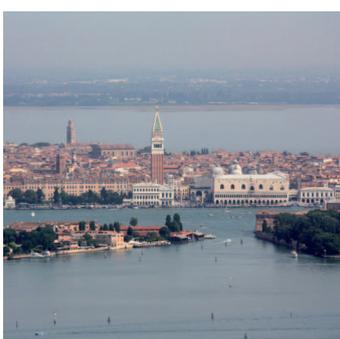


IL CONTROLLO AMBIENTALE DELLA COSTRUZIONE DEL MOSE

10 anni di monitoraggi
tra mare e laguna di Venezia
2004 - 2015



Editors

P. Campostrini, C. Dabalà, P. Del Negro, L. Tosi



Questo volume riassume i principali risultati dei "Monitoraggi degli effetti dei cantieri prodotti dalla costruzione delle opere alle bocche lagunari" condotti a partire dal 2004 nell'ambito degli Studi B.6.72 B/1 - B/11 del Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche Veneto - Trentino Alto Adige - Friuli Venezia Giulia (già Magistrato alle Acque di Venezia), affidati al Consorzio Venezia Nuova e sviluppati da CORILA.

Alta sorveglianza

Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche Veneto
- Trentino Alto Adige - Friuli Venezia Giulia (già Magistrato alle
Acque)

Ufficio Salvaguardia di Venezia
*Giampietro Mayerle, Fabio Riva,
Valerio Volpe, Maria Adelaide Zito*

A cura di

CORILA
*Editors: Pierpaolo Campostrini, Caterina Dabalà,
Paola Del Negro, Luigi Tosi*

Con i contributi specialistici di

CORILA
Pierpaolo Campostrini, Caterina Dabalà, Chiara Dall'Angelo
Dipartimento di Biologia, sezione di Etologia, Università di Pisa
Natale Emilio Baldaccini

Dipartimento di Georisorse e Territorio, Politecnico di Torino
Alessandro Casasso, Antonio Di Molfetta, Rajandrea Sethi

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale,
Università degli Studi di Padova (DICEA-UNIPD)
Giampaolo Di Silvio

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara
*Renzo Cremonini, Patrizio Fausti, Maria Carmen Guerra,
Andrea Santoni, Giuliano Scalpelli Quiqueto,
Nicolò Zuccherini Martello*

Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica,
Università Ca' Foscari di Venezia (DAIS-UNIVE)
*Marco Anelli Monti, Francesco Cavarro, Francesca Coccon,
Piero Franzoi, Vyrion Georgalas, Elisa Morabito, Fabio Pranovi,
Simone Redolfi Bristol, Giovanni Sburlino, Patrizia Torricelli,
Matteo Zucchetta*

© Copyright CORILA
Consorzio per il Coordinamento delle Ricerche
inerenti al sistema Lagunare di Venezia

S. Marco 2847, Palazzo Franchetti
30124 Venezia

Tel. +39-041.2402511 - pec: corila@pec.it

direzione@corila.it

www.corila.it

This work is licensed under a
Creative Commons Attribution 4.0 International License.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Stampa Nuova Jolly, Padova 2017

Coordinamento generale

Consorzio Venezia Nuova
*Fabio Beraldin, Giovanni Cecconi, Claudia Cerasuolo,
Massimo Gambillara*

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima,
Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISAC-CNR)
Franco Belosi, Daniela Cesari, Daniele Contini

Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche
(ISMAR-CNR)
*Giuliano Lorenzetti, Giorgia Manfè, Marco Sigovini,
Davide Tagliapietra, Luca Zaggia*

Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali,
Consiglio Nazionale delle Ricerche (IDPA-CNR)
Andrea Gambaro

Museo di Storia Naturale di Venezia
Luca Mizzan, Marco Uliana, Cecilia Vianello

SELC soc. coop.
*Isabelle Cavalli, Emiliano Checchin, Daniele Curiel,
Daniele Mion, Chiara Miotti, Andrea Rismondo, Francesco Scarton*

Università IUAV di Venezia
Marco Della Puppa, Marco Mazzarino

*Francesco Barbieri, Elena Elvini, Leonardo Ghirelli,
Lorenzo Zanella*

*Tutti i rapporti relativi ai monitoraggi dei cantieri del MOSE sono
a disposizione al sito web www.monitoraggio.corila.it.*

*La presente relazione scientifica è parte delle attività finanziate
dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Provveditorato
Interregionale per le Opere Pubbliche del Veneto - Trentino
Alto Adige - Friuli Venezia Giulia (PROVV.OO.PP.), già
Magistrato alle Acque di Venezia (MAG.ACQUE), tramite il
concessionario Consorzio Venezia Nuova (CVN).*

*Tutte le figure, salvo quelle di cui è indicata esplicitamente la
fonte, sono di proprietà di CORILA e degli autori.*

*Le affermazioni qui riportate sono di responsabilità degli autori
e non necessariamente sono condivise dal Provveditorato
o dal Concessionario.*



La torbidità e l'idrodinamica nelle aree interessate dai cantieri alle bocche di porto

Monitoring of turbidity and hydrodynamics in the construction sites at the inlets

Giampaolo Di Silvio, Luca Zaggia, Chiara Dall'Angelo,
Giuliano Lorenzetti, Giorgia Manfè

Introduzione

La realizzazione delle opere per la difesa di Venezia e della laguna dai fenomeni di acqua alta ha reso necessaria l'esecuzione di un complesso sistema di interventi per adeguare la morfologia dei fondali delle bocche di porto alle strutture e alle funzionalità del sistema di barriere mobili progettato, il Sistema MOSE. Ne sono esempio gli interventi di riprofilatura dei fondali e la ricollocazione del canale navigabile, la realizzazione delle opere di protezione fondali a monte e a valle delle barriere, la costruzione delle opere di spalla, la costruzione dell'isola nuova nel basso fondale della bocca di porto di Lido, la realizzazione delle lunate foranee e lo scavo del recesso di barriera per la posa dei cassoni e delle paratoie del MOSE. Oltre a questi interventi principali è stata realizzata tutta una serie di attività minori che hanno richiesto operazioni di regolazione, sagomatura e rifinitura dei fondali in prossimità delle opere già realizzate ed il raccordo delle stesse alla morfologia preesistente.

Per avere un'idea approssimativa dei volumi complessivamente movimentati da queste operazioni, basti pensare che la quantità di sedimenti corrispondente al solo ingombro dei cassoni è superiore ad 1 milione di metri cubi e che, considerando gli spazi fra i cassoni ed il recesso di barriera, il volume totale di sedimenti movimentati per la posa dei cassoni potrebbe essere di poco inferiore a 1,5 milioni di metri cubi. A questo si sommano i volumi delle varie operazioni di raccordo, sagomatura e riprofilatura dei fondali delle bocche.

Tutti questi interventi, realizzati in tempi diversi nell'arco dell'evoluzione dei cantieri, sono stati effettuati utilizzando varie metodologie di lavoro, anche se nella gran parte dei casi si tratta di dragaggi e posa di materiale lapideo di diverse dimensioni (blocchi di varie dimensioni e tout-venant). Le tipologie di mezzi utilizzati per questi interventi comprendono quasi tutto il panorama conosciuto nell'ambito delle attrezzature di dragaggio, ed anche un'imbarcazione con chiglia apribile.

In ogni intervento di ingegneria costiera che comporti la movimentazione di sedimenti, la realizzazione delle opere si accompagna ad una serie di impatti che hanno inizio dalle fasi di cantiere, a causa della dispersione di materiale sospeso al di fuori dell'area di lavoro, e proseguono nel medio e lungo periodo come effetto dell'interazione fra le strutture realizzate e le forzanti naturali del sistema interessato.

Nel caso della laguna di Venezia, trattandosi di un ambiente di peculiare valore, gli impatti legati alla realizzazione del Sistema MOSE dovevano rimanere necessariamente contenuti, limitando lo stress ambientale a livelli accettabili per l'ecosistema. Si è reso necessario, pertanto, programmare un monitoraggio continuo, le cui difficoltà intrinse-

che di realizzazione, visto l'ambiente altamente dinamico delle bocche mareali della laguna, hanno portato all'adozione di metodologie di lavoro e di strumentazione tipiche della ricerca scientifica.

Questo contributo descrive le attività svolte dal team scientifico composto da personale ISMAR-CNR, OGS, Università di Padova e CORILA, che ha operato nel corso dei dieci anni di monitoraggio per lo studio della torbidità e dell'idrodinamica durante la realizzazione del Sistema MOSE, e ne riassume i principali risultati.

Scopo dell'attività è quello di valutare gli effetti della movimentazione dei sedimenti, ripascimenti, scarico pietrame e dragaggi sull'ambiente e sugli ecosistemi di pregio circostanti le aree di cantiere, fornendo anche indicazioni operative sulle modalità di esecuzione delle lavorazioni, al fine di mantenere gli impatti generati all'interno di limiti precauzionali. Le indagini hanno previsto sia specifiche campagne di misura della torbidità prodotta dalle attività di cantiere, sia lo studio della variabilità spaziale e temporale del particolato solido sospeso in condizioni naturali.

La quantità consistente di dati acquisiti, sia in termini spaziali che temporali, ha richiesto la messa a punto di specifiche metodologie di elaborazione. L'analisi statistica dei dati registrati nel corso del primo anno di studio ha permesso la definizione di un valore massimo ammissibile (valore soglia) della concentrazione del particolato solido messo in sospensione nella colonna d'acqua dalle attività di dragaggio. Questo valore rappresenta un riferimento per tutte le osservazioni successive, incluse quelle tuttora in corso, al fine di contenere la torbidità ad un livello accettabile per le aree interessate dalle operazioni di cantiere e per le aree sensibili ad esse limitrofe. Per valutare la conformazione e l'evoluzione del pennacchio di torbida (*plume*) generato dai dragaggi, in funzione anche delle correnti di marea, è stato messo a punto un modello matematico semplificato di trasporto e dispersione dei sedimenti, capace di stimare la concentrazione di solidi sospesi generata ad una qualsiasi distanza dai mezzi di scavo.

Per la sua evidente importanza nei fenomeni di trasporto dei sedimenti in sospensione e per le problematiche connesse al ricambio idrico, è stata quindi approfondita l'idrodinamica del sistema delle bocche di porto, attraverso misure della intensità e direzione della corrente, riconosciuta -assieme alle altre condizioni meteomarine- come una fondamentale forzante agente sul sistema.

Grazie alle conoscenze complessivamente ottenute dalle attività di misura della matrice acqua, dall'analisi dei dati e dalla modellazione, è stato possibile ottenere alcune indicazioni generali sui cambiamenti delle condizioni idrodinamiche e morfologiche nell'importante area di connessione tra la laguna di Venezia e il mare.

Sistemi di dragaggio e rilascio pietrame

Nel corso degli interventi alle bocche sono state utilizzate diverse tipologie di sistemi di dragaggio o rilascio di pietrame, in relazione alle diverse esigenze di cantiere:

- *draga a benna bivalve o a grappo o grabs buckets* (figura 1), con impianti montati su imbarcazione o su pontone. Il ciclo di lavoro consiste nella calata della benna in acqua, nella chiusura sul fondo, nel sollevamento e nello scarico del materiale sulla tramoggia o sul pontone. Si tratta del tipo di apparecchiatura che è stata maggiormente utilizzata durante la realizzazione delle opere del Sistema MOSE, sia per l'attività di scavo che per la posa di materiale lapideo. Il suo impatto dipende, oltre che dal volume di scavo e dalle condizioni idrodinamiche, dalla condotta delle operazioni e dal livello di manutenzione dell'attrezzatura di scavo. Il monitoraggio deve tener conto di tutti i processi in atto nell'area di impatto e delle conseguenze delle attività sull'ambiente circostante.
- *draga idrorefluente o suction dredger* (figura 2). L'attrezzo di scavo, manovrato da un sistema idraulico o elettrico, è montato all'estremità di un braccio d'acciaio mobile, at-

1. Draga a grappo durante operazioni di rilascio pietrame presso la lunata foranea di Lido.
2. Draga idrorefluente presso la bocca di Malamocco.
3. Effetto della draga idrorefluente a sfioro "ASTRA" durante le operazioni di dragaggio.
4. Motobetta a scafo apribile "LYBRA" mentre rilascia il carico di pietrame per la posa in opera del nucleo della lunata alla bocca di porto di Lido.

taccato allo scafo mediante cerniere, all'interno del quale è presente una pompa che aspira acqua e sedimento; la miscela viene scaricata nell'area di conferimento. Si tratta della tipologia di draga a minore impatto, trattandosi di un sistema praticamente chiuso. È stata utilizzata in alcune particolari lavorazioni nelle aree di cantiere, ad esempio per la preparazione della sezione d'imposta del molo che delimita l'area del porto rifugio e della conca di navigazione nella spalla nord della bocca di porto di Lido.

- *draga idrorefluente a sfioro* o *trailing suction hopper dredger* (figura 3). Il materiale del fondale (acqua e sedimento) viene aspirato mediante uno o due tubi, collegati ad un impianto di aspirazione molto potente, e scaricato nella stiva. All'interno della vasca di sedimentazione avviene un frazionamento meccanico dei materiali per cui le particelle più grossolane si depositano, mentre quelle più fini restano in sospensione a causa della turbolenza e vengono scaricate fuori bordo (overflow). Mano a mano che la stiva si riempie di materiale, aumenta progressivamente sia la concentrazione della miscela scaricata sia la sua granulometria. Quando le perdite diventano così elevate da non giustificare la prosecuzione dello sfioro, le attività di scavo vengono interrotte e la draga scarica il materiale accumulato nella stiva nella zona prevista per il conferimento dei sedimenti o su un'imbarcazione di appoggio. Questo sistema di dragaggio rappresenta la tipologia maggiormente impattante e ad essa è stata dedicata una particolare attenzione nel corso delle prime fasi del monitoraggio attraverso lo sviluppo di un modello matematico del processo di stivaggio e rilascio dei materiali sfiorati, nonché dei susseguenti fenomeni di dispersione, che determinano la configurazione del pennacchio di materiale rilasciato dallo sfioramento.
- *motobetta a chiglia apribile* o *split-hull* (figura 4), che scarica il materiale contenuto nella stiva tramite l'apertura del fondo della chiglia. È stata utilizzata durante la costruzione della lunata foranea a Lido per la posa rapida di ingenti quantità di materiale lapideo.



Effetti delle attività di cantiere e determinazione del valore soglia della torbidità

Tutte le attività di dragaggio, indipendentemente dal tipo di draga o dalle precauzioni prese durante gli scavi, causano un aumento temporaneo della quantità di particolato sospeso nella colonna d'acqua, generando, a partire dal punto di scavo, un pennacchio di torbida. Al di là dell'effetto visibile in superficie, l'aumento della quantità di particelle in sospensione può avere conseguenze negative su tutte le componenti della rete trofica (Anchor Environmental CA, 2003) che nel medio e lungo periodo potrebbero ripercuotersi sul funzionamento dell'ecosistema.

Per quanto riguarda gli organismi acquatici si distinguono due tipologie di effetti che l'aumento di particolato in sospensione può causare (Anchor Environmental CA, 2003): effetti comportamentali (allarmismo, modifiche della possibilità di movimento) e fisiologici (modifiche della respirazione e del meccanismo di filtrazione, soffocamento, abrasione, modifiche nello sviluppo di specie nello stadio larvale) che possono portare alla mortalità o alla diminuzione della motilità, della crescita e della riproduzione.

L'aumento della quantità di particelle sospese si traduce anche in una diminuzione della trasparenza e in un aumento della deposizione al fondo. La diminuzione della trasparenza e la conseguente riduzione della profondità di penetrazione della luce causano problemi agli organismi dotati di un sistema visivo e rallentano la produzione primaria (fotosintesi), risorsa chiave, per la vita degli organismi acquatici (Anchor Environmental CA, 2003). L'eccessivo tasso netto di deposizione dei sedimenti che, a parità di granulometria e di capacità di risollevarli da parte delle correnti e delle onde, è comunque strettamente legato alla torbidità, può causare una riduzione di tassi di crescita e riproduzione negli organismi presenti sul fondo, quali fanerogame, benthos, uova e larve di pesci (Anchor Environmental CA, 2003).

