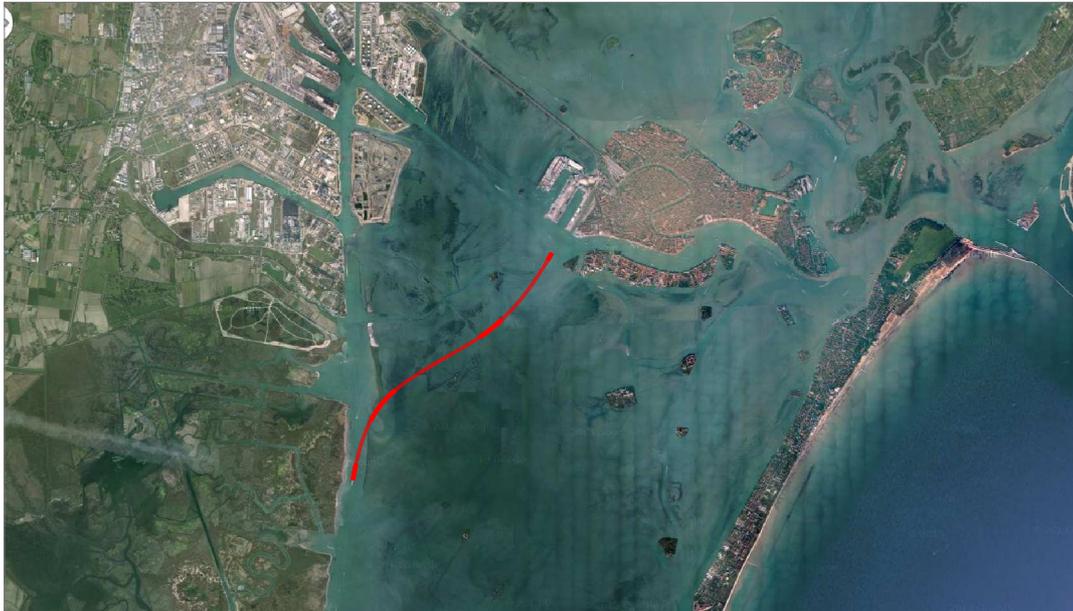




AUTORITÀ PORTUALE DI VENEZIA

DIREZIONE TECNICA



**ADEGUAMENTO VIA ACQUA DI ACCESSO ALLA STAZIONE
MARITTIMA DI VENEZIA E RIQUALIFICAZIONE DELLE AREE
LIMITROFE AL CANALE CONTORTA SANT'ANGELO**

PROGETTO PRELIMINARE

STUDIO MORFOLOGICO

PROGETTISTA
Autorità Portuale di Venezia
Direzione Tecnica

REDATTO DA
PROTECNO

DIRETTORE TECNICO E
RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO
Ing. N. Torricella

CODICE PROGETTO

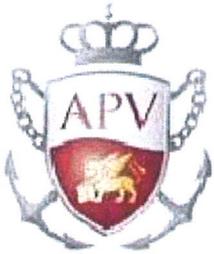
49.810.000

CODICE ELABORATO

02

SCALA

rev	data	descrizione	redatto	controllato	approvato
0	05/2013	EMISSIONE PROGETTO PRELIMINARE	Adami, Comola		N. Torricella
1					
2					
3					
4					

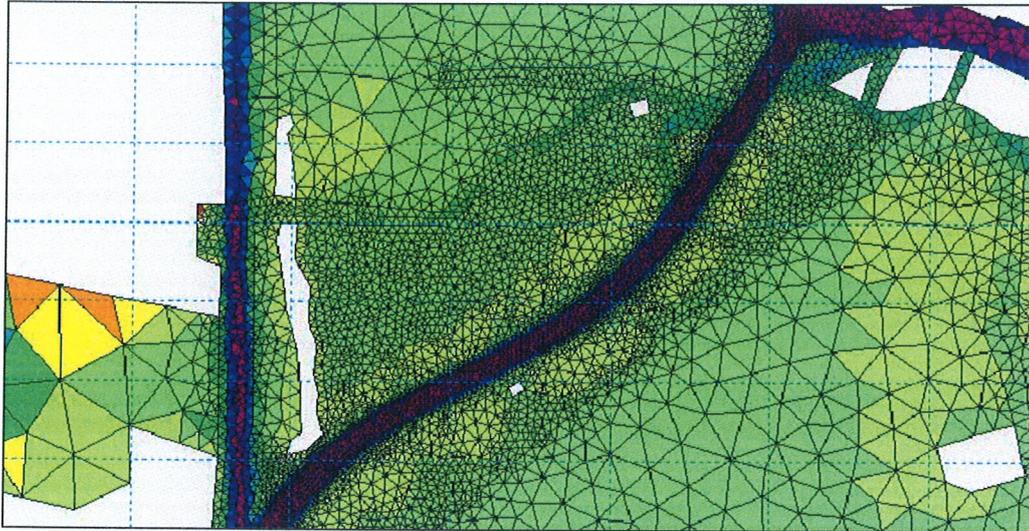


Committente

Autorità Portuale di Venezia

Responsabile del Procedimento

Dott. Ing. Nicola Torricella



Adeguamento via acqua di accesso alla Stazione Marittima di Venezia e riqualificazione delle aree limitrofe al Canale Contorta S. Angelo.

STUDIO MORFOLOGICO

numero allegato

R03

codice file

404001R03-1ED

timbro e firma



titolo allegato

Relazione Tecnica Illustrativa - Seconda configurazione

codice partner/cliente

404001R03-1ED

Direttori Tecnici

Prof. Ing. Attilio Adami
Dott. Ing. Giannarturo Comola

Collaboratori

Dott. Ing. Eleonora Dallan

scala

Progettista

PROTECNO
LIFE AROUND WATER

Protecno srl

Via Risorgimento, 9
35027 Noventa Padovana (Pd) Italy
Tel. +39 049 8935128
Fax +39 049 8935266
e-mail: protecno@protecno.it
www.protecno.it



rev	data	descrizione	redatto	controllato	approvato
5					
4					
3					
2					
1	maggio 2013	Prima emissione	ED	ED	AA

Sommario

1. PREMESSA	3
2. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI	4
3. DESCRIZIONE DEL MODELLO MORFOLOGICO.	7
4. SOFTWARE UTILIZZATO	9
5. DATI DI INPUT	9
5.1. BATIMETRIA	10
5.2. IL VENTO	11
5.3. LA MAREA	13
5.4. I SEDIMENTI	13
6. ALLESTIMENTO MODELLO	14
6.1. DOMINIO E MESH DI CALCOLO	14
6.2. SEQUENZA SIMULAZIONI	20
6.2.1. <i>Simulazioni con modello sedimentologico</i>	20
6.2.2. <i>Simulazioni con modello morfologico</i>	21
6.3. PROGRAMMA PROVE.....	22
6.3.1. <i>Simulazioni con modello sedimentologico</i>	22
6.3.1. <i>Simulazioni con modello morfologico</i>	23
7. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI CON MODELLO SEDIMENTOLOGICO	23
7.1. PROVA SPCONF2_v20-45°_018	25
7.1.1. <i>Risultati modulo Spectral wave</i>	26
7.1.2. <i>Risultati modulo idrodinamico</i>	28
7.1.3. <i>Risultati modulo di trasporto solido</i>	31
7.2. PROVA SPCONF2_v15-135°_018	34
7.2.1. <i>Risultati modulo Spectral Wave</i>	34
7.2.2. <i>Risultati modulo idrodinamico</i>	37
7.2.3. <i>Risultati modulo di trasporto solido</i>	40
8. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI CON MODELLO MORFOLOGICO	43
8.1. PROVA SP_WINDC2	45

8.1.1.	<i>Risultati modulo idrodinamico</i>	45
8.1.2.	<i>Risultati modulo morfologico</i>	48
8.2.	PROVA SPCONF2_WINDC3	50
8.2.1.	<i>Risultati modulo idrodinamico</i>	50
8.2.2.	<i>Risultati modulo morfologico</i>	53
9.	CONCLUSIONI	55

1. PREMESSA

Nel 2012 è stato eseguito uno *Studio di Fattibilità* per un intervento di adeguamento della via acquea di accesso alla Stazione Marittima di Venezia e di riqualificazione delle aree limitrofe al Canale Contorta S. Angelo.

L'idea è quella di creare un percorso alternativo per le grandi navi che attualmente entrano dalla bocca di Lido e transitano attraverso il bacino S. Marco. Lo studio, datato febbraio 2012, contiene delle valutazioni basate su analisi con modello matematico idrodinamico.

Un ulteriore studio con modello matematico è stato eseguito da Protecno s.r.l. su incarico dell'Autorità Portuale di Venezia per approfondire le indagini riguardo le modifiche dell'idrodinamica per la porzione di laguna interessata dal nuovo canale nonché l'aspetto dell'evoluzione morfologica della zona di interesse. Lo studio è stato presentato nella relazione "*Studio morfologico – R01 Relazione Tecnica Illustrativa*".

Considerazioni richieste da APV riguardanti gli effetti idro-morfodinamici causati dal transito nel nuovo canale in progetto delle grandi navi da crociera sono stati presentati nello "*Studio degli effetti idrodinamici e morfologici del transito di natanti – R02 Relazione Tecnica Illustrativa - Prima configurazione*".

Su richiesta dell'Autorità Portuale, Protecno ha sviluppato l'intero studio per una configurazione di progetto alternativa a quella illustrata nello studio di Fattibilità e analizzata nei due precedenti studi sopra citati.

L'analisi delle modifiche all'idro-morfodinamica lagunare per questa nuova configurazione di progetto proposta da APV sono riportate nella presente relazione "*Studio morfologico – R03 Relazione Tecnica Illustrativa – Seconda configurazione*".

Gli effetti idro-morfodinamici causati dal transito nel nuovo canale in progetto delle grandi navi da crociera sono invece trattati nella relazione "*Studio degli*

effetti idrodinamici e morfologici del transito di natanti – R04 Relazione Tecnica Illustrativa - Seconda configurazione”.

2. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI

Gli interventi oggetto del presente studio riguardano l’adeguamento della via acqua di accesso alla Stazione Marittima di Venezia e di riqualificazione delle aree limitrofe al Canale Contorta S. Angelo.



Figura 1 - Corografia della laguna di Venezia; il riquadro rosso individua la zona interessata dagli interventi e oggetto del presente studio.

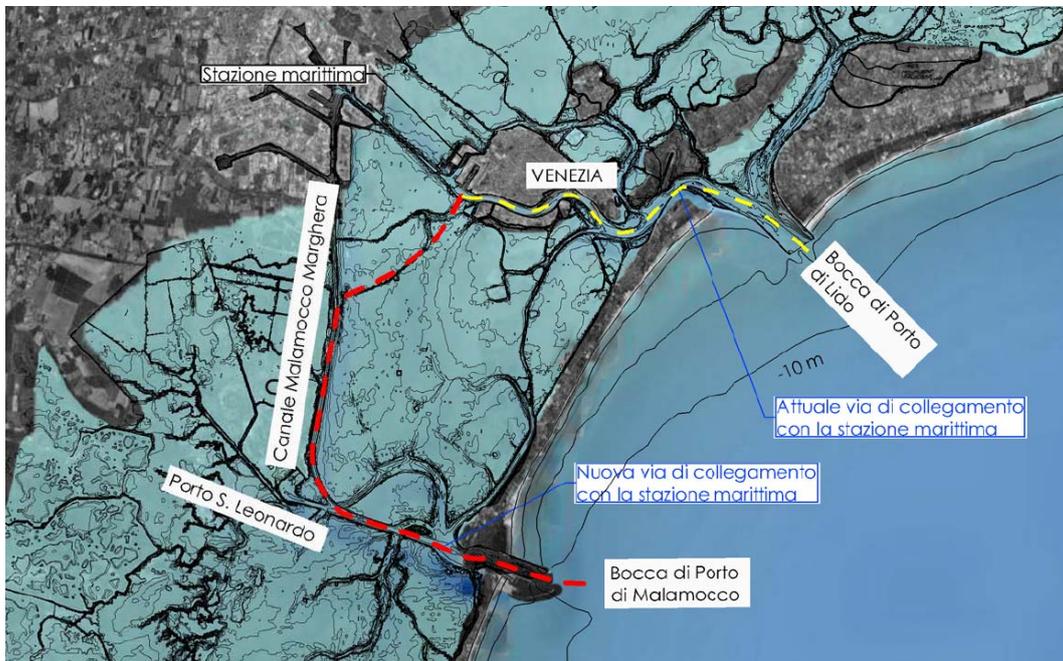


Figura 2 - Percorso attuale (in giallo) e nuovo percorso in progetto (in rosso) per l'accesso alla Stazione Marittima di Venezia (fonte: Studio di fattibilità)

L'idea è quella di creare un percorso alternativo per le grandi navi che attualmente entrano dalla bocca di Lido e transitano attraverso il bacino di S. Marco (Figura 2).

L'attuale canale Contorta S. Angelo dovrà essere risezionato in larghezza e profondità mentre il canale Malamocco - Marghera non richiederà ulteriori interventi rispetto alle manutenzioni già attualmente eseguite dall'Autorità Portuale di Venezia.

Gli interventi previsti prevedono di centrare l'andamento planimetrico del nuovo alveo per lo più sull'attuale, scostandosene leggermente solo per minimizzare le interferenze con strutture preesistenti, quali l'isola di S. Angelo, e per mantenere un raggio di curvatura idoneo alla manovrabilità delle navi di cui deve permettere il transito. È prevista inoltre la realizzazione di una serie di velme a lato del canale con l'obiettivo di proteggere i fondali adiacenti dalla risacca indotta dal transito delle navi, ma anche per contribuire a garantire il mantenimento dei fondali del canale stesso.

La prima configurazione di progetto (Figura 3) di cui si sono studiati gli aspetti di modifica della idrodinamica e morfologia lagunare e gli effetti del passaggio di natanti è stata quella presentata nello Studio di Fattibilità, con una cunetta larga 80 m e profonda -10 m s.m.m. (dato poi rettificato da APV in -10.50 m s.m.m.) con sponde con pendenza 1:3.

La seconda configurazione di progetto, elaborata da APV e oggetto del presente studio, prevede una cunetta di 120 m e profondità -10.50 m s.m.m. e con sponde con pendenza 1:4.

Le due configurazioni presentano un diverso andamento planimetrico (Figura 5), che comunque mantiene approssimativamente gli stessi punti di ingresso del nuovo canale sia verso il canale S. Leonardo - Marghera che verso il Canale della Giudecca.

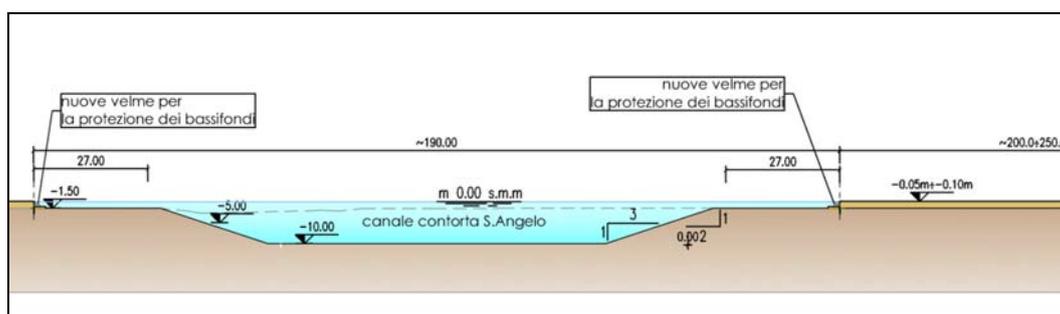


Figura 3 – Prima configurazione di progetto. Sezione del nuovo Canale Contorta S. Angelo (fonte: Studio di Fattibilità).

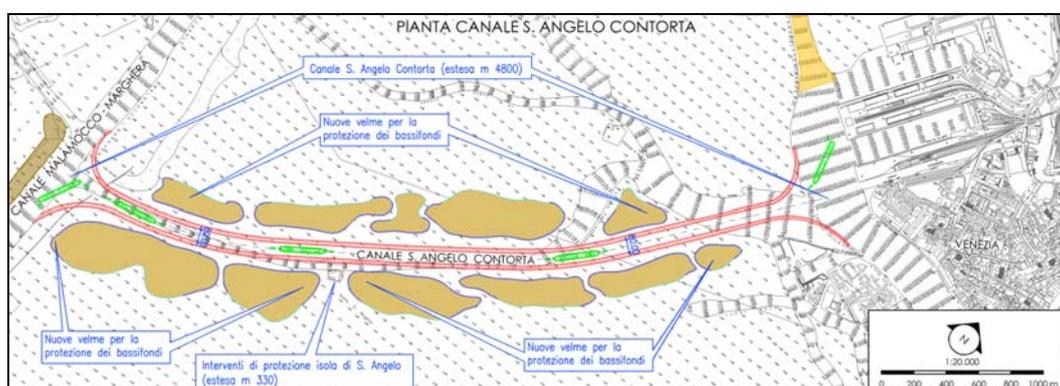


Figura 4 – Prima configurazione di progetto. Tracciato planimetrico del nuovo Canale Contorta S. Angelo e disposizione delle velme (fonte: Studio di Fattibilità).



Figura 5 - Confronto dell'andamento planimetrico della prima configurazione di progetto (in verde) e della seconda configurazione di progetto (in rosso).

3. DESCRIZIONE DEL MODELLO MORFOLOGICO.

Lo studio è stato eseguito impiegando il modello Mike21 prodotto dal Danish Hydraulic Institute (Copenhagen), ed utilizzando a base delle simulazioni la carta delle batimetrie della laguna di Venezia pubblicata dal Magistrato alle Acque nel 2002, opportunamente aggiornata per tener conto della realizzazione, in tale

ambito, di varie nuove strutture morfologiche, avvenuta negli ultimi anni circa, da parte del Magistrato alle Acque – Consorzio Venezia Nuova.

Le simulazioni sono state eseguite nelle condizioni attuali ed in due configurazioni di progetto.

In particolare, la presente relazione illustra l'allestimento del modello e i risultati delle simulazioni per la seconda configurazione, e si rimanda alla relazione “*Studio morfologico – R01 Relazione Tecnica Illustrativa*” per lo stato attuale e la prima configurazione di progetto.

Nelle prove sono stati simulati gli effetti sui sedimenti del moto ondoso da vento accoppiato alla propagazione della marea all'interno della laguna. In questo modo sono stati ricostruiti l'andamento della velocità della corrente e delle eventuali variazioni di livello della superficie libera lagunare nell'area considerata ed è stato possibile produrre una mappatura della capacità di trasporto dei sedimenti.

Il modello idrodinamico delle correnti di marea infatti rende conto degli effetti di risospensione e trasporto dei sedimenti all'interno dei canali lagunari principali.

Il modello di moto ondoso da vento genera gli sforzi tangenziali al fondo che regolano il verificarsi di questi fenomeni nelle rimanenti superfici lagunari.

Gli sforzi tangenziali, e quindi le correnti prodotte al fondo dal moto ondoso da vento, unitamente alle correnti di marea e all'interazione fra i due fenomeni sono l'input che, assegnato al modello di trasporto dei sedimenti, governa la stabilità del fondale.

Sono stati realizzati due blocchi di simulazioni a crescente onere computazionale. Il primo fornisce un'interpretazione sedimentologica delle dinamiche del trasporto, il secondo un vero e proprio modello morfologico.

Dal primo si ricavano delle rappresentazioni istantanee della capacità di trasporto, mentre il secondo consente di apprezzare le tendenze erosive e di deposizione complessive conseguenti ad un certo evento meteorico.

4. SOFTWARE UTILIZZATO

Per il presente studio è stato utilizzato il pacchetto software MIKE21 di produzione DHI (Danish Hydraulic Institute), release 2008 (*Danish Hydraulic Institute. MIKE21. Release 2008. Scientific Documentation*). In particolare sono stati implementati i moduli:

- di generazione, trasformazione e decrescita del moto ondoso (Spectral Wave, SW);
- idrodinamico (Hydrodynamic, HD);
- di trasporto dei sedimenti non coesivi (Sediment Transport, ST) e aggiornamento della quota batimetrica (morfologico).

Con la combinazione di questi tre moduli sono stati indagati i diversi aspetti che caratterizzano la morfodinamica lagunare, illustrati nel precedente paragrafo.

La modellazione con il modulo ST fornisce indicazioni sulla capacità di trasporto di sedimenti coesivi, ovvero la propensione alla messa in sospensione del sedimento, non la dispersione dei sedimenti, dinamica invece tipica di materiali fini e coesivi.

Si rimanda alla relazione “*Studio morfologico – R01 Relazione Tecnica Illustrativa*” per la descrizione dettagliata dei tre moduli SW, HD, ST.

5. DATI DI INPUT

Si riportano in questo capitolo le informazioni di base riguardanti i dati di input scelti per le simulazioni numeriche. Una trattazione più approfondita delle scelte

fatte è riportata nella già citata relazione “*Studio morfologico – ROI Relazione Tecnica Illustrativa*”.

Visto che in questa sede si è studiata una seconda configurazione di progetto, da confrontare con la configurazione attuale e con la prima configurazione di progetto, si sono mantenuti gli stessi dati di vento, marea e granulometria utilizzati per queste ultime.

5.1. BATIMETRIA

Primo passo per l’allestimento del modello è stata la creazione del dominio di calcolo. Per realizzare una adeguata rappresentazione della laguna di Venezia, con le informazioni necessarie al software di calcolo, è necessario definire il contorno della laguna, le quote batimetriche, e la mesh di calcolo.

Il contorno della laguna è stato ricavato a partire dalla cartografia digitale della Laguna di Venezia (CTR in formato vettoriale reperibili sul sito della Regione Veneto), ricostruendo i contorni in ambiente CAD georeferenziato e esportandoli in formato XYZ così da poterli caricare nel modello Mike21.

Per quanto riguarda i dati batimetrici, la griglia computazionale è stata costruita sulla carta delle batimetrie della laguna di Venezia pubblicata dal Magistrato alle Acque nel 2002, opportunamente aggiornata per tener conto della realizzazione, in tale ambito, di varie nuove strutture morfologiche, avvenuta negli ultimi anni, da parte del Magistrato alle Acque – Consorzio Venezia Nuova.

Per lo stato di progetto sono state implementate le nuove batimetrie del canale (fondo alla -10.50 m s.m.m., cunetta larga 120 m e sponde con pendenza 1:4).

Le velme sono state mantenute come da Studio di fattibilità, con quota sommitale di - 0.10 m s.m.m., e sono state disposte lungo il canale assecondando il nuovo andamento planimetrico previsto per la seconda configurazione (Figura 6).

