3.3e 4.4).

Per rendere chiaro e al contempo sintetico quanto riportato, gli esempi sono organizzati in specifiche fasi di calcolo rappresentative dei diversi termini in cui è frazionato il generico termine sorgente.

SE1. TERMINE SORGENTE PER ATTIVITÀ DI SVERSAMENTO IN AREE COSTIERE

Lo scopo di questa scheda esemplificativa è quello di mostrare la stima del termine sorgente relativo ad attività di sversamento in aree costiere (cfr. par. 4.5.2) per ripascimento sommerso.

Nel caso in esame, il sedimento viene prelevato da una cava di prestito, trasportato fino alla zona di sversamento e refluito nell'area costiera mediante draga idraulica di tipo TSHD (cfr. par. 2.2.2.3). In questo caso la sorgente può essere considerata di tipo stazionario (cioè la posizione non cambia nel tempo) e con intensità costante di durata finita (pari alla durata dell'operazione di sversamento). Nell'ipotesi di sversamento in aree con profondità limitate è verosimile considerare la sorgente distribuita sull'intera colonna d'acqua.

In relazione alle modalità operative selezionate, il generico ciclo della movimentazione è stato composto nelle seguenti fasi di lavorazione:

- dragaggio da una cava di prestito al largo;
- carico (con *overflow*) del sedimento nel natante;
- trasferimento del natante nell'area di sversamento;
- sversamento in un'area costiera con la tecnica del *rainbowing* (cfr. par. 2.3);
- trasferimento del natante nell'area di escavo.

Da un punto di vista fisico il termine sorgente è stato frazionato durante l'esecuzione delle fasi di dragaggio, di carico (con *overflow*) e sversamento. Pertanto, il presente esempio applicativo è stato articolato nelle seguenti fasi di calcolo:

- Fase 1: Stima della quantità di sedimento fine risospesa durante la fase di dragaggio
- Fase 2: Stima della quantità di sedimento rilasciata per *overflow* in fase di carico
- Fase 3: Stima della quantità di sedimento fine rilasciata durante lo sversamento
- Fase 4: Stima dell'intensità della sorgente di risospensione in fase di sversamento
- Fase 5: Definizione della localizzazione e della durata della sorgente in fase di sversamento.

Fase 1: Stima della quantità di sedimento fine disponibile al campo lontano durante il dragaggio

Si considera una frazione fine ($d < 63 \mu\text{m}$), pari a ($f_{63} =$) 0,25 della massa totale di sedimento dragato. Tale frazione è tipicamente nota, poiché deriva dalle analisi granulometriche effettuate in fase di caratterizzazione della cava di prestito. La stessa caratterizzazione permette la definizione della densità dei grani (ρ_s , per ipotesi pari a 2.650 kg/m^3), della porosità (n , per ipotesi pari a 0,35), della densità secca ($\rho_d = \rho_s - n\rho_s = 1.720 \text{ kg/m}^3$) e della densità in sito ($\rho_{\text{situ}} = \rho_d + n\rho_w = 2.080 \text{ kg/m}^3$, ρ_w densità dell'acqua pari a 1.028 kg/m^3).

Si considera una draga idraulica del tipo TSHD con capacità di carico (V_{tot}) pari a 5.000 m^3 , da cui deriva una massa (asciutta) totale di fine disponibile al campo lontano (m_{tot}) pari a circa 2.150 t/ciclo .

Della massa totale di fine disponibile (m_{tot}) solo una sua frazione (m_d) viene risospesa durante il dragaggio. La massa di sedimento persa durante la fase di dragaggio (m_d) può essere stimata con la relazione:

$$m_d = \sigma_d m_{\text{tot}}$$

dove il parametro σ_d è compreso tra 0 e 0,03. Ne consegue che la massa di sedimento risospesa/rilasciata durante la fase di dragaggio è al più pari a circa 65 t/ciclo .

Fase 2: Stima delle perdite di sedimento fine per *overflow* in fase di carico

Poiché una parte della massa (asciutta) di sedimento fine viene persa durante la fase di dragaggio, solo una sua frazione ($m_{tot} - m_d$) viene caricata all'interno della draga e diviene disponibile al trasporto nel campo lontano, in parte per l'*overflow* in fase di carico e in parte durante la fase di sversamento.

Il rilascio di sedimento durante l'*overflow* è dipendente dalla durata della fase di carico e dai fenomeni di sedimentazione e intrappolamento all'interno del pozzo di carico della draga della miscela sedimentaria. Seguendo il suggerimento di Becker *et al.* (2015), è possibile stimare la frazione rilasciata per *overflow* tramite la seguente relazione:

$$m_o = R_0 (1 - f_{sed})(1 - f_{trap})m_h$$

nella quale, R_0 è il rapporto tra la durata dell'*overflow* e la durata dell'operazione di escavo (compreso tra 0 e 1, poiché l'*overflow*, se presente, ha inizio successivamente in concomitanza con il riempimento del pozzo di carico), m_h è la massa di sedimento fine che viene caricata nel pozzo di carico della draga ($=m_{tot}-m_d$), f_{sed} descrive i fenomeni di sedimentazione nel pozzo di carico (compreso tra 0 e 1) e f_{trap} descrive i fenomeni di intrappolamento nella miscela sedimentaria (compreso tra 0,01 e 0,05). Ne consegue che il rilascio per *overflow* può essere al più pari alla massa fine che viene caricata nella draga. Assegnando ai parametri che forniscono m_o (R_0, f_{sed}, f_{trap}) valori ragionevoli (basati su dati di letteratura, es. Becker *et al.*, 2015) permettono di stimare la massa m_o pari a circa 1.065 t/ciclo ($R_0=0,70$, $f_{sed}=0,25$, $f_{trap}=0,03$).

Fase 3: Stima della quantità di sedimento rilasciato durante lo sversamento

In seguito al trasferimento del natante dall'area di dragaggio all'area di sversamento, la massa di sedimento fine disponibile al campo lontano nell'area di sversamento è pari alla massa totale di sedimento fine ($m_{tot}=2.150$ t/ciclo) a meno delle perdite durante la fase di dragaggio ($m_d=65$ t/ciclo) e per *overflow* ($m_o=1.065$ t/ciclo). Ne consegue che la massa di sedimento fine disponibile al trasporto nel campo lontano durante la fase di sversamento (m_s) è pari a 1.020 t/ciclo.

La stima della sorgente di sversamento, utilizzando la formulazione generale proposta da Becker *et al.* (2015), è:

$$m_s = \sigma_s m_{ts}$$

È necessario definire la parte di sedimento disponibile al trasporto nel campo lontano in base alle tecniche utilizzate. Nel caso di sversamento con la tecnica del *rainbowing*, il pennacchio di torbida subisce processi di risospensione e trasporto prevalentemente assimilabili alla fase dispersiva (o passiva, cfr. par. 3.3.4), l'unica che contribuisce al termine sorgente:

$$m_{sp} = \sigma_{sp} m_{ts}$$

nella quale σ_{sp} assume valori simili a quelli relativi al fenomeno dell'*overflow* (quindi del valore del parametro σ_o compreso tra 0 e 0,20).