Durante la movimentazione di sedimenti particolarmente ricchi di materia organica e con potenziale redox fortemente negativo, l'ossidazione dei materiali messi in sospensione, caratterizzati da una forte domanda chimica di ossigeno, può dar luogo ad un rapido impoverimento dell'ossigeno stesso naturalmente disciolto nell'acqua. Questi fenomeni possono dar luogo a temporanee ipossie e anossie che possono causare la morte degli organismi acquatici oppure il degrado delle condizioni ambientali favorevoli alla loro vita (EPA Quality criteria for water, 1986).

Sono stati pubblicati numerosi studi riguardo agli effetti che le particelle sospese possono avere sugli organismi acquatici e i risultati disponibili hanno permesso di realizzare alcuni database comprendenti specie, valori soglia di concentrazione (mg/l), durata dell'esposizione, reazione (percentuale di mortalità, riduzione della crescita) e tipo di reazione (letale o subletale) (Anchor Environmental CA, 2003). In queste banche dati sono distinte due tipologie di esposizione: acuta (inferiore a 96 ore) e cronica (maggiore di 96 ore). Gli impatti dovuti alle operazioni di dragaggio (Wilber and Clarke, 2001) ricadono nella tipologia di esposizione "acuta". Per le specie ittiche di tipo estuarino, ma anche per molluschi e larve, i primi effetti negativi (10% di mortalità) si manifestano con concentrazioni di particelle sospese superiori a 100 mg/l e per persistenze superiori ad 1 giorno (Wilber and Clarke, 2001).

Nel caso delle attività di scavo nella laguna di Venezia, concentrazioni così elevate si possono verificare nell'immediata vicinanza dell'apparecchiatura di scavo e persistono per qualche ora al massimo. Anche le condizioni naturali possono dare luogo ad incrementi di torbidità alle bocche di porto determinando il raggiungimento di valori prossimi o superiori a quelli ritenuti potenzialmente pericolosi per gli organismi: in occasione di eventi meteo marini con vento superiore a 13 m/s, ad esempio, sono stati registrati va-

lori circa pari a 700 mg/l presso la stazione torbidimetrica LTP (figura 13). È chiaro che le specie che colonizzano questo ecosistema devono essersi adattate alle condizioni naturali prevalenti, e quindi anche a eventi meteomarinari di forte intensità, ma potrebbero risultare più sensibili a perturbazioni più contenute a livello di magnitudo ma più prolungate nel tempo.

Vista la difficoltà ad effettuare indagini per verificare la tolleranza su tutti gli organismi di un ecosistema, i piani di monitoraggio generalmente individuano un valore di riferimento (valore soglia) della concentrazione di particolato in sospensione attraverso un'analisi statistica delle variazioni temporali e spaziali nell'area. Questo approccio è stato utilizzato anche per la laguna di Venezia, stabilendo che la concentrazione media di particelle nella colonna d'acqua pari a 30 mg/l determina un'ammissibile modificazione rispetto alla situazione indisturbata ed è da considerarsi il valore soglia (APPENDICE "Calcolo del valore soglia della concentrazione").

Per l'individuazione del valore limite, è stato necessario adottare preliminarmente un criterio per identificare l'“Area di Impatto Totale” (A.I.T.), ristretta intorno alla draga, dove si ammette che la concentrazione di particelle possa raggiungere qualsiasi valore, mentre all'esterno il valore soglia stabilito non può essere superato. Per consentire alle specie lo spostamento ed evitare la zona perturbata, e per minimizzare l'impatto complessivo sull'ecosistema, l'A.I.T. dovrà essere sufficientemente più stretta della larghezza della bocca e avere una superficie relativamente poco estesa rispetto alla superficie totale della bocca di porto. È stata quindi identificata come A.I.T. un'area di 50.000 m² attorno alla zona di scavo e di forma variabile in funzione della velocità della corrente (figura 5). Le valutazioni teoriche, confermate da rilevazioni condotte in campo anche nel corso di questo studio, dimostrano che la concentrazione dei sedimenti sospesi diminuisce rapidamente con la distanza dalla draga, con diminuzione più contenuta per sedimenti fini e per correnti elevate, nella direzione della corrente. La forma del *plume* prodotto dalla draga risulta pertanto allungata per velocità elevate, essendo invece circoscritta attorno all'area di lavorazione per velocità ridotte.

Quindi, rispettando il valore limite di 30 mg/l all'esterno dell'A.I.T. si ha ragionevole



5. Esempio di forme dell'A.I.T. in funzione della velocità della corrente “v”, alla bocca di porto di Chioggia.
Dati mappa ©2016 Google.

certezza che l'impatto della torbidità generata sull'ambiente circostante, sia confrontabile per durata ed intensità alla concentrazione raggiunta durante alcuni eventi naturali (temporali e mareggiate) e per i quali si può assumere che la comunità biologica locale sia già adattata; ciò permette di classificare come minimo l'effetto sull'ecosistema circostante della lavorazione di cantiere. Va peraltro sottolineato che il valore di 30 mg/l è tre volte inferiore ai livelli riportati in letteratura relativamente ad esposizione acuta con effetti sub letali e quindi garantisce con un buon margine di sicurezza la tutela dell'ecosistema in esame (Wilber and Clarke, 2001; Anchor Environmental CA, 2003).

Materiali e metodi

La quantità di materiale risospeso e la sua dispersione areale (pennacchio o *plume*) dipendono da numerose variabili: morfologia (profondità e forma del canale), proprietà intrinseche dei materiali movimentati (granulometria, densità, contenuto organico e contenuto d'acqua), tipologia di draga e modalità di utilizzo, variabili ambientali (correnti, maree, moto ondoso).

Il monitoraggio è stato programmato in modo da poter valutare non solo l'impatto sull'ambiente alle diverse scale spaziali e temporali ma anche l'andamento e le eventuali variazioni delle forzanti agenti nel sistema, con l'ausilio, laddove necessario, di opportuni modelli ed algoritmi atti ad integrare tutte le informazioni.



6. Strumentazione oceanografica utilizzata:
A) sistema Rosette-CTD;
B) ADCP;
C) LISST- granulometro laser 100X.

A tal fine sono state effettuate diverse attività di rilevamento:

1. campagne di monitoraggio della torbidità prodotta direttamente dalle attività di cantiere;
2. campagne di monitoraggio dei parametri idrodinamici (intensità e direzione della corrente) e della torbidità lungo sezioni caratteristiche localizzate all'interno delle bocche di porto e nei pressi dei recessi di barriera;
3. registrazione in continuo della torbidità in stazioni fisse opportunamente posizionate sia all'interno sia all'esterno delle bocche di porto.

I risultati ottenuti hanno permesso inoltre di tarare e verificare un modello matematico della diffusione del pennacchio di concentrazione creato dalle draghe durante le attività di scavo e di fare alcune considerazioni preliminari sul trasporto solido e sui cambiamenti intercorsi in questi anni sulle condizioni idrodinamiche e morfologiche nelle aree prossime alla costruzione delle opere di difesa del Sistema MOSE.

Strumentazione utilizzata e parametri rilevati

Durante le attività di campo è stato impiegato un set di strumenti ad alto profilo tecnologico per la raccolta dei dati idrologici e fisici della colonna d'acqua. La restituzione del dato elaborato e validato è stata portata a termine mediante software dedicati. Si riporta di seguito una descrizione sintetica delle variabili ambientali misurate e della strumentazione oceanografica utilizzata.

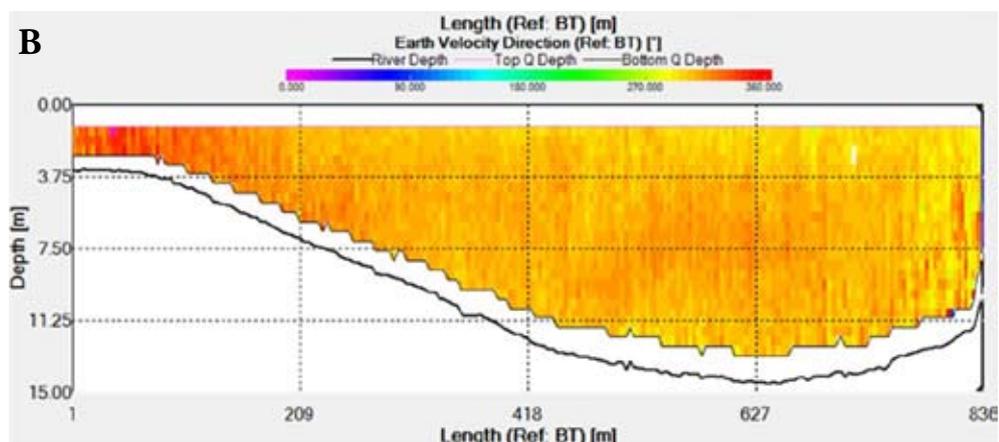
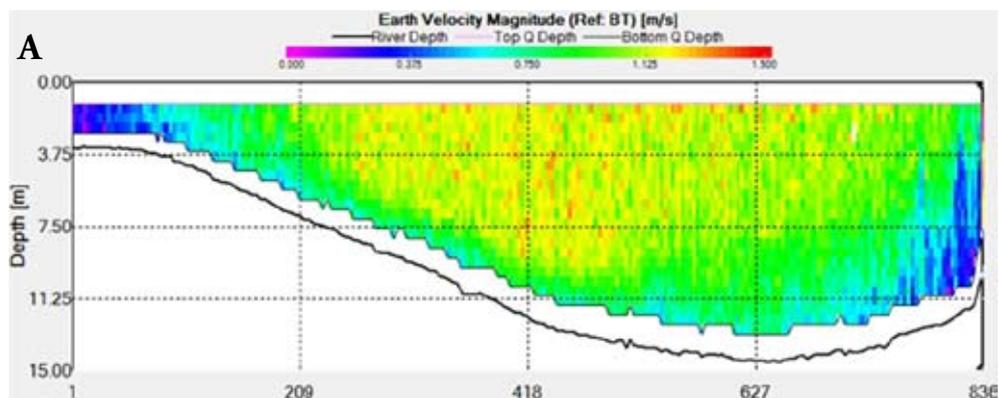
- *Prelievo di campioni e determinazione di parametri fisici della colonna d'acqua* (temperatura, conducibilità, torbidità). È stato utilizzato un sistema Rosette-CTD (figura 6A) costituito da una sonda multiparametrica (IDRONAUT®) con la quale si rilevano conduttività elettrica, temperatura e pressione/livello dell'acqua nel punto di immersione, e un carosello di bottiglie per il campionamento di volumi d'acqua a diverse profondità (Rosette InterOcean). I campioni d'acqua così raccolti vengono poi analizzati in laboratorio per la determinazione della concentrazione di particolato in sospensione (SPM, Suspended Particulate Matter) e della sua distribuzione granulometrica.
- *Misura di intensità e direzione della corrente*. Sono stati utilizzati profilatori acustici Doppler (ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler, figura 6B), strumenti che, montati sul fianco di una imbarcazione, emettono un segnale acustico a frequenza nota lungo la colonna d'acqua. Questo segnale viene modificato in intensità e frequenza dalle correnti marine e dal materiale presente in sospensione e, una volta ritornato alla sorgente emittente, fornisce informazioni circa la intensità e direzione di corrente e la quantità di particolato solido sospeso (backscatter). Il risultato della misura è una mappatura istantanea del campo di velocità della corrente lungo il percorso dell'imbarcazione (figura 7).
- *Determinazione della granulometria dei sedimenti*. È stato utilizzato un granulometro laser LISST-100X (Laser In Situ Scattering and Transmissometry, figura 6C) in situ o in laboratorio (sui campioni d'acqua prelevati in campo).
- *Determinazione della concentrazione di "particolato solido in sospensione"* (Suspended Particulate Matter-SPM). La concentrazione di particolato sospeso, espressa in milligrammi di solidi per litro d'acqua (mg/l), dipende dal peso totale delle particelle in sospensione e soprattutto da quelle con diametro maggiore di 0.4 μm . È funzione diretta del numero, della dimensione e del peso specifico delle particelle e comprende sia la componente inorganica (argilla, limo, sabbia, ecc.) del sedimento sia la componente organica (aggregati di macromolecole, organismi viventi, resti di organismi). La quantificazione è stata eseguita in laboratorio sui campioni d'acqua secondo il me-

todo IRSA (Quaderno 100/2050/94, ANPA, 1999) che prevede la pesatura di una membrana di policarbonato (Millipore) prima e dopo la filtrazione di un adeguato volume d'acqua.

- *Misura della torbidità.* La torbidità è definita come la riduzione della trasparenza dell'acqua dovuta alla presenza di sostanze in sospensione. Tale parametro è una funzione diretta del numero, della superficie e dell'indice di rifrazione delle particelle in sospensione ma, al tempo stesso, è una funzione inversa delle loro dimensioni e dipende anche dalla lunghezza d'onda del raggio incidente. Non è una misura diretta di concentrazione ma viene espressa in FTU (Formazine Turbidity Unit) e si rileva sfruttando la proprietà dell'acqua di attenuare o disperdere un fascio di luce (nel visibile o infrarosso) o di onde sonore che attraversa un determinato volume (fenomeno di scattering).

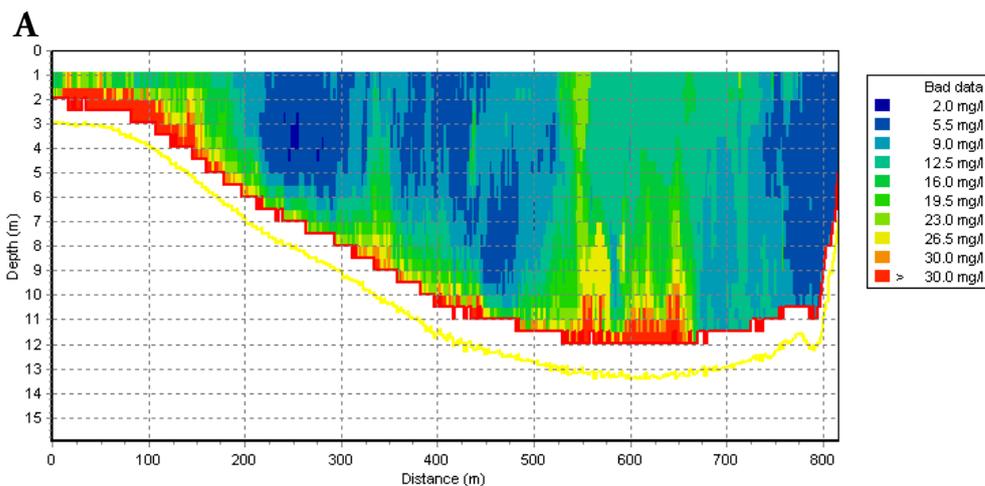
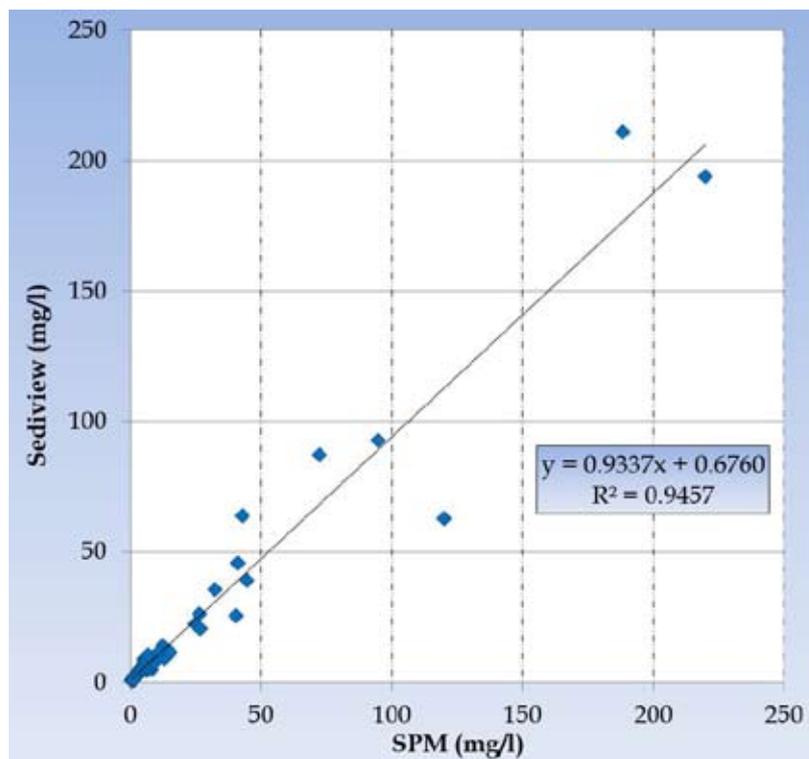
Per il rilievo della torbidità in continuo sono state allestite alcune stazioni fisse, descritte nel seguito, equipaggiate con sonde multiparametriche autoregistranti (Idronaut Mod. OceanSeven 304 CTD-T; Idronaut Srl., 2005a) fornite di un sensore ottico OBS (Optical Backscatter Sensor, Seapoint Turbidity Meter; Idronaut Srl., 2005b) che genera una tensione di uscita proporzionale alla quantità di particelle sospese lungo la colonna d'acqua. Per tutto il periodo di monitoraggio le sonde hanno lavorato con una frequenza di campionamento di un dato ogni 15 minuti. Queste misure di torbidità, effettuate con sensore ottico, vengono poi convertite in concentrazione di SPM mediante una relazione di calibrazione ottenuta utilizzando i valori direttamente determinati in campioni d'acqua, periodicamente prelevati in corrispondenza dello strumento.