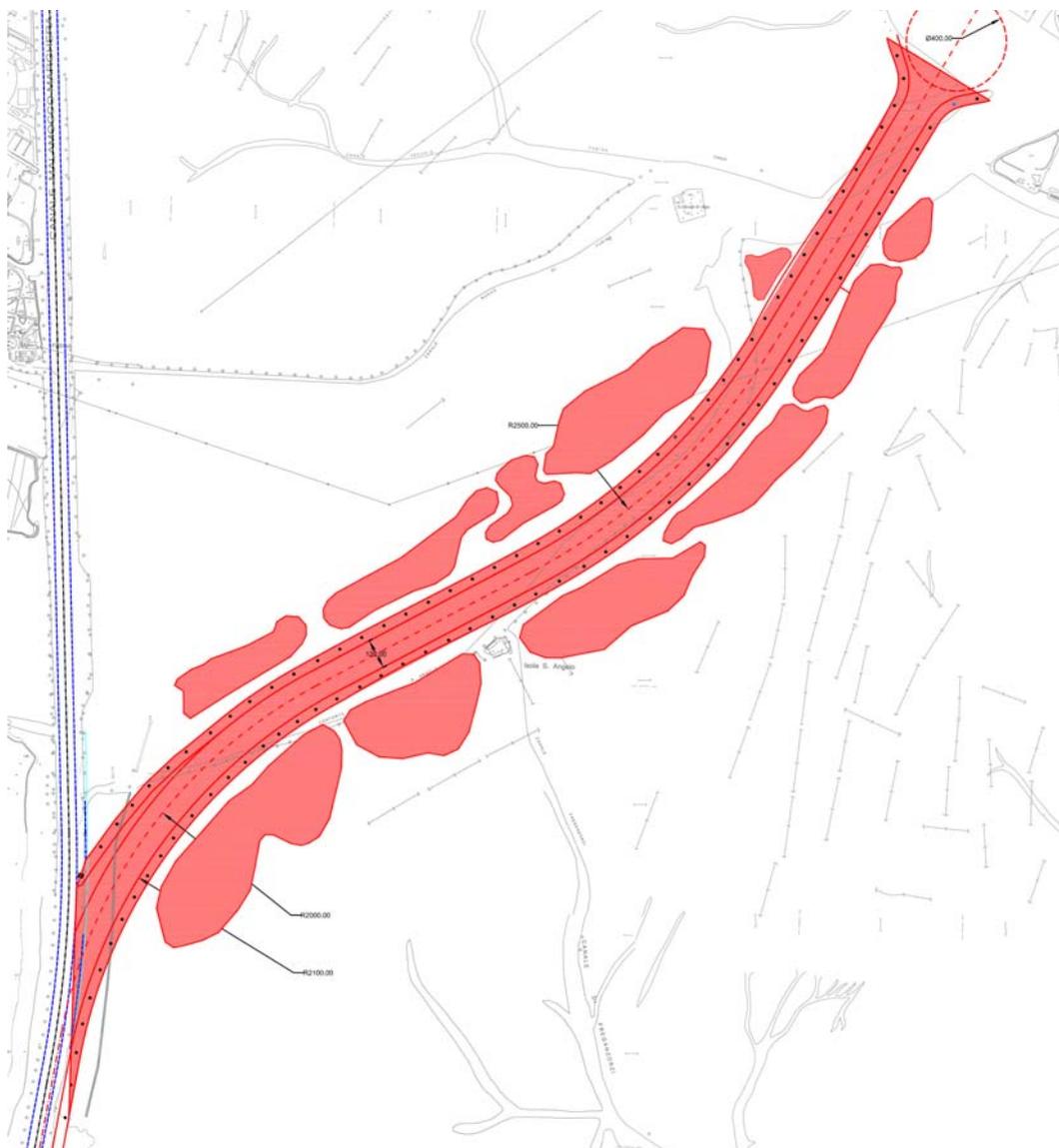


Figura 6 - Seconda configurazione. Andamento planimetrico del canale e disposizione delle velme, come implementati nel modello matematico.

5.2. IL VENTO

In laguna, le traversie principali lungo cui spira il vento sono nord-est e sud-est. I dati di vento registrati alla piattaforma CNR dal 1997 al 2002 confermano la netta prevalenza della traversia di Bora (45°) con valori estremali di velocità del vento dell'ordine dei 20 m/s.

Seconda, in ordine di importanza, appare la traversia di scirocco (135°), caratterizzata da valori estremali del vento dell'ordine dei 15 m/s.

Tali condizioni di vento sono state utilizzate nella prima fase dello studio con modello matematico sedimentologico, imponendole costanti sull'intero dominio di calcolo.

Per la seconda parte dello studio, svolta con modello morfologico, si è fatto riferimento a due delle condizioni di vento utilizzate nello studio C.2.10/III. In tale studio, era stata svolta un'accurata analisi dei dati di vento, selezionando gli eventi più rappresentativi dell'evoluzione morfologica lagunare nel periodo 1970-2000. A partire da 45 condizioni di vento ricavate dai dati della piattaforma CNR, erano state svolte simulazioni per ridurre il numero di condizioni di vento ed ottenere comunque una distribuzione di erosione e sedimentazione simile a quella ottenuta con tutte le 45 condizioni iniziali. Erano state così ottenute le quattro condizioni di vento presentate in tabella Tabella 1.

Numero condizione	Velocità [m/s]	Direzione [°N]
C1	6.91	17.40
C2	11.92	72.61
C3	6.66	194.08
C4	2.14	316.60

Tabella 1 - Condizioni di vento ricavate nello studio C.2.10/III

In questa sede, per le simulazioni morfologiche sono state scelte le due condizioni più vicine ad una bora e uno scirocco intensi, quindi la condizione C2 e la C3, imponendole costanti sull'intero dominio di calcolo.

5.3. LA MAREA

Per la scelta della marea con cui forzare il modello sono state utilizzate le informazioni estratte dallo *Studio C.2.10/III - Attività di aggiornamento del piano degli interventi per il recupero morfologico in applicazione della Delibera del Consiglio dei Ministri del 15 marzo 2001 – Studi integrativi 3^a fase*, e dallo *Studio C.2.10/IV - Aggiornamento del piano morfologico in base alle richieste dell'Ufficio di Piano*.

In Figura 7 si riporta l'andamento della marea morfologica adottata nelle nostre simulazioni.

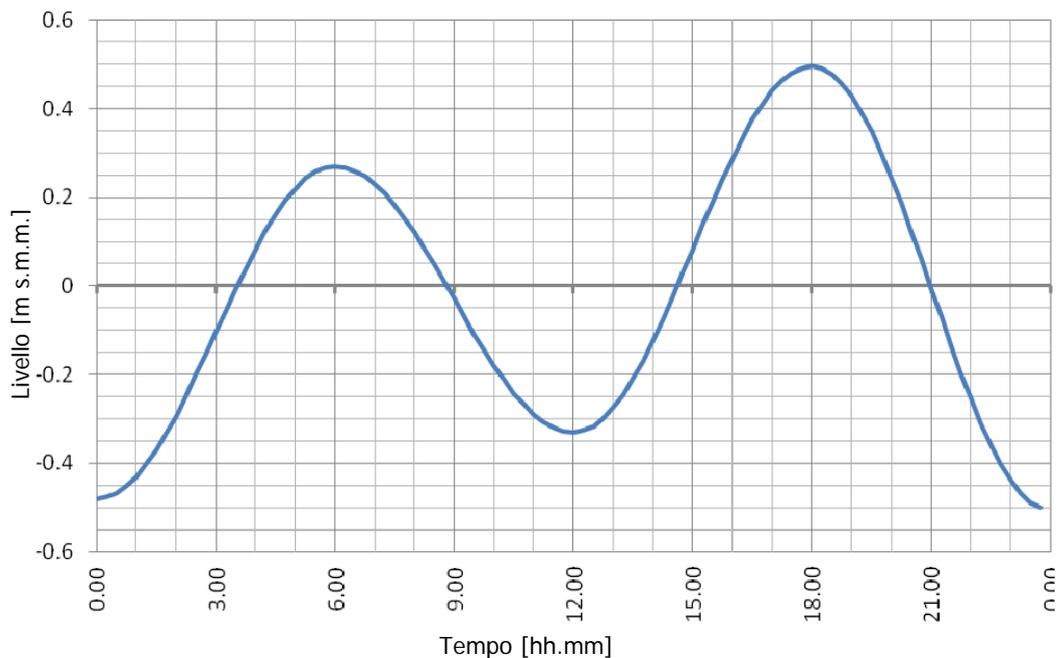


Figura 7 - Marea morfologica adottata nelle simulazioni.

5.4. I SEDIMENTI

Per la simulazione dei processi morfologici è necessario definire le caratteristiche dei sedimenti presenti nella zona compresa nel dominio di calcolo, informazione fondamentale per poter indagare il trasporto solido.

Informazioni sui sedimenti che caratterizzano la laguna sono stati ricavati dall'Atlante della Laguna e dai già citati Studi C.2.10/III e C.2.10/IV.

Tenendo conto di tali informazioni e delle caratteristiche del modello numerico utilizzato per le simulazioni (trasporto di materiale non coesivo), nel modello è stata imposta una granulometria uniforme di sedimenti sabbiosi su tutto il dominio, con un diametro medio pari a 180 μm .

6. ALLESTIMENTO MODELLO

6.1. DOMINIO E MESH DI CALCOLO

Il modello numerico MIKE21 risolve numericamente le equazioni del moto in un dominio discretizzato con elementi triangolari, utilizzando il metodo ai volumi finiti. La risoluzione del modello aumenta tanto più piccoli, e perciò numerosi, sono gli elementi triangolari che discretizzano il dominio di calcolo. A ciò corrisponde un aumento del tempo di calcolo necessario ad ottenere la soluzione voluta. Per questo motivo il modello consente la differenziazione delle dimensioni della mesh nelle zone di diverse caratteristiche e interesse.

Poiché si intende indagare la morfodinamica nella zona interessata dagli interventi ed in quelle limitrofe in cui è possibile risentirne gli effetti, il dominio di calcolo comprende tutta la laguna di Venezia (Figura 8) con una rappresentazione di dettaglio molto spinto nella zona oggetto di studio e via via più grossolano allontanandosene.

L'ubicazione della sezione di chiusura è stata posta presso le tre bocche lagunari in modo da poter riprodurre correttamente i fenomeni fisici di interesse, in particolare la propagazione della marea e la generazione delle onde prodotte dal vento che spira direttamente sulla superficie lagunare.

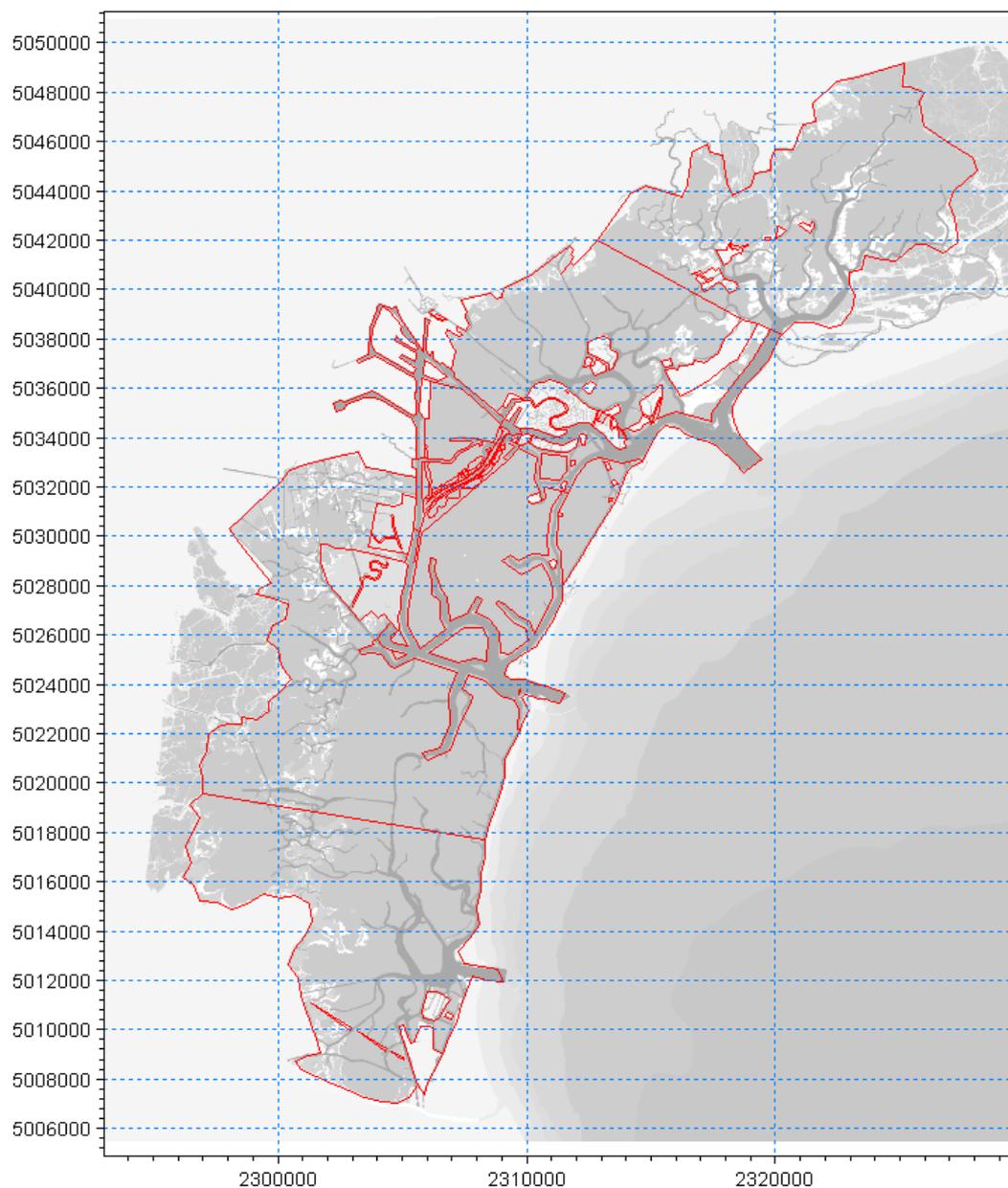


Figura 8 – Dominio di calcolo per le simulazioni in seconda configurazione di progetto.

Il dominio di calcolo è stato suddiviso in zone a differente dimensione degli elementi triangolari per ottimizzare i tempi di calcolo ed ottenere una soluzione maggiormente accurata nella zona di interesse.

Sia per la parte di studio definita “sedimentologica” che per quella “morfologica” è stata utilizzata una stessa mesh di calcolo in cui si è tenuto conto delle ottimizzazioni cui si era giunti per la mesh creata per la parte morfologica in stato attuale e in prima configurazione. Si ha cioè una maglia meno fitta nelle aree lagunari più distanti e meno significative e una risoluzione maggiore nella zona oggetto di studio (Figura 10):

- elementi di area massima di 700 m² per il canale in progetto;
- elementi di area massima di 2 000 m² per i canali di stato attuale situati nella zona interessata dalle opere in progetto;
- elementi di area massima di 6 000 m² per i canali principali;
- elementi di area massima di 40 000 m² per le aree di bassofondo adiacenti la zona di interesse;
- elementi di area massima di 100 000 m² per le due fasce ad esse esterne;
- elementi di area massima di 300 000 m² per le zone estreme a nord e sud nel dominio;

Complessivamente la mesh di calcolo in seconda configurazione è composta da circa 14 500 nodi e da circa 27 000 elementi triangolari.

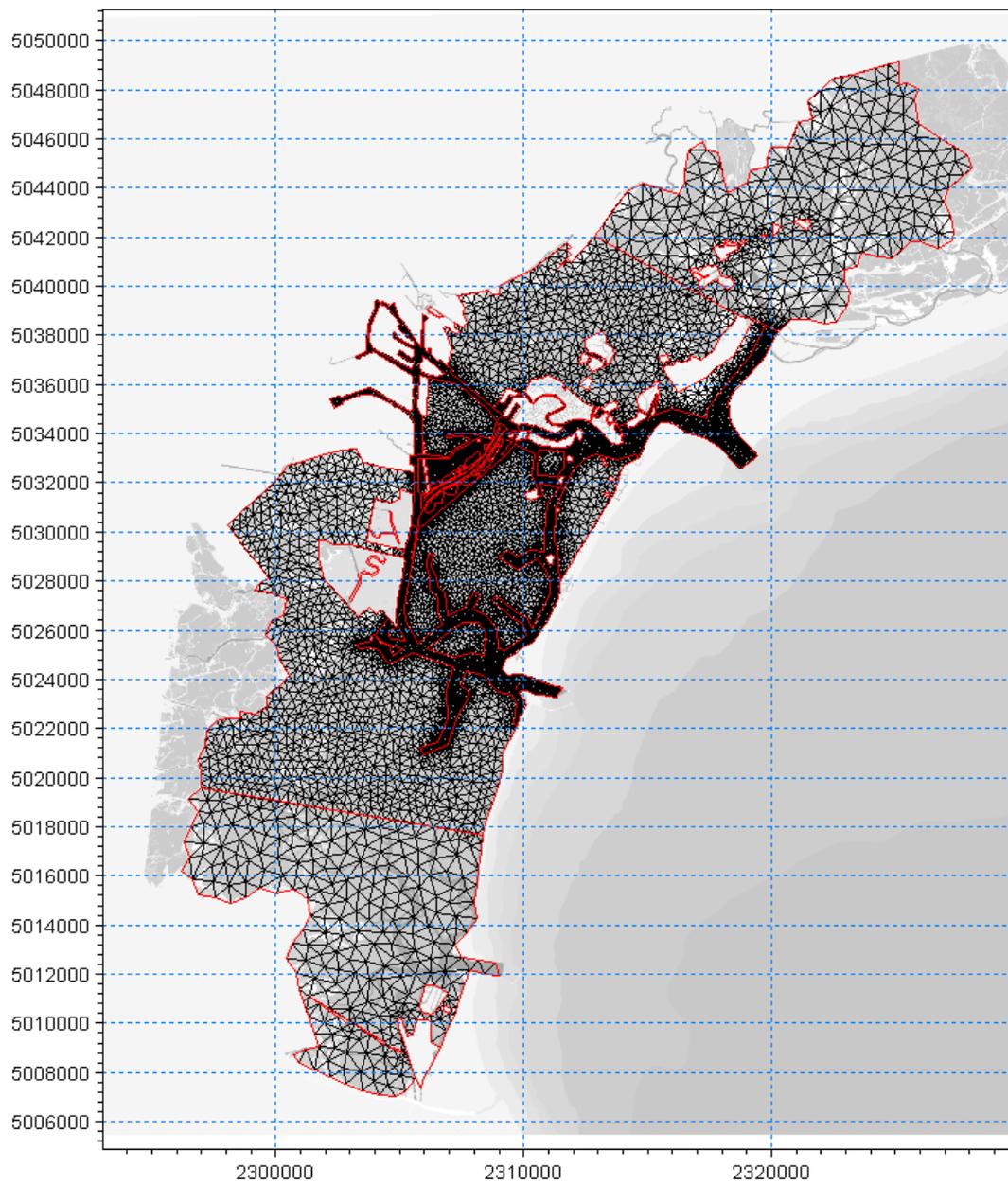


Figura 9 - Seconda configurazione di progetto. Mesh di calcolo sull'intero dominio.

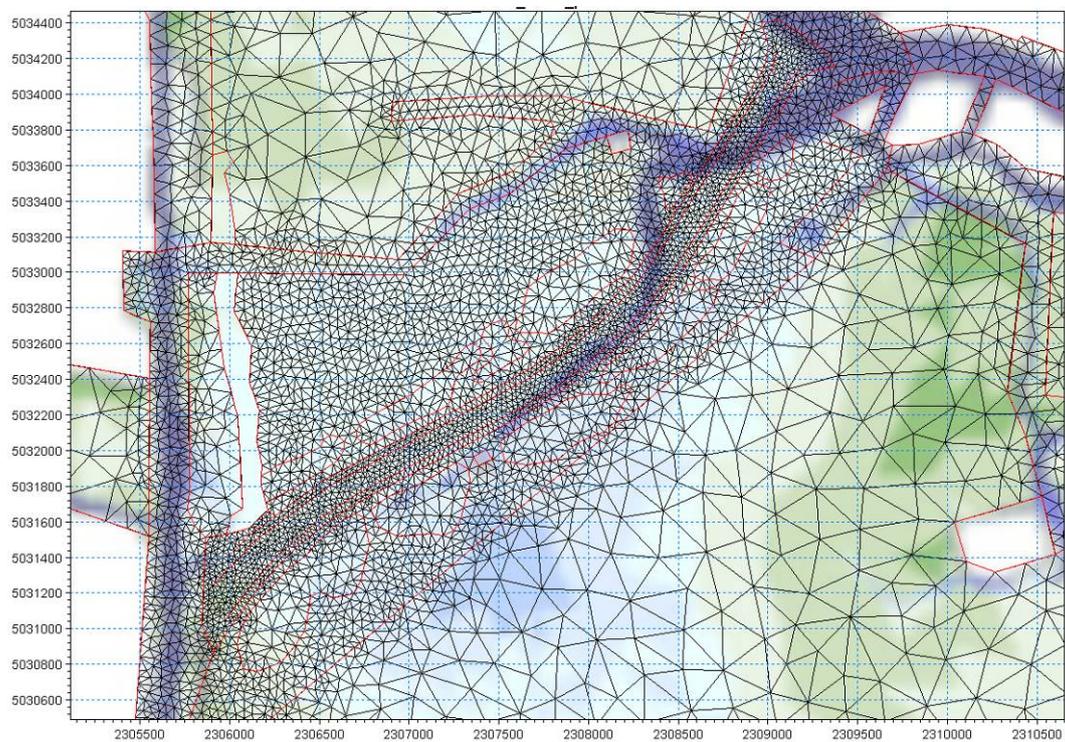


Figura 10 – Seconda configurazione di progetto. Mesh di calcolo, zoom sulla zona di interesse (una immagine della batimetria attuale come sfondo).

I dati batimetrici sono stati interpolati su questa griglia ad elementi triangolari ottenendo la batimetria di calcolo. Questa è stata migliorata a mano per definire meglio i varchi tra le velme (Figura 12).