Ne consegue che la massa di sedimento fine disponibile all'alimentazione del pennacchio di torbida nel campo lontano è al più pari a circa 205 t/ciclo.

Applicando la formula di generale di Becker *et al.* (2015), si ottiene che il sedimento fine disponibile al campo lontano nella fase di sversamento (m_{sp}) è una frazione pari a circa 0.09 della massa fine disponibile (m_{ts}).

Fase 4: Stima dell'intensità della sorgente per sversamento

La stima dell'intensità della sorgente in fase di sversamento dipende dalla durata dell'operazione che, a sua volta, dipende dalla tecnica di sversamento e dalla potenza utilizzata per pompare la miscela di acqua e sedimento. Considerando una durata dello sversamento pari a 8 h (a cui corrisponde una portata di massa di sedimento pari a circa 300 kg/s) si giunge alla stima finale pari a 7,1 kg/s. Nel caso descritto, ipotizzando l'impronta dell'area di sversamento pari a 100 m² ed una profondità media di 3 m, si ottiene un flusso medio di concentrazione di sedimento pari a circa 24 g/m³/s.

Fase 5: Localizzazione e durata della sorgente in fase di sversamento

La descrizione numerica della sorgente deve avere l'obiettivo di descrivere la posizione e la durata della sorgente in relazione alla tecnica considerata. Nel caso in esame la sorgente è di tipo stazionario (cioè la posizione non cambia nel tempo) con intensità costante di durata finita (pari alla durata dell'operazione di sversamento). Poiché lo sversamento avviene in aree costiere con profondità

relativamente limitate, è possibile considerare la sorgente distribuita sull'intera colonna d'acqua. La stima, infine, dell'impronta areale del getto, permette di stimare il flusso di concentrazione di sedimenti (es. $\text{g/m}^3/\text{s}$) da utilizzare come termine forzante dell'equazione di conservazione del sedimento in sospensione (cfr. par. 4.5).

Ipotizzando l'area dell'impronta pari a 100 m^2 ed una profondità media di 3 m, si ottiene un flusso medio di concentrazione di sedimento pari a circa $24 \text{ g/m}^3/\text{s}$.

Nella tabella seguente sono riportati i risultati ottenuti in questa applicazione esemplificativa.

Tabella SE.1 : Parametri considerati per definire il termine sorgente durante sversamento in aree costiere

DESCRIZIONE	SIMBOLO	VALORE	UNITÀ DI MISURA
Frazione sottile in situ	f_{63}	0,25	-
Densità dei grani	ρ_s	2.650	kg/m^3
Porosità in situ	N	0,35	-
Densità secca	$\rho_d=(1-n) \rho_s$	1.720	kg/m^3
Densità in situ	$\rho_{\text{situ}}=\rho_d+n\rho_w$	2.080	kg/m^3
Volume di carico della draga	V_{tot}	5.000	m^3
Massa di sedimento fine disponibile al campo lontano	m_{tot}	2.150	t/ciclo
Massa di sedimento fine persa durante l'escavo	m_d	65	t/ciclo
Massa di sedimento fine persa a causa dell' <i>overflow</i>	m_o	1.250	t/ciclo
Massa di sedimento fine disponibile al campo lontano durante la fase di sversamento	m_{sp}	205	t/ciclo
Percentuale di sedimento fine disponibile al campo lontano nella fase di sversamento rispetto a quella disponibile	-	9,52	%
Sorgente in termini di flusso di sedimenti	-	7,1	kg/s
Sorgente in termini di flusso di concentrazione media	-	23,80	$\text{g/m}^3/\text{s}$

SE2. TERMINE SORGENTE PER ATTIVITÀ DI ESCAVO IN BACINI SEMICHIUSI

Si riporta di seguito un esempio di stima del termine sorgente durante attività di dragaggio in bacini semichiusi. Non viene qui considerata la fase di sversamento del sedimento dragato.

In questa scheda esemplificativa si ipotizza un dragaggio meccanico effettuato con draga a cucchiaio del tipo BHD (cfr. par. 2.2.1.1) ad una profondità di circa -10m. Si ipotizza, inoltre, una sorgente di tipo continuo (cioè con intensità costante e di durata finita, pari alla durata del singolo ciclo) e non stazionario (cioè la posizione cambia nel tempo). Si precisa che l'ipotesi di sorgente di tipo continuo deve essere dimostrata nelle successive fasi di modellazione sulla base della disponibilità di informazioni di maggior dettaglio sulle modalità tecnico-operative che permettono di schematizzare la sorgente come di tipo intermittente (cfr. par. 4.1).

Date le caratteristiche fisiche del dragaggio meccanico e la profondità ridotta del battente idrico (10 m), è possibile considerare la sorgente omogeneamente distribuita sull'intera colonna d'acqua.

Il generico ciclo di dragaggio è stato scomposto come segue:

- discesa verso il fondo della benna e rimozione del sedimento;
- risalita verso la superficie della benna a pieno carico;
- svuotamento della benna mediante scarico del sedimento rimosso nella bettolina.

Il presente esempio applicativo, finalizzato alla stima dell'intensità della sorgente durante la fase di dragaggio, è stato articolato in due fasi di calcolo.

1. Fase 1: Stima della quantità di sedimento fine risospeso durante il dragaggio
2. Fase 2: Stima dell'intensità della sorgente di risospensione
3. Fase 3 Definizione della localizzazione e della durata della sorgente

Fase 1: Stima della quantità di sedimento fine risospeso durante il dragaggio

Si considera una frazione fine ($d < 63 \mu\text{m}$) pari a ($f_{63} =$) 0,70 della massa totale di sedimento rimosso.

Tale frazione è tipicamente nota, poiché deriva dalle indagini sulle caratteristiche geotecniche e granulometriche effettuate nelle fasi iniziali di progettazione degli interventi. Le stesse indagini permettono la definizione della densità dei grani (ρ_s , per ipotesi pari a 2.650 kg/m^3), della porosità (n , per ipotesi pari a $0,35$), della densità secca ($\rho_d = \rho_s - n\rho_s = 1.720 \text{ kg/m}^3$), della densità *in situ* ($\rho_{\text{situ}} = \rho_d + n\rho_w = 2.080 \text{ kg/m}^3$, ρ_w densità dell'acqua pari a 1.028 kg/m^3).