Per il rilievo della torbidità nella colonna d'acqua nelle aree di cantiere e nelle sezio-

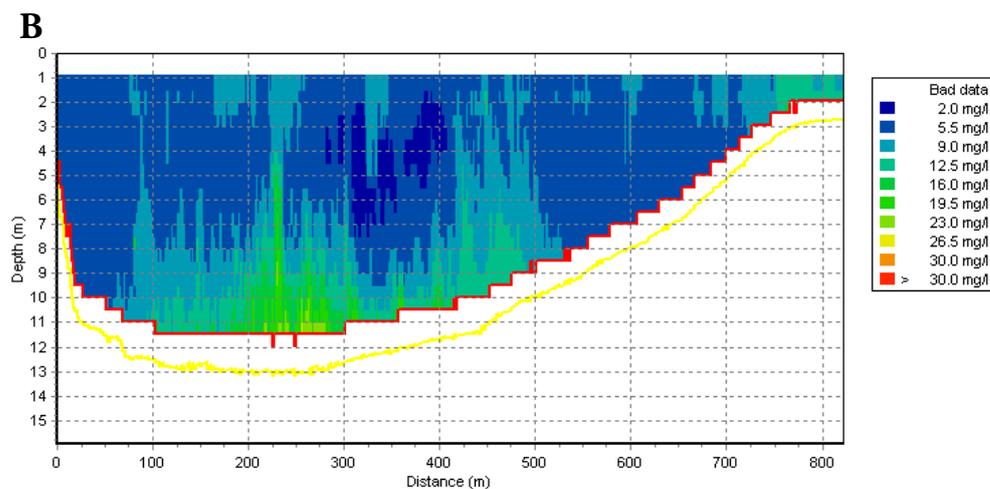


7. Distribuzione della velocità (A) e della direzione (B) della corrente nella sezione trasversale della bocca di porto di Lido. Sono visibili le zone di massima velocità, al centro della sezione, caratterizzate da una ben definita direzione di flusso di marea crescente.

8. Relazione lineare tra la concentrazione del particolato solido sospeso stimata col metodo Sediview e la concentrazione misurata sui campioni d'acqua prelevati durante la campagna di monitoraggio effettuata alla bocca di porto di Lido nei giorni 25-26 agosto 2010.



9. Distribuzione del particolato solido in sospensione nella sezione principale della bocca di porto di Lido il giorno 25 agosto 2010, in diverse condizioni di marea: fase iniziale del calante (A), caratterizzata da basse concentrazioni, alle ore 11.54; fase finale del calante (B), caratterizzata da risospensione di sedimenti dal fondo, alle ore 15.35.



ni dei canali di bocca si è usata invece un'imbarcazione appositamente equipaggiata con profilatore acustico ADCP e sistema Rosette-CTD. Le misure effettuate con la strumentazione Rosette-CTD e le concentrazioni di SPM determinate nei campioni, prelevati simultaneamente all'acquisizione con ADCP, permettono, mediante il software dedicato DRL-Sediview®, la conversione del valore del *backscatter* acustico in stime della concentrazione del particolato in sospensione. In figura 8 si osserva un esempio di correlazione tra i valori di concentrazione misurati e i valori di concentrazione stimati col metodo Sediview. Diventa quindi possibile ottenere, per le sezioni investigate, mappature bidimensionali della concentrazione del particolato solido in sospensione (figura 9).

- *Altre informazioni utili all'elaborazione dei dati e all'interpretazione dei risultati delle indagini: dati meteo-marini.* Per queste informazioni si è fatto riferimento alle registrazioni effettuate alla piattaforma oceanografica "Acqua alta" del CNR-ISMAR, per la direzione e velocità del vento, e ai mareografi gestiti dall'ICPSM del Comune di Venezia per il livello di marea (figura 13).

Metodologie di indagine

Campagne di monitoraggio della torbidità prodotta direttamente dalle attività di cantiere

Le campagne di misura eseguite durante le operazioni di dragaggio prevedono l'esecuzione di percorsi a zig-zag (transetti) che intersecano il pennacchio di torbida prodotto dalla draga in attività a valle, rispetto alla corrente, del punto di scavo (si veda, come esempio, la figura 15). I transetti vengono estesi lateralmente e longitudinalmente oltre il perimetro del *plume* e dell'"Area di Impatto Totale", la cui forma viene stimata in funzione della velocità della corrente, fino a rilevare i valori di concentrazione prossimi a quelli naturalmente presenti nell'area in condizioni imperturbate.

Campagne di monitoraggio dei parametri idrodinamici (velocità e direzione della corrente) e della torbidità lungo sezioni caratteristiche

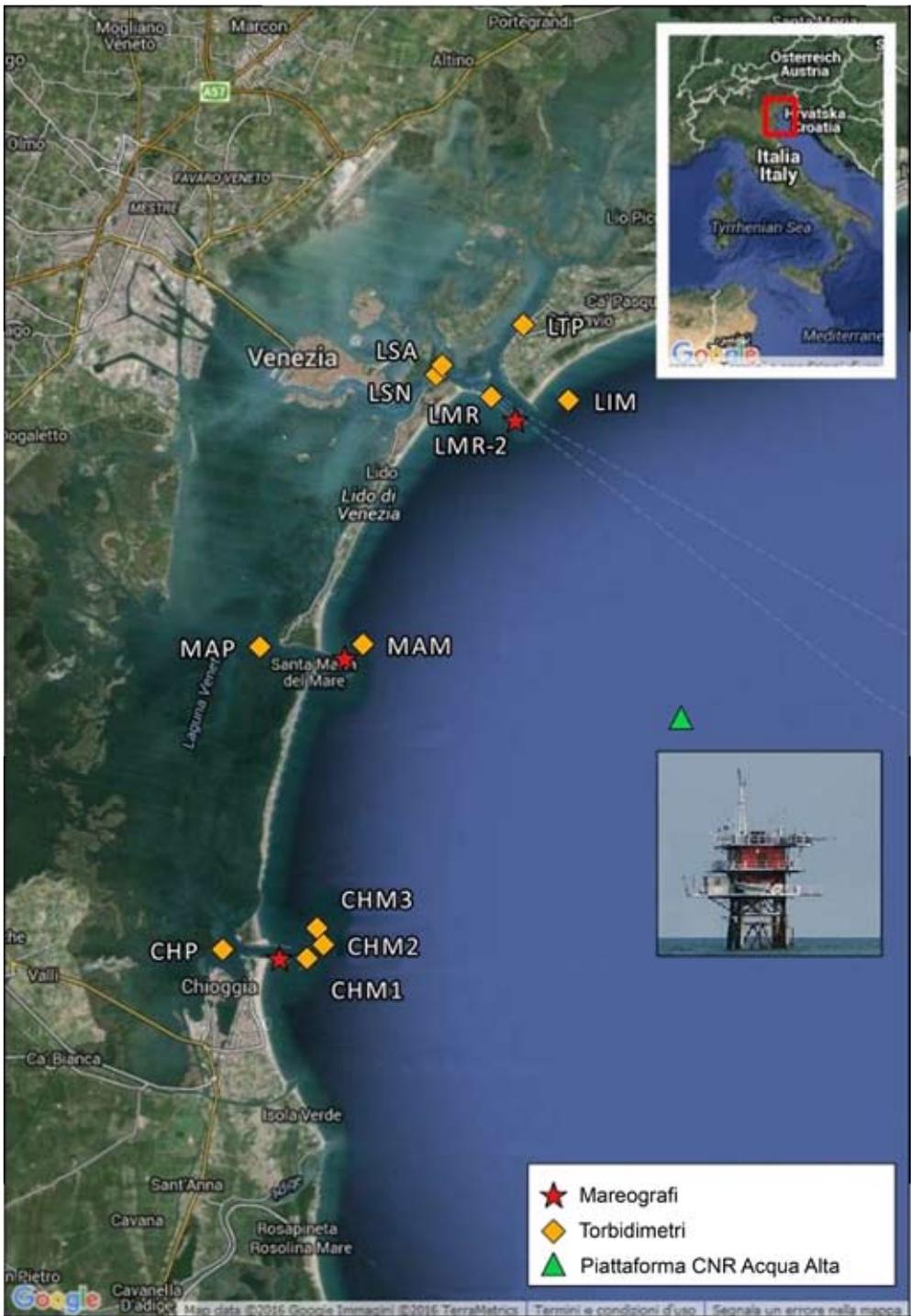
Le indagini per lo studio dell'idrodinamica e della torbidità nelle aree prossime ai cantieri sono effettuate con misure, ripetute in diverse condizioni meteomarine e di marea, lungo sezioni caratteristiche localizzate in prossimità delle bocche di porto, dei recessi di barriera e in sezioni interne alla laguna (figure 10, 11, 12).

Lungo ogni sezione vengono individuati dei punti notevoli, solitamente in posizione corrispondente al punto di massima profondità, in corrispondenza dei quali vengono acquisiti dei profili verticali per determinare velocità e direzione della corrente e, sui campioni d'acqua prelevati con il sistema Rosette-CTD, la concentrazione e granulometria del particolato solido in sospensione.

Altre misure sono effettuate in sezioni esterne ai tre canali ma comunque interessanti per investigare la dinamica dei flussi di scambio alle bocche. Queste sezioni sono localizzate nell'area immediatamente al di fuori delle bocche e in corrispondenza ai moli frangiflutti (lunate) per lo studio della nuova configurazione del getto uscente (figure 18 e 19).

Registrazione in continuo della torbidità in stazioni fisse

L'attività di rilevazione della torbidità in continuo nelle stazioni fisse è iniziata a maggio 2005 in 8 stazioni di misura (figura 13), opportunamente posizionate nei canali delle tre bocche o nelle immediate vicinanze, ed è proseguita quasi ininterrottamente insieme all'acquisizione dei parametri chimico-fisici dell'acqua (temperatura, conducibilità



13. Rete delle stazioni fisse per la misura della torbidità in continuo, mareografi e piattaforma CNR-ISMAR. Dati mappa ©2016 Google.

Tabella 1. Periodi di funzionamento delle stazioni per la misura della torbidità in continuo.

Inizio	Fine	Stazioni in laguna					Stazioni in bocca di porto		Stazioni a mare		
		LSN	LSA	LTP	MAP	CHP	LMR	LMR-2	LIM	MAM	CHM
01/04/2005	31/05/2006	X		X	X	X	X		X	X	X
01/06/2006	30/04/2007		X	X	X	X	X	X	X		
01/05/2007	30/04/2008		X	X	X	X	X	X	X	X	
01/05/2008	30/04/2009		X	X	X	X	X	X	X	X	
01/05/2009	30/04/2010				X	X				X	
01/05/2010	30/04/2011				X	X				X	
01/05/2011	30/04/2012			X	X	X	X	X	X	X	
01/05/2012	30/04/2013			X	X	X	X	X	X	X	X
01/05/2013	30/04/2014			X	X	X	X	X	X	X	X
01/05/2014	30/04/2015				X	X				X	X

e livello/pressione). L'attività ha subito alcune variazioni durante il decennio di monitoraggio 2005-2015, in funzione dell'evoluzione e dello sviluppo delle lavorazioni dei cantieri (tabella 1).

Le stazioni sono state alloggiate presso postazioni mareografiche esistenti e realizzate con strutture diverse a seconda della profondità del fondale nei canali delle tre bocche di porto, all'interno della laguna e in mare (figura 14).

La strumentazione per la misura delle proprietà ottiche dell'acqua di mare è immersa per lunghi periodi; pertanto presenta alcuni problemi, quali la formazione di incrostazioni dovute ad una varietà di organismi animali e vegetali (*fouling*) e lo stazionamento temporaneo di materiali trasportati dalla corrente (residui di vegetali o plastica o animali come ad esempio granchi, uova di pesci o molluschi). Questi pregiudicano, se non addirittura impediscono, l'utilizzabilità delle informazioni registrate dalla strumentazione. Per garantire un livello accettabile della qualità delle informazioni raccolte ci si è avvalsi di una metodologia razionale e sistematica di manutenzione e calibrazione della strumentazione, nonché di "pulizia" dei dati dai valori palesemente errati e di una procedura di correzione del dato basata sul confronto con i dati dei campioni di acqua.

Una volta ottenuta la serie "corretta" dei valori di torbidità, misurati in FTU, si effettua la conversione in valori di concentrazione di SPM, misurati in mg/l; è stata infatti determinata, per ogni singola stazione, una relazione di regressione fra le concentrazioni determinate nei campioni d'acqua, prelevati in campo in concomitanza con le operazioni di pulizia, ed il valore della torbidità registrata dallo strumento nello stesso istante del prelievo (Di Silvio *et al.*, 2011).

14. Strutture di alloggiamento delle sonde per le stazioni LMR (A), CHM (B), CHP (C).



Risultati

Campagne di monitoraggio della torbidità prodotta direttamente dalle attività di cantiere

Il monitoraggio della torbidità prodotta dai cantieri alle bocche di porto ha permesso, in 10 anni, di acquisire 150 transetti e raccogliere 450 campioni d'acqua per la determinazione dell'impatto del carico solido in sospensione generato dalle macchine operatrici impegnate durante dragaggi o scarico pietrame. Si tratta di una quantità importante di determinazioni per un'attività che richiede il massimo sforzo ai fini della tutela degli ecosistemi di pregio della laguna di Venezia.

Di seguito si riportano alcuni esempi dei risultati ottenuti monitorando varie tipologie di draghe impegnate in diverse lavorazioni.

Dragaggi

Nella figura 15 si riporta un esempio di un transetto di monitoraggio (percorso a zig-zag in figura, composto da 11 sezioni) effettuato alla bocca di porto di Lido, per studiare la propagazione del pennacchio di torbida prodotto dalla draga idrorefluente a sfioro "Astra" (figura 3) impegnata in operazioni di riprofilatura dei fondali. Questa tipologia di dragaggio ha generato i maggiori impatti misurati nel corso del monitoraggio, tanto come intensità che come estensione: come già accennato, il modo di operare delle draghe idrorefluenti a sfioro implica che la concentrazione di sedimenti e la granulometria del materiale sfiorato (*overflow*) aumentino progressivamente con la durata dello sfioro. Nella figura 16 è visualizzato l'andamento della concentrazione di particolato solido in sospensione, ottenuta dalla calibrazione del segnale di *backscatter* acustico, lungo alcune sezioni trasversali del transetto a distanza progressiva dal punto di scavo. Si osservi che nella prima sezione alla distanza di 100 m dal punto di scavo e all'interno dell'A.I.T. la concentrazione è molto elevata e maggiore di 180 mg/l, mentre a 800 m essa scende a valori inferiori a 30 mg/l.