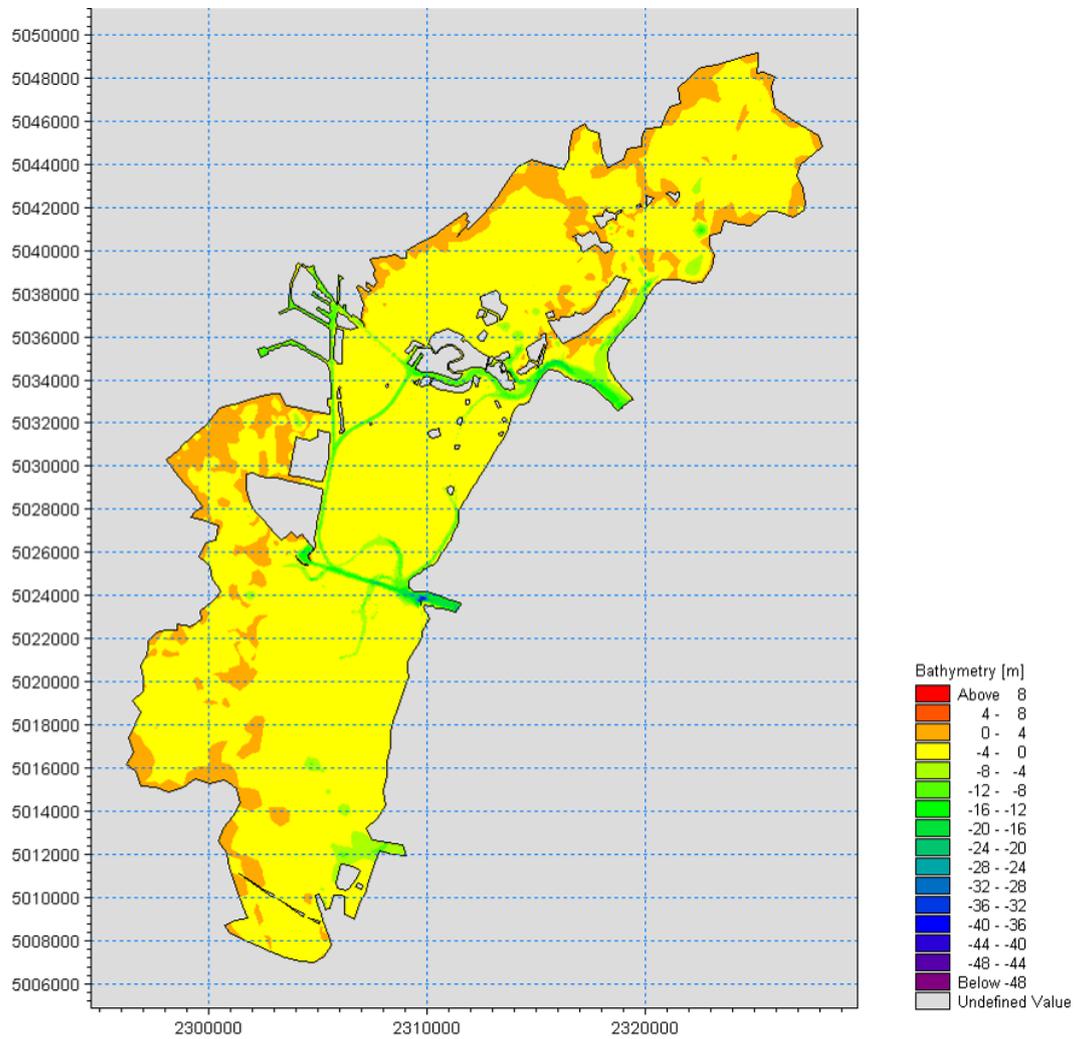


Figura 11 - Seconda configurazione di progetto. Batimetria di calcolo sull'intero dominio.

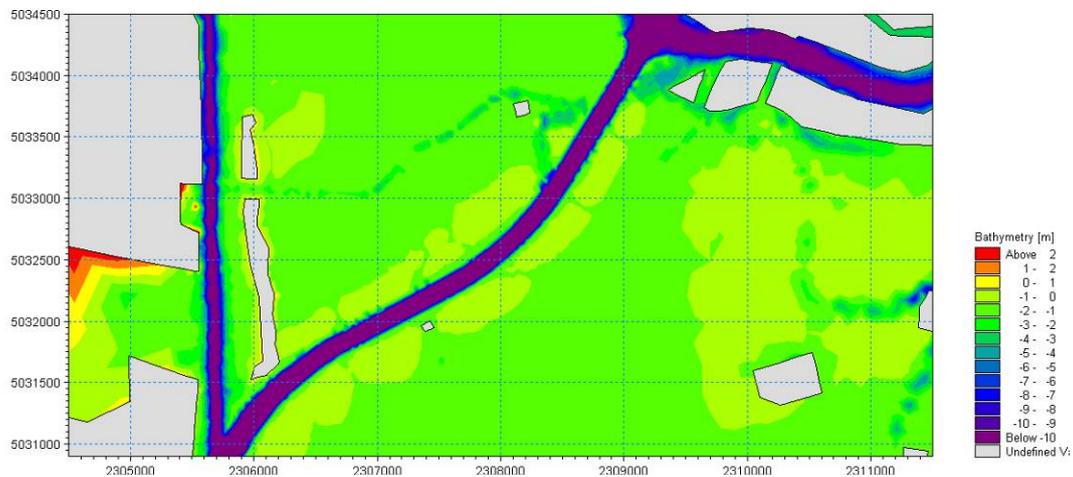


Figura 12 - Seconda configurazione di progetto. Batimetria di calcolo, zoom sulla zona di interesse.

6.2. SEQUENZA SIMULAZIONI

In prima fase (modello sedimentologico) sono state analizzate delle situazioni di vento teoriche, rappresentando una bora con direzione di provenienza 45°N e intensità estrema (20 m/s) ed uno scirocco con direzione di provenienza 135°N e intensità anch'essa estrema per il tipo di vento (15 m/s).

In seconda fase (modello morfologico) sono state applicate due delle quattro condizioni di vento individuate nello studio C.2.10/III, un vento di 11.92 m/s con direzione 72.96 °N e un vento di 6.66 m/s con direzione 194.08 °N.

In entrambe le situazioni la marea imposta al contorno è la marea morfologica definita all'interno dello studio C.2.10/III e descritta al paragrafo 5.3.

6.2.1. Simulazioni con modello sedimentologico

I diversi moduli del software Mike 21 sono stati impiegati in cascata in questo modo, per ogni combinazione di forzanti esterne e configurazione batimetrica:

- simulazione della sola idrodinamica (HD) forzando il modello con marea alle bocche di laguna e vento costante sull'intero dominio;
- simulazione di generazione del moto ondoso (SW) forzando il modello con vento e con le mappe di variazione di livello risultanti dalla prima simulazione idrodinamica (simulazione di tipo stazionario);
- simulazione idrodinamica (HD) di seconda fase, finalizzata a tradurre in termini di correnti i radiation stress calcolati con la simulazione di moto ondoso; modello forzato con marea alle bocche di laguna, vento costante sull'intero dominio e mappe dei radiation stress risultanti dalla precedente simulazione SW;
- generazione della "Sediment table" necessaria alla successiva simulazione di trasporto solido;
- simulazione di trasporto solido (ST) forzando il modello con le correnti e le variazioni di livello generate dall'ultima simulazione HD e con le onde generate dalla simulazione SW.

In tal modo è stato possibile riprodurre tutti i fenomeni fisici che hanno influenza sulla morfodinamica dei canali e dei bassofondi lagunari.

La Sediment table è una tabella generata da un tool di Mike 21 nella quale si combinano le diverse condizioni idrodinamiche e caratteristiche sedimentologiche.

Sono state simulate 24 ore, delle quali si considerano le prime 12 come messa a regime del modello.

6.2.2. Simulazioni con modello morfologico

I modelli idrodinamico, HD, di moto ondoso, SW, e di trasporto solido, ST, in modalità morfologica, sono stati utilizzati in maniera accoppiata invece che in cascata. Questo comporta che ad ogni passo di calcolo il modello tenga conto dei risultati ottenuti dai diversi moduli e, in particolare, aggiorni le quote del fondo.

Sono state riprodotte 48 ore, facendo iniziare la simulazione morfologica vera e propria dopo le prime 24.

6.3. PROGRAMMA PROVE

6.3.1. Simulazioni con modello sedimentologico

Sono state effettuate simulazioni considerando i seguenti diversi input:

- configurazione:
 - stato di progetto in seconda configurazione (con i varchi tra le velme ben rappresentati);
- marea: marea morfologica di durata 24 ore;
- vento:
 - bora di 20 m/s, direzione di provenienza 45°N;
 - scirocco di 15 m/s, direzione di provenienza 135°N;
- sedimenti:
 - sabbia fine $d_{50}=0.180$ mm, granulometria uniforme.

Nella tabella seguente si riassume il programma prove con le relative condizioni testate; per ognuna sono state eseguite quattro simulazioni in cascata, come illustrato al paragrafo precedente (HD – SW – HD – ST).

Nome prova	Stato	Vento		Marea	D_{50} [mm]
		Vel. [m/s]	Dir. [°N]		
SPconf2_v20-45°_018	Prog. II° config	20	45	Morfologica	0.18
SPconf2_v15-135°_018	Prog. II° config.	15	135	Morfologica	0.18

Tabella 2 – Elenco delle prove effettuate con modello sedimentologico.

6.3.1. Simulazioni con modello morfologico

Sono state effettuate simulazioni considerando i seguenti diversi input:

- configurazione:
 - stato di progetto in seconda configurazione (con i varchi tra le velme ben rappresentati);
- marea: marea morfologica di durata 24 ore;
- vento:
 - 11.92 m/s, direzione di provenienza 72.61°N;
 - 6.66 m/s, direzione di provenienza 194.08°N;
- sedimenti:
sabbia fine $d_{50}=0.180$ mm, granulometria uniforme.

Nella tabella seguente si riassume il programma prove con le relative condizioni testate. I moduli HD, SW, ST sono stati utilizzati in modalità accoppiata.

Nome prova	Stato	Vento		Marea	D_{50} [mm]
		Vel. [m/s]	Dir. [°N]		
SPconf2_windC2	Prog. II° config	11.92	72.61	Morfologica	0.18
SPconf2_windC3	Prog. II° config	6.66	194.08	Morfologica	0.18

Tabella 3 – Elenco delle prove effettuate con modello morfologico.

7. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI CON MODELLO SEDIMENTOLOGICO

Nei paragrafi seguenti si riportano i risultati in termini di mappe di altezza d'onda, velocità della corrente e capacità di trasporto solido, per le diverse prove effettuate. La capacità di trasporto indica la propensione alla movimentazione dei sedimenti.

Per comprendere la tendenza all'erosione o al deposito non si deve guardare direttamente il valore della capacità di trasporto quanto piuttosto il suo gradiente

nella direzione del flusso. In questo senso, un aumento di capacità di trasporto nella direzione del flusso è indice di tendenza erosiva mentre la sua diminuzione nel verso del flusso segnala una tendenza al deposito.

I risultati istantanei sono stati rappresentati con riferimento alle ore 15, 18, 21, 24 di ogni simulazione. Questo per escludere le prime dodici ore di messa a regime e per mostrare i risultati in alcuni istanti ritenuti significativi in quanto in corrispondenza di precisi momenti della marea imposta al contorno aperto.

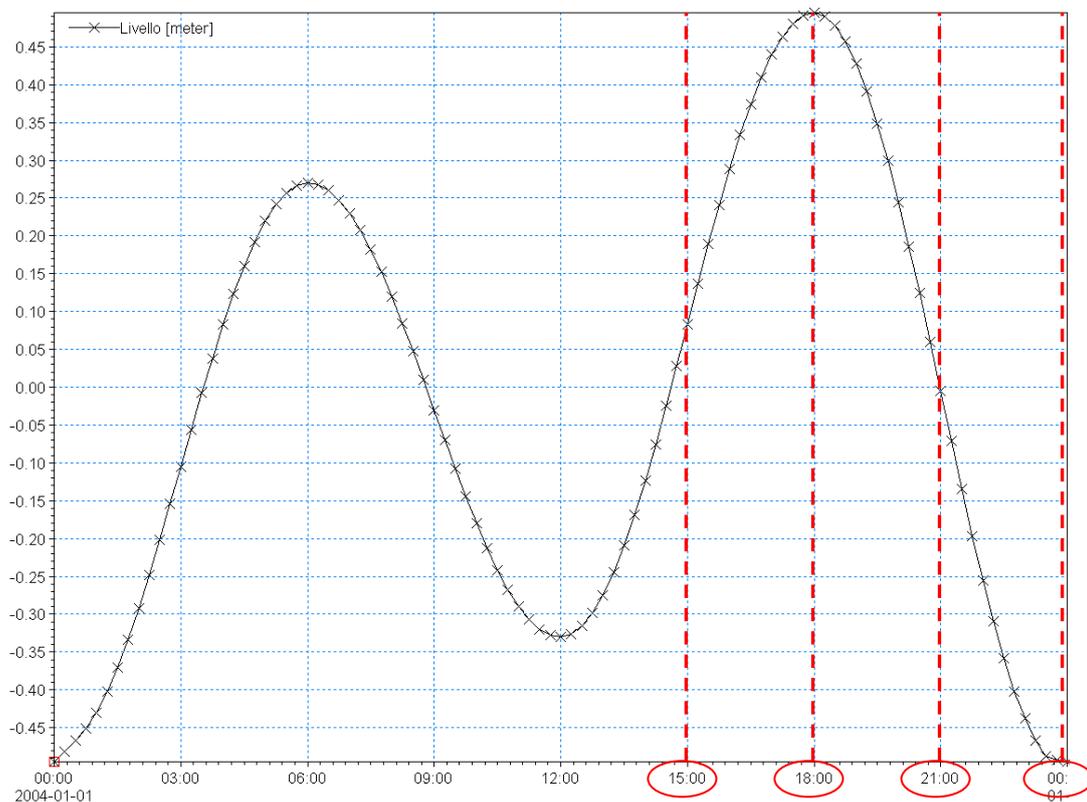


Figura 13 - Marea data in input al modello matematico; in rosso sono evidenziati gli istanti in cui sono stati estratti i risultati delle simulazioni presentate nei prossimi paragrafi.

Per ogni prova viene mostrata la mappa di tutto il dominio di calcolo relativa all'istante più significativo in termini di altezza d'onda, corrente, o trasporto, così

da poter valutare gli effetti delle opere in progetto anche in relazione alla morfodinamica dell'intera laguna.

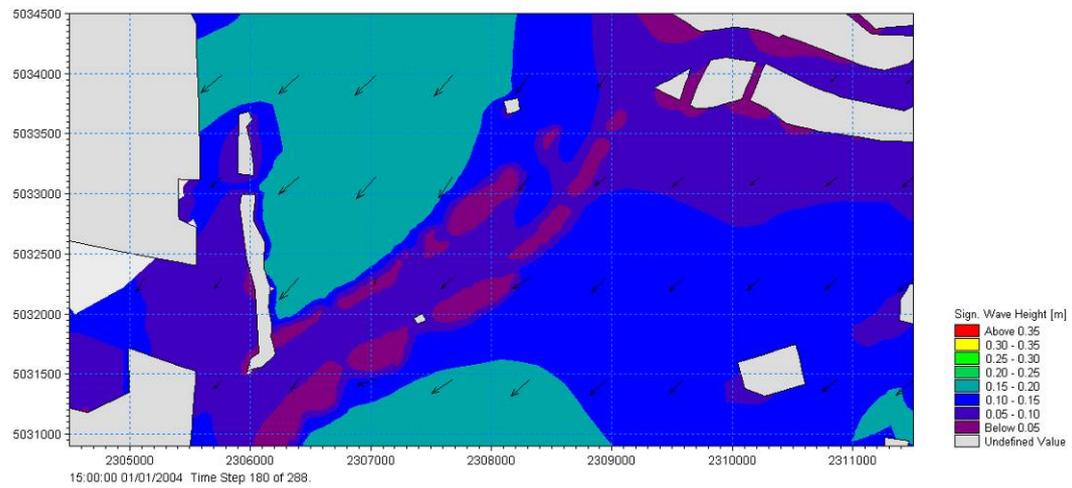
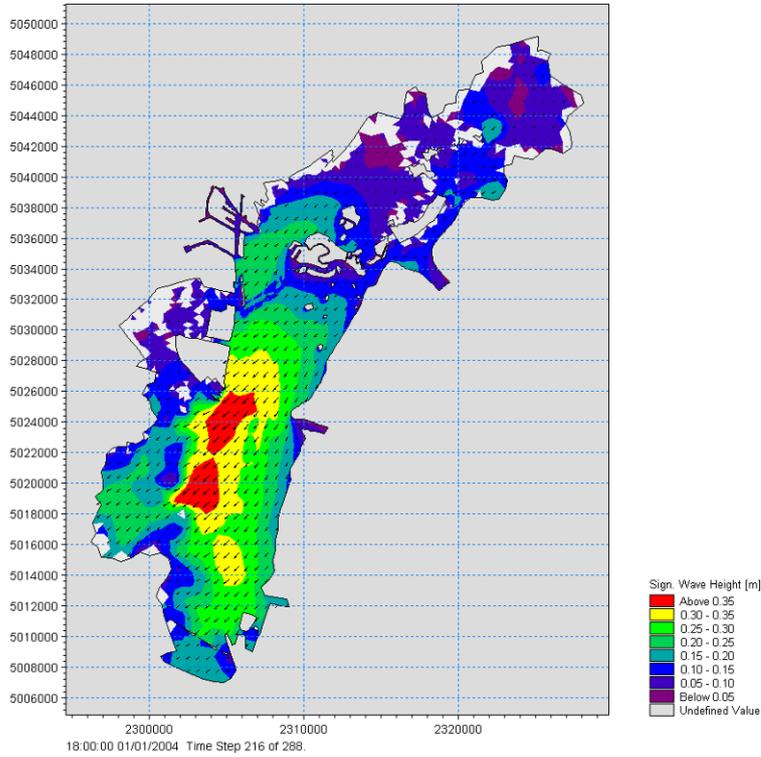
Vengono quindi visualizzati i risultati con uno zoom sulla zona di interesse, mantenendo la stessa gradazione di colori utilizzata nella relazione “*Studio morfologico – R01 Relazione Tecnica Illustrativa*”, in modo che si possano facilmente confrontare i risultati di stato attuale e delle due configurazioni di progetto relative alle stesse condizioni di input.

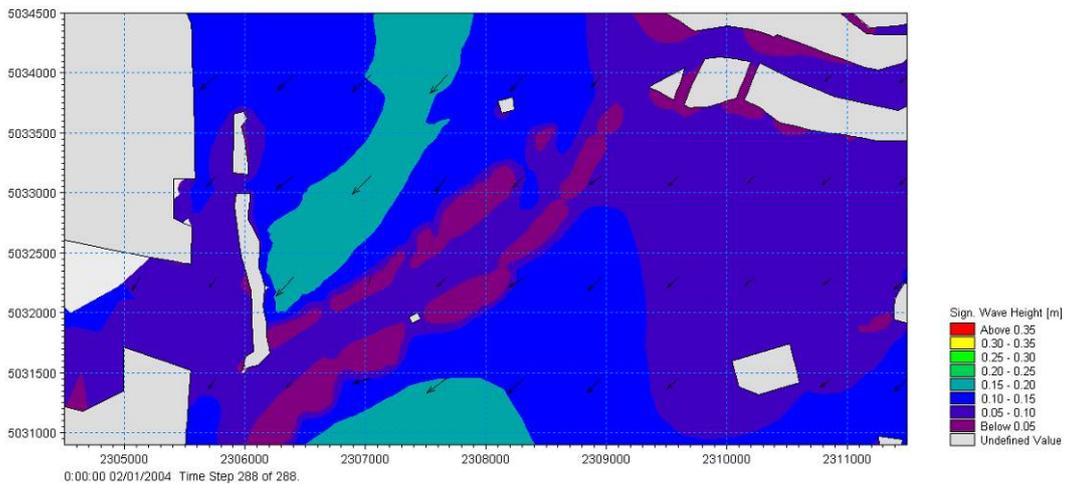
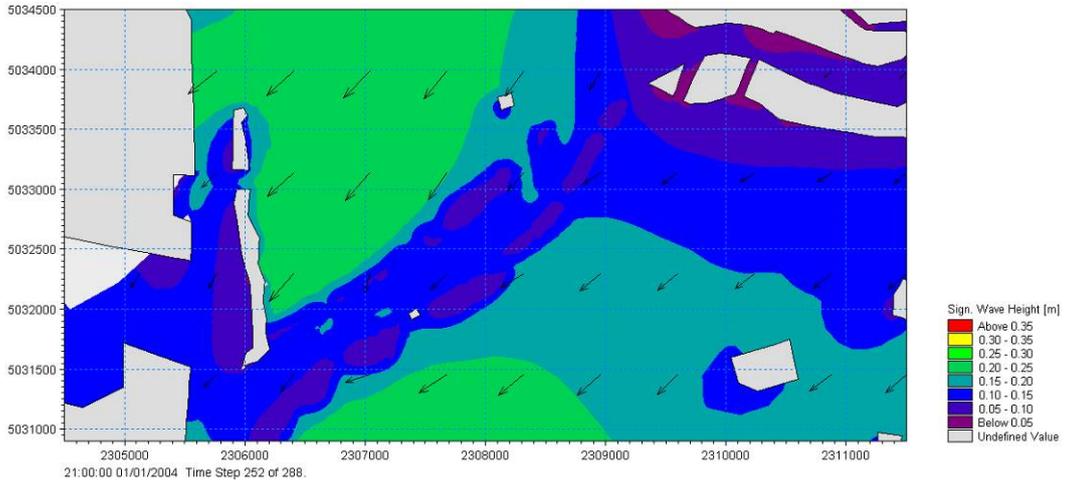
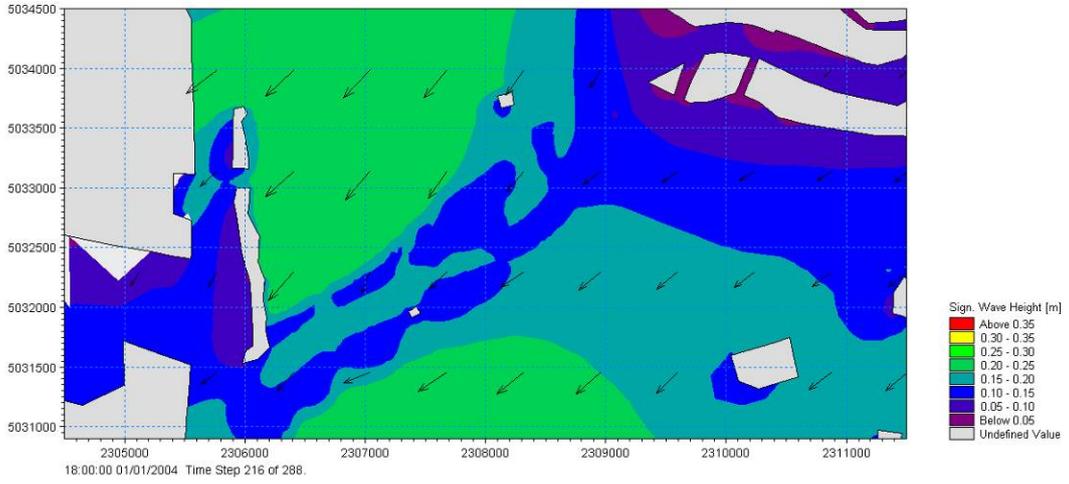
Nei seguenti paragrafi verranno esposte alcune considerazioni riguardo il confronto dei risultati ottenuti in seconda configurazione con quanto ottenuto per lo stato attuale e per la prima configurazione di progetto, delle quali per brevità non si riportano figure nella presente relazione, rimandando alla relazione sopra citata per la consultazione delle mappe dei relativi risultati.

7.1. PROVA SPCONF2_v20-45°_018

Prova in stato di progetto, seconda configurazione, bora da 20 m/s, marea morfologica, sedimenti a granulometria uniforme con $d_{50}=0.18$ mm.