Si considera un volume della benna (V_b) pari a 9 m^3 , da cui deriva una massa (asciutta) totale di fine disponibile al campo lontano (m_{tot}) pari a circa 11 t/ciclo .

La stima della quantità di sedimento persa durante la fase di escavo può essere effettuata con diverse metodologie. La più semplice è l'applicazione del metodo proposto da Becker *et al.* (2015), per il quale la massa persa durante la fase di dragaggio (m_d) può essere stimata con la relazione:

$$m_d = \sigma_d m_{\text{tot}}$$

con il parametro σ_d compreso tra 0 e $0,03$. Ne consegue che la massa di sedimento persa durante la fase di dragaggio è al più pari a circa 435 kg/ciclo .

In alternativa, è possibile utilizzare il metodo del TGU (*Turbidity Generation Unit*) di Nakai (1978) da cui si ottiene un valore del TGU pari a circa 56 per terreni argillo-sabbiosi (cfr. par. 3.3.3.1, Tabella 3.2) che permette di stimare una massa di sedimento risospeso durante il dragaggio di circa 504 kg/ciclo .

Fase 2: Stima dell'intensità della sorgente di risospensione

La stima dell'intensità della sorgente (che permette di stimare il flusso di sedimenti da utilizzare come termine forzante) dipende dalla durata dell'operazione.

Si ipotizzano 45 cicli/h, a cui corrisponde una produttività di $405 \text{ m}^3/\text{h}$ e una durata di 80 s (poco più di un minuto) del singolo ciclo di dragaggio.

L'intensità media della sorgente risulta compresa tra i $5,4 \text{ kg/s}$ (applicando il metodo proposto da Becker *et al.*, 2015) e i $6,3 \text{ kg/s}$ (applicando il metodo del TGU di Nakai, 1978).

L'intensità della sorgente può essere stimata anche applicando il metodo proposto da Collins (1995), considerando un'impronta areale della benna opportunamente amplificata dal coefficiente K_{cb} . In questo caso, ipotizzando una profondità pari a 10 m e il fattore K_{cb} pari a 1 (cfr. par. 3.3.3.2) si ottiene un'impronta areale della benna pari a circa 20 m^2 e un'intensità della sorgente pari a circa 9 kg/s .

La stima della concentrazione dei sedimenti risospesi nel campo vicino richiede, oltre la durata del singolo ciclo di dragaggio (già definita in 80 s), anche la dimensione caratteristica della benna (ipotizzata pari a $4,5 \text{ m}$) e la velocità di sedimentazione del sedimento movimentato. Considerando la formulazione proposta da Ozer (1994), che tiene conto anche della flocculazione, si ipotizza una velocità di sedimentazione pari a $0,01 \text{ cm/s}$ (es. Di Risio *et al.*, 2017). Ne risulta una concentrazione nel campo vicino pari a circa 900 g/m^3 .

Nel caso in esame, considerando una profondità media di 10 m e l'impronta areale della benna pari a 20 m^2 , si ottiene un flusso medio di concentrazione di sedimento rispettivamente pari a circa $13 \text{ g/m}^3/\text{s}$ applicando il metodo di Becker *et al.*, 2015, pari a circa $16 \text{ g/m}^3/\text{s}$ applicando il metodo del TGU e pari a circa $22 \text{ g/m}^3/\text{s}$ applicando il metodo di Collins, 1995.

Fase 3: Localizzazione e durata della sorgente

La descrizione numerica della sorgente deve avere l'obiettivo di descrivere la posizione e la durata della sorgente in relazione alla tecnica considerata. Nel caso in esame la sorgente è di tipo intermittente (cioè la posizione cambia nel tempo) con intensità costante di durata finita (pari alla durata del singolo ciclo). Date le caratteristiche fisiche del dragaggio meccanico, è possibile considerare la sorgente distribuita sull'intera colonna d'acqua. La stima dell'impronta areale della benna (opportunamente amplificata dal coefficiente K_{cb}), permette di stimare il flusso di concentrazione di sedimenti (es. $\text{g/m}^3/\text{s}$) da utilizzare come termine forzante dell'equazione di conservazione del sedimento in sospensione (cfr. par. 4.5).

Ipotizzando l'area dell'impronta pari al quadrato della dimensione caratteristica della benna, si ottiene un'impronta pari a circa 20 m^2 ed una profondità media di 10 m , si ottiene un flusso medio di concentrazione di sedimento pari a circa $13 \text{ g/m}^3/\text{s}$ (applicando il metodo di Becker *et al.*, 2015), a circa $16 \text{ g/m}^3/\text{s}$ (applicando il metodo del TGU) e a circa $22 \text{ g/m}^3/\text{s}$ (applicando il metodo di Collins, 1995).

La tabella seguente mostra sinteticamente i risultati ottenuti in questo esempio.

Tabella SE2 - Parametri considerati per la definizione del termine sorgente durante escavo in bacini semichiusi

DESCRIZIONE	SIMBOLO	VALORE	UNITÀ DI MISURA
Frazione sottile in situ	f_{63}	0,70	-
Densità dei grani	ρ_s	2.650	kg/m ³
Porosità in situ	N	0,35	-
Densità secca	$\rho_d=(1-n) \rho_s$	1.720	kg/m ³
Densità in situ	$\rho_{situ}=\rho_d+n\rho_w$	2.080	kg/m ³
Volume della benna	V_b	9	m ³
Massa di sedimento fine disponibile al campo lontano	m_{tot}	10,8	t/ciclo
Massa di sedimento fine persa durante l'escavo	m_d	435 505**	kg/ciclo
Sorgente in termini di flusso di sedimenti	-	5,4* 6,3** 9,0***	kg/s
Sorgente in termini di flusso di concentrazione media	-	13,40* 15,56** 22,20***	g/m ³ /s

(*) Metodo di Becker *et al.* (2015)

(**) Metodo del TGU di Nakai (1978)

(***) Metodo di Collins (1995)

SE3. TERMINE SORGENTE PER ATTIVITÀ DI SVERSAMENTO AL LARGO

Nel seguito si riporta un esempio finalizzato alla stima del termine sorgente relativo alla sola fase di sversamento (o immersione) al largo effettuato con draga del tipo *split barge* (par. 2.3.2), dotata di un sistema di apertura totale in senso longitudinale. In questo caso la sorgente è considerabile di tipo stazionario (cioè la posizione non cambia nel tempo) con intensità costante di durata finita (pari alla durata dell'operazione di sversamento).

Il generico ciclo della movimentazione è stato composto come segue:

- dragaggio con draga meccanica e betta per il trasporto dotata di sistema di apertura totale in senso longitudinale;
- trasferimento del natante nell'area di sversamento al largo;
- sversamento al largo con apertura totale dello scafo (*dumping*, par. 2.3.2);
- trasferimento del natante nell'area di escavo.