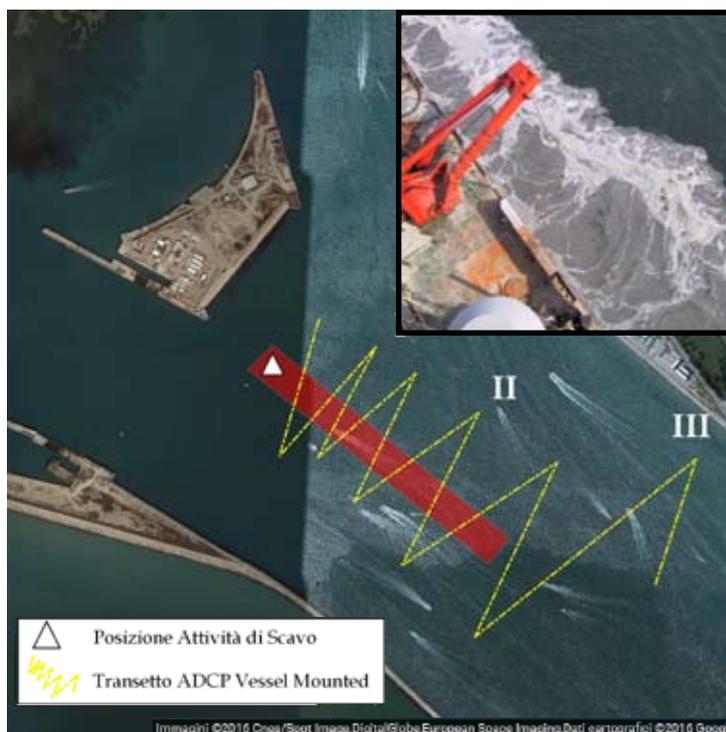
Rilascio pietrame

Durante il monitoraggio della produzione di torbida sono state controllate sia le operazioni di scavo che le operazioni di posa di materiale lapideo impiegato per la realizzazione del nucleo dei moli frangiflutti. Quest'ultima attività, in alcune circostanze, ha la peculiarità di produrre un notevole impatto visivo, qui inteso come differenza cromatica tra l'acqua di mare non perturbata e la nuvola di materiale risospeso, a causa della presenza di materiale argilloso che solitamente si ritrova adeso al pietrame di cava. All'impatto visivo non è corrisposto un impatto in termini di concentrazioni di solidi sospesi; il materiale più fine, argilloso, ha la caratteristica di rimanere in sospensione più a lungo rispetto alla frazione sabbiosa con un effetto ottico più marcato a parità di concentrazioni.

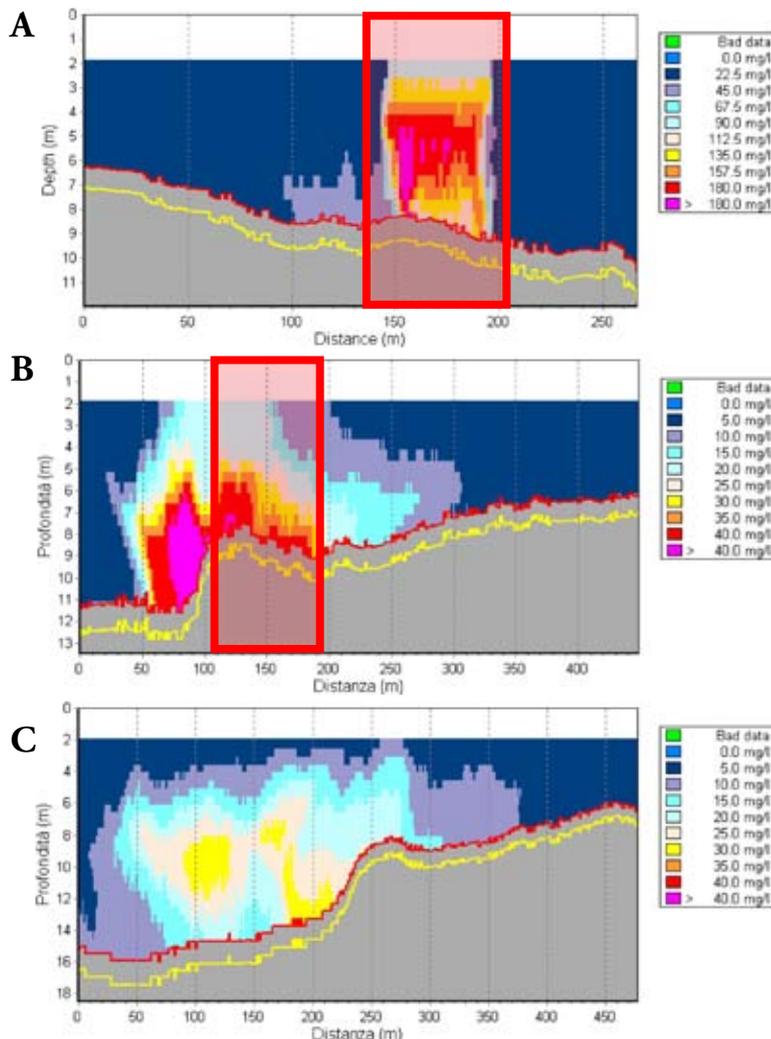
Per la costruzione della lunata all'esterno alla bocca di porto di Lido, ad esempio, sono stati utilizzati due sistemi di scarico pietrame. Il primo sistema, attuato dalla motobetta a chiglia apribile (*split-hull*) "LYBRA" (figura 4), prevedeva il rilascio del carico per la posa in opera del nucleo della lunata (circa 1000 m³) in un breve lasso di tempo. Il monitoraggio di questa attività, peraltro riscontrata esclusivamente durante la costruzione della lunata, ha permesso di misurare valori estremamente elevati di concentrazione di solidi sospesi, pari a circa 400 mg/l, tuttavia limitati all'immediato intorno del punto di rilascio e non al di fuori dell'A.I.T. dove le concentrazioni erano comunque comprese

15. Bocca di porto di Lido, 16 giugno 2005 ore 17:59, attività di scavo della draga "Astra" (nel riquadro). In giallo un transetto per lo studio della propagazione del pennacchio di torbida all'interno e all'esterno dell'A.I.T. (700x77 m), rappresentata con un rettangolo rosso; I, II e III indicano le sezioni di cui si riporta l'andamento della torbidità in figura 16; la velocità della corrente era superiore a 0.5 m/s (media sulla verticale), marea calante.

Dati mappa ©2016 Google.



16. Bocca di porto di Lido, 16 giugno 2005 ore 17:59, attività di scavo della draga "Astra". Andamento della concentrazione di SPM, ottenuta dalla calibrazione del segnale di backscatter acustico, lungo sezioni trasversali a distanze progressive dal punto di scavo, rispettivamente di 100 (sezione I, A), 400 (sezione II, B) e 800 m (sezione III, C). L'A.I.T. è rappresentata con una retinatura rossa. Le differenti colorazioni lungo ciascuna sezione corrispondono a diversi quantitativi di materiale solido in sospensione (Rosso: maggiori concentrazioni, Blu: minori concentrazioni). Nelle diverse sezioni i valori sono rappresentati con scale diverse per facilitare la visualizzazione.





entro il valore di soglia di 30 mg/l. Il secondo sistema ha previsto l'impiego di imbarcazioni munite di benna a grappo (figura 1). In questo caso la torbidità prodotta, rispetto a quella prodotta dalla motobetta a chiglia apribile, è stato sicuramente meno importante in termini di valori massimi (80-120 mg/l) e anch'essi comunque limitati alla superficie interna dell'A.I.T.

L'utilizzo della strumentazione acustica, lungo un percorso a zig-zag, ha permesso anche il monitoraggio del ciclo di lavoro delle draghe a grappo "Pater Sardus" e "Colomba C.", impegnate nella preparazione del substrato per la costruzione della lunata alla bocca di porto di Lido. È stato così possibile mappare la distribuzione del carico sospeso: in figura 17 è visualizzata la variazione spaziale della concentrazione media di solidi sospesi sulla verticale; si osserva che, in questo particolare caso, i massimi valori nei pressi dell'area di lavoro sono superiori a 128 mg/l e che le aree dove si registrano i valori più elevati sono concentrate in spazi delimitati.

In conclusione, l'impatto generato dalle attività di rilascio pietrame differisce quindi notevolmente in relazione alla metodologia di lavoro.

Campagne di monitoraggio dei parametri idrodinamici (velocità e direzione della corrente) e della torbidità lungo sezioni caratteristiche

Sebbene l'attività di monitoraggio non abbia uno scopo prettamente scientifico, lo studio dell'idrodinamica mediante strumentazione acustica permette di fornire informazioni dettagliate circa le strutture del campo di corrente alle diverse scale (turbolenze, vorticosità, asimmetrie del flusso etc.) e del trasporto di sedimenti, altrimenti impossi-

17. Rappresentazione grafica del valore massimo sulla colonna d'acqua della torbidità (mg/l) durante le operazioni di rilascio pietrame di "Pater Sardus" e "Colomba C." per la realizzazione della lunata alla bocca di porto di Lido. Elaborazioni in ambiente GIS dei dati ottenuti mediante calibrazione dei dati di backscatter ottenuti dalle misure mediante strumentazione acustica ADCP.

bili da evidenziare.

Queste conoscenze risultano utili anche in un'ottica di lungo periodo per la stessa gestione del Sistema MOSE e per la comprensione degli effetti del nuovo assetto idrodinamico sulla morfologia del sistema bocca di porto-litorale. Nel seguito sono illustrati alcuni esempi dei risultati delle indagini idrodinamiche in casi di particolare interesse.

Idrodinamica e morfologia

Una condizione riscontrata frequentemente durante le indagini in campo è la formazione di un vortice, attivato dalla corrente nel canale di porto, all'interno del bacino di evoluzione della conca di navigazione nei pressi della bocca di porto di Malamocco (figura 18). La struttura è caratterizzata da velocità basse o nulle al centro della sezione che taglia il bacino di evoluzione approssimativamente da NW a SE e massime alle estremità della sezione stessa. In condizioni di marea calante il vortice presenta una rotazione oraria, mentre in condizioni di marea crescente il senso di rotazione è antiorario.

Un altro esempio di particolare importanza per comprendere gli effetti delle trasformazioni idro-morfologiche sulla circolazione locale ed il trasporto solido nei canali di bocca è rappresentato dalla nuova configurazione assunta dalla bocca di porto di Chioggia nei pressi della rispettiva lunata. Durante il monitoraggio sono stati effettuati appositamente alcuni transetti per investigare il campo di corrente che si instaura nei pressi del frangiflutti, in particolare durante il calante di marea. Si è osservato come il flusso uscente attraverso la bocca di porto si scomponga in due correnti principali caratterizzate da velocità massime confrontabili, ancorché il flusso secondario (tra la lunata e il molo sud) sia inferiore a quello del ramo centrale (a nord della lunata) (figura 19). Tutto ciò implica che a ridosso della base del molo si verifichi un aumento dello sforzo tangenziale (*shear stress*) al fondo che causa la rimozione del sedimento e l'instaurarsi di fenomeni erosivi visibili, come un progressivo approfondimento della parte di fondale compresa tra il molo sud e la lunata (figura 20).

Questo fenomeno è un esempio rappresentativo dell'interazione nel medio periodo fra il modificato assetto idrodinamico delle bocche di porto e la morfologia dei fondali adiacenti le bocche.

Variazioni batimetriche

Mediante strumentazione ADCP è possibile acquisire anche dati batimetrici tipo *single-beam*, che possono integrare le informazioni più dettagliate provenienti da rilievi *multi-beam* o indagini geofisiche, per la valutazione speditiva delle variazioni morfologiche intervenute nell'intervallo di osservazione.

Un esempio riguarda l'analisi delle variazioni batimetriche della sezione 80-82 nel canale della bocca di porto di Lido (figura 10), investigata ripetutamente nel corso del monitoraggio, per la quale si dispone di una serie cospicua di dati batimetrici a corredo delle misure idrodinamiche. L'analisi dei dati disponibili ha evidenziato fenomeni di variazioni batimetriche anche dell'ordine del metro nel periodo 2008-2010 (figura 21).

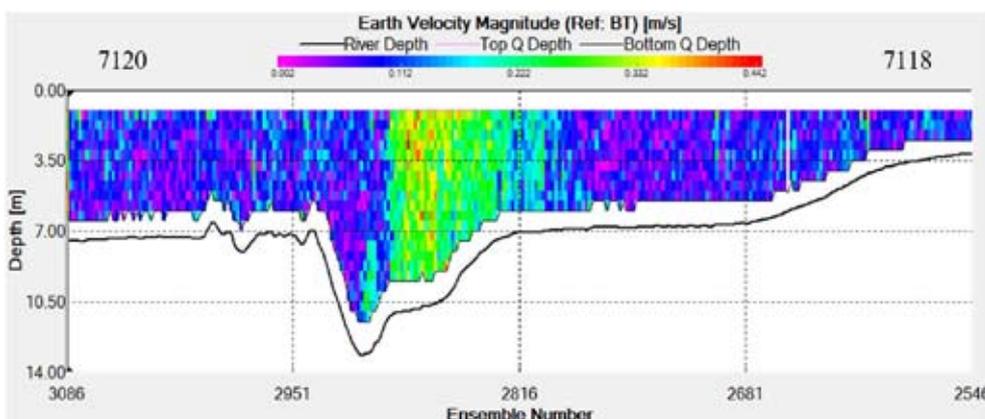
Le variazioni riscontrate alla bocca di porto di Lido hanno evidenziato l'importanza di investigare con maggior dettaglio l'eventuale presenza di trend morfologici nelle sezioni maggiormente studiate. È stata quindi avviata un'analisi integrata dei dati ottenuti dalle numerose acquisizioni correntometriche disponibili dal 2007 al 2013 per lo studio della variazione del tirante medio annuo idraulico (ovvero della distanza tra fondo e pelo libero dell'acqua) al variare del tempo per ciascuna bocca. Il caso della bocca di porto di Lido risulta particolarmente interessante (figura 22): l'andamento del tirante calcolato



18. Configurazione del campo di corrente, come velocità media sulla verticale e direzione (evidenziate con vettori proporzionali all'intensità), presso la bocca di porto di Malamocco il giorno 4 ottobre 2013, con marea crescente. È evidente la struttura vorticoso all'interno del bacino di evoluzione della conca di navigazione.
Dati mappa ©2016 Google.

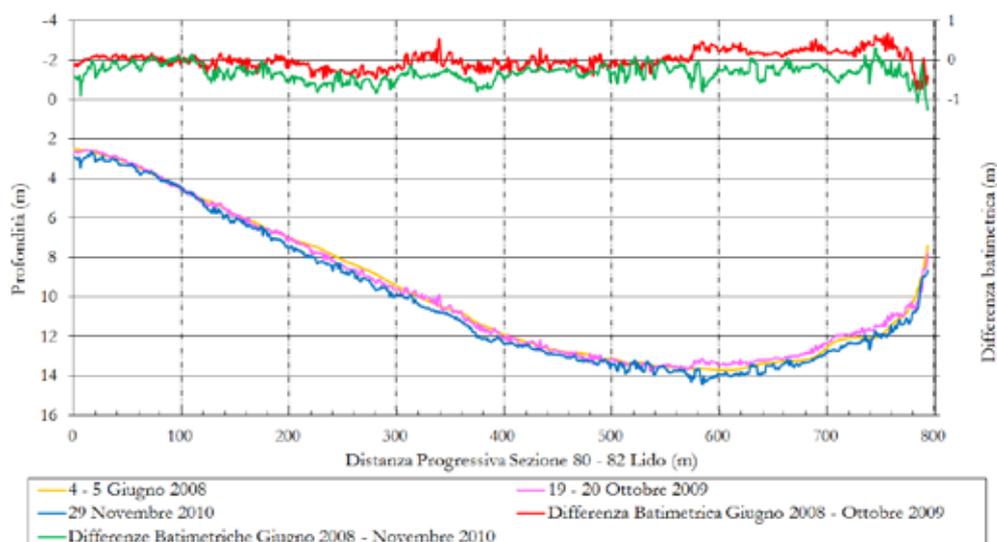


19. Campo di velocità nei pressi della lunata alla bocca di porto di Chioggia durante il calante di marea, 8 marzo 2012.
Dati mappa ©2016 Google.



20. Intensità di corrente lungo la sezione del nuovo canale naturale (tra i punti 7120 e 7118, figura 19) scavato dal flusso secondario in uscita dalla bocca di porto di Chioggia in direzione SW, 8 marzo 2012.

21. Sezione 80-82 della bocca di porto di Lido (figura 10): batimetria del fondale (asse di lettura sinistro) rilevata durante le campagne del 2008 (giallo), 2009 (rosa) e 2010 (blu) e variazioni batimetriche (rosso e verde, asse di lettura destro).