7.1.1. Risultati modulo Spectral wave



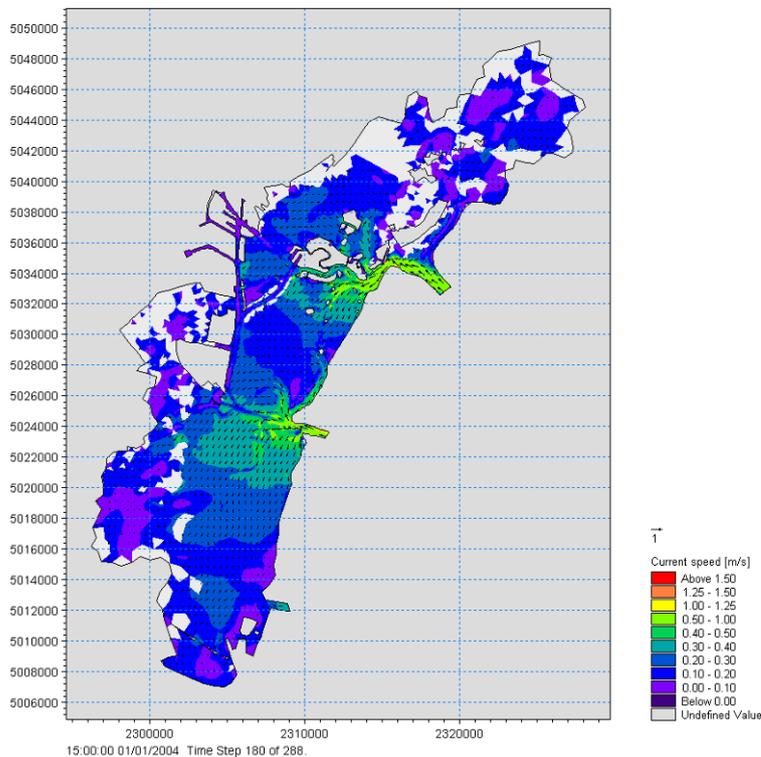


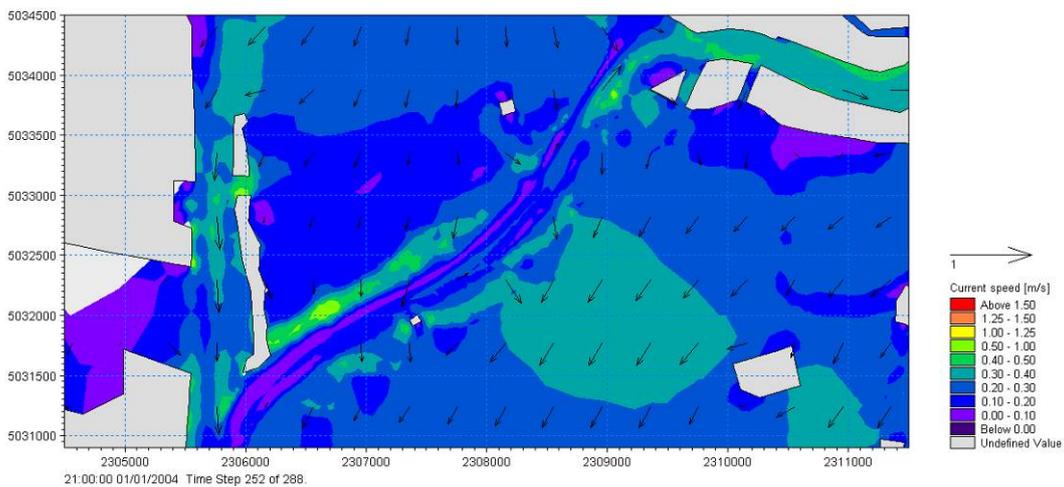
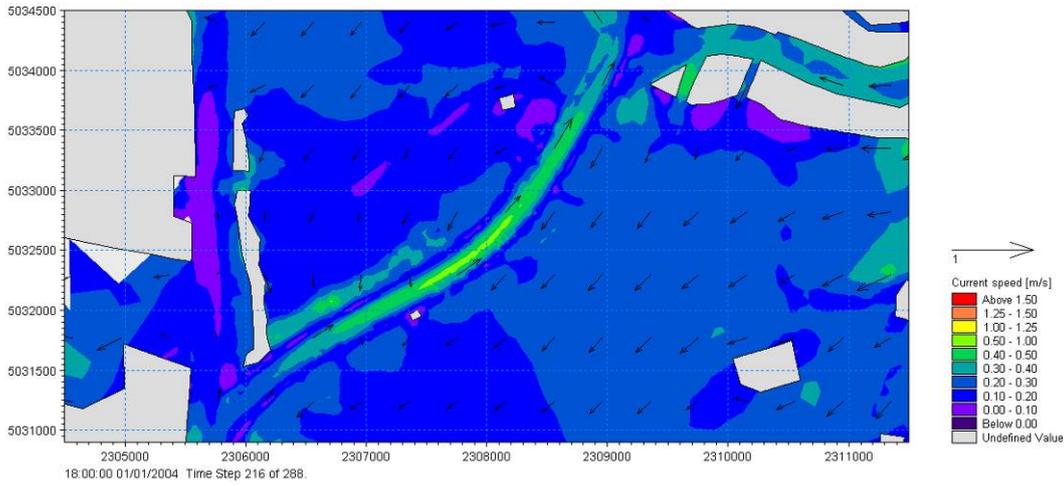
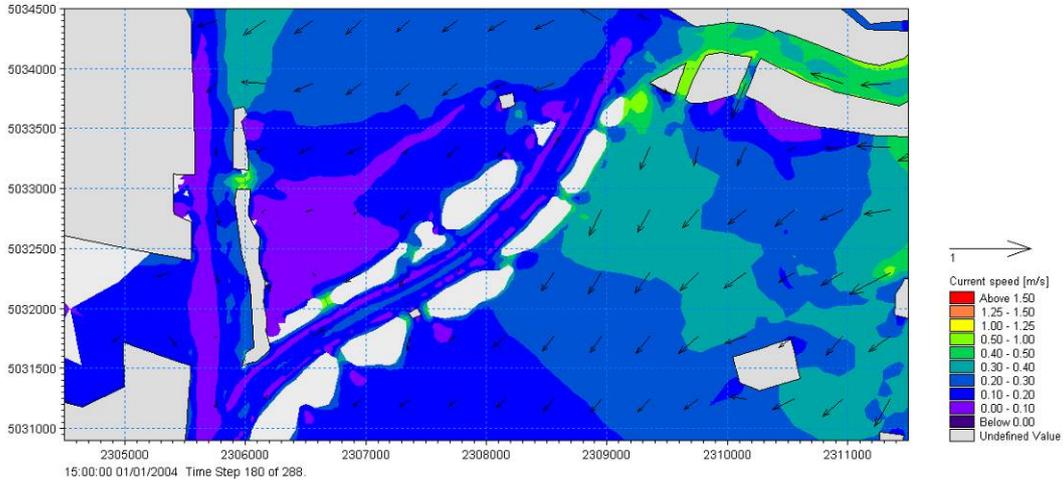
Considerando l'intero dominio di calcolo, i risultati mostrano onde massime con altezza significativa di circa 0.35 m nell'istante in cui il livello di marea è massimo, con una mappatura molto simile a quella ottenuta in stato attuale.

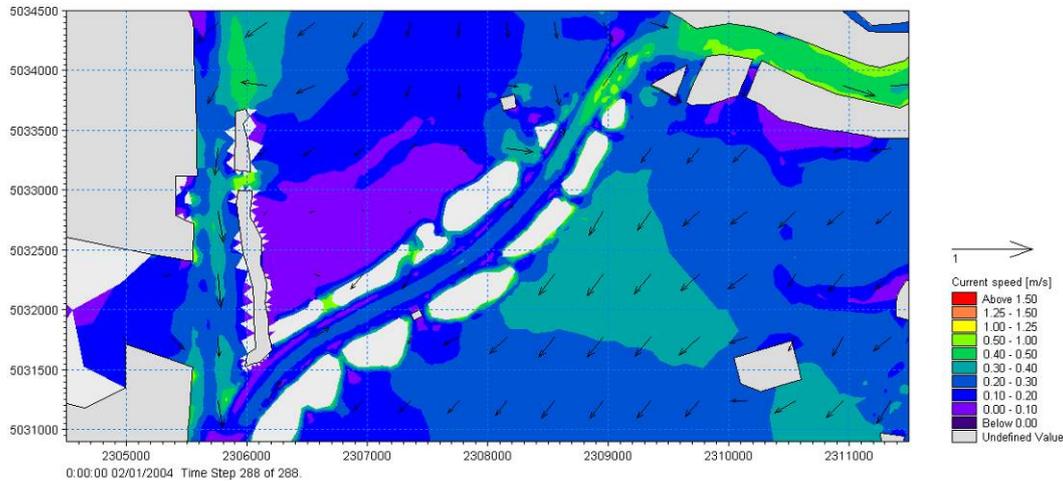
Nella zona interessata dalle opere in progetto invece si raggiungono altezze significative massime di circa 0.25 m, leggermente minori di quanto riscontrato in stato attuale. Si nota in particolare l'effetto di attenuazione del moto ondoso dovuto alla presenza delle velme, contro le quali si ha frangimento, che riparano quindi il canale in progetto dalle onde da vento.

I risultati sono quasi identici a quanto ottenuto nella prima configurazione.

7.1.2. Risultati modulo idrodinamico







L'idrodinamica della laguna nel suo insieme appare simile a quanto riscontrato in stato attuale.

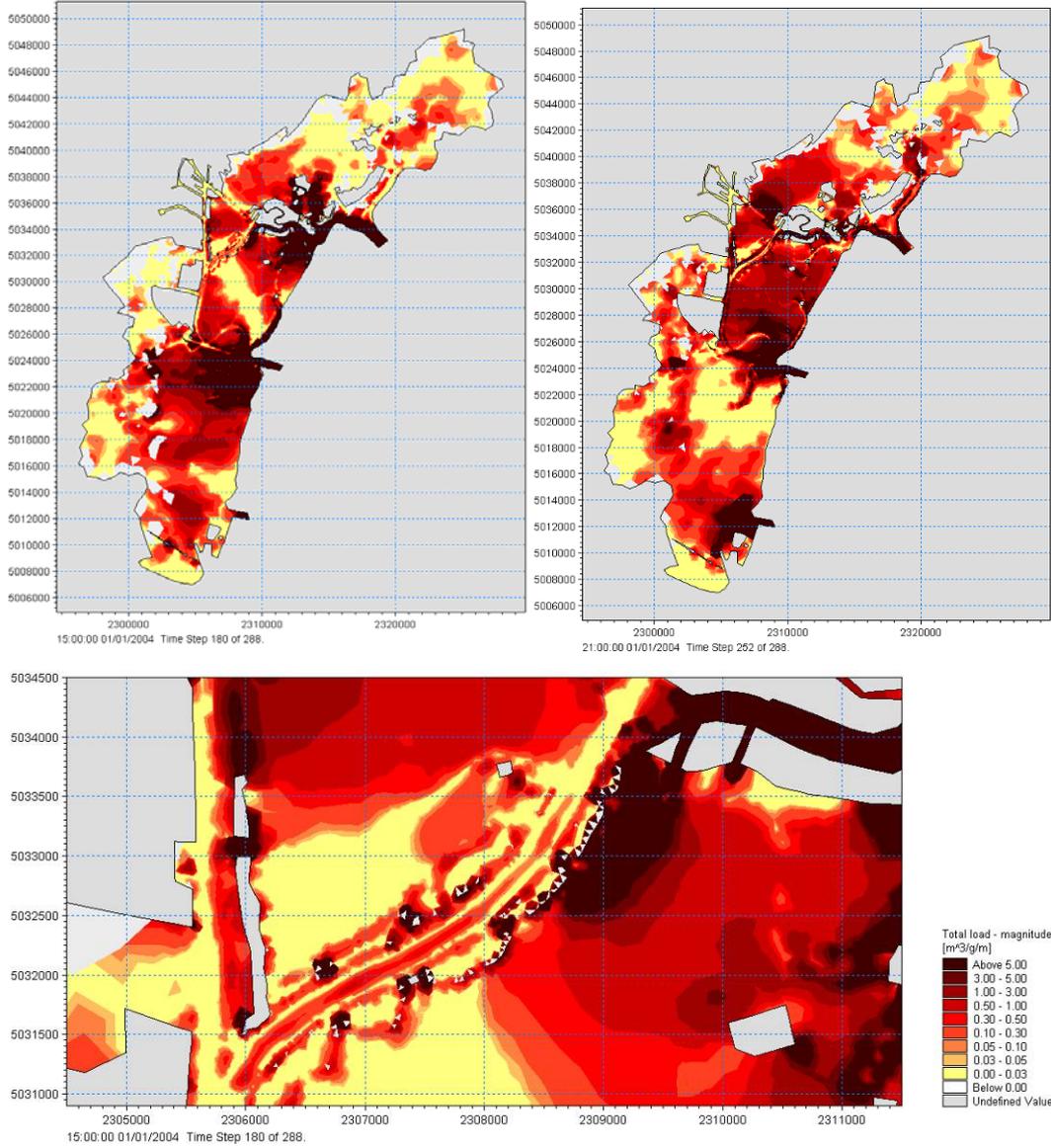
Un diverso andamento delle correnti si ha invece nella zona interessata dalle opere in progetto, dove si nota, nei momenti con livello minore, una zona a velocità molto basse a nord delle velme in progetto (che in questi istante appaiono emerse). La corrente trova quindi vie alternative per defluire da nord verso sud con un aumento delle velocità a nord della barene esistenti verso il Canale Malamocco - Marghera, e nella zona tra il Canale Contorta S. Angelo e il canale della Giudecca. La zona a sud del nuovo canale presenta così correnti leggermente più intense che nello stato attuale.

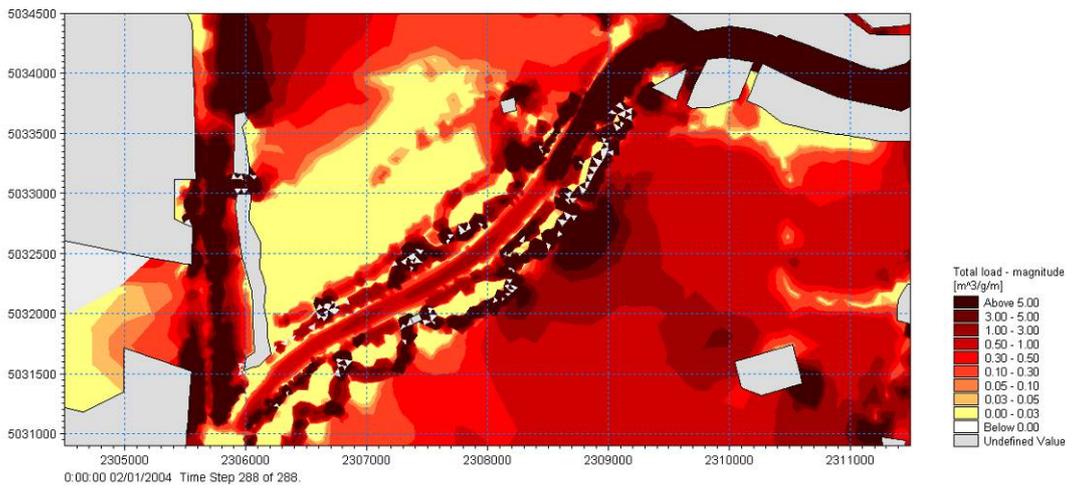
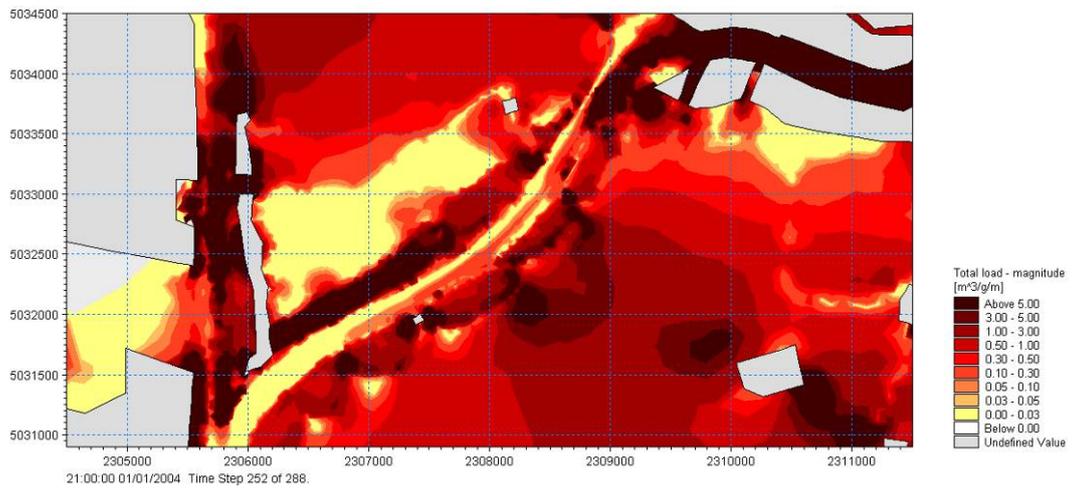
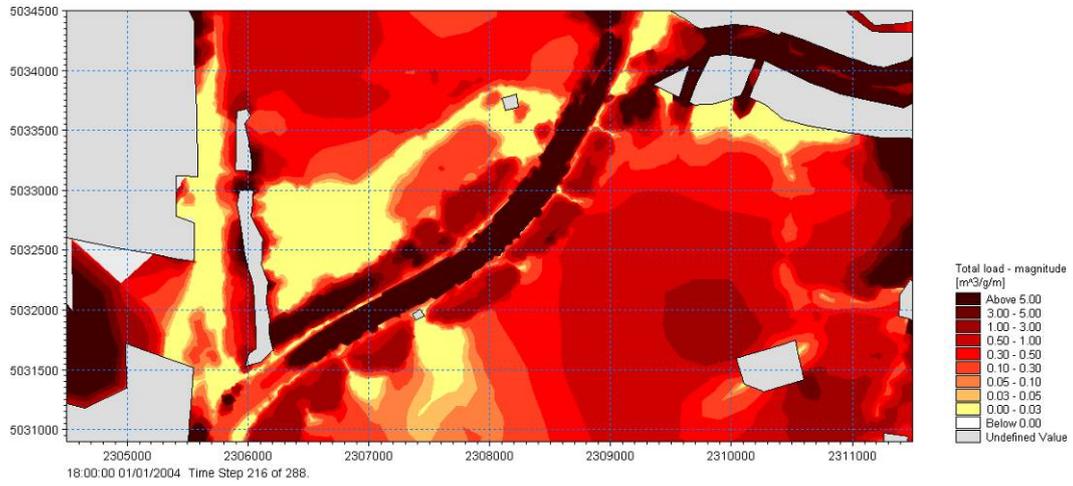
Il nuovo canale appare interessato da velocità variabili, con istanti a velocità quasi nulla fino a 50 cm/s. In generale, la porzione settentrionale del nuovo canale, che si butta nel canale della Giudecca, appare interessata dalle velocità maggiori.

Inoltre l'intensità della corrente è accentuata proprio nei varchi tra le velme.

Confrontando invece con la prima configurazione di progetto, si hanno mappe della velocità di corrente quasi identiche. Si può notare in alcuni istanti che il canale in seconda configurazione presenta in centro alveo velocità di poco superiori (10-20 cm/s più che in prima configurazione), e nel bassofondo esterno alle velme le zone con acqua quasi ferma hanno una leggera minor estensione.

7.1.3. Risultati modulo di trasporto solido





Considerando l'intero dominio di calcolo, i momenti di generale maggiore attività appaiono quelli delle ore 15 e 21, rispettivamente in fase di marea crescente e calante. Nel primo caso la parte meridionale della laguna appare quella maggiormente attiva, mentre nel secondo caso è la zona centrale che mostra una maggiore movimentazione di sedimenti. Non si notano nella morfodinamica complessiva grandi differenze rispetto allo stato attuale.

Entrando nel dettaglio della zona oggetto dello studio, si può facilmente notare come la morfodinamica rispecchi l'andamento delle velocità della corrente, riscontrando quindi le stesse differenze rispetto allo stato attuale segnalate nelle simulazioni idrodinamiche.

Mentre in stato attuale in tutta la zona si alternavano situazioni più attive a condizioni di minor attività nel trasporto solido, in stato di progetto si nota a nord delle velme una zona con capacità di trasporto calante nel verso del flusso, condizione che indica una tendenza al deposito di materiale.

Una maggiore capacità di trasporto rispetto allo stato attuale si ha nelle due zone dove il flusso incrementa la velocità: a nord delle berme esistenti lungo il canale Malamocco-Marghera e tra il canale Contorta S. Angelo e il canale della Giudecca.

Una capacità di trasporto elevata si nota nell'area occupata dalle velme negli istanti con i livelli maggiori, poiché esse vengono sommerse e l'acqua defluisce con un basso tirante e velocità non trascurabili.

Nel nuovo canale si alternano istanti a capacità di trasporto quasi nulla a istanti in cui tutto il canale presenta una elevata movimentazione di sedimenti. In generale, la porzione settentrionale del nuovo canale, che si butta nel canale della Giudecca, appare interessata da una capacità di trasporto solido in aumento nel verso del flusso e quindi ad una tendenza all'asportazione di materiale.

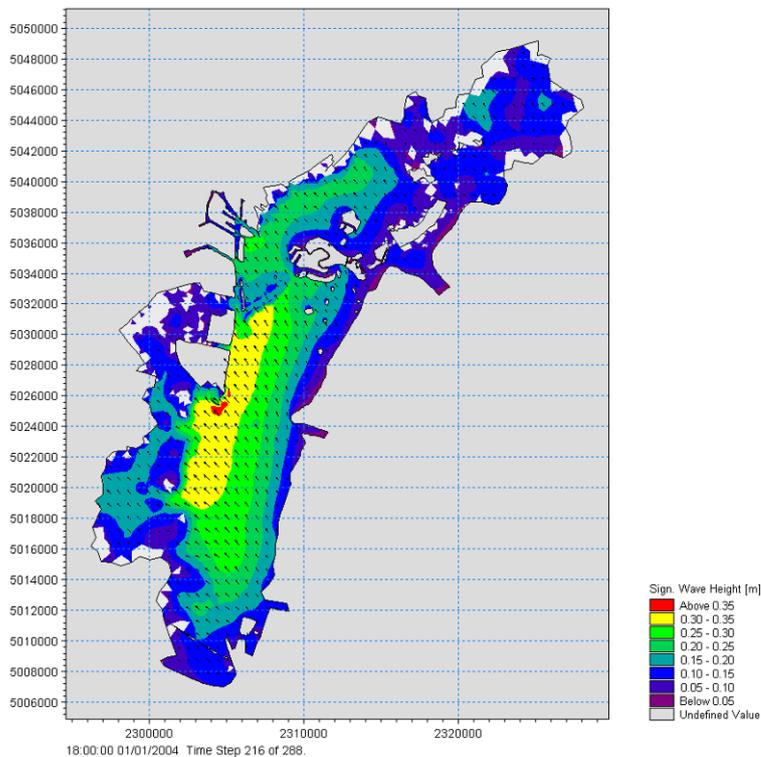
Il confronto con lo stato attuale è quindi del tutto analogo a quanto si era già riscontrato confrontando stato attuale e prima configurazione di progetto.