Il presente esempio applicativo, finalizzato alla stima dell'intensità della sorgente durante lo sversamento al largo del tipo *dumping* (cfr. par. 2.3.2), è stato articolato in tre fasi di calcolo:

- 1- Fase 1: Stima della quantità di sedimento fine disponibile al campo lontano in fase di carico
- 2- Fase 2: Stima della quantità di sedimento fine rilasciato durante lo sversamento
- 3- Fase 3: Stima dell'intensità della sorgente di risospensione
- 4- Fase 4: Definizione della localizzazione e della durata della sorgente

Fase 1: Stima della quantità di sedimento fine disponibile al campo lontano in fase di carico

Si considera una frazione fine ($d < 63\mu\text{m}$) pari a ($f_{63} =$) 0,70 della massa totale di sedimento rimosso. Tale frazione è tipicamente nota, poiché deriva dalle analisi granulometriche effettuate nell'ambito delle indagini da eseguire per ottenere l'autorizzazione a procedere con le operazioni. Le stesse indagini permettono la definizione della densità dei grani (ρ_s , per ipotesi pari a 2.650 kg/m³), della porosità (n, per ipotesi pari a 0,35), della densità secca ($\rho_d = \rho_s - n\rho_s = 1.720$ kg/m³), della densità in situ ($\rho_{situ} = \rho_d + n\rho_w = 2.080$ kg/m³, ρ_w densità dell'acqua pari a 1.028 kg/m³).

Si considera un volume della benna (V_b) pari a 9 m³, un volume della betta pari a 1.800 m³ e una produttività di 400 m³/h (corrispondenti a 45 cicli di escavo orari). Ne deriva una durata del ciclo di carico pari a circa 4,4 h e una massa del sedimento fine disponibile al trasporto nel campo lontano

(m_{tot}) pari a circa 2.170 t/ciclo.

Parte della massa fine di sedimento disponibile al campo lontano viene persa durante la fase di escavo. Un ciclo di sversamento al largo è costituito da 200 cicli di escavo (necessari a riempire la betta di carico). Con riferimento alla precedente scheda esemplificativa (cfr. SE2), la massa persa durante la fase di rimozione (m_d) può essere stimata in 87 t/ciclo (applicando il metodo di Becker *et al.*, 2015).

Fase 2: Stima della quantità di sedimento fine rilasciato durante lo sversamento al largo

La massa di sedimento fine disponibile al trasporto nel campo lontano durante lo sversamento al largo è pari alla massa totale di sedimento fine (m_{tot}) a meno delle perdite durante la fase di dragaggio ($m_d=87$ t/ciclo). Si osserva che per le tecniche operative adottate si è considerata trascurabile la perdita per *overflow*.

Ne consegue che la massa di sedimento fine disponibile al trasporto durante lo sversamento (m_{ts}) è pari a 2.080 t/ciclo. Tuttavia, soltanto una parte di m_{ts} è effettivamente disponibile al campo lontano, poiché una parte raggiunge il fondo con la fase di collasso dinamico del pennacchio (anche sotto forma di correnti di densità). Secondo le indicazioni di Becker *et al.* (2015), la massa disponibile al campo lontano (m_{sp}) è espressa da:

$$m_{sp} = \sigma_{sp} m_{ts}$$

nella quale il coefficiente (empirico) σ_{sp} è compreso tra 0 e 0,05. Ne consegue che la massa disponibile al campo lontano è al più pari a circa 105 t/ciclo.

Fase 3: Stima dell'intensità della sorgente

La stima dell'intensità della sorgente dipende dalla durata dell'operazione. In questo caso l'operazione di scarico può essere ipotizzata di durata pari a 10 minuti. Pertanto, l'intensità della sorgente è pari a circa 170 kg/s (Tabella SE.3).

Fase 4: Localizzazione e durata della sorgente

La descrizione numerica della sorgente deve avere l'obiettivo di descrivere la posizione e la durata della sorgente in relazione alla tecnica considerata. Nel caso in esame la sorgente è di tipo stazionario (cioè la posizione non cambia nel tempo) con intensità costante di durata finita (pari alla durata dell'operazione di sversamento). Poiché lo sversamento avviene in corrispondenza del fondo o durante la fase di discesa (dipendente dalla profondità), a seconda del regime di collasso (cfr. par. 3.3.3), è auspicabile localizzare la sorgente negli strati profondi della colonna d'acqua. La stima, infine, dell'estensione del getto di sedimento, permette di stimare il flusso di concentrazione di sedimenti (es. $g/m^3/s$) da utilizzare come termine forzante dell'equazione di conservazione del sedimento in sospensione (cfr. par. 3.4).

Ipotizzando l'area dell'impronta pari a 300 m^2 ed un'altezza interessata dalla dispersione nel campo lontano pari a 10 m, si ottiene un flusso medio di concentrazione di sedimento pari a circa 58 $g/m^3/s$.

La tabella seguente mostra sinteticamente i risultati ottenuti in questa scheda esemplificativa.

Tabella SE3 - Parametri considerati per la definizione del termine sorgente durante sversamento al largo

DESCRIZIONE	SIMBOLO	VALORE	UNITÀ DI MISURA
Frazione sottile in situ	f_{63}	0,70	-
Densità dei grani	ρ_s	2.650	kg/m ³
Porosità in situ	N	0,35	-
Densità secca	$\rho_d=(1-n)\rho_s$	1.720	kg/m ³
Densità in situ	$\rho_{situ}=\rho_d+n\rho_w$	2.080	kg/m ³
Volume di carico della betta	-	1.800	m ³
Massa di sedimento fine disponibile al campo lontano	m_{tot}	2.170	t/ciclo
Massa di sedimento fine persa durante l'escavo	m_d	87	t/ciclo
Massa di sedimento fine disponibile durante la fase di sversamento	m_s	2.083	t/ciclo
Massa di sedimento fine disponibile al campo lontano durante la fase di sversamento	m_{sp}	104,2	t/ciclo
Sorgente in termini di flusso di sedimenti	-	173,6	kg/s
Sorgente in termini di flusso di concentrazione media	-	57,9	g/m ³ /s

SE4. COMPARAZIONE DEL TERMINE SORGENTE DURANTE L'ESCAVO CON DRAGAGGIO MECCANICO E IDRAULICO IN BACINI SEMI CHIUSI

Si riporta nel seguito un esempio applicativo (tratto da Feola *et al.*, 2016) in cui sono state ipotizzate due operazioni di escavo (una con draga meccanica e una con draga idraulica), definendo un volume di dragaggio unitario come scenario base da replicare al variare delle condizioni idrodinamiche per la stima dell'evoluzione della nube di torbida.