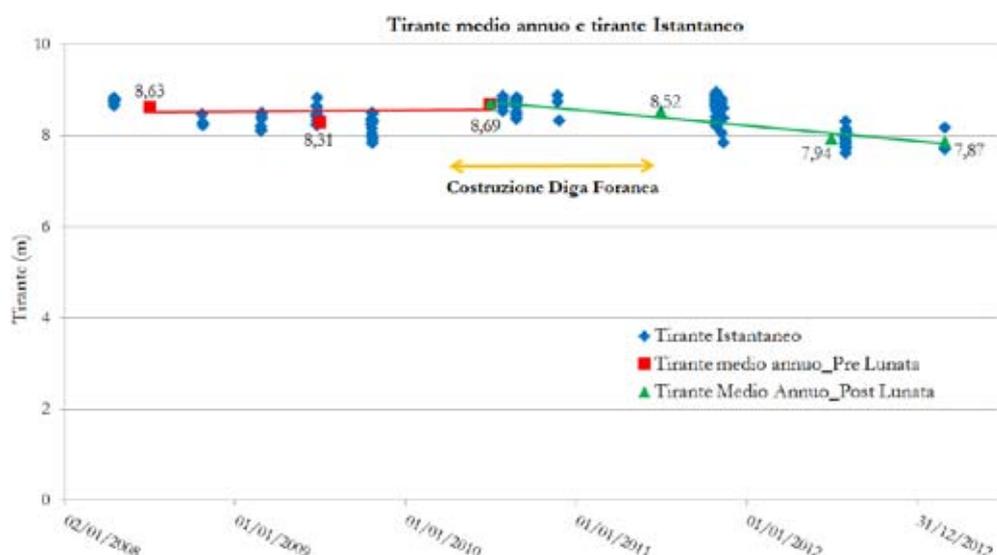


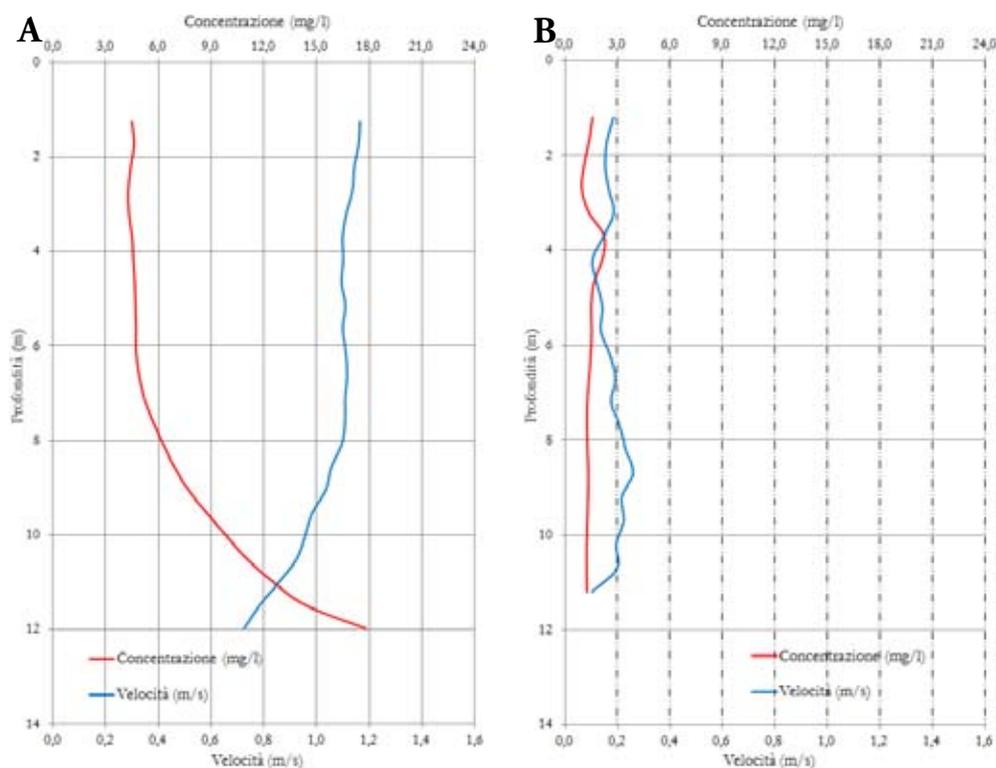
lungo la sezione di interesse 80-82 (figura 10) è espressione di variazioni a lungo termine nella sezione idraulica, e quindi di variazioni morfologiche della sezione stessa. Le evidenze sperimentali mostrano che il tirante medio annuo si è modificato successivamente al completamento della lunata; infatti, la pendenza della retta interpolatrice dei dati relativi al periodo post lunata (figura 22) suggerisce il verificarsi di fenomeni di riequilibrio morfologico a seguito della costruzione della lunata stessa.

Profili verticali di contrazione di particellato solido in sospensione

Nell'ambito delle indagini del monitoraggio una particolare attenzione è stata dedicata allo studio del trasporto solido. Con i parametri misurati a diverse quote sui punti notevoli nelle sezioni investigate (figure 10, 11,12) sono stati individuati dei profili verticali sui quali è stato calcolato l'andamento della concentrazione del particellato solido in sospensione e della velocità della corrente lungo la colonna d'acqua. Vengono qui mostrati, come esempio, dei profili relativi al punto notevole ADCP nella bocca di Lido (figura 10) per diverse condizioni idrodinamiche (figura 23). Come si può osservare, nel caso di velocità di corrente particolarmente elevata (> 0.5 m/s) il

22. Andamento del tirante calcolato lungo la sezione di interesse 80-82 alla bocca di porto di Lido, periodo 2008-2013.





23. Profili verticali della velocità di corrente (linee rosse) e concentrazione del particolato solido in sospensione (linee blu) al centro della sezione 80-82 (punto ADCP, figura 10) con due diverse condizioni di corrente di marea: A) velocità elevate, B) velocità basse.

profilo verticale (figura 23A) presenta un andamento regolarmente decrescente lungo la colonna d'acqua a partire dalla profondità di 8 m, mentre il profilo del materiale sospeso mostra un corrispondente progressivo aumento della concentrazione con massimi in prossimità dello strato più vicino al fondo. Nel caso di basse velocità di corrente (figura 23B) si vede come entrambe le grandezze presentino un andamento pressoché costante lungo la colonna d'acqua e con valori massimi di velocità decisamente inferiori (<0.3 m/s).

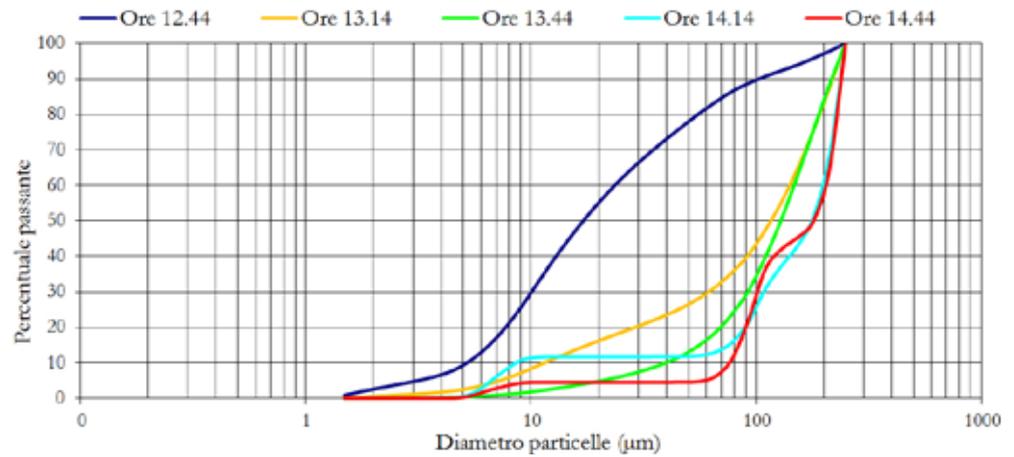
Proprietà granulometriche

Poiché nelle indagini idrodinamiche è molto importante anche conoscere le caratteristiche dei materiali trasportati dalle correnti, sin dalle prime fasi del monitoraggio è stato utilizzato lo strumento LISST-100X (figura 6). È quindi disponibile un database esteso sulle proprietà dei materiali trasportati dalle correnti nelle tre bocche di porto di Venezia nelle differenti condizioni di marea.

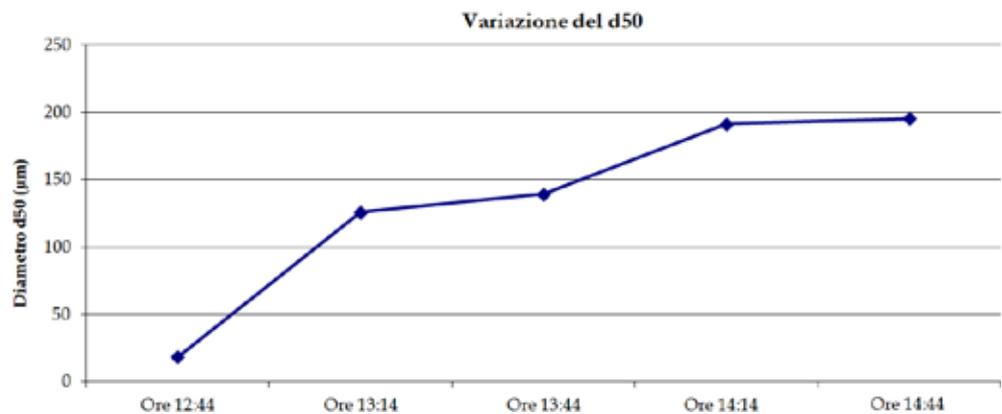
Negli esempi di figura 24 e figura 25 sono rappresentate rispettivamente le curve granulometriche ed i valori del diametro medio (d_{50}), ovvero il diametro che rappresenta il 50° percentile della distribuzione cumulata, di una sessione di misure effettuate durante un calante di marea il giorno 17 febbraio 2010 nei pressi del punto 83 alla bocca di porto di Lido (figura 10). Le curve granulometriche (Figura 24) rivelano un aumento graduale delle frazioni più grossolane; infatti, i materiali più fini si hanno alle ore 12.44 mentre i più grossolani alla fine del calante tra le ore 14.14 e le ore 14.44. In particolare si osserva un brusco aumento della frazione grossolana tra le ore 12.44 e le ore 13.14, che probabilmente corrisponde anche all'aumento della velocità della corrente che causa la risospensione di elevate concentrazioni di materiale più grossolano. Corrispondentemente anche il d_{50} aumenta progressivamente dall'inizio del calante alle sue fasi finali (figura 25).

Nella figura 26, a titolo di esempio comunque rappresentativo della situazione alle tre

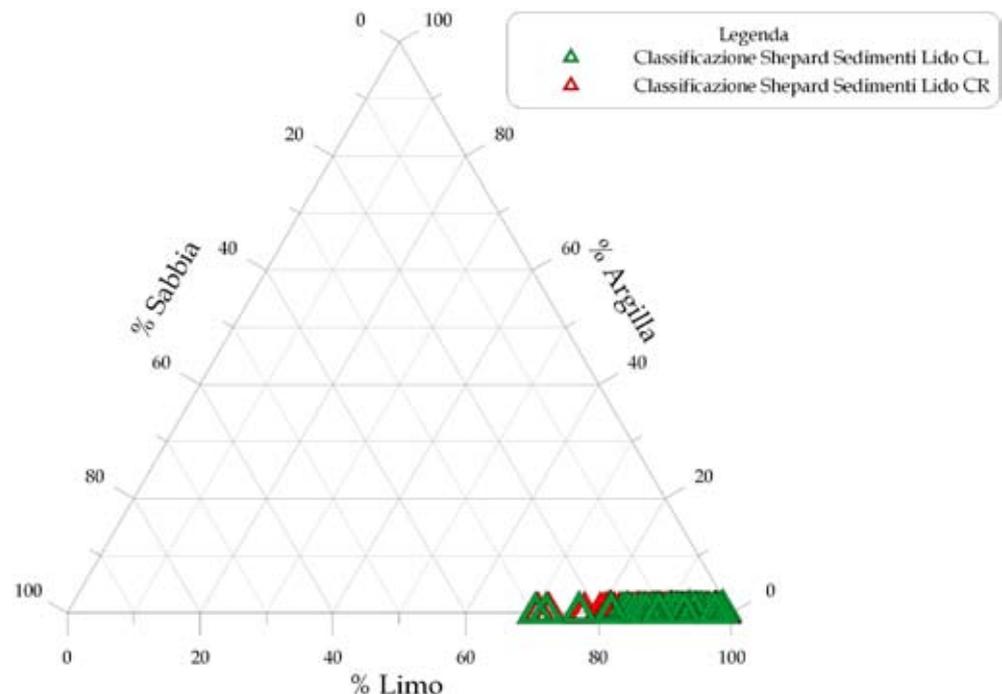
24. Distribuzione granulometrica in situ (Punto 83, figura 10) nella fase di marea calante, il giorno 17 febbraio 2010 presso la bocca di porto di Lido.



25. Variazione del d50 (Punto 83, figura 10) nella fase di marea calante, il giorno 17 febbraio 2010 presso la bocca di porto di Lido.



26. Diagramma di Shepard dei campioni prelevati tra maggio 2009 ed aprile 2010 alla bocca di porto di Lido. I campioni sono rappresentati con diverse colorazioni corrispondenti alla fase di marea calante (CL, verde) ed alla fase di marea crescente (CR, rosso).

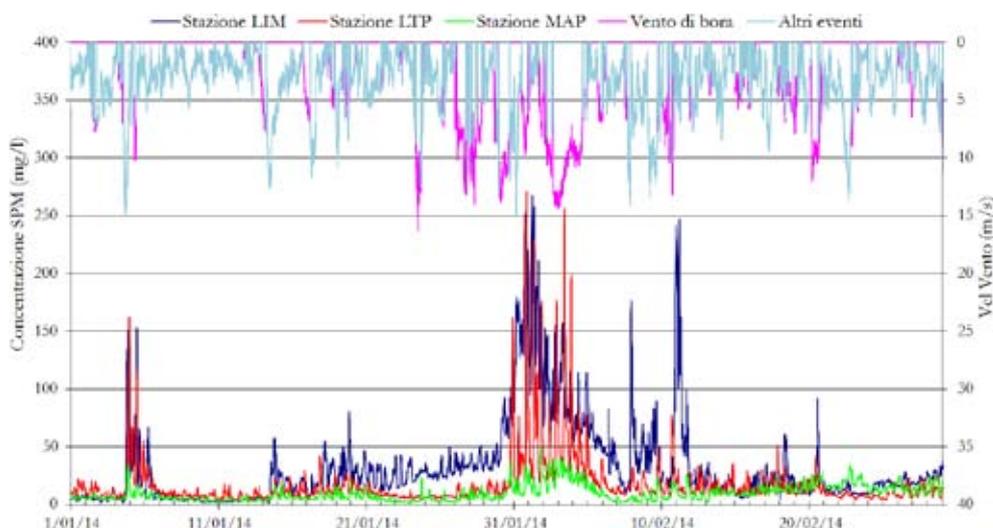


bocche di porto, è rappresentato un diagramma triangolare di Shepard (1954) nel quale sono riportati i risultati relativi ai campioni d'acqua prelevati alla bocca di porto di Lido nell'arco di un intero anno di monitoraggio, da maggio 2009 ad aprile 2010. Sono state determinate in laboratorio le percentuali in volume delle frazioni granulometriche in base alla scala di Udden-Wentworth (1922): argilla ($\text{Ø} < 3.9 \mu\text{m}$), limo ($3.9 \mu\text{m} < \text{Ø} < 62.5 \mu\text{m}$) e sabbia ($\text{Ø} > 62.5 \mu\text{m}$). I campioni si posizionano all'interno del triangolo sulla base del loro contenuto percentuale delle tre frazioni granulometriche principali. I materiali campionati durante le normali attività di monitoraggio risultano solitamente molto omogenei: la componente argillosa è solitamente pressoché assente o al più presenta percentuali molto basse (<1%), mentre le frazioni sabbiosa e limosa risultano predominanti in questo contesto ambientale. È altamente probabile che la frazione argillosa sia incorporata come aggregato nella compagine sospesa e che quindi sia inclusa nelle altre due frazioni analizzate. La scarsa differenziazione fra le caratteristiche dei materiali nelle fasi di marea calante e crescente sembra indicare un prevalente rimaneggiamento della stessa tipologia di materiali che verrebbero continuamente scambiati dalle normali correnti di marea fra il delta tidale interno ed esterno.