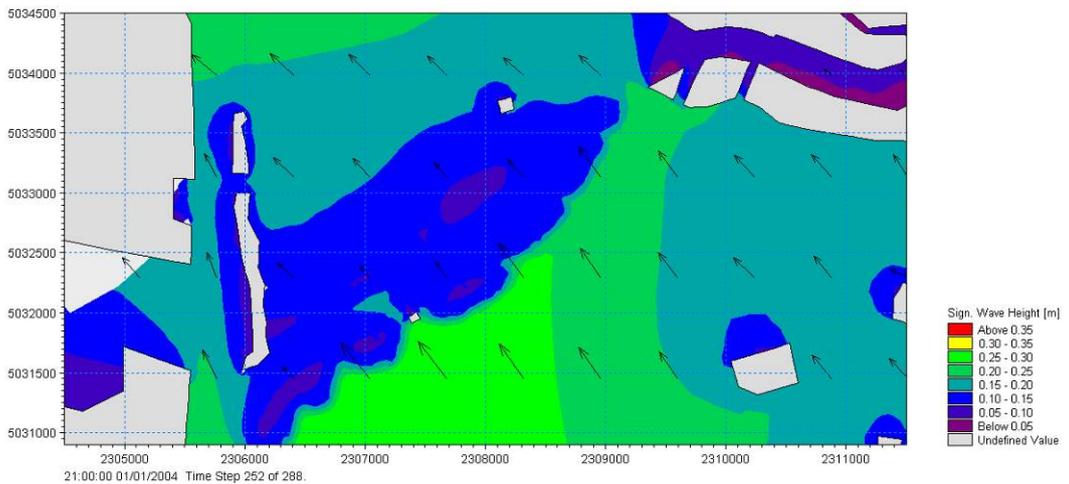
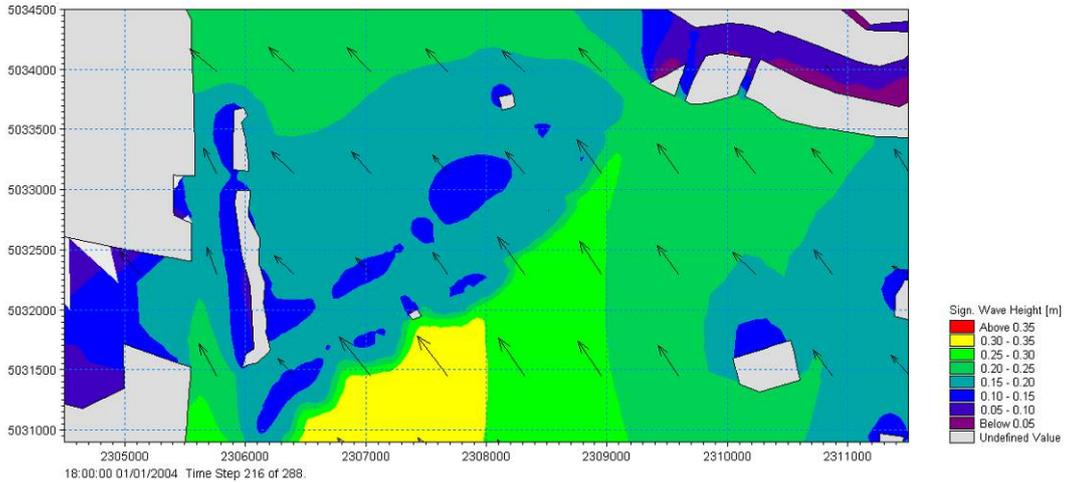
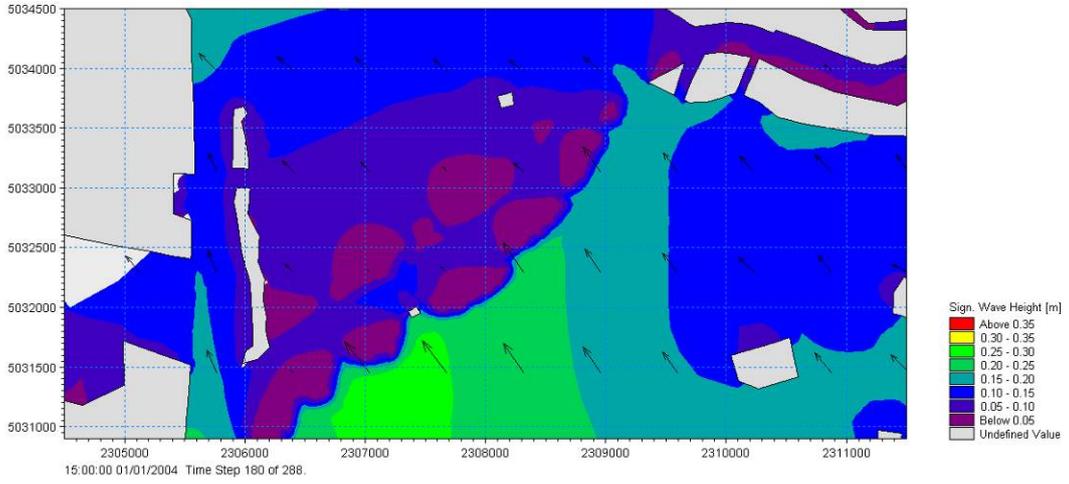
Infatti, non si notano grandi differenze nelle mappe di capacità di trasporto tra prima e seconda configurazione di progetto. Unica cosa che si può notare è una modesta maggior vivacità di movimentazione di sedimenti in alveo in seconda configurazione, legata alla leggera maggior velocità della corrente.

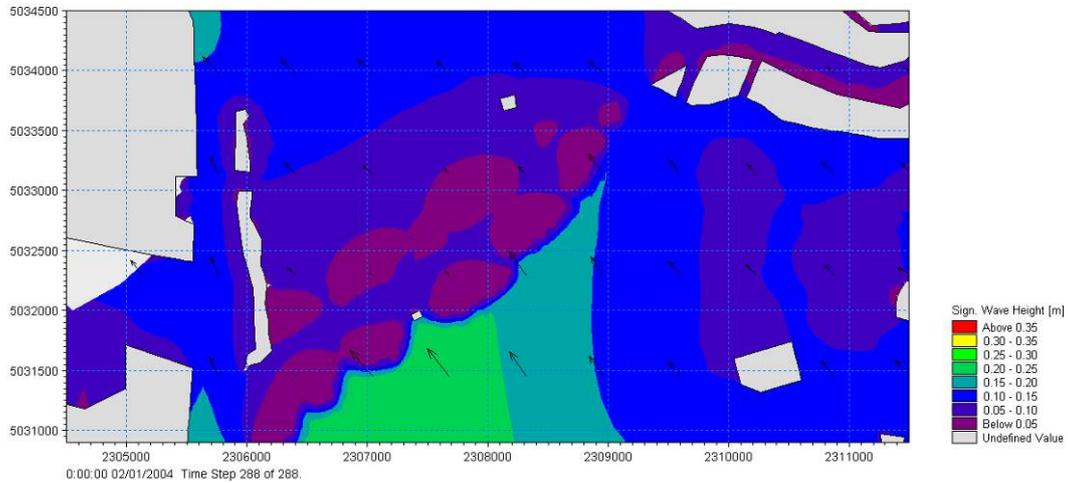
7.2. PROVA SPCONF2_v15-135°_018

Prova in stato di progetto, seconda configurazione, vento di scirocco da 15 m/s, marea morfologica, sedimenti a granulometria uniforme con $d_{50}=0.18$ mm.

7.2.1. Risultati modulo Spectral Wave





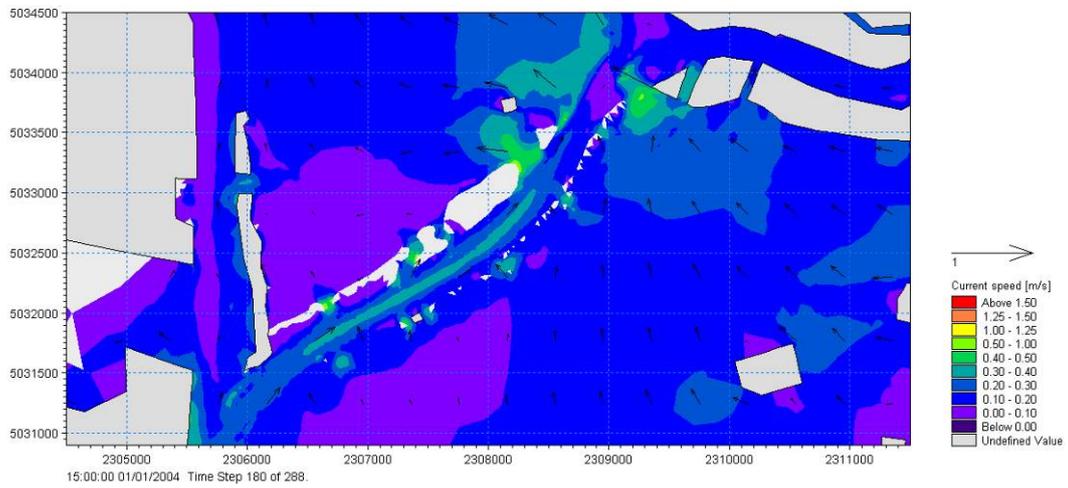
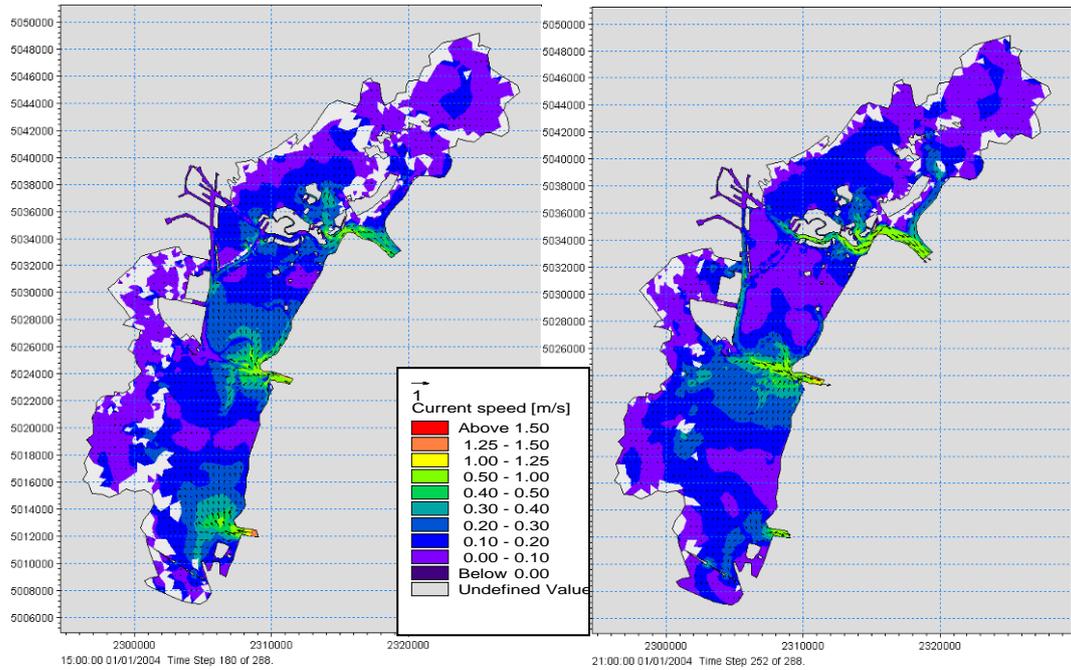


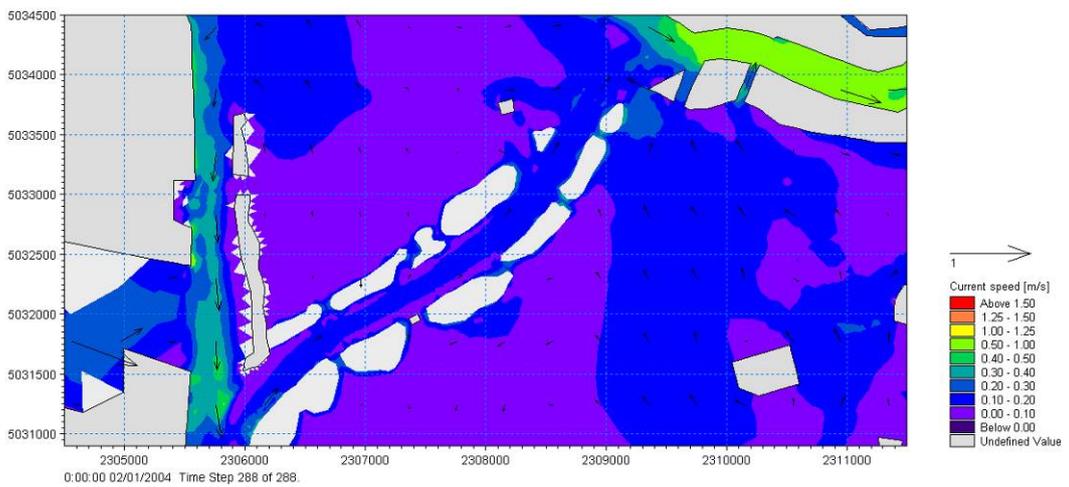
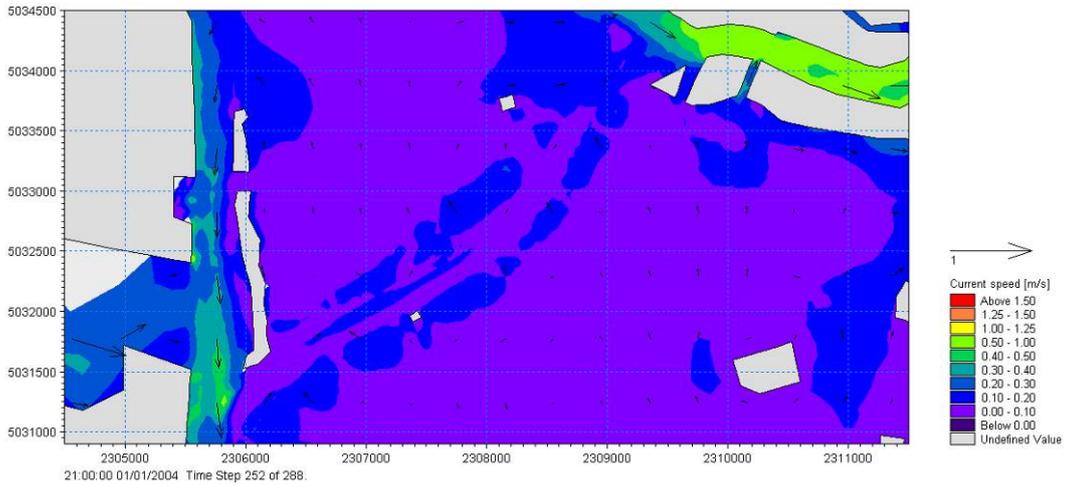
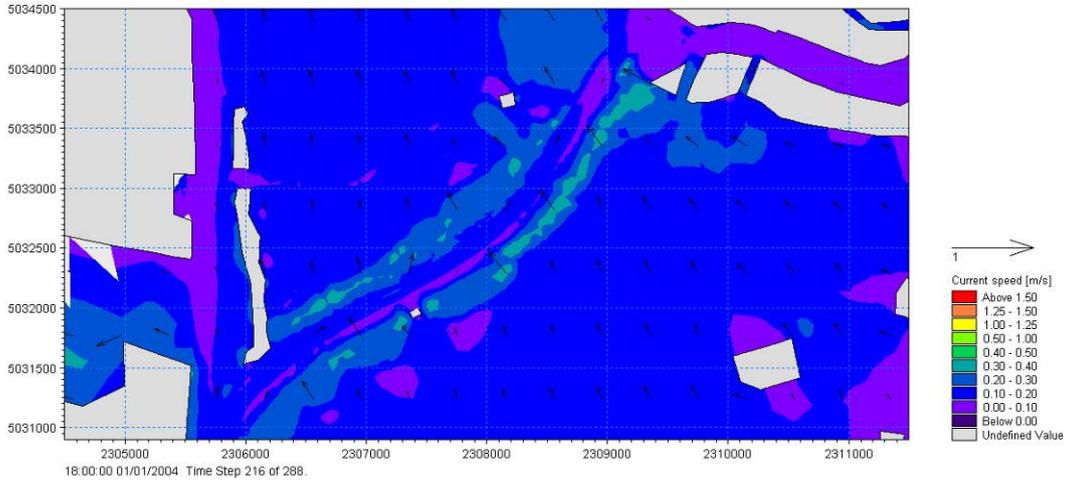
Considerando l'intero dominio di calcolo, i risultati mostrano onde massime con altezza significativa di circa 0.35 m nell'istante in cui il livello di marea è massimo, con una mappatura molto simile a quella ottenuta in stato attuale.

Nella zona interessata dalle opere in progetto si raggiungono altezze significative massime di circa 0.30-0.35 m a ridosso delle velme a sud del nuovo canale. Si nota poi l'effetto di attenuazione del moto ondoso dovuto alla presenza delle velme, contro le quali si ha frangimento, che riparano quindi il canale in progetto e la zona a nord dello stesso dalle onde da vento.

I risultati sono quasi identici a quanto ottenuto nella prima configurazione.

7.2.2. Risultati modulo idrodinamico





Nell'idrodinamica generale della laguna, non si evidenziano particolari differenze nell'andamento delle correnti rispetto allo stato attuale. Si nota un calo delle velocità solo nelle aree a sud e nord del canale in progetto e solo negli istanti di marea crescente in cui il livello è ancora minore o prossimo a zero.

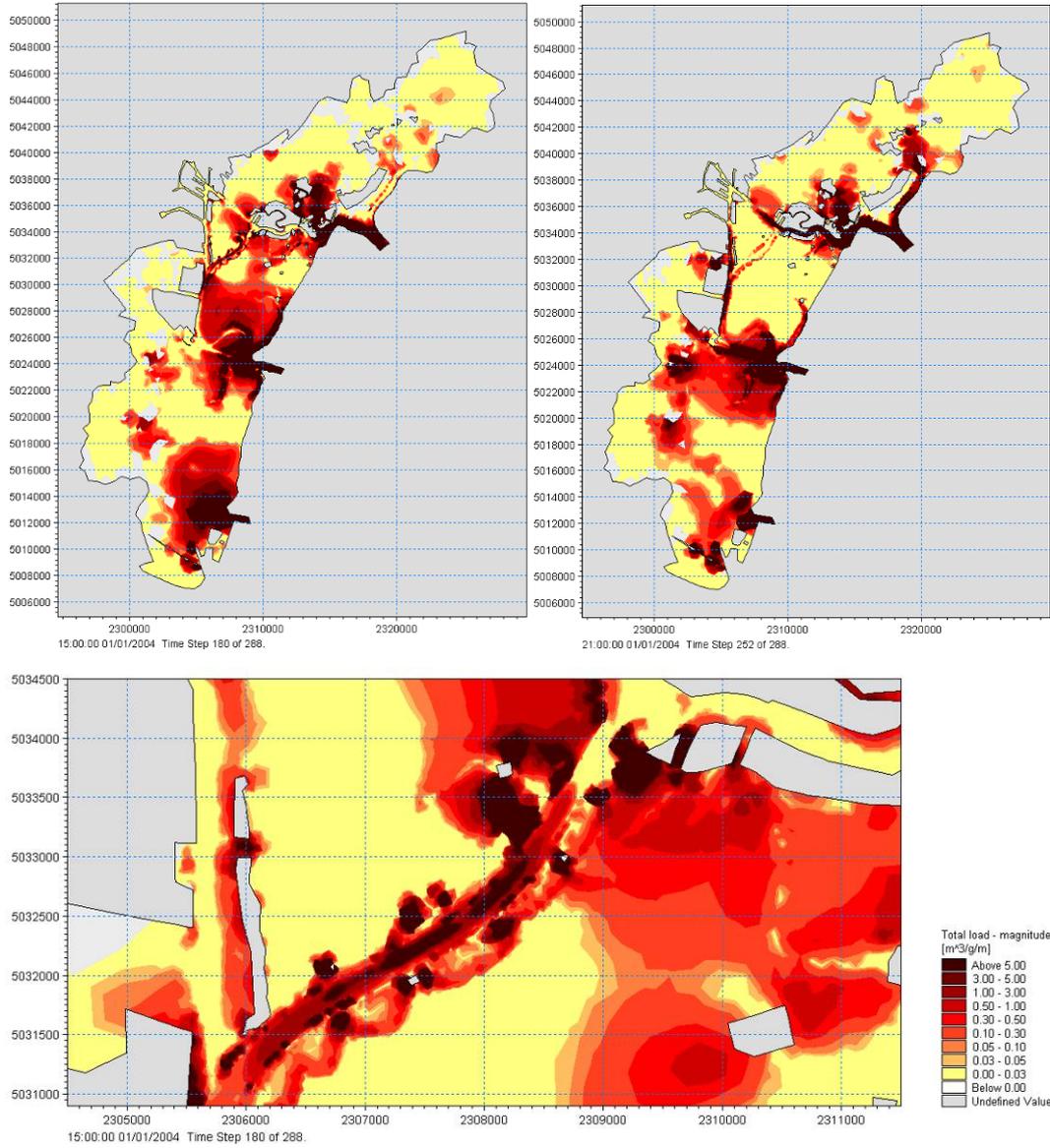
Scendendo nel dettaglio all'analisi della zona interessata dagli interventi in progetto, rispetto alla situazione in stato attuale si nota, nei momenti con livello minore, una zona a velocità molto basse a nord e sud delle velme in progetto (che in questi istanti appaiono emerse). La corrente trova quindi vie alternative per defluire da sud verso nord, con un aumento delle velocità, nella zona tra il Canale Contorta S. Angelo e il canale della Giudecca. Negli altri istanti, in cui le velme iniziano ad essere sommerse, l'andamento delle velocità nelle aree a nord e sud delle nuove opere appare simile a quello in stato attuale, con differenze localizzate solo nelle aree occupate dalle velme.