Nel dettaglio, sono stati ipotizzati tassi di produzione di 800 m³/ciclo e di 3.000 m³/ciclo rispettivamente per la draga meccanica e per la draga idraulica (Tabella SE.4). Ipotizzando per entrambi i casi tre cicli di dragaggio giornalieri di durata di 8 h, per semplicità omogenei e senza intermittenze, sulla base dei tassi di produzione considerati per ciclo di lavorazione, è stata derivata una produttività giornaliera di 2.400 m³/giorno e di 9.000 m³/giorno rispettivamente per la draga meccanica e per la draga idraulica.

Come per l'esempio applicativo SE2, anche in questo caso è utile ricordare che le ipotesi semplificative di schematizzazione della sorgente (es. intermittenza/continuità di rilascio nel tempo) possono essere riformulate in funzione della disponibilità di informazioni di maggior dettaglio sulle modalità operative.

Per confrontare il rilascio conseguente all'utilizzo delle due le due tipologie di dragaggio, ipotizzando un medesimo volume unitario di 70.000 m³ da rimuovere, è stato derivato un periodo di dragaggio di circa un mese per la draga meccanica (30 gg) e poco più di una settimana (8 gg) per la draga idraulica.

Fase 1: Stima della quantità di sedimento fine disponibile al campo lontano

Per il calcolo del quantitativo potenzialmente disponibile al trasporto nel campo lontano è stata ipotizzata una frazione di fine pari al 70 % del sedimento da dragare sulla base delle curve granulometriche disponibili per il caso studio esaminato (Feola *et al.*, 2016).

Ipotizzando per entrambe le tecniche di dragaggio, per semplicità, una risospensione di sedimento solo durante l'escavo (trascurando, pertanto, le fasi di carico/trasporto con eventuale *overflow* e sversamento (cfr. par. 3.3.4), è stata ipotizzata una fuoriuscita di sedimento fine pari al 5% del volume da dragare, coerentemente con quanto riportato in letteratura (Pennekamp *et al.*, 1996; John *et al.*, 2000; Becker *et al.*, 2015).

Per la draga meccanica il rilascio dei sedimenti è stato considerato costante su tutta la colonna d'acqua mentre, per il dragaggio con mezzo idraulico è stato ipotizzato un rilascio nelle fasi iniziali di sviluppo del pennacchio confinato in prossimità del fondo e nell'intorno della testa dragante (Collins, 1995; Palermo & Averett, 2003; Palermo *et al.*, 2008).

Fase 2: Stima dell'intensità della sorgente

Nell'esempio proposto la draga meccanica e la draga idraulica completano la movimentazione del volume unitario in un periodo di circa 30 e 8 giorni, rispettivamente (Tabella SE.4). Tale periodo costituisce lo scenario base per la modellazione di trasporto ed evoluzione del pennacchio di torbida prodotto dall'attività di movimentazione da simulare in concomitanza con differenti condizioni idrodinamiche.

A partire dai parametri ipotizzati, si è giunti alla quantificazione della massa totale di sedimento fine effettivamente disponibile al trasporto nel campo lontano rilasciata in corrispondenza della testa dragante. Tale massa, suddivisa nel tempo di lavorazione, fornisce il flusso di rilascio di sedimento fine, rispettivamente di 2 kg/s per draga meccanica e di 7 kg/s per draga idraulica, da utilizzare come termine sorgente da inserire opportunamente all'interno del dominio di calcolo del modello di trasporto.

In Tabella SE.4 sono schematizzate le corrispondenze tra la metodologia proposta da Becker *et al.* (2015, cfr. par. 3.3.4) e in quella proposta in Feola *et al.* (2016) relativamente al confronto tra il rilascio della frazione di sedimento fine durante l'escavo condotto con le due tecniche di dragaggio ipotizzate.

In entrambi i casi la metodologia è replicabile per la definizione del termine sorgente durante le diverse fasi operative (*overflow* e sversamento) e il livello di attendibilità delle stime è funzione del dettaglio delle informazioni disponibili.

Tabella SE.4 - Parametri considerati per l'implementazione del termine sorgente associato a draga di tipo meccanico ed idraulico (Feola et al., 2016) e comparazione con i termini analoghi utilizzati da Becker et al., 2015 relativi a draga meccanica del tipo BHD e idraulica del tipo TSHD.

PARAMETRI CONSIDERATI IN FEOLA et al., 2016				PARAMETRI CONSIDERATI IN BECKER et al., 2015 (cfr. par. 3.3.4)			
Parametro	Unità Misura	Draga meccanica	Draga idraulica	Parametro	Unità misura	Draga meccanica	Draga idraulica
Volume dragato per sessione	m ³ /ciclo	800	3.000	-	-	-	-
Durata del singolo ciclo	h	8		Durata di carico/durata ciclo ^(*)	min	360	240
Cicli di dragaggio	cicli/giorno	3		N. di bette a pieno carico, N. di cicli	wk ⁻¹	28	42
Volume dragato giornaliero	m ³ /giorno	2.400	9.000	Produttività settimanale	m ³ /wk	50.000	100.000
Volume unitario da dragare	m ³	70.000		Volume totale <i>in situ</i> da movimentare, V _{situ}	m ³	2.000.000	2.000.000
Giorni di dragaggio	gg	~30	~8	Periodo di esecuzione	wk	40	20
Densità sedimenti	kg/m ³	1.900		Densità del sedimento secco, ρ _d	kg/m ³	1.590	1.590
Frazione sedimento fine	%	~70		Percentuale del sedimento fine, f _{< 63 μm}	%	30	30
Massa di sedimento fine	Ton	~100.000		Massa complessiva di fine	kg	9,5 10 ⁸	9,5 10 ⁸
% spill	%	5		Percentuale di fine rilasciato dalla benna (σ _b), o dalla testa dragante (σ _d)	%	4	3
Massa totale di spill sedimento fine	Ton	~5.000		-	-	-	-
Flusso di rilascio sedimento fine	kg/s	~2	~7	Flusso di sedimenti che abbandona la sorgente durante la fase di escavo (***)	kg/s	1,6	7,6

(*) in Becker et al. (2015) sono indicati rispettivamente i cicli di lavorazione, della durata di 6 h, quantificati come numero di bettoline in pieno carico (loading) e fase di sversamento (placamento) per la draga meccanica (BHD) e i cicli, della durata di 4 h, composti da carico (loading), *overflow*, sversamento (placamento) per la draga idraulica (TSHD).

(**) in Becker et al. (2015), oltre alla frazione di rilascio associata alla testa dragante, sono indicati anche il termine di frazione associata allo sversamento (placement fraction, σ_p, 5 %) per draga meccanica (BHD) e i termini di *overflow* (σ_o, 20 %) e sversamento (σ_p, 10 %) per la draga idraulica (TSHD).