Registrazione in continuo della torbidità in stazioni fisse

Le serie temporali di dati acquisiti dalle stazioni fisse (un dato ogni 15 minuti, figura 13) rappresentano una base di riferimento per le valutazioni sulla torbidità generata dai cantieri; tuttavia, grazie alla loro estensione temporale, risultano utili anche per valutazioni sul trasporto in corrispondenza di particolari eventi meteomarini e in generale sul trasporto solido laguna-mare.

Si riporta di seguito un esempio di andamento della concentrazione di particolato sospeso (SPM), rilevata nella stazione a mare LIM e nelle stazioni in laguna LTP e MAP, e della velocità del vento rilevata alla piattaforma oceanografica ISMAR-CNR nel periodo gennaio-febbraio 2014 (figura 27). Si osserva come nei giorni 1-3 febbraio 2014, in occasione di un intenso evento di bora con velocità del vento pari a 13-15 m/s, le tre stazioni rispondano in maniera diversa: nelle due stazioni alla bocca di porto di Lido i valori massimi di concentrazione sono simili (240-260 mg/l) sebbene nel caso della stazione interna LTP l'andamento della concentrazione sia altresì modulato dalla marea; per la stazione MAP, situata all'interno della bocca di porto di Malamocco, invece, i valori massimi raggiungono i 50 mg/l. Nel caso di venti di bora, quindi, il sistema della bocca di porto di Lido è caratterizzato da un maggior carico in sospensione rispetto a



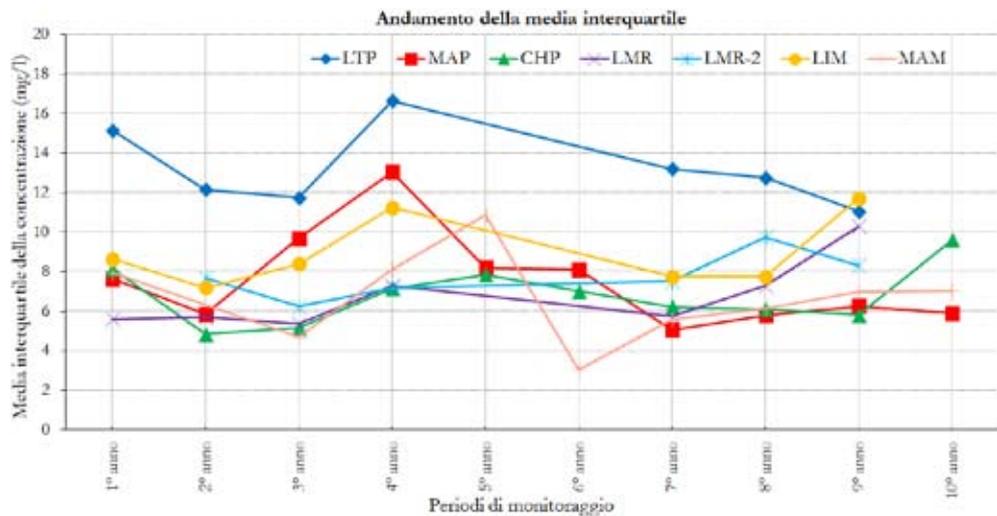
27. Serie temporale della concentrazione di SPM, presso le stazioni LIM, LTP e MAP, e della velocità del vento nel periodo gennaio-febbraio 2014.

quello della bocca di porto di Malamocco, in particolare nel lato nord del canale di bocca e nel canale di Treporti che ricevono l'input di materiale sospeso sul litorale di Cavallino e sospinto all'interno della bocca dalla marea entrante.

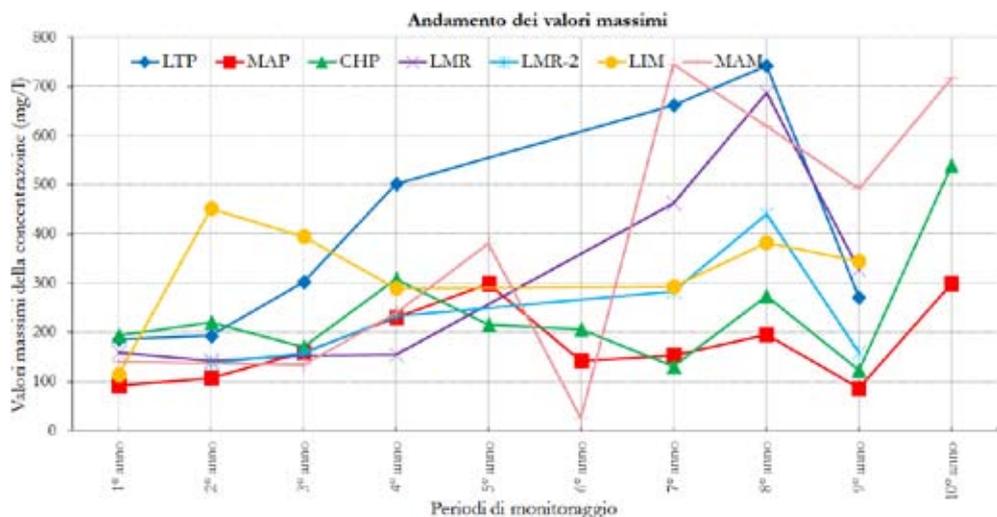
Per ciascuna delle stazioni è stata effettuata un'analisi statistica delle serie temporali relative ai singoli anni di misura. Si riportano come esempio, nelle figure seguenti (figura 28, figura 29), l'andamento della media interquartile dei valori massimi di concentrazione per ogni stazione e per i singoli anni del periodo di monitoraggio; nell'analisi non sono state inserite le stazioni in laguna che hanno funzionato per un periodo limitato (LSN, LSA), mentre è stata considerata la stazione CHM anche se ha funzionato solo per 4 anni (tabella 1). Dai risultati emerge una notevole variabilità dei parametri statistici della concentrazione sia spaziale sia temporale interannuale, legata principalmente alle frequenza degli eventi estremi; non è però evidente alcuna loro sistematica tendenza, nel corso del decennio, ad una crescita o decrescita in funzione del tempo.

Dato che l'obiettivo del monitoraggio è sia quello di acquisire i valori di torbidità di fondo ai fini della tutela degli ecosistemi di pregio sia quello di verificare la dispersione del *plume* di torbidità generato dalle draghe, è stata effettuata per ogni stazione un'analisi dei superamenti del valore di soglia della concentrazione (30 mg/l) rilevati nell'intero decennio del monitoraggio.

28. Andamento della media interquartile della concentrazione di solidi sospesi rilevata presso 7 stazioni fisse (figura 10) tra il 2005 ed il 2015.



29. Andamento dei valori massimi della concentrazione di solidi sospesi rilevata presso 7 stazioni fisse (figura 10) tra il 2005 ed il 2015.



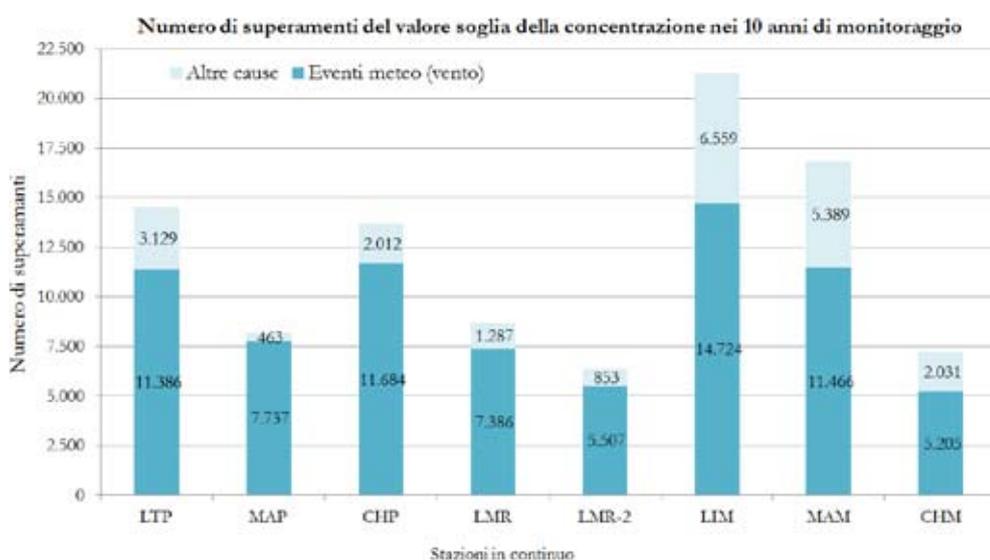
In condizioni generali, i superamenti del valore di soglia possono essere legati a numerose e differenti cause:

- eventi di risospensione riconducibili al vento locale, soprattutto bora, tanto in mare quanto, specialmente, all'interno della laguna;
- aumento della risospensione e del trasporto litoraneo, e quindi del carico, rilevabile anche nei giorni successivi all'evento di vento sostenuto scatenante, o addirittura in assenza di vento (moto ondoso creato a distanza);
- eventi di breve o brevissima durata (nell'arco di 1 ora circa) rilevati nelle stazioni all'interno delle bocche di porto ed in laguna dovuti al passaggio di imbarcazioni di grandi dimensioni (come porta-container o navi cisterna nella bocca di Malamocco) che sono caratterizzate da un pescaggio elevato (superiore ai 9 m);
- attività di dragaggio.

Per ogni stazione è stata pertanto effettuata una prima analisi, attribuendo o meno la causa del superamento ad un evento meteomarinico significativo, cioè con vento proveniente dalla stessa direzione con velocità, misurata alla piattaforma oceanografica del CNR-ISMAR (figura 10), prevalentemente maggiore di 10 m/s.

In generale, i superamenti vengono attribuiti alla categoria "eventi meteo" sia quando sono contemporanei al vento sia quando continuano anche dopo la fine del vento (infatti, in seguito ad un evento di bora, la risospensione naturale può durare anche più giorni), o se iniziano immediatamente dopo la fine del vento o, infine, se il superamento inizia un po' prima che il vento raggiunga la velocità di 10 m/s (ed abbia comunque velocità maggiore rispetto alle ore precedenti) e continui per la durata dell'evento meteomarinico. Si ricorda che dall'analisi dei risultati è emerso che le stazioni rispondono in maniera diversa alle forzanti naturali, confermando così la variabilità spaziale della torbidità e dei meccanismi che la determinano.

In figura 30 si riporta, per ogni stazione, il numero di superamenti, cioè il numero dei dati di concentrazione di valore superiore a 30 mg/l, attribuibili alle due categorie "eventi meteo" e "altre cause", per il totale dei 10 anni di monitoraggio. Vengono attribuiti alla categoria "altre cause" sia i superamenti dovuti al "mare lungo", cioè creati da eventi di lunga durata (soprattutto di scirocco, caratterizzato da un lungo fetch) che si sono verificati molte ore prima, sia i superamenti che avvengono in assenza di vento forte. Per i superamenti appartenenti a questa seconda categoria è stata ovviamente preventivamente verificata la presenza o meno di attività di scavo alle bocche di porto, in base alle in-



30. Superamenti (cioè numero di dati registrati ogni 15 minuti) del valore di soglia della concentrazione di solidi sospesi, pari a 30 mg/l, registrati nei 10 anni di monitoraggio, suddivisi per stazione di misura.

formazioni fornite dalla Direzione Lavori dei cantieri del MOSE.

Nella figura 30 si vede come per ogni stazione la maggioranza dei superamenti sia dovuta agli eventi meteo marini; si nota inoltre come le stazioni a mare LIM e MAM presentino un numero di superamenti dovuto ad “altre cause” abbastanza elevato, giustificabile con la maggior esposizione delle sonde al moto ondoso senza vento (onde lunghe) e alle correnti litoranee.

In ogni caso, per una soddisfacente analisi della variabilità della torbidità in relazione alle forzanti naturali nonché delle eventuali perturbazioni indotte dalle opere del Sistema MOSE, sarà sicuramente di aiuto lo sviluppo, già iniziato nell’ambito dell’attività di monitoraggio, di un modello semi-empirico capace di prevedere la torbidità in funzione delle forzanti naturali, con diverse configurazioni delle bocche.

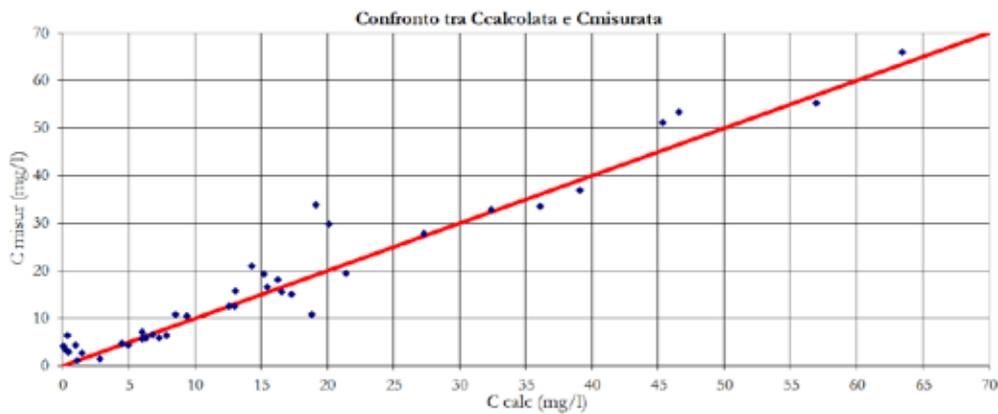
Modello del pennacchio (*plume*)

Una delle difficoltà oggettive riscontrate nel monitoraggio delle attività di scavo è che la zona di maggiore impatto, dove opera l’apparecchiatura di dragaggio, non può essere sperimentalmente investigata sia per motivi di sicurezza sia per questioni legate alla qualità delle misure stesse; la presenza di forte turbolenza e la formazione di bolle d’aria infatti compromettono le misure acustiche e ottiche e la distribuzione dei materiali movimentati rende difficile l’approccio alla misura, dato che in prossimità dell’attrezzo si instaura una forte disomogeneità della scia di materiale disperso. È però possibile definire, in corrispondenza della draga, una sorgente diffusa di rilascio del sedimento (indicata come “area di dragaggio”) e seguire il comportamento del pennacchio che si muove trasportato dalla corrente mediante un modello teorico in grado di simulare la dispersione e il trasporto dei materiali a valle di quest’area.

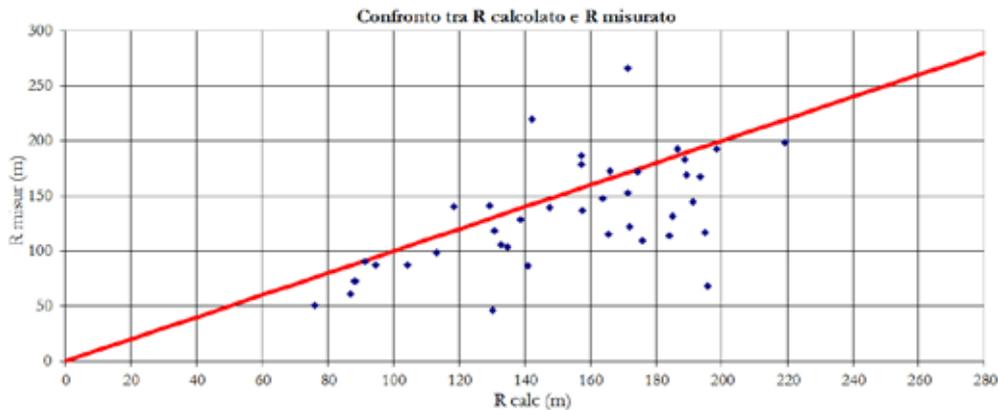
È stato quindi messo a punto un modello semplificato di trasporto e dispersione di sedimenti per studiare la conformazione e l’evoluzione del *plume* in funzione sia dell’input di sedimenti da parte della draga che delle correnti di marea. Ciò ha consentito di stimare approssimativamente la concentrazione di solidi sospesi generata da una draga ad una qualsiasi distanza da essa, senza dover necessariamente ricorrere alle misure in campo.