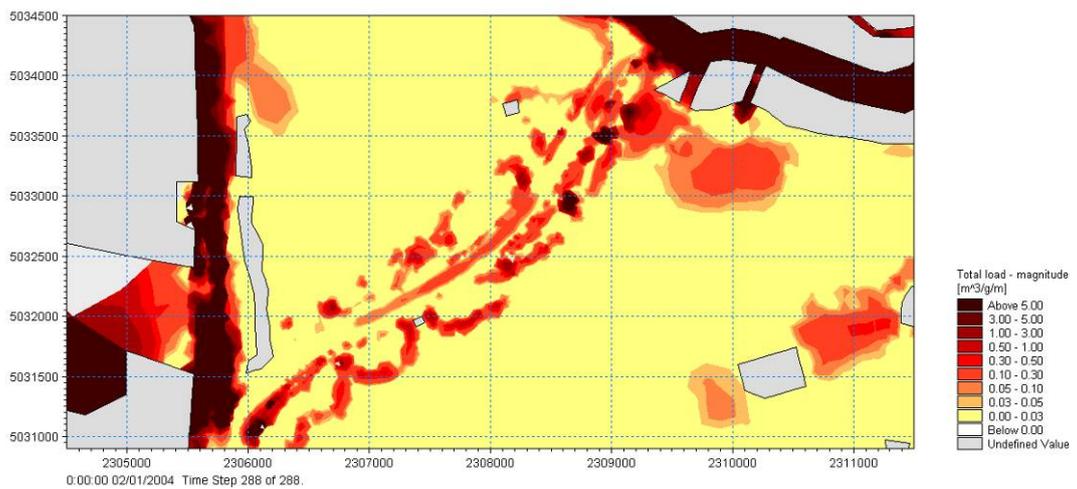
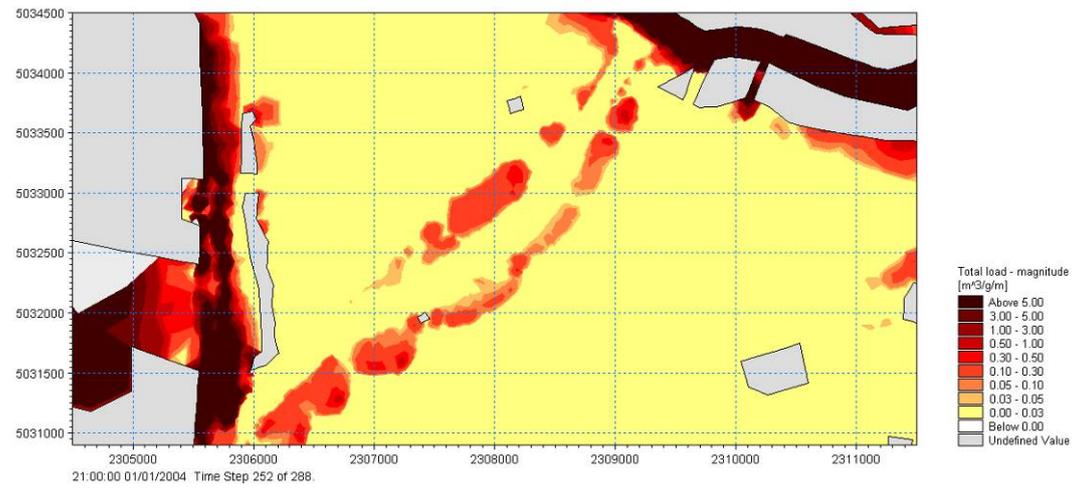
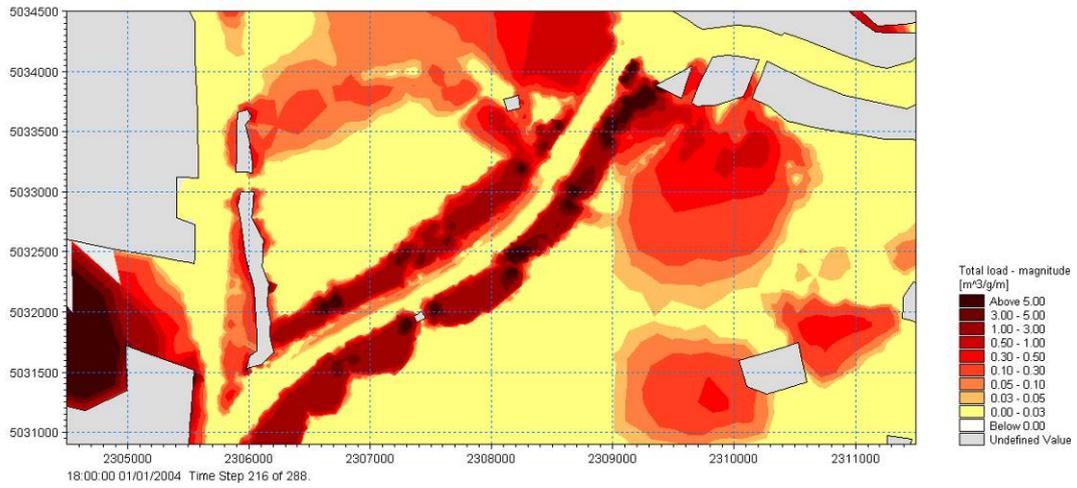
È da notare invece come, negli istanti a livello inferiore a zero, l'intensità della corrente sia accentuata proprio nei varchi tra le velme, dove quindi si potrebbero avere effetti di erosione delle stesse.

Il nuovo canale appare interessato da velocità variabili, con istanti a velocità quasi nulla fino a quasi 40 cm/s.

La seconda configurazione di progetto presenta velocità del tutto simili a quanto rilevato nella prima configurazione.

7.2.3. Risultati modulo di trasporto solido





Considerando l'intero dominio di calcolo, non si notano nella morfodinamica complessiva grandi differenze rispetto allo stato attuale.

Entrando nel dettaglio della zona oggetto dello studio, si può facilmente notare come la morfodinamica rispecchi l'andamento delle velocità della corrente, riscontrando quindi le stesse differenze rispetto allo stato attuale segnalate nelle simulazioni idrodinamiche. Nelle due aree a nord e sud degli interventi, negli istanti a livello basso e marea crescente, si risente maggiormente dell'effetto di schermatura delle velme e quindi le due aree citate appaiono meno attive dal punto di vista del trasporto solido. Il gradiente della capacità di trasporto nel verso del flusso indica in questi istanti una possibile asportazione di materiale dalla zona sud-ovest verso quella a nord-ovest delle velme.

Capacità di trasporto più alte si localizzano nei punti in cui la corrente è più veloce: nella zona tra il Canale Contorta S. Angelo e il canale della Giudecca, sopra le velme negli istanti in cui sono sommerse e tra i varchi della stesse negli istanti in cui sono emerse.

Nel nuovo canale si alternano istanti a capacità di trasporto elevata a istanti in cui essa è molto bassa.

Non ci sono significative differenze nelle mappe di capacità di trasporto tra prima e seconda configurazione di progetto. Unica cosa che si può notare, come nella prova precedente, è una modesta maggior vivacità di movimentazione di sedimenti in alveo in seconda configurazione, legata alla leggera maggior velocità della corrente.

8. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI CON MODELLO MORFOLOGICO

Nei paragrafi seguenti si riportano i risultati in termini di mappe di velocità della corrente e variazione del livello del fondo per le diverse prove effettuate.

Per ogni prova viene mostrata la mappa di tutto il dominio di calcolo relativa agli istanti più significativi in termini di andamento della corrente, così da poter valutare gli effetti delle opere in progetto anche in relazione alla morfodinamica dell'intera laguna.

Vengono poi visualizzati i risultati con uno zoom sulla zona di interesse, mantenendo la stessa gradazione di colori tra le diverse prove, in modo che si possano facilmente confrontare i risultati relativi alle stesse condizioni di input. Sono state considerate le ore 15, 18, 21, 24 del secondo giorno di ogni simulazione, per escludere le prime ventiquattro ore di messa a regime e per mostrare i risultati in alcuni istanti ritenuti significativi in quanto in corrispondenza di precisi momenti della marea imposta al contorno aperto.

Per la parte morfologica, si riporta invece l'ultimo istante della simulazione, che rende conto della variazione del fondo alla fine delle 24 ore di marea morfologica. I risultati permettono di interpretare la tendenza all'accumulo o all'erosione in maniera parametrica, confrontando lo stato di progetto in seconda configurazione con lo stato attuale e quello di progetto in prima configurazione visti nella relazione "*Studio morfologico – R01 Relazione Tecnica Illustrativa*".

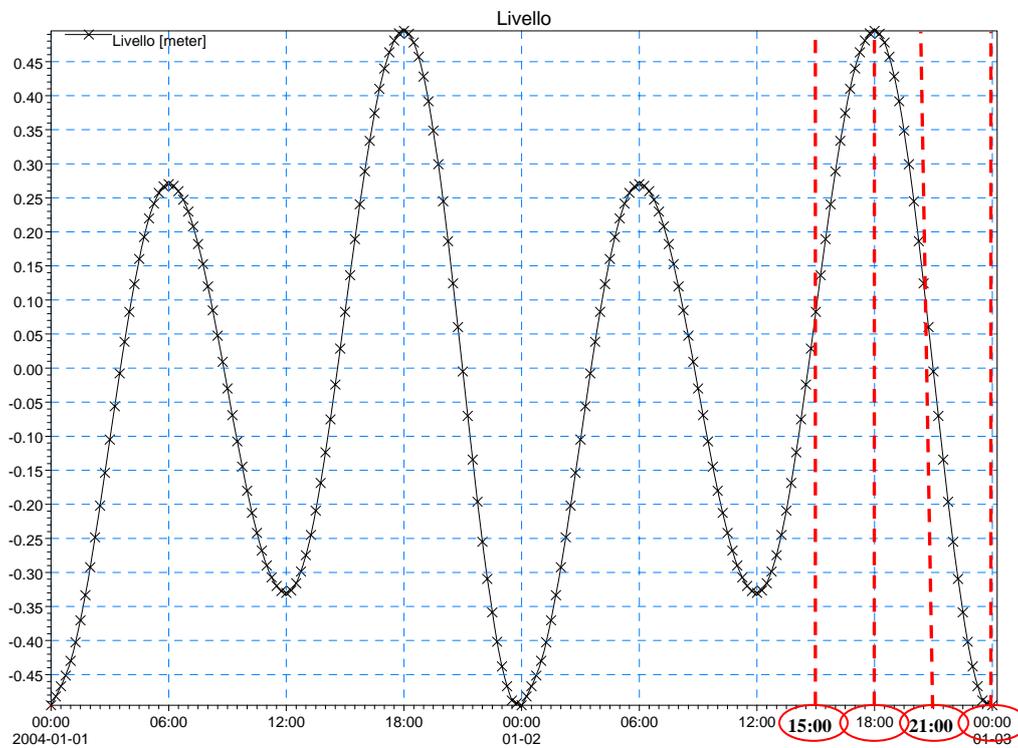
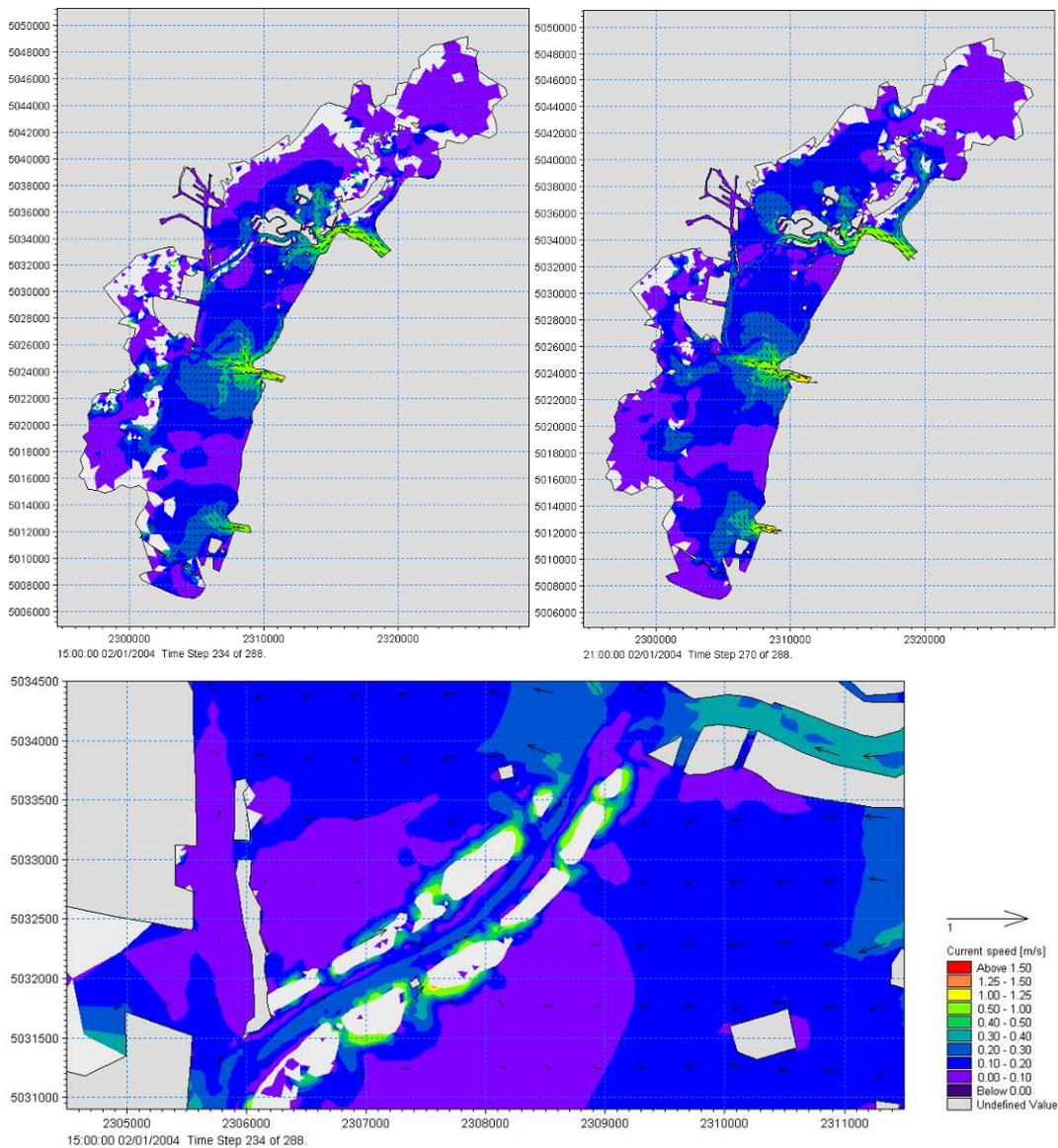


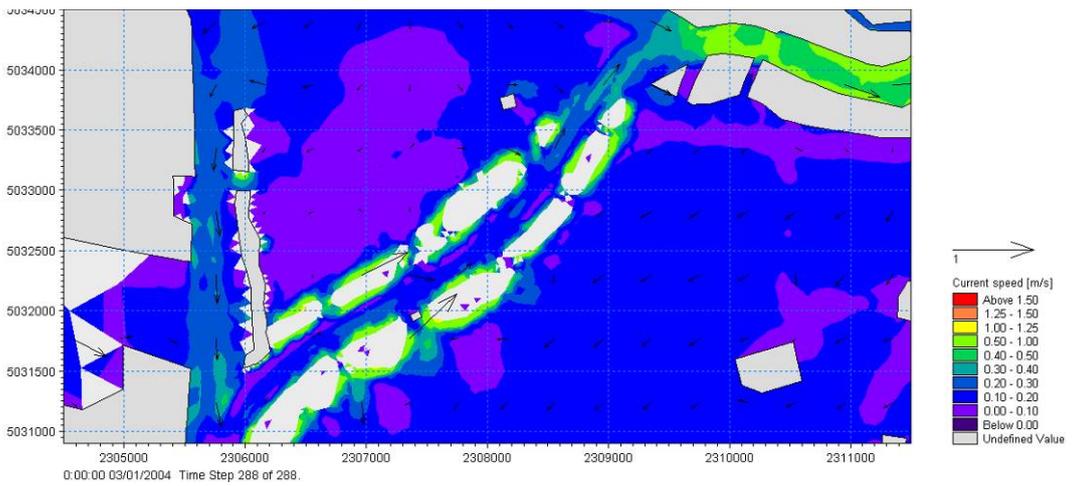
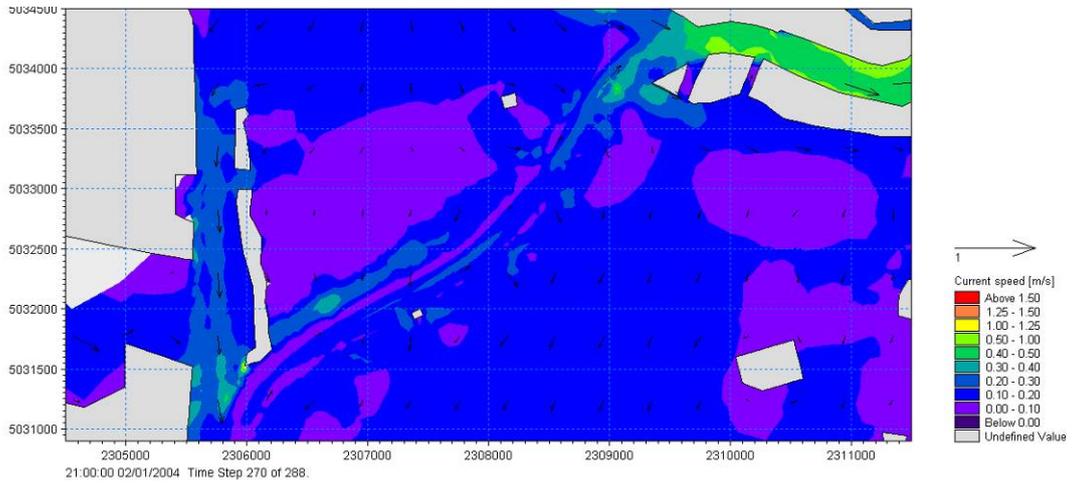
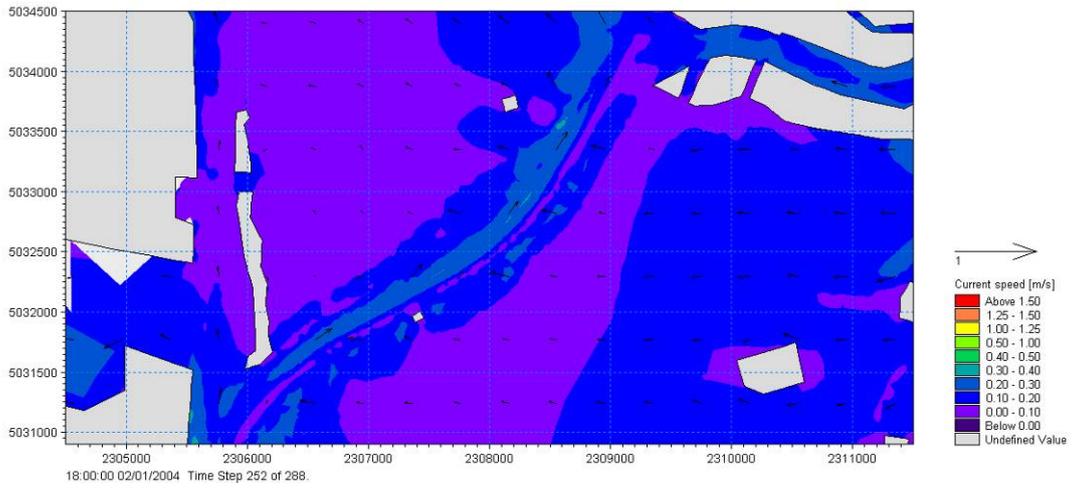
Figura 14 - Marea data in input al modello matematico; in rosso sono evidenziati gli istanti in cui sono stati estratti i risultati delle simulazioni presentate nei prossimi paragrafi.

8.1. PROVA SP_WINDC2

Prova in stato di progetto, seconda configurazione, con vento di 11.92 m/s proveniente da 72.61°N, con marea morfologica, sedimenti a granulometria uniforme con $d_{50}=0.18$ mm.

8.1.1. Risultati modulo idrodinamico





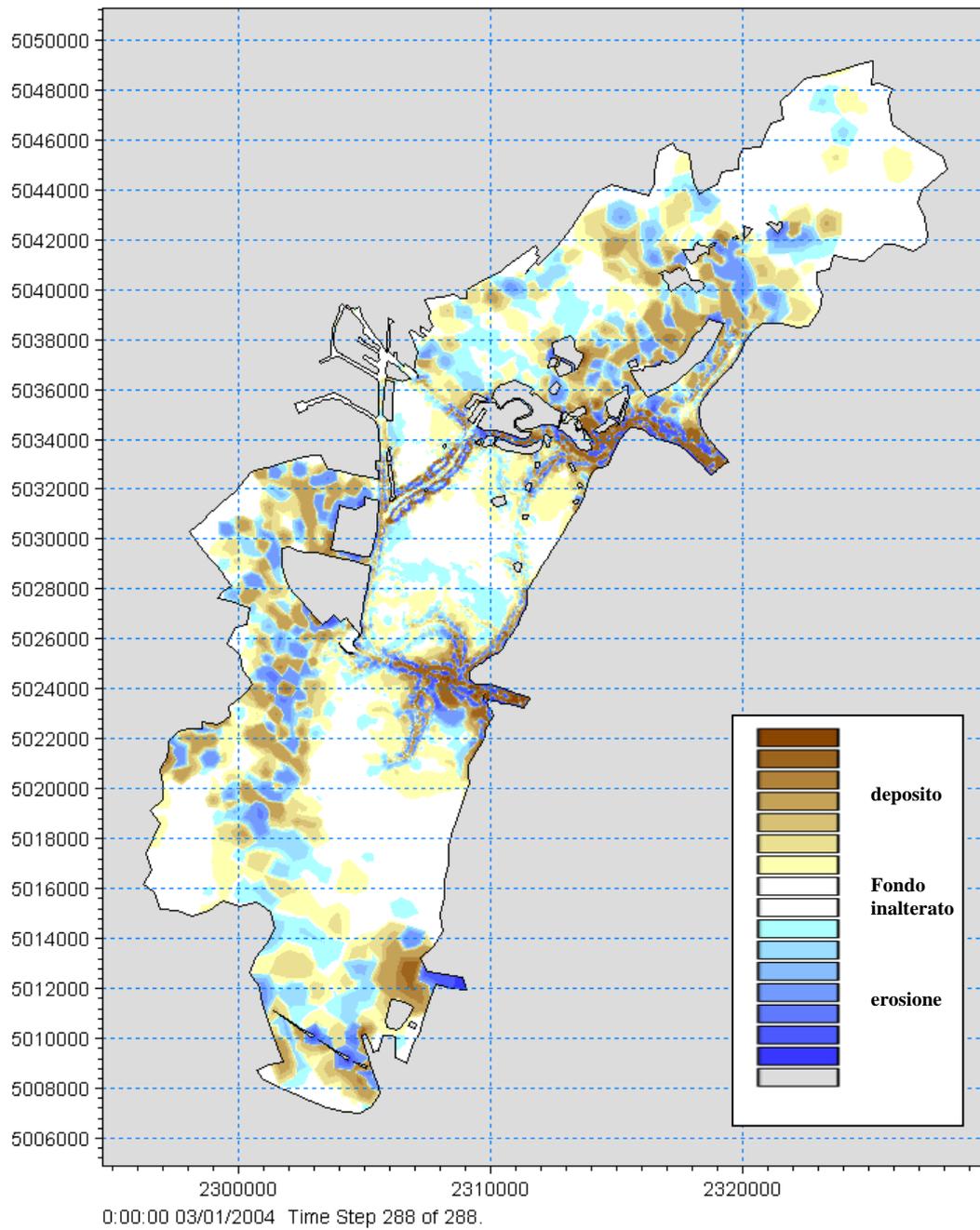
Considerando l'intero dominio, l'idrodinamica appare del tutto simile a quella dello stato attuale, mostrando quindi come le nuove opere non comportino modifiche nell'andamento generale delle velocità.