(***) in Becker et al. (2015), oltre alla sorgente associata alla testa dragante, sono indicati anche i flussi associati allo sversamento (68 kg/s) per draga meccanica (BHD) e i termini di flusso associato all'*overflow* (35 kg/s) e sversamento (79 kg/s) per la draga idraulica (TSHD).

SE5. APPLICAZIONE DEL TERMINE SORGENTE NEL DOMINIO DI CALCOLO DURANTE PER DRAGAGGIO MECCANICO E IDRAULICO

Si riprenda l'esempio proposto nella SE.4, in cui sono state confrontate due modalità operative di dragaggio (meccanico e idraulico) ipotizzando un volume di dragaggio unitario.

Ricordando che nell'esempio proposto (SE4) la draga meccanica e quella idraulica completano la movimentazione del volume unitario in un periodo di 30 e 8 giorni rispettivamente, i termini sorgente sono stati opportunamente inseriti nel modello di trasporto, specificandone la localizzazione (con riferimento alla discretizzazione del dominio di calcolo), l'entità e la serie temporale di rilascio di sedimento fine.

È stato tracciato un percorso che identifica la serie temporale di posizioni occupate dalla draga nel corso dell'intero scenario unitario di dragaggio. Nel dettaglio, assumendo un'ipotetica profondità di dragaggio di 1 m e valutata la dimensione media della maglia della griglia di calcolo (circa 2.500 m²), è stato individuato un insieme di 28 celle consecutive che rappresentano l'area di dragaggio (di circa 70.000 m²) entro la quale inserire la sorgente di sedimento rilasciato durante il dragaggio (in Figura SE5.1).

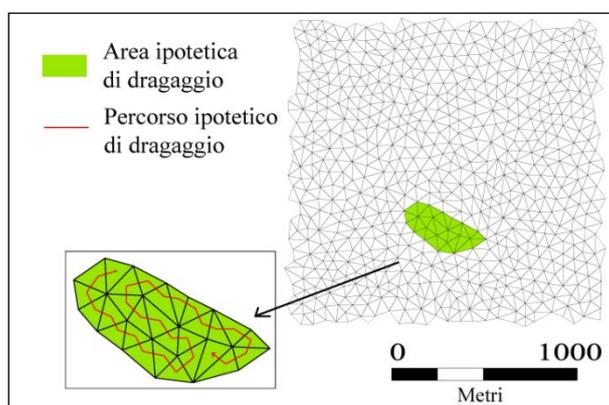


Figura SE5.1 - Discretizzazione dell'area di dragaggio corrispondente allo scenario di movimentazione del "volume unitario" di riferimento

Per lo scenario di dragaggio ipotizzato, è stato identificato un possibile percorso ottimizzato della draga congiungendo i centroidi delle singole maglie (s1, s2, s3, ..., s28, area 1, Figura SE5.2 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). In funzione della numerosità delle maglie della griglia e del tempo necessario per il completamento dei lavori di dragaggio da simulare, è stato stimato, per ogni tipologia di draga, un tempo medio di permanenza nella singola posizione (maglia del grigliato di calcolo). In tal modo è possibile costruire la serie temporale delle localizzazioni dei centroidi delle celle occupate dalla draga, il relativo flusso di sedimento (kg/s) e percentuale di fine.

Alternativamente, il percorso compiuto dalla draga può essere schematizzato come una serie di sorgenti puntuali, preliminarmente identificate nel dominio di calcolo (nel caso in esame 28 sorgenti puntuali adiacenti) che si attivano/disattivano in successione, restando attive il tempo medio necessario al completamento del dragaggio della superficie di ogni singola maglia. In questo caso devono essere predisposte serie temporali di "accensione" delle diverse sorgenti puntuali alle quali è associata una portata fluida (m³/s, di entità trascurabile) e una adeguata concentrazione di sedimenti (kg/m³) in modo che il flusso di sedimenti dalla sorgente sia quello stimato dalla caratterizzazione della sorgente (cfr. SE4).

Come anticipato nella SE4, il rilascio dei sedimenti durante l'escavo è stato considerato costante lungo la colonna d'acqua per la draga meccanica e confinato in prossimità del fondo nell'intorno della testa dragante (nelle fasi iniziali di sviluppo del pennacchio) per il dragaggio idraulico. Tali ipotesi esemplificative devono essere opportunamente definite, caso per caso, in relazione alle specifiche caratteristiche ambientali (es. profondità del sito di intervento) e delle modalità operative utilizzate (es. dimensioni e grado di penetrazione del dispositivo di taglio). Le differenti modalità di rilascio lungo la verticale devono, quindi, essere opportunamente implementate nella definizione del modello di trasporto in funzione della discretizzazione verticale prescelta (Tabella SE.5).

A titolo esemplificativo in Tabella SE5 è riportata la discretizzazione della sorgente di dragaggio per

due differenti aree di intervento, localizzate in parti diverse del dominio di calcolo e con possibile diversa estensione media della maglia della griglia (area 1, 28 celle da 2.500 m²; area 2, 32 celle da 2.200 m² circa, Figura SE5.2). L'esempio riportato nella presente SE è tratto e modificato da Feola *et al.* (2015), a cui si rimanda per maggiori dettagli.

Come riportato in Tabella SE5 il tempo medio (t_i) di permanenza della draga nella singola maglia (o attivazione della singola sorgente, s_i) è differente in funzione della macchina operatrice e della dimensione media della maglia nell'area del dominio di calcolo in cui avviene l'intervento.

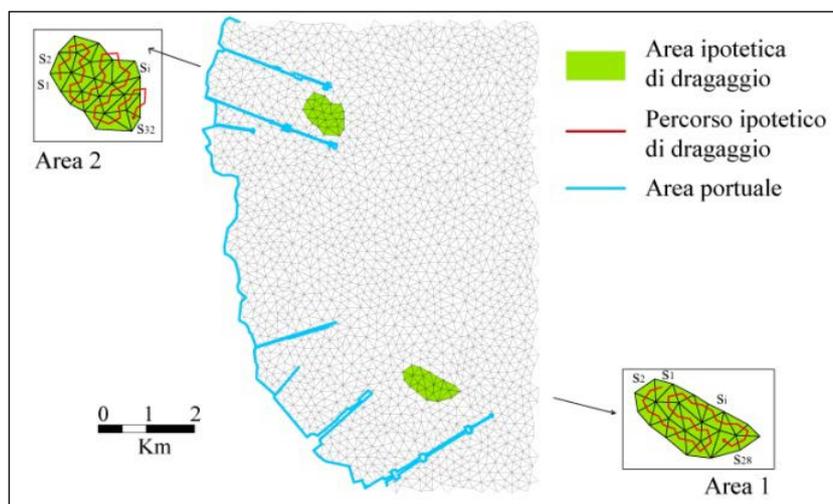


Figura SE5.2 - Dettaglio della discretizzazione dell'area di dragaggio corrispondente allo scenario di movimentazione del "volume unitario" di riferimento ed inserimento nel dominio di calcolo in corrispondenza di due differenti scenari di dragaggio (area 1, 28 celle; area 2, 32 celle)

Tabella SE5 - Discretizzazione della sorgente di dragaggio per due diverse draghe (meccanica e idraulica) e due differenti aree di dragaggio all'interno di un dominio di calcolo (modificato da Feola *et al.*, 2015).