L’input di sedimenti generato dalle draghe dipende dalla tipologia della draga stessa: esso, ancorché mediato nel tempo, può essere considerato costante per alcuni tipi di draghe, ma non per le draghe idrorefluenti a sfioro; dalle misure condotte a bordo della draga idrorefluente a sfioro “Astra” risulta infatti che la quantità e la granulometria dei sedimenti refluiti in mare tendono a crescere nel corso delle operazioni di dragaggio, per il suo principio di funzionamento. È stato quindi necessario impostare un sotto-modello per descrivere il comportamento della miscela dragata all’interno della stiva e valutare la quantità e le caratteristiche granulometriche del materiale sfiorato ed immesso nella colonna d’acqua; tali risultati costituiscono l’input per il funzionamento del modello principale. Una descrizione dettagliata della struttura del modello e del sottomodulo viene riportata in appendice (APPENDICE “Modelli”).

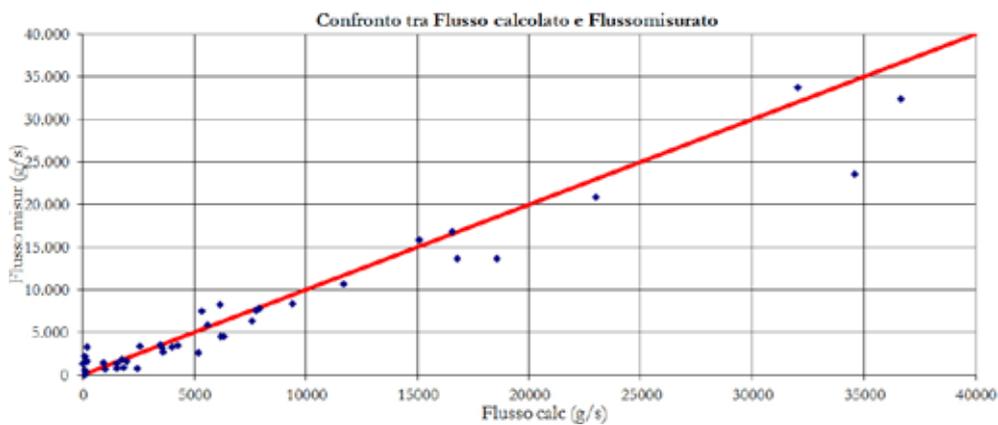
Il modello ha confermato la validità delle modalità per il monitoraggio dell’A.I.T. e per il rispetto del valore soglia della torbidità all’esterno di quest’area. I risultati del modello sono stati infatti confrontati con le misure eseguite in situ nel corso di alcune importanti operazioni di dragaggio condotte dalla draga “Astra” nella bocca di Lido nel 2005. Il confronto fra i risultati del modello e le misure in situ sono riportate nelle figure 31, 32 e 33, relative rispettivamente alla concentrazione di sedimenti sull’asse del pennacchio C, alla larghezza del pennacchio R ed al flusso longitudinale di sedimenti. Si nota che le migliori correlazioni si hanno tra C calcolata e C misurata e tra Flusso calcolato e Flusso misurato, mentre per quanto riguarda il confronto tra la larghezza del pennacchio (R calcolata e misurata) la corrispondenza non è così evidente.



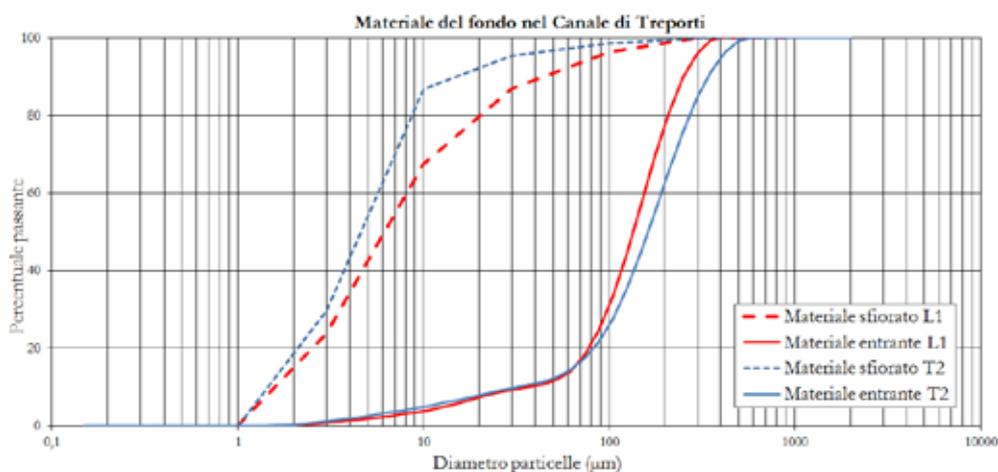
31. Confronto tra la concentrazione sull'asse del pennacchio calcolata dal modello e misurata nel corso delle campagne eseguite nel 2005, presso la bocca di porto di Lido, in presenza della draga idrorefluente a sfioro "Astra".



32. Confronto fra la larghezza del pennacchio R calcolato dal modello e misurato nel corso delle campagne eseguite nel 2005, presso la bocca di porto di Lido, in presenza della draga idrorefluente a sfioro "Astra".



33. Confronto tra il flusso calcolato (con R misurato) ed il flusso misurato nel corso delle campagne eseguite nel 2005, presso la bocca di porto di Lido, in presenza della draga idrorefluente a sfioro "Astra".



34. Curve granulometriche del materiale entrante nella stiva (materiale del fondo) della draga "Astra" e del materiale sfiorato nel canale di San Nicolò (L1) e nel canale di Treporti (T2) alla bocca di porto di Lido (campagne del 2005).

In figura 34 si riportano le curve granulometriche relative ai materiali del fondo e a quelli sfiorati dalla draga nel canale di San Nicolò (L1) e nel canale di Treporti (T2) alla bocca di porto di Lido. Si osserva che esiste una differenza notevole tra i due spettri granulometrici; come già descritto, infatti, all'interno della stiva della draga idrorefluente a sfioro avviene una separazione dei materiali più grossolani che decantano a discapito di quelli più fini che fuoriescono dallo sfioro. Le caratteristiche granulometriche dei sedimenti sfiorati dalla draga sono di fondamentale importanza in quanto input del sotto modello di dispersione del *plume*.

Conclusioni

Le indagini effettuate durante le attività di cantiere hanno permesso di verificare il rispetto dei criteri fissati per la salvaguardia dell'ecosistema, in particolare per quanto riguarda il valore soglia della concentrazione di solidi sospesi fissato pari a 30 mg/l. I superamenti attribuibili ai lavori di dragaggio riscontrati nel corso delle giornate di campagna si limitano ad alcune lavorazioni particolari, condotte per intervalli di breve durata, quali: scavi con draga idrorefluente a sfioro, refluitamento dei materiali per la costruzione dell'isola nuova, operazioni di rilascio di pietrame da imbarcazione con chiglia apribile. In nessun caso i superamenti del valore di soglia si sono estesi al di fuori dell'“Area di Impatto Totale” (A.I.T.).

In talune circostanze si sono verificate condizioni di criticità, come ad esempio durante la costruzione della diga foranea a Lido, che hanno portato a effettuare ispezioni mirate per il controllo dell'osservanza dei limiti imposti. Le segnalazioni di eventi potenzialmente critici sono avvenute successivamente ad allarmi lanciati sulla base di osservazioni per lo più visive, da elicottero o da natante. Tuttavia si è dimostrato che un impatto visivo molto forte, quale quello verificatosi durante la risospensione in condizioni di acqua ad elevata trasparenza, non necessariamente si traduce, alla luce delle determinazioni sperimentali effettuate, in valori di torbidità potenzialmente impattanti e superiori al valore limite.

Dall'analisi svolta sulla lunga serie storica di dati raccolta dalla rete di stazioni fisse per il rilievo della torbidità in continuo risulta una notevole variabilità dei parametri statistici della concentrazione sia spaziale sia temporale interannuale, legata principalmente alle frequenze degli eventi estremi. Questo risultato escluderebbe un effetto significativamente importante della realizzazione delle opere sul trasporto solido, almeno per quanto riguarda le concentrazioni misurate in corrispondenza delle stazioni scelte. Quasi sempre il pennacchio di materiale risospeso dai mezzi di scavo operanti nelle aree di cantiere non presenta un'estensione tale da interessare significativamente le stazioni fisse per la registrazione della torbidità. Pertanto è estremamente improbabile che i superamenti del valore di soglia segnalati dai torbidimetri siano attribuibili alle operazioni di dragaggio; infatti per ogni stazione la maggioranza dei superamenti è dovuta agli eventi meteorologici. Del resto, come già detto, i controlli condotti per mezzo di imbarcazioni nelle vicinanze della draga durante le operazioni di dragaggio hanno confermato il generale rispetto dei valori di soglia e delle altre limitazioni imposte. Considerata peraltro l'alta variabilità temporale, ma anche spaziale, delle forzanti naturali (vento locale e moto ondoso), va da sé che tale provvisoria conclusione dovrebbe essere suffragata da future registrazioni nelle stesse stazioni torbiometriche, auspicabilmente da proseguire sistematicamente negli anni a venire.

Per quanto riguarda gli aspetti investigati, si può evidenziare che gli interventi sinora eseguiti per la realizzazione delle opere mobili hanno avuto, nel breve e medio periodo, un impatto minimo sugli ecosistemi limitrofi, sia per durata che per intensità rispetto agli

eventi di origine naturale.

Tali interventi hanno comportato però trasformazioni morfologiche locali piuttosto importanti. Al di là delle trasformazioni rappresentate dagli stessi interventi, esistono delle retroazioni nel sistema bocche mareali-litorali che possono essere considerate una risposta dell'ambiente naturale alle trasformazioni operate dall'uomo. Il monitoraggio effettuato mediante strumentazione acustica ha permesso la raccolta di numerose informazioni dettagliate circa le strutture del campo di corrente alle diverse scale (turbolenze, vorticità a mesoscala, asimmetrie del flusso, ecc.). Queste informazioni hanno consentito di evidenziare variazioni nell'idrodinamica e nella morfologia causate dalla realizzazione delle opere o dalle trasformazioni indotte dalla loro presenza e possono essere di grande utilità nell'ottica di un controllo delle variazioni future, nel medio e lungo periodo, nel sistema bocche tidali-litorali anche dopo l'operatività del Sistema MOSE.

Si evidenzia l'importanza di una continuazione degli studi su idrodinamica, trasporto solido e registrazioni in continuo in un'ottica di gestione del sistema fisico rappresentato dall'insieme opere-contesto naturale.

I dati raccolti potranno essere inoltre di grande utilità per la calibrazione e validazione di modelli matematici per la previsione di processi morfodinamici sul medio e lungo periodo, consentendo di superare le limitazioni legate alla sola osservazione puntuale dei processi.

Ringraziamenti

Il monitoraggio per lo studio della torbidità e dell'idrodinamica durante la realizzazione del Sistema MOSE presso le bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia è stato possibile attraverso la collaborazione di diverse Istituzioni ed Enti di ricerca: CORILA, ISMAR-CNR, OGS, UNIPD.

Le numerose attività (campionamenti, analisi di laboratorio, elaborazione dati e modellistica) sono state svolte nel corso degli anni da personale qualificato. Si ringraziano pertanto: Franco Arena (OGS), Emiliano Checchin (SELC soc. coop.), Franco Costa (ISMAR-CNR), Daniele Curiel (SELC soc. coop.), Caterina Dabalà (CORILA), Loris Dametto (ISMAR-CNR), Valentina Defendi (ISMAR-CNR e CORILA), Stefano Donà (ISMAR-CNR), Riccardo Fiorin (Laguna Project), Francesco Fracassi (CORILA), Miroslav Gacic (OGS), Giorgio Gelsi (OGS), Vèdrana Kovacevic (OGS), Gian Franco Magris (ISMAR-CNR), Roberto Malfassi (OGS), Francesca Manfrin (ISMAR-CNR), Marino Meneghin (ISMAR-CNR), Matteo Morgantini (CORILA), Federico Riccato (Laguna Project), Ruggero Ruggeri (ISMAR-CNR), Francesco Simionato (ISMAR-CNR), Giovanni Venier (CORILA), Gabriele Zamperoni (CNR-ISMAR) e Marinai Trip Navi.

Appendici

Calcolo del valore soglia della concentrazione

Nel 2005 è stato messo a punto il procedimento per il calcolo del valore della concentrazione massima ammissibile (C_{\max}), utilizzando la breve serie di dati disponibile. Nel 2011 si è deciso di utilizzare i numerosi dati raccolti nei sei anni di monitoraggio successivi per una verifica della coerenza della scelta effettuata per il valore di soglia.

All'esterno dell'area di impatto totale (A.I.T.), già definita per contestualizzare il valore soglia, si può tollerare che il valore C_{\max} sia pari a quello superato con una frequenza accettabile (il 10% del tempo) in condizioni naturali e che la sua persistenza non superi le 6 ore del semiperiodo di marea. Analizzando, per ciascun torbidimetro, la serie storica dei valori di concentrazione, il valore C_{\max} sarebbe quindi pari al valore corrispondente al 90° percentile della serie di dati (C_{90}^R). Per rendere applicabile il valore C_{90}^R così ottenuto da un singolo torbidimetro ad una più ampia zona, esso è stato moltiplicato per il "coefficiente di variabilità spaziale", dato dal rapporto fra il valore mediano della concentrazione misurata nell'intera area di interesse in tutte le campagne effettuate ed il valore mediano della concentrazione registrata dallo stesso torbidimetro.

In conclusione, la concentrazione ammissibile C_{\max} al di fuori della A.I.T. è così calcolata:

$$C_{\max} = C_{90}^R * C_{50}^Z / C_{50}^R$$

dove:

C_{90}^R : 90° percentile della concentrazione misurata in una delle stazioni fisse per la misura della torbidità;

C_{50}^R : 50° percentile della concentrazione nell'area di interesse, misurata durante numerose campagne di misura effettuate sull'intera zona nelle vicinanze del torbidimetro;

C_{50}^Z : 50° percentile della concentrazione misurata nella stessa stazione fissa.

La prima applicazione di tale formula nell'anno 2005 è stata effettuata utilizzando la breve serie di dati disponibile (giugno 2004-febbraio 2005) per l'unico torbidimetro collocato nella parte mediana del canale di Lido (6044 dati), nonché tutte le campagne condotte fra il 2002 e il 2005 nelle due bocche di porto di Lido e Chioggia (612 dati). I valori così calcolati ($C_{50}^R = 4,2$ mg/l, $C_{90}^R = 16,7$ mg/l e $C_{50}^Z = 7,6$ mg/l) hanno fornito un valore pari a $C_{\max} = 30$ mg/l, sistematicamente utilizzato negli anni successivi come valore soglia per il monitoraggio della torbidità.

Nel 2011 invece per il calcolo del parametro C_{50}^Z è stata utilizzata la serie di tutte le misure effettuate durante le campagne svolte nel periodo 2006-2011 in assenza di operazioni di scavo (considerando quindi solamente la torbidità naturale) in specifiche sezioni di interesse nelle tre bocche di porto in varie condizioni di marea. Si osserva che questa serie esprime sia la variabilità spaziale della torbidità, sia la sua variabilità temporale, limitatamente peraltro alle sole correnti di marea; la serie stessa infatti non contiene importanti eventi di moto ondoso, durante i quali solitamente non si eseguono rilievi da imbarcazione.

Per il calcolo dei parametri C_{50}^R e C_{90}^R sono state utilizzate inoltre le serie cronologiche registrate in continuo nelle stazioni fisse (figura 13, tabella 1). Tali serie, al contrario, contengono oltre alle maree eccezionali, anche gli eventi intensi di moto ondoso.