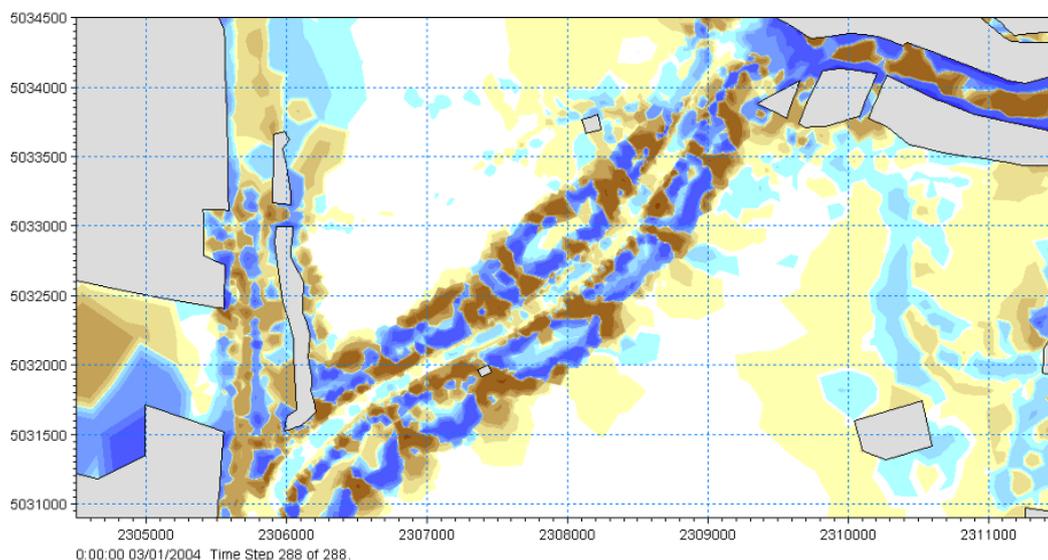
Scendendo ad analizzare la zona interessata dalle opere, si può notare come la zona di bassofondo a nord e sud del nuovo canale presenti velocità basse come era nello stato attuale, con un certo aumento delle aree a velocità quasi nulla. Il flusso si concentra, nel suo passaggio da nord a sud o viceversa, nel canale della Giudecca e nel canale S.Leonardo-Marghera, che quindi presentano velocità leggermente maggiori che in stato attuale, soprattutto nei momenti di minimo mareale quando si sente maggiormente l'effetto schermante delle velme.

Il nuovo canale alterna momenti in cui il flusso ha velocità di circa 30 cm/s a momenti di quasi calma. A seconda del livello dell'acqua, si hanno velocità più intense tra i varchi delle velme o sopra le stesse.

Rispetto alla prima configurazione, la seconda presenta velocità del tutto analoghe, con una modesta maggior intensità del flusso in canale e nel bassofondo adiacente.

8.1.2. Risultati modulo morfologico





Considerando l'intero dominio di calcolo, le variazioni del fondo appaiono del tutto simili a quelle ottenute in stato attuale, sottolineando come la presenza del nuovo canale non abbia conseguenze sulle dinamiche lagunari generali.

Scendendo nel dettaglio del comparto di interesse, si nota come le aree di bassofondo a nord e sud del nuovo canale presentino variazioni trascurabili del fondo come era stato ottenuto per lo stato attuale. Così come per lo stato attuale, anche per lo stato di progetto il canale della Giudecca e il canale S. Leonardo-Marghera appaiono più vivaci. In particolare, si osserva che le tendenze evolutive appaiono le stesse, anche se un po' intensificate. Questo è spiegabile considerando che in queste due aree l'idrodinamica presenta velocità maggiori, poiché il flusso che in stato attuale occupava l'intera area di bassofondo trova in stato di progetto l'ostacolo delle velme e concentra quindi il suo passaggio nelle due aree che restano "accessibili".

In tutta la fascia delle velme e del nuovo canale si ottengono variazioni del fondo più intense che altrove, data la vivacità del flusso e la sua variabilità in intensità e direzione sopra le velme e tra i varchi.

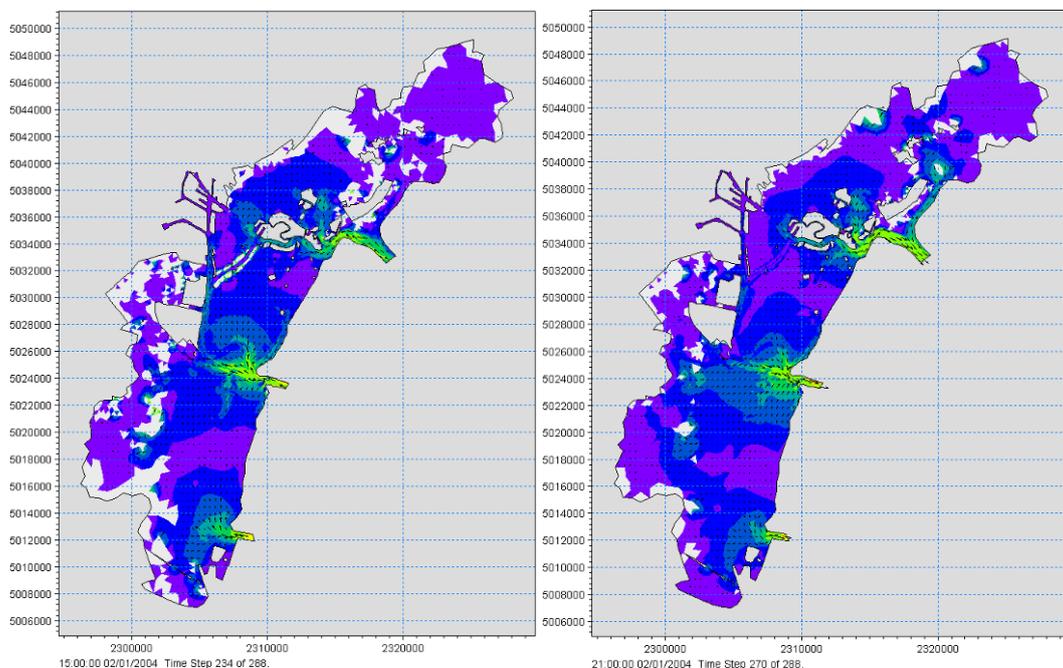
In linea generale si osserva che, d'altro canto, i sedimenti che vengono messi in movimento non provengono dall'esterno ma da questa stessa zona in cui l'idrodinamica tende a ricondurre verso l'appiattimento del fondale erodendo le velme e depositando nei varchi e verso il canale i materiali così messi in sospensione.

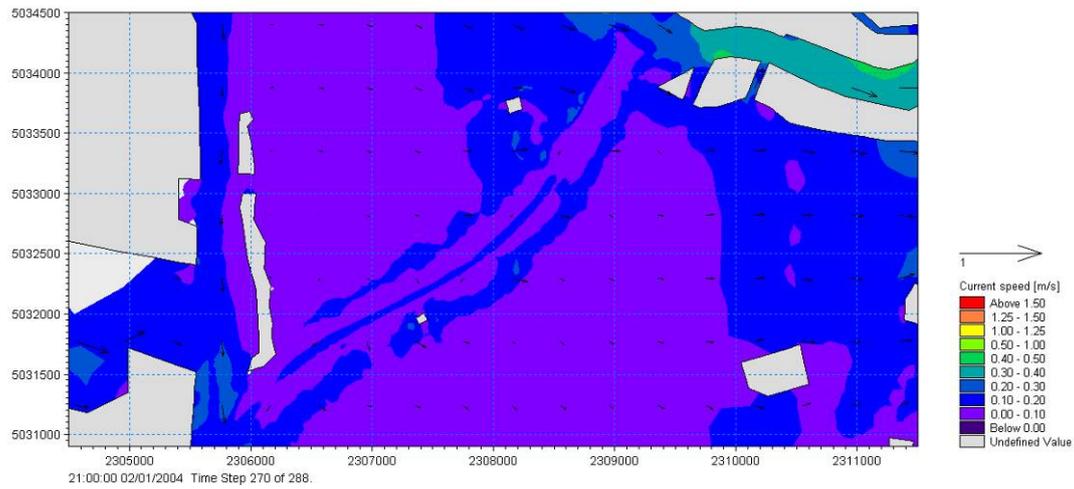
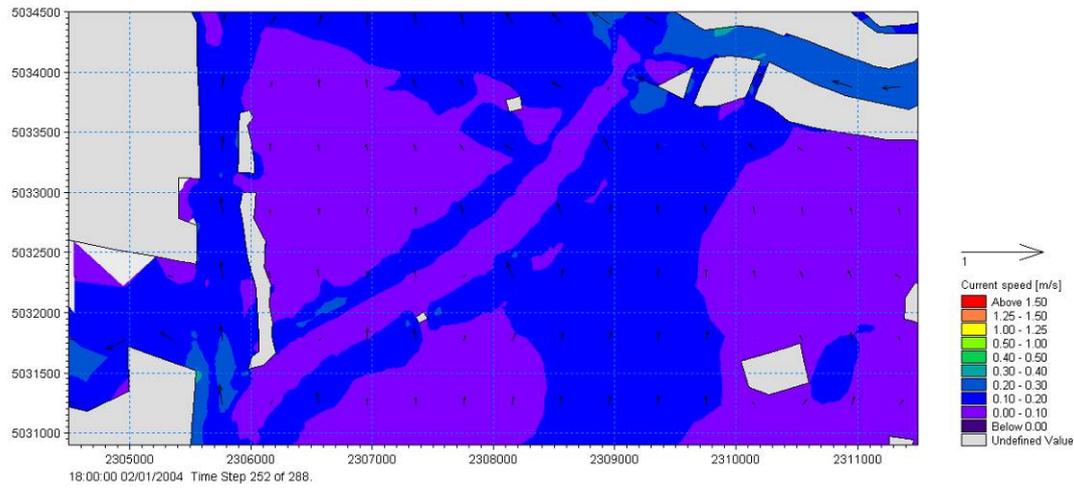
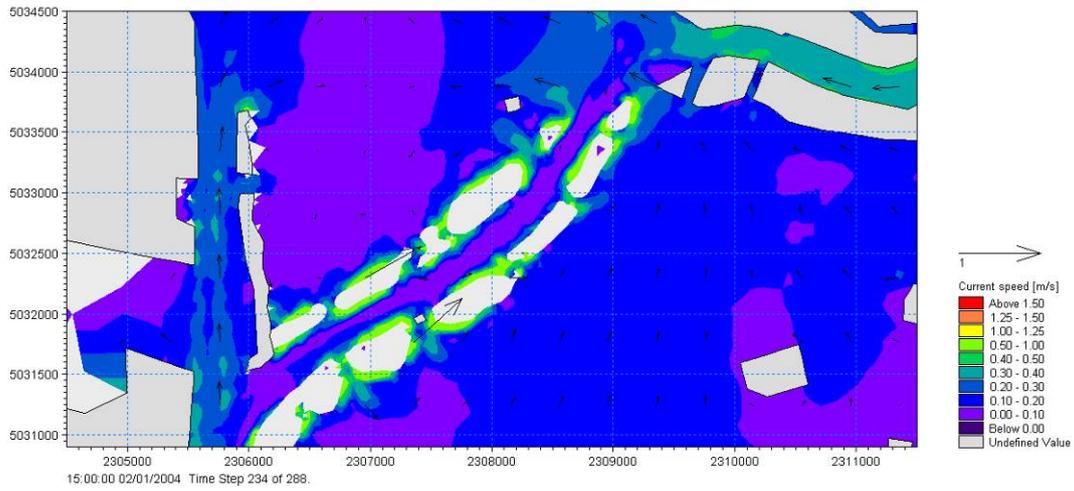
Si nota come la mappa delle variazioni del fondo in seconda configurazione sia del tutto simile a quella che era stata ottenuta in prima configurazione.

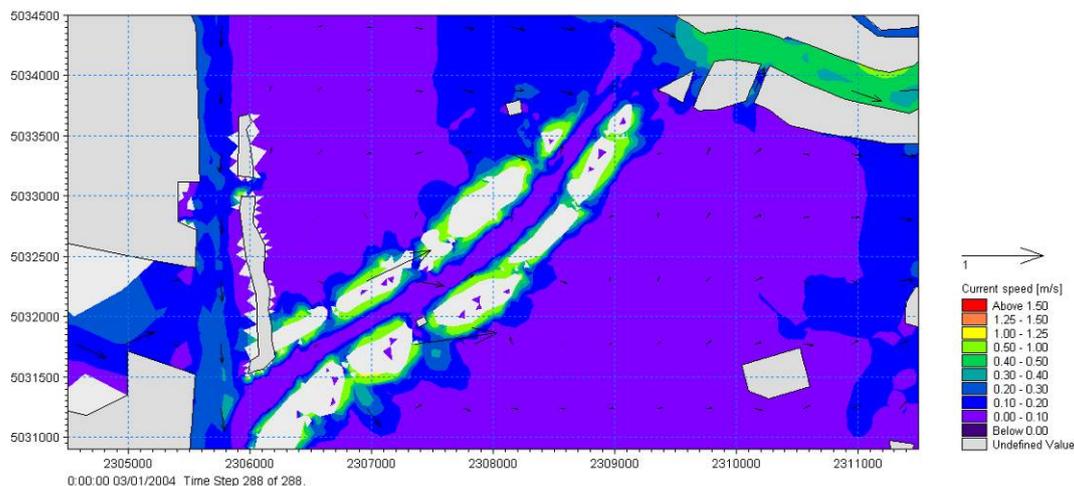
8.2. PROVA SPCONF2_WINDC3

Prova in stato di progetto, seconda configurazione, con vento di 6.66 m/s proveniente da 194.08°N, con marea morfologica, sedimenti a granulometria uniforme con $d_{50}=0.18$ mm.

8.2.1. Risultati modulo idrodinamico





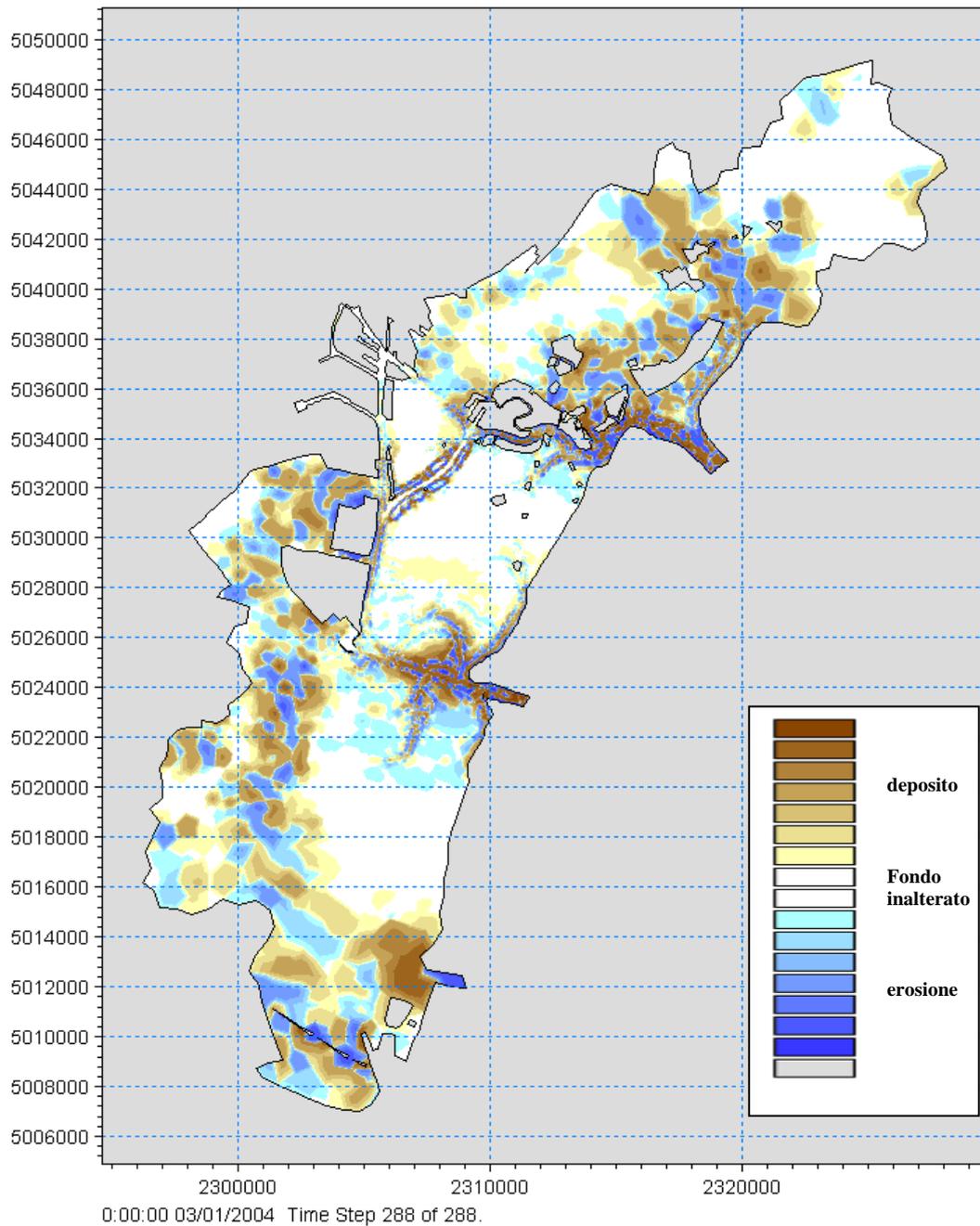


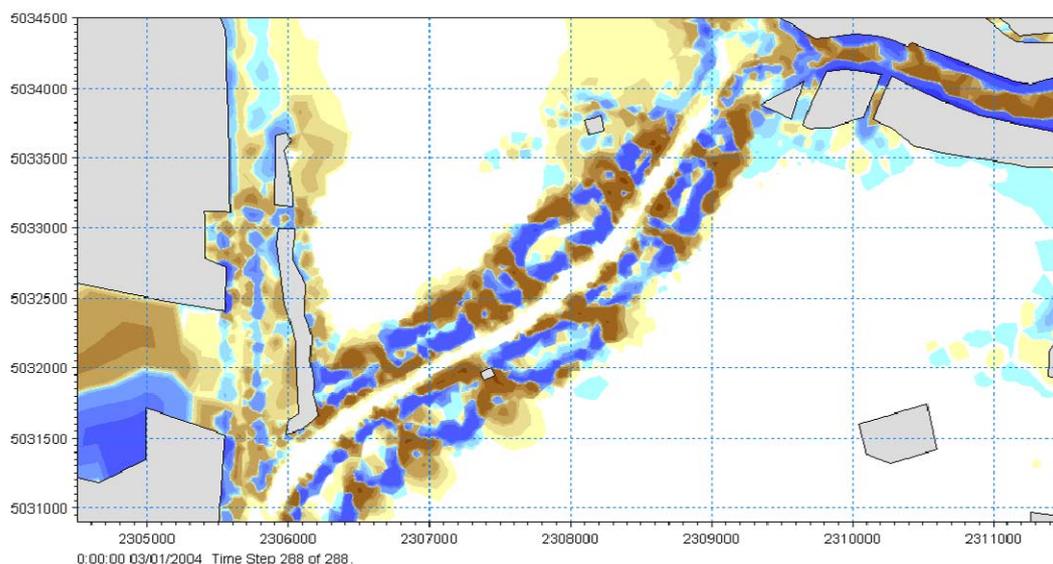
Considerando l'intero dominio, l'idrodinamica appare del tutto simile a quella dello stato attuale, mostrando quindi che anche in questo scenario di vento da sud le nuove opere non comportano modifiche nell'andamento generale delle velocità. Scendendo ad analizzare la zona interessata dalle opere, si può notare come la zona di bassofondo a nord e sud del nuovo canale presenti velocità basse come era nello stato attuale, con un aumento delle aree a velocità quasi nulla a causa dell'effetto schermante delle velme. Il flusso si concentra, nel suo passaggio da nord a sud o viceversa, nel canale della Giudecca e nel canale S.Leonardo-Marghera, che quindi presentano velocità leggermente maggiori che in stato attuale, soprattutto nei momenti di minimo mareale quando si sente maggiormente l'effetto schermante delle velme.

Il nuovo canale appare interessato da velocità basse, a tratti quasi nulle. A seconda del livello dell'acqua, si hanno velocità più intense tra i varchi delle velme o sopra le stesse.

Assolutamente simili le mappe di velocità ottenute in seconda e in prima configurazione di progetto.

8.2.2. Risultati modulo morfologico





Considerando l'intero dominio di calcolo, le variazioni del fondo appaiono del tutto simili a quelle ottenute in stato attuale, sottolineando come la presenza del nuovo canale non abbia conseguenze sulle dinamiche lagunari generali.

Scendendo nel dettaglio del comparto di interesse, si possono fare considerazioni analoghe a quelle fatte nelle simulazioni con vento dal I° quadrante (paragrafo 8.1.2). Le aree di bassofondo a nord e sud del nuovo canale presentano variazioni trascurabili del fondo come era stato ottenuto per lo stato attuale. Anche per lo stato di progetto il canale della Giudecca e il canale S. Leonardo-Marghera appaiono soggetti a cambiamenti maggiori e, rispetto a quanto ottenuto nello stato attuale, le tendenze evolutive appaiono le stesse ma intensificate. Questo è spiegabile considerando che in queste due aree l'idrodinamica presenta velocità maggiori poiché il flusso, che in stato attuale occupava l'intera area di bassofondo, trova in stato di progetto l'ostacolo delle velme e concentra quindi il suo passaggio nelle due aree che restano "accessibili".

In tutta la fascia delle velme e del nuovo canale si ottengono variazioni del fondo più intense che altrove, data la vivacità della corrente e la sua variabilità in intensità e direzione sopra le velme e tra i varchi.

Si nota come la mappa delle variazioni del fondo in seconda configurazione sia del tutto simile a quella che era stata ottenuta in prima configurazione. Qui appare più evidente come l'alveo del canale non subisca modifiche del fondo, le quali si concentrano nella zona occupata dalle velme.

9. CONCLUSIONI

Il progetto di adeguamento della via acquea di accesso alla Stazione Marittima di Venezia e di riqualificazione delle aree limitrofe al Canale Contorta S. Angelo è stato oggetto nel 2012 di uno Studio di Fattibilità, in cui sono state indagate con modello matematico le possibili alterazioni dell'idrodinamica lagunare indotte da tale intervento. In tale studio si era evidenziata la necessità di approfondire le analisi sull'idrodinamica e la morfodinamica nella zona di interessata dagli interventi.

Nello “*Studio morfologico – ROI Relazione Tecnica Illustrativa*” redatto da Protecno si erano approfondite le analisi svolte nello Studio di Fattibilità, indagando le eventuali modifiche sui processi morfodinamici che lo stato di progetto potrebbe comportare rispetto alla situazione attuale. In tale occasione si era studiato lo stato di progetto come da Studio di Fattibilità, con cunetta larga 80 m.

La presente relazione estende le stesse analisi per una seconda configurazione di progetto proposta da APV, che prevede un canale con cunetta larga 120 m.

Lo studio è stato eseguito esattamente come fatto nel precedente studio morfologico, per poi poter agevolmente confrontare i risultati. È stato utilizzato il modello numerico MIKE 21, combinando diversi moduli di calcolo per poter adeguatamente rappresentare i diversi fattori che hanno influenza sull'idrodinamica lagunare e sul trasporto solido: correnti di marea e moto ondoso da vento.

Il dominio di calcolo è stato esteso all'intera laguna, con un affinamento della griglia computazionale nella zona oggetto degli interventi.

In prima fase si è utilizzato il modello di trasporto solido in modalità disaccoppiata, meno onerosa dal punto di vista computazionale, al fine di indagare la capacità di trasporto caratteristica delle diverse fasi di marea nelle diverse condizioni di vento.

Sono state simulate, per lo stato attuale e per lo stato di progetto, due differenti condizioni di vento (bora da 20 m/s e scirocco da 15 m/s) con una marea morfologicamente rilevante.

Esattamente come si era rilevato nella prima configurazione, anche per la seconda non si notano modifiche nella morfodinamica lagunare generale rispetto a quanto ottenuto nelle simulazioni di stato attuale mentre si hanno alcune differenze nella zona interessata dalle opere.

Tendenzialmente negli istanti caratterizzati da bassa marea l'effetto di schermatura delle velme in progetto risulta più evidente, con un calo delle velocità nelle zone a nord o sud delle stesse e un aumento in alcuni punti in cui il flusso è "costretto" a transitare. In altri istanti invece le velocità e le capacità di trasporto di materiale risultano simili a quanto accade in stato attuale.

All'interno del canale in progetto si alternano istanti in cui velocità e capacità di trasporto sono rilevanti ad altri in cui sono molto basse, senza mostrare quindi una tendenza evidente al trasporto o al deposito.

La successione delle velme previste in fregio al canale costituisce uno sbarramento che attraversa, dal Canale S. Leonardo Marghera alla Stazione Marittima l'intera zona di spartiacque fra i bacini di Lido e di Malamocco. Questa interruzione si fa sentire nelle fasi di flusso e riflusso della marea, costringendo la corrente ad aggirare l'ostacolo concentrandosi nel Canale S. Leonardo Marghera e all'imbocco del Canale della Giudecca.

Questo per quanto riguarda il confronto con lo stato attuale.

Comparando invece prima e seconda configurazione, si può affermare che dal punto di vista dell'idrodinamica e morfodinamica generale della laguna e locale della zona interessata dalle opere, esse siano praticamente equivalenti. Non si hanno infatti significative differenze tra le due se non una modesta maggior vivacità nel flusso in seconda configurazione, sia in alveo che nelle zone di bassofondo.

In seconda fase è stato implementato il modello morfologico vero e proprio, in cui i moduli idrodinamico, di moto ondoso e morfologico, sono stati utilizzati in maniera accoppiata invece che in cascata. Questo comporta che ad ogni passo di calcolo ci sia un feedback fra i diversi moduli e, in particolare, le quote del fondo vengano aggiornate.

Le simulazioni morfologiche sono state svolte allo scopo di confrontare, per due scenari di vento di intensità medio-alta e direzioni tra quelle più frequenti, le modifiche alle tendenze di evoluzione del fondale in laguna indotte dalla realizzazione del nuovo Canale Contorta S. Angelo e delle velme ad esso adiacenti.

Anche in questo caso, le considerazioni sono uguali a quelle che si era potuto fare per la prima configurazione.

La dinamica lagunare generale non mostra cambiamenti rispetto allo stato attuale, e così anche le mappe di variazione del livello di fondo.

Entrando nel dettaglio della zona di indagine, si assiste ad una modifica locale dell'andamento delle correnti che porta ad un leggero aumento delle aree di bassofondo caratterizzate da basse velocità e una concentrazione del flusso verso il canale S. Leonardo-Marghera e il canale della Giudecca. Queste modifiche sono comunque di poca entità e si notano solo negli istanti di bassa marea quando le velme intercettano maggiormente il flusso in direzione nord-sud o viceversa.

Considerazioni simili si possono fare valutando le differenze tra le mappe di variazione del fondo. Rispetto allo stato attuale, le zone di bassofondo restano

morfologicamente poco attive, mentre nei due canali sopra citati si vede che in stato di progetto la tendenza morfologica attualmente già presente permane, anche se accentuata.

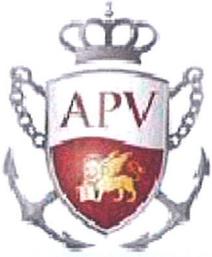
La zona del canale Contorta S. Angelo e delle velme limitrofe risulta essere la più sollecitata, data la vivacità del flusso e la sua variabilità in intensità e direzione sopra le velme e tra i varchi.

In linea generale si osserva che i sedimenti che vengono messi in movimento non provengono dall'esterno, ma da questa stessa zona in cui l'idrodinamica tende a ricondurre verso l'appiattimento del fondale erodendo le velme e depositando verso il canale e tra i varchi i materiali così messi in sospensione.

Per questo motivo si sottolinea l'importanza di una adeguata realizzazione dell'intervento.

Dal punto di vista delle motivazioni per le quali sono state introdotte le velme in fregio al canale, si può dire che la protezione dalle torbide sospinte dai venti è efficace soprattutto con maree medio-basse. Le velme, inoltre, sono sicuramente efficaci nel costituire una interruzione del fetch libero lagunare, anche se questo evidentemente comporta che in corrispondenza alle opere vi sia una concentrazione di sforzi, con le conseguenze appena descritte.

Il confronto invece tra prima e seconda configurazione permette di affermare che tra le due non ci sono differenze apprezzabili nei processi di morfodinamica.

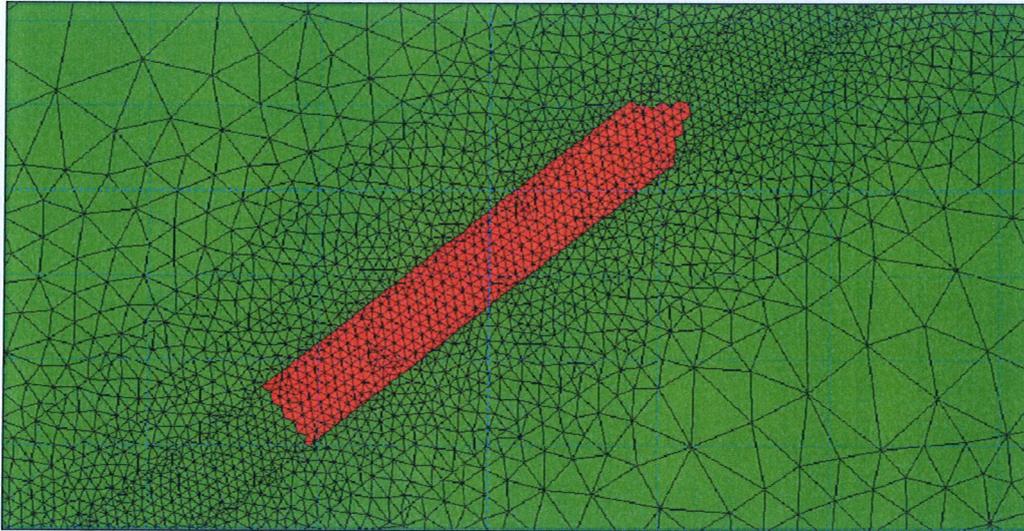


Committente

Autorità Portuale di Venezia

Responsabile del Procedimento

Dott. Ing. Nicola Torricella



Adeguamento via acqua di accesso alla Stazione Marittima di Venezia e
riqualificazione delle aree limitrofe al
Canale Contorta S. Angelo.

STUDIO DEGLI EFFETTI IDRODINAMICI E MORFOLOGICI DEL TRANSITO DI NATANTI

numero allegato

R04

titolo allegato

Relazione Tecnica Illustrativa - Seconda configurazione

codice file

404001R04-1ED

codice partner/cliente

404001R04-1ED

scala

timbro e firma



Direttori Tecnici

Prof. Ing. Attilio Adami
Dott. Ing. Giannarturo Comola

Progettista

PROTECNO
LIFE AROUND WATER

Collaboratori

Dott. Ing. Eleonora Dallan

Protecno srl

Via Risorgimento, 9
35027 Noventa Padovana (Pd) Italy
Tel. +39 049 8935128
Fax +39 049 8935266
e-mail: protecno@protecno.it
www.protecno.it



rev	data	descrizione	redatto	controllato	approvato
5					
4					
3					
2					
1	maggio 2013	Prima emissione	ED	ED	AA

Sommario

1. PREMESSA	3
2. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO	4
3. INQUADRAMENTO TEORICO DEL FENOMENO	7
4. DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO	10
5. DATI DI INPUT	10
5.1. BATIMETRIA	11
5.2. I SEDIMENTI	11
5.3. LA NAVE IN TRANSITO	12
6. ALLESTIMENTO MODELLO	13
6.1. TRACCIATO DEL CANALE PER IL TRANSITO DELLA NAVE.....	13
6.2. DOMINIO	16
6.3. MESH DI CALCOLO	17
6.4. INPUT NAVE IN TRANSITO	20
6.5. MODALITÀ E PROGRAMMA PROVE.....	22
7. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	24
7.1. CONF2_SN_6KN_LIV0.00.....	28
7.1.1. <i>Modulo idrodinamico</i>	28
7.1.2. <i>Modulo morfologico</i>	32
7.2. CONF2_SN_6KN_LIV0.50.....	33
7.2.1. <i>Modulo idrodinamico</i>	33
7.2.2. <i>Modulo morfologico</i>	37
7.3. CONF2_SN_6KN_LIV1.00.....	38
7.3.1. <i>Modulo idrodinamico</i>	38
7.3.2. <i>Modulo morfologico</i>	42
7.4. CONFRONTO PROVE SN	42
7.5. CONF2_NS_6KN_LIV0.00.....	45
7.5.1. <i>Modulo idrodinamico</i>	45
7.5.2. <i>Modulo morfologico</i>	49
7.6. CONF2_NS_6KN_LIV0.50.....	50

7.6.1.	<i>Modulo idrodinamico</i>	50
7.6.2.	<i>Modulo morfologico</i>	54
7.7.	CONF2_NS_6KN_LIV1.00.....	55
7.7.1.	<i>Modulo idrodinamico</i>	55
7.7.2.	<i>Modulo morfologico</i>	59
7.8.	CONFRONTO PROVE NS	59
7.9.	CONFRONTO PRIMA CONFIGURAZIONE – SECONDA CONFIGURAZIONE	62
8.	CONCLUSIONI	71

1. PREMESSA

Nel 2012 è stato eseguito uno *Studio di Fattibilità* per un intervento di adeguamento della via acquea di accesso alla Stazione Marittima di Venezia e di riqualificazione delle aree limitrofe al Canale Contorta S. Angelo.

L'idea è quella di creare un percorso alternativo per le grandi navi che attualmente entrano dalla bocca di Lido e transitano attraverso il bacino S. Marco. Lo studio, datato febbraio 2012, contiene delle valutazioni basate su analisi con modello matematico idrodinamico.

Un ulteriore studio con modello matematico è stato eseguito da Protecno s.r.l. su incarico dell'Autorità Portuale di Venezia per approfondire le indagini riguardo le modifiche dell'idrodinamica per la porzione di laguna interessata dal nuovo canale nonché l'aspetto dell'evoluzione morfologica della zona di interesse. Lo studio è stato presentato nella relazione "*Studio morfologico – R01 Relazione Tecnica Illustrativa*".

Considerazioni richieste da APV riguardanti gli effetti idro-morfodinamici causati dal transito nel nuovo canale in progetto delle grandi navi da crociera sono stati presentati nello "*Studio degli effetti idrodinamici e morfologici del transito di natanti – R02 Relazione Tecnica Illustrativa - Prima configurazione*".

Su richiesta dell'Autorità Portuale, Protecno ha sviluppato lo studio riguardante gli effetti idro-morfodinamici causati dal transito nel nuovo canale in progetto delle grandi navi da crociera anche per una configurazione di progetto alternativa a quella illustrata nello studio di Fattibilità e analizzata nei due precedenti studi sopra citati.

I risultati ottenuti sono illustrati nella presente relazione "*Studio degli effetti idrodinamici e morfologici del transito di natanti – R04 Relazione Tecnica Illustrativa - Seconda configurazione*".

L'analisi delle modifiche all'idro-morfodinamica lagunare per questa nuova configurazione di progetto sono invece riportate nello “*Studio morfologico – R03 Relazione Tecnica Illustrativa – Seconda configurazione*”.

2. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO

Gli interventi oggetto del presente studio riguardano l'adeguamento della via acqua di accesso alla Stazione Marittima di Venezia e di riqualificazione delle aree limitrofe al Canale Contorta S. Angelo.



Figura 1 - Corografia della laguna di Venezia; il riquadro rosso individua la zona interessata dagli interventi e oggetto del presente studio.

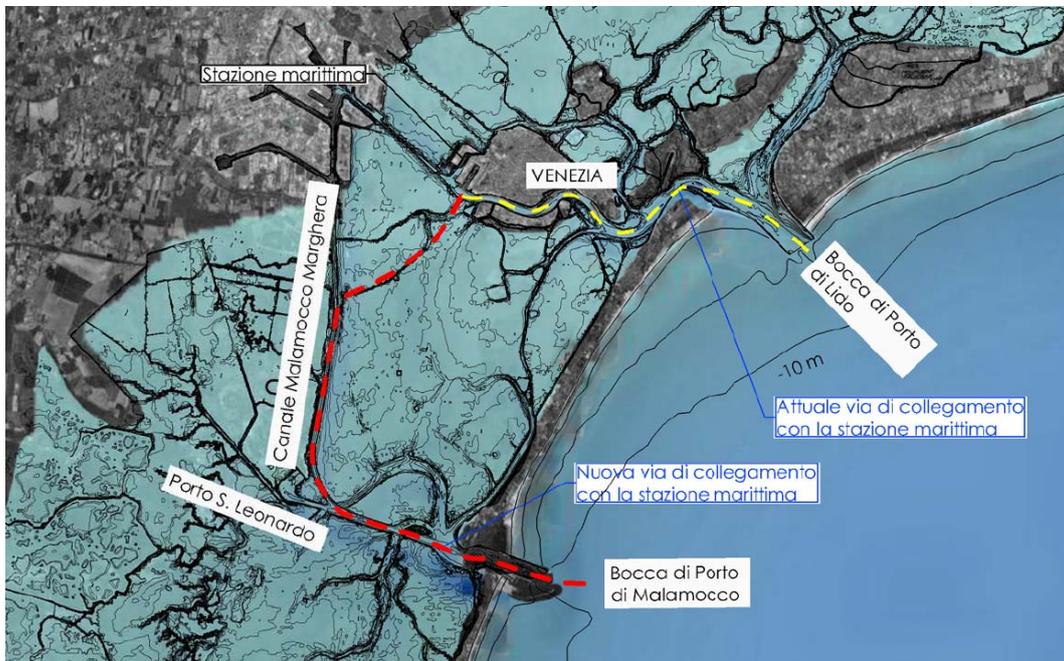


Figura 2 - Percorso attuale (in giallo) e nuovo percorso in progetto (in rosso) per l'accesso alla Stazione Marittima di Venezia (fonte: Studio di fattibilità)

L'idea è quella di creare un percorso alternativo per le grandi navi che attualmente entrano dalla bocca di Lido e transitano attraverso il bacino di S. Marco (Figura 2).

L'attuale canale Contorta S. Angelo dovrà essere risezionato in larghezza e profondità mentre il canale Malamocco - Marghera non richiederà ulteriori interventi rispetto alle manutenzioni già attualmente eseguite dall'Autorità Portuale di Venezia.

Gli interventi previsti prevedono di centrare l'andamento planimetrico del nuovo alveo per lo più sull'attuale, scostandosene leggermente solo per minimizzare le interferenze con strutture preesistenti, quali l'isola di S. Angelo e per mantenere un raggio di curvatura idoneo alla manovrabilità delle navi di cui deve permettere il transito. È prevista inoltre la realizzazione di una serie di velme a lato del canale con l'obiettivo di proteggere i fondali adiacenti dalla risacca indotta dal transito delle navi, ma anche per contribuire a garantire il mantenimento dei fondali del canale stesso.

La prima configurazione di progetto (Figura 3) di cui si sono studiati gli aspetti di modifica della idrodinamica e morfologia lagunare e gli effetti del passaggio di natanti è stata quella presentata nello Studio di Fattibilità, con una cunetta larga 80 m e profonda -10 m s.m.m. (dato poi rettificato da APV in -10.50 m s.m.m.).

La seconda configurazione di progetto, elaborata da APV e oggetto del presente studio, prevede una cunetta di 120 m e profondità -10.50 m s.m.m.

Le due configurazioni presentano un diverso andamento planimetrico (Figura 5), che comunque mantiene approssimativamente gli stessi punti di ingresso del nuovo canale sia verso il canale S. Leonardo - Marghera che verso il Canale della Giudecca.

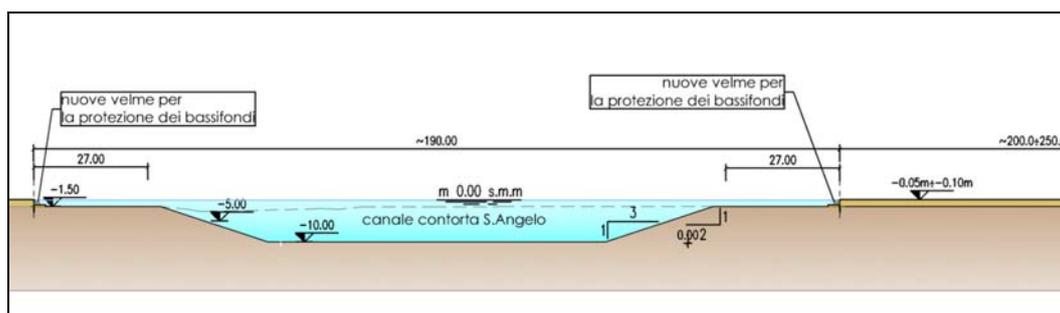


Figura 3 – Prima configurazione di progetto. Sezione del nuovo Canale Contorta S. Angelo fonte: Studio di Fattibilità).

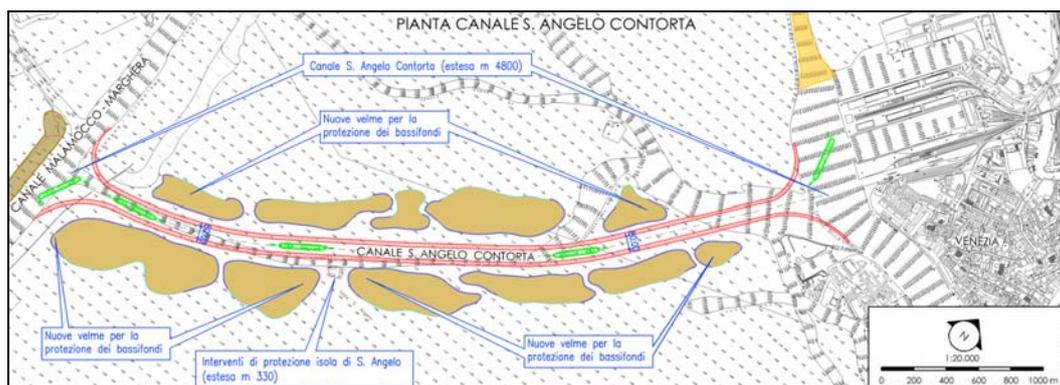


Figura 4 – Prima configurazione di progetto. Tracciato planimetrico del nuovo Canale Contorta S. Angelo e disposizione delle velme (fonte: Studio di Fattibilità).



Figura 5 - Confronto dell'andamento planimetrico della prima configurazione di progetto (in verde) e della seconda configurazione di progetto (in rosso).

3. INQUADRAMENTO TEORICO DEL FENOMENO

Come nella analoga relazione che trattava lo studio degli effetti del transito dei natanti per la prima configurazione di progetto, si riporta nel seguito una breve descrizione teorica del fenomeno oggetto delle simulazioni numeriche.

All'interno della laguna di Venezia e dei suoi canali le principali cause del moto ondoso sono riconducibili da una parte all'azione del vento, che genera onde caratterizzate da altezze, periodi e direzione variabili con l'intensità del vento

stesso e con la geometria dei fondali, dall'altra alle perturbazioni introdotte dalle imbarcazioni in navigazione, alle quali è associata la formazione di un doppio sistema di onde (di tipo divergente e trasversale) stazionarie rispetto al corpo in movimento, le cui caratteristiche, pur dipendendo da molti parametri, sono fondamentalmente controllate dalla velocità di spostamento dei natanti stessi.

Come detto, dunque, sono due le cause fondamentali della formazione di onde nel bacino lagunare: il vento ed i natanti. Il primo ha un ruolo fondamentale nelle zone poco profonde e caratterizzate da ampi specchi d'acqua liberi, i secondi assumono importanza rilevante nei campi confinati, quali i canali.

L'intensità dei sistemi d'onda generati dai natanti in navigazione dipende:

- in campo aperto, principalmente dalla velocità di spostamento del natante in navigazione e dalle caratteristiche idrodinamiche della carena;
- in campo confinato (canali) oltre che dai parametri suddetti, dal rapporto fra la sezione della carena e la sezione liquida del canale in cui il natante si sta muovendo.

Il transito di natanti di grandi dimensioni in un canale provoca infatti un abbassamento del piano dell'acqua, correlato al rapporto tra la sezione immersa del natante e quella del canale oltre che alla velocità con cui si muovono i natanti stessi. Per effetto di questo fenomeno, nei canali secondari afferenti ai suddetti canali principali si osserva la propagazione di onde negative e positive, che provocano aumenti locali della velocità mareale con possibili effetti erosivi sui fondali.

Per inquadrare in via teorica il fenomeno, si può far riferimento a metodi teorico - empirici reperibili in letteratura, in grado di stimare le caratteristiche geometriche dell'onda e dell'abbassamento prodotti da un'imbarcazione in transito in un canale.

In generale, quando un natante si muove lungo una via d'acqua navigabile, crea una corrente di ritorno che è parallela e di senso opposto alla direzione