	Unità Misura	AREA 1		AREA 2	
		Draga Meccanica	Draga Idraulica	Draga Meccanica	Draga Idraulica
Volume unitario da dragare	m ³	70.000		70.000	
Profondità di scavo	m	1		1	
Superficie di scavo	m ²	70.000		70.000	
Produttività	m ³ /gg	2.400	9.000	2.400	9000
Giorni di dragaggio	gg	~30	~8	~30	~8
% spill	%	5		5	
Flusso di sedimento fine	kg/s	~2	~7	~2	~7
N. di maglie/sorgenti puntuali, S_i		28		32	
Superficie media maglia	m ²	2500		2200	
Tempo medio singola maglia/singola sorgente, t_i	h	~26	~7	~23	~6
Modalità di rilascio		Su tutta la colonna	Strato al fondo [0-14% profilo verticale]	Su tutta la colonna	Strato al fondo [0-14% profilo verticale]

APPENDICE 2: ESEMPIO DI SCHEDA INFORMATIVA DI PROGETTO

Nel seguito si riporta un esempio di scheda informativa di progetto (SIP), specifica per ogni progetto ed articolata nelle fasi *ante operam* (Tabella SIP-AO), in corso d'opera (Tabella SIP-IO) e *post operam* (Tabella SIP-PO), la cui compilazione potrebbe essere utile per l'implementazione degli studi modellistici, sia per supportare l'ottimizzazione e la gestione degli interventi nelle diverse fasi di progettazione e gestione (es. per calibrare/validare i modelli utilizzati per definire il flusso dei sedimenti fini risospesi/rilasciati dai mezzo di lavoro, cfr. par. 4.4, 4.5), sia per arricchire i database utilizzati per derivare le formulazioni empiriche per la stima del termine sorgente ed ampliarne gli intervalli di validità (cfr. par. 3.3 e 5.2)

Per massimizzare l'utilità della scheda informativa di progetto è auspicabile la sua compilazione:

- nell'*ante operam* (Tabella SIP-AO), in corso d'opera (Tabella SIP-IO) e nel *post operam* (Tabella SIP-PO) con una frequenza (o numero di campagne di monitoraggio) adeguata a fornire informazioni statisticamente rappresentative della torbidità naturale dell'area di intervento³⁸ (quindi per le principali condizioni meteo-marine e di eventuale traffico dei natanti che caratterizzano il paraggio in esame);
- in corso d'opera (Tabella SIP-IO) al cambio di ogni sessione (o lotto funzionale) dei lavori per cui si possano considerare costanti i fattori tecnico-operativi utilizzati (es. tipo di draga, produttività del ciclo di dragaggio/sversamento, ecc.) e ambientali dell'area di intervento (condizioni meteo-marine e caratteristiche del sedimento movimentato).

Si sottolinea, infine, che la scheda informativa è da ritenersi una guida per la raccolta dei dati utili agli scopi modellistici nelle diverse fasi progettuali (sia nel caso del progetto in esame che di progetti futuri). Inoltre, potrebbe non essere necessaria l'acquisizione di talune informazioni riportate nella proposta di scheda informativa perché disponibili presso altre fonti informative, oppure non di interesse per lo specifico caso in esame.

³⁸ Un'unica campagna potrebbe fornire informazioni sufficienti per definire le caratteristiche dei sedimenti e batimetriche utili per l'implementazione dei modelli preliminarmente all'avvio delle attività ma, in taluni casi, potrebbe non fornire informazioni statisticamente rappresentative delle condizioni meteo-marine e della conseguente torbidità naturale del sito.

Tabella SIP.AO - Esempio di scheda informativa di progetto sito-specifica, per la raccolta e la diffusione di informazioni/dati utili agli scopi modellistici nella fase ante operam.

ESEMPIO DI SCHEDA INFORMATIVA DI PROGETTO ANTE OPERAM (SIP-AO) (*)											
-- Informazioni e indagini ambientali utili per l'implementazione degli studi modellistici preliminari alle operazioni di movimentazione --											
COMPARTI AMBIENTALI	SEDIMENTO DA MOVIMENTARE	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE, MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI								Note	
		Parametri misurati	Valore	Unità di misura	Metodiche di campionamento				Data dei campionamenti e frequenza di acquisizione		
					Strumentazione utilizzata	N. stazioni di misura/campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e quota/profondità	Distanza da eventuali sorgenti di risospensione/rilascio			
			Tipologia e resistenza al taglio								
			Densità /contenuto d'acqua								
			Distribuzione granulometrica								
			Diametro medio								
			% di fine								
			Velocità critica risospensione (misurata o stimata) in relazione alle correnti locali								
			Contaminanti								
			Rilievo batimetrico								
	Tassi di deposizione										
	Altro:										
COLONNA D'ACQUA	Dati meteorologici e idrodinamici	CONDIZIONI METEOMARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA								Note	
		Parametri misurati	Valore o riferimento allegato con le serie dei dati	Unità di misura	Metodiche di campionamento				Data dei campionamenti e frequenza di acquisizione		
					Strumentazione utilizzata	N. stazioni di misura/campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e quota/profondità	Distanza da eventuali sorgenti di risospensione/rilascio			
			Vento (direzione e intensità)								
			Onde (altezza, direzione, periodo)								
	Livello marino										
	Pressione atmosferica										

		Correnti (direzione e intensità)									
		Altro									
	Parametri chimico-fisici	Profondità									
		Temperatura									
		Salinità									
		Densità									
		Ossigeno disciolto									
		Clorofilla									
		PH									
		Torbidità									
		Altro									
	Sedimenti in sospensione	SSC (valori background)									
		Diametro medio									
		Altro									
	Contaminanti:										
Altro:											
<p>(*) Per massimizzare l'utilità della SIP-AO è auspicabile la sua compilazione con una frequenza (o numero di campagne di monitoraggio) adeguata a fornire informazioni statisticamente rappresentative della torbidità naturale dell'area di intervento (quindi per le principali condizioni meteo-marine e di eventuale traffico dei natanti che caratterizzano il paraggio in esame)</p>											

Tabella SIP.IO - Esempio di scheda informativa di progetto sito-specifica, per la raccolta e la diffusione di informazioni/dati utili agli scopi modellistici nella fase in corso d'opera e per arricchire i database utilizzabili per valutare la fattibilità/compatibilità di progetti futuri.

ESEMPIO DI SCHEDA INFORMATIVA DI PROGETTO IN CORSO D'OPERA (SIP-IC) (**)										
-- Informazioni e dati (ambientali e operativi) utili per la verifica degli studi modellistici del progetto in esame in corso d'opera e per l'implementazione di studi modellistici nell'ambito di per progetti futuri --										
COMPARTI AMBIENTALE	SEDIMENTO	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE E SEDIMENTOLOGICHE NEI FONDALI DELLE AREE INTERESSATE E PROSSIME A QUELLE INTERESSATE DALL'INTERVENTO								
		Parametri misurati	Valore	Unità di misura	Metodiche di campionamento				Note	
					Strumentazione utilizzata	N. stazioni di misura/campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e profondità	Distanza dal mezzo di lavoro e da eventuali sorgenti di risospensione/rilascio		Data dei campionamenti e frequenza di acquisizione
			Tipologia e resistenza al taglio							
			Densità							
			Distribuzione granulometrica							
			Diametro medio							
			% di fine							
			Velocità critica risospensione (misurata o stimata)							
		Contenuto d'acqua								
		Contaminanti:								
		Altro								
	COMPARTI AMBIENTALE	COLONNA D'ACQUA	CONDIZIONI METEOMARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA (***)							
			Parametri misurati	Valore o riferimento allegato con le serie dei dati	Unità di misura	Metodiche di campionamento				Note
						Strumentazione utilizzata	N. stazioni di misura/campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e quota/profondità	Distanza dal mezzo di lavoro e da eventuali sorgenti di risospensione/rilascio	
Dati meteorologici e idrodinamici			Vento (direzione e intensità)							
			Onde (altezza, direzione, periodo)							
	Livello marino									
	Pressione atmosferica									

		Correnti (direzione e intensità)									
		Altro									
	Parametri chimico-fisici		Profondità								
			Temperatura								
			Salinità								
			Densità								
			Ossigeno disciolto								
			Clorofilla								
			PH								
			Torbidità								
			Altro								
			SSC in prossimità dei mezzi di lavoro (Termine Sorgente)								
			SSC in aree non disturbate dai lavori (verifica dei valori background)								
			Diametro medio								
			Altro								
	Contaminanti:										
	Altro:										
INFORMAZIONI SULLE MODALITÀ TECNICHE E OPERATIVE											
CONDIZIONI DI UTILIZZO		Parametri operativi	Valore - range di variabilità	Unità di misura	Descrizione					Note	
		Tipologia draga/mezzo									
		Modalità di carico/trasporto									
		Profondità di lavoro (max-min)									
		Potenza pompe o capacità della benna									
		Produttività									
		Profondità di taglio dichiarata (in caso di escavo)									

	Spessore di ricoprimento dichiarato (in caso di sversamento)				
	Densità del sedimento movimentato				
	Flusso di rilascio/risospensione in prossimità della condotta/benna				
	Modalità di rilascio (al fondo, sulla colonna, etc.)				
	Altro				
CICLO DI LAVORO	Data di inizio della sessione del ciclo dei lavori				
	Data di fine della sessione del ciclo dei lavori				
	Eventuali anomalie/interruzione dei lavori				
	Velocità di spostamento della draga				
	Posizione della draga				
	Volumi movimentati				
	Superficie di escavo				
	Altro				
MISURE CORRETTIVE E DI MITIGAZIONE					
CONDIZIONI DI UTILIZZO	Caratteristica	Descrizione	Localizzazione, profondità, estensione	Note	
	Tipologia misura				
	Data installazione				
	Data rimozione				
	Altro				
<p>(**) Per massimizzare l'utilità della SIP-IC (per il progetto in esame e per progetti futuri) è auspicabile la sua compilazione ad ogni cambio della sessione dei lavori (e delle modalità operative) e di rilevanti variazioni delle condizioni meteo-marine.</p> <p>(***) Per consentire una migliore interpretazione dei dati acquisiti in corso d'opera, è auspicabile l'acquisizione di informazioni/dati sulle condizioni meteorologiche e i parametri chimico-fisici della colonna d'acqua prima dell'avvio delle diverse sessioni dei lavori (e quindi delle attività di monitoraggio) per cui è prevista la compilazione della SIP-IO.</p>					

Tabella SIP.PO - Esempio di scheda informativa di progetto sito-specifica, per la raccolta e la diffusione di informazioni/dati utili agli scopi modellistici nella fase post operam.

ESEMPIO DI SCHEDA INFORMATIVA DI PROGETTO POST OPERAM (SIP-PO) (**)										
-- Informazioni e dati ambientali al termine delle operazioni utili per la verifica degli studi modellistici nel <i>post operam</i> --										
COMPARTI AMBIENTALI	SEDIMENTO	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE, MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI NELLE AREE INTERESSATE E PROSSIME AL SITO D'INTERVENTO								
		Parametri misurati	Valore	Unità di misura	Metodiche di campionamento				Data dei campionamenti e frequenza di acquisizione	Note
					Strumentazione utilizzata	N. stazioni di misura/campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e profondità	Distanza da eventuali sorgenti di risospensione/rilascio		
		Tipologia e resistenza al taglio								
		Densità								
		Distribuzione granulometrica								
		Diametro medio								
		% di fine								
		Velocità critica risospensione (misurata o stimata)								
		Contenuto d'acqua								
		Contaminanti								
		Tasso di deposizione								
		Rilievo batimetrico (verifica spessore escavo/ricoprimento)								
Altro										
COLONNA D'ACQUA	Dati meteorologici e idrodinamici	CONDIZIONI METEOMARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA								
		Parametri misurati	Valore o riferimento allegato con le serie dei dati	Unità di misura	Metodiche di campionamento				Data dei campionamenti e frequenza di acquisizione	Note
					Strumentazione utilizzata	N. stazioni di misura/campionamento ed eventuale codifica	Coordinate e profondità	Distanza da eventuali sorgenti di risospensione/rilascio		
		Vento (direzione e intensità)								
Onde (altezza, direzione, periodo)										
Livello marino										

		Pressione atmosferica								
		Correnti (direzione e intensità)								
		Altro								
	Parametri chimico-fisici	Profondità								
		Temperatura								
		Salinità								
		Densità								
		Ossigeno disciolto								
		Clorofilla								
		PH								
		Torbidità								
		Altro								
	Lettura dei solidi sospesi	SSC								
		Diametro medio								
		Altro								
Contaminanti:										
Altro:										

(**) Da compilare se previsto monitoraggio nel *post operam* in funzione delle finalità ambientali e progettuali delle operazioni e dei risultati degli studi, al fine di verificare il ripristinarsi delle condizioni ambientali iniziali o di nuove condizioni di equilibrio.