Considerando le seguenti circostanze:

- verosimile sottostima nella valutazione di (C_{50}^Z),
- numero necessariamente limitato di stazioni torbidimetriche,
- conseguente incertezza nel classificare in dettaglio le possibili sotto-zone lagunari,

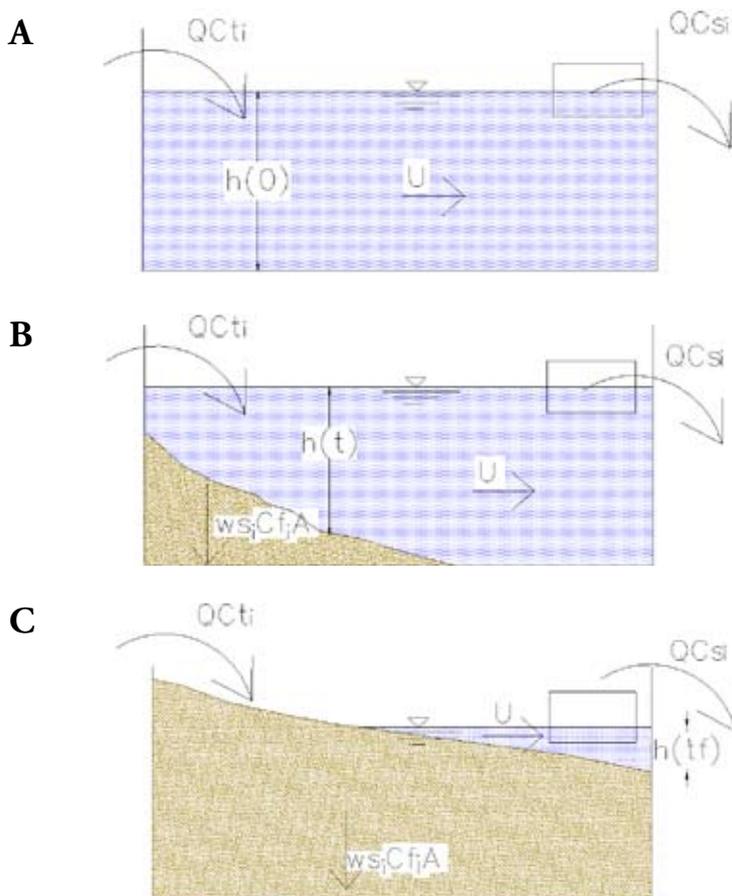
- carattere comunque “convenzionale” dei criteri di tolleranza e del valore di riferimento stabilito,
- condivisione fra esperti dei criteri e dello stesso valore finale,
- familiarità degli operatori e dei controllori con i criteri già accettati,

si è ritenuto che i risultati ottenuti non siano stati tali da giustificare una riduzione del “valore di soglia” calcolato nel 2005 e pari a 30 mg/l, né tantomeno una differenziazione di tale valore fra le tre bocche oppure fra zona e zona nella laguna. Lo studio effettuato ha quindi confermato come “valore di soglia” sulla frontiera della A.I.T. una concentrazione media nella colonna d’acqua pari a 30 mg/l.

Modelli

Sottomodello della stiva della draga idrorefluente

Quando la draga idrorefluente a sfioro inizia a scavare e ad immettere nella stiva la miscela acqua-sedimento a concentrazione elevata ($C = \sum C_i$ essendo C_i la concentrazione della frazione i -ma) la velocità longitudinale dell’acqua nella stiva stessa diretta verso lo sfioro (U) è abbastanza bassa in quanto il tirante d’acqua medio h (figura 35) è piuttosto elevato, essendo la stiva ancora praticamente vuota: in questo modo viene facilitata la sedimentazione delle particelle più grosse ($w_i C_i A$), che iniziano a formare un letto di sabbia, mentre la concentrazione dello scarico C_s è ancora molto bassa e formata dalle sole particelle sottili. Tale processo continua per un certo tempo durante il quale aumenta lo spessore del letto di sabbia fino al raggiungimento del carico massimo. Nell’istante generico si possono quindi individuare nella stiva due volumi: il volume occu-



35. Schematizzazione a scala deformata del processo di carico all’interno della stiva e sfioro del materiale.
 A) situazione iniziale al tempo $t=0$;
 B) situazione intermedia al tempo t ;
 C) situazione finale al tempo t_f .

pato dal materiale depositato sul fondo ed il volume occupato dalla miscela di scarico. Man mano che aumenta il volume del letto di fondo e diminuisce il volume occupato dalla miscela, la velocità della corrente aumenta e, conseguentemente, aumenta la quantità del materiale in sospensione convogliato verso lo scarico (QC_{s_i}) e rilasciato in mare. Dapprima escono le particelle più fini e, quando la velocità longitudinale dell'acqua comincia a prevalere rispetto a quella di sedimentazione, iniziano a fuoriuscire anche le particelle più grosse. La fase di stivaggio e di sfioro dei sedimenti in mare termina quando le perdite di sedimenti dalla stiva diventano eccessivamente elevate e non è più conveniente proseguire lo scavo.

Il bilancio di sedimenti delle varie classi granulometriche (i) fra flusso entrante (QC_{t_i}), flusso uscente ($QC_{s_i}=g_{0_i}$) e flusso netto di deposito ($w_{s_i}C_{f_i}A$) fornisce il valore della portata solida scaricata in mare per ciascuna classe granulometrica (g_{0_i}). I dati che permettono il calcolo di g_{0_i} sono: la composizione granulometrica del materiale di fondo dragato, la portata liquida di dragaggio Q , le dimensioni della stiva ($A \cdot h_0$), due parametri costanti (caratteristiche delle draga) la cui taratura può essere eseguita nel corso di una operazione di dragaggio. La portata solida g_{0_i} del materiale sfiorato per ciascuna classe granulometrica costituisce il dato di input per il modello principale, che simula il comportamento del pennacchio rilasciato dalla draga.

Modello principale del pennacchio

Le ipotesi che stanno alla base della formulazione del modello principale e che permettono di semplificarlo sono:

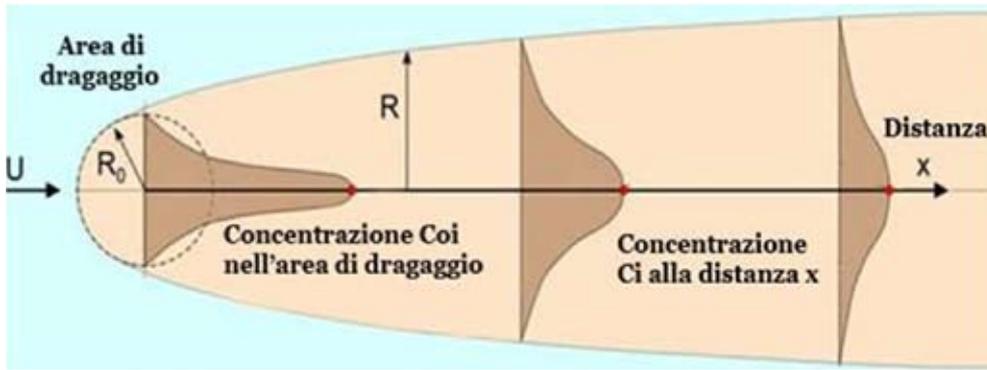
- concentrazione uniforme sulla profondità;
- profondità costante;
- velocità dell'acqua uniforme e stazionaria;
- dimensioni limitate e conosciute dell'area di dragaggio;
- concentrazione prodotta dal dragaggio sovrapponibile a quella dovuta alla risospensione da parte di vento, onde e correnti.

Con riferimento anche alla figura 36, indicheremo con:

- x = distanza tra il punto di misura e il baricentro dell'area di dragaggio (m),
- R_0 = raggio nell'area di dragaggio (m),
- $R(x)$ = semiampiezza del pennacchio nella sezione di misura (m),
- h = profondità (m),
- U = velocità dell'acqua (m/s),
- w_{s_i} = velocità di sedimentazione (funzione della frazione granulometrica i -ma delle particelle) (m/s),
- t_f = tempo che intercorre tra l'istante di inizio scavo e l'istante di misura (s),
- $t = X/U$ = tempo impiegato dall'acqua per percorrere la distanza tra la zona di scavo e il punto di misura (s),
- t_e = tempo che intercorre fra l'istante finale dello scavo e l'istante di misura (s),
- K_T = coefficiente di dispersione laterale (m^2/s) (a rigore dipende dalla scala di turbolenza ma è ragionevolmente assunto costante).

Il pennacchio di torbida (figura 36) creato dalle attività di scavo viene calcolato nel modello come la somma di "nuvole elementari" create con successive immissioni istantanee di massa infinitesima rilasciate in $x=0$. La concentrazione di ogni nuvola elementare tende col passare del tempo ad abbassarsi, in virtù della sedimentazione e del fenomeno dispersivo che determinano un allargamento del raggio R della nuvola.

Dal sottomodello del riempimento della stiva risulta che g_{0_i} è nullo all'inizio dello sfioro



36. Pennacchio di torbidità prodotto da una draga che immette, in continuo, una quantità di sedimenti (g_{0i}) aventi granulometria i . La concentrazione $C_i(x)$ decresce con la distanza longitudinale x e con la distanza trasversale dall'asse del pennacchio.

($t=tf$) ma aumenta linearmente nel tempo, assumendo il suo massimo valore al termine dello scavo ($t=te$) cioè per $tf < t < te$.

$$g_0 = \alpha_t (tf - t)$$

con α_t valore noto fornito dal citato sottomodulo.

Ipotizzando una distribuzione lineare della concentrazione in direzione trasversale al pennacchio, il bilancio di massa fornisce l'andamento delle dimensioni della nuvola nel tempo:

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + 6k_r t}$$

mentre la concentrazione $\Delta C_i(t)$ della frazione i -ma all'interno della nuvola elementare diminuisce nel tempo secondo l'espressione:

$$\Delta C_i = \frac{3g_0 \Delta t}{\pi R_0^2 h} \exp(-\gamma_i t)$$

Il coefficiente γ_i esprime il decadimento nel tempo della concentrazione di solidi sospesi nella nuvola:

$$\gamma_i = \frac{w_{si}}{h} + \frac{6k_r}{R_0^2}$$

Il coefficiente γ_i congloba le due componenti che influiscono sul decadimento della concentrazione: la componente di sedimentazione dovuta al peso delle particelle (w_{si}/h), la dispersione dei sedimenti in sospensione e quindi l'allargamento della nuvola; processo quest'ultimo regolato dal coefficiente K_r e dalla dimensione iniziale della nuvola pari a R_0 .

Passando all'integrazione tra tf e $t < te$ si ha, per ogni frazione granulometrica,

$$C_i(t) = \frac{3\alpha_t}{\pi R_0^2 h \gamma_i} \left[e^{(-\gamma_i t)} \left(t_f - t - \frac{1}{\gamma_i} \right) + \beta_i \frac{1}{\gamma_i} e^{(-\gamma_i t_f)} \right]$$

che esprima la variazione della concentrazione della frazione i -esima nel baricentro della nuvola integrale.

Utilizzando la relazione $te=X/U$ si ottiene, dalla formula precedente, la distribuzione spaziale della concentrazione $C(x)$ sull'asse del pennacchio al termine dello scarico $t=te$, cioè nella situazione di massima estensione della torbidità. Come intuitivo, si osserva che l'estensione del pennacchio è più ampia per operazioni di dragaggio intense e prolungate (α_t e t_f elevati), per operazioni di dragaggio concentrate (R_0 ridotto) e per le frazioni più fini (γ_i più piccolo).

La concentrazione totale $C(x)$ nel pennacchio a diverse distanze x dalla draga, misurata al tempo $t=te$ ($te=X/U$) dopo l'inizio delle operazioni di dragaggio $t=t_p$ è fornita pertanto dalla sommatoria delle singole frazioni granulometriche.

$$C = \sum_{i=0}^s C_i$$

con C_i fornite precedentemente.

Bibliografia

- Anchor Environmental CA, L.P. (2003) Literature review of Effects of resuspended Sediments due to dredging operations. Irvine, California.
- ANPA (1999) Le principali metodiche di campionamento e analisi del particolato in sospensione in ambienti acquatici. Rassegna bibliografica, Serie Documenti 9/1999.
- Di Silvio G., Franzoia M., Nones M., Bonaldo D., Zaggia L., Lorenzetti G., Dall'Angelo C. (2011) Evaluating sediment input of rivers flowing in the Lagoon of Venice. In Scientific Research and Safeguarding of Venice, CORILA. Volume VII, 2007-2010 results.
- EPA (2001) Guidelines for Dredging.
- EPA (1986) Quality criteria for water. 440/5-86-001.
- Idronaut Srl. (2005a) OceanSeven 304 CTD-T OPERATOR MANUAL, Brugherio (Milan).
- Idronaut Srl. (2005b) Seapoint Turbidity Meter USER MANUAL, Brugherio (Milan).
- Land J., Burt T. N. and Otten H. (2004) Application of a new international protocol to measurement of sediment release from dredgers. Proc. 17th World Dredging Conference, Hamburg.
- Land J., Clarke D., Reine K., Dickerson C. (2007) Acoustic Determination of Sediment loss terms for mechanical dredging operations at Providence, RI, USA. Proc. 18th World Dredging Conference, Orlando.
- Madricardo F., Amos C. L. , De Pascalis F., Ferrarin C., Fogarin S., Lorenzetti G., Kassem H., Kruss A., Maicu F., Petrizzo A., Umgiesser G., Zaggia L. (2015) Sediment transport in a tidal inlet: the case of the Lido inlet, Venice, Italy. Conference: ECSA 55 Unbounded boundaries and shifting baselines: Estuaries and coastal seas in a rapidly changing world, At London UK.
- Ertfemeijer P. L., Lewis R. R. III (2006) Environmental impacts of dredging on seagrasses: A review. Marine Pollution Bulletin, Volume 52, Issue 12. Pag. 1553-1572. Elsevier.
- Wilber D. H. and Clarke D. G. (2011) 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 Fishery Management, 21: 855-875.

Summary

We describe here the approach for the monitoring of hydrodynamics and water turbidity and summarize the main results of the investigations.

Acoustic techniques were extensively employed to study water and sediment transport and their temporary perturbations caused by the variety of engineering works that followed over time, as well as the effects of the permanent morphological changes at the inlets. The most impacting perturbations induced by the works included dredging interventions and the release of rock materials for the construction of breakwaters. Investigations were mainly based on the conversion of *backscatter* recorded by Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) operated from a survey boat or a wireless connected trimaran. The calibration was based on CTD measurement performed with a multiparameter probe and a large series of water samples collected with an integrated rosette sampler, requiring a particular effort in the field. However, once the conversion was obtained, the procedure guaranteed a rapid assessment of short-term variations in the suspended sediment concentration, allowing to monitor the highly dynamic environment of the inlet channel as well as the turbidity plume released from an operating dredger.

Turbidity was also measured in continuous in some fixed stations located near the construction area providing a base reference for the comparison of impacts with the natural trend of suspended particulate matter (SPM). As continuous measurements of seawater turbidity in a network of stations is not a simple task, dedicated methodologies have been developed for processing and analyzing recorded data and to convert time series of turbidity (FTU) in time series of suspended particulate matter (mg/l) allowing to evaluate possible impacts of work sites on the ecosystem quality. An increase of the suspended sediments concentration generated by dredging works can, for instance, increase the oxygen demand or reduce light penetration in the water column with effects on the biota. A “threshold” limit on the SPM concentration was then defined by means of statistical analysis on data collected in the first phase of the monitoring period. This limit, calculated for the specific context on the basis of the natural trend of turbidity and information from the technical and scientific literature, cannot be exceeded outside a predetermined area around the operating machine whose size is defined as a function of current velocity. By respecting this limit negative effects on the valuable ecosystems surrounding the worksites, like seagrass meadows and associated biological communities can be avoided. Therefore, controls on the activities have been performed with acoustic measurements during field-surveys and by the records of fixed turbidity stations, and any violation of the imposed limit was reported to the authority in charge of the project management.

In the absence of measurements the impact of the works can still be assessed using predictive tools: a simplified sediments transport and dispersion model was developed to predict the configuration and the evolution of the turbidity plume as a function of both the input of sediments released by a trailing suction hopper dredger, the most impacting vessel among those monitored, and the tidal currents. This numerical model allowed to estimate the concentration of suspended particles at any distance from the operating vessel.

As the morphodynamics of the inlets is controlled by sediment properties and tidal currents the investigations on particulate transport are integrated with studies on the water circulation of the inlets and grain size distribution of the suspended fraction. Field measurements were performed in several test sections which included areas of the ebb and flood tidal delta by combining information acquired on the channel cross-section and along its longitudinal direction describing most of the variability of the investigated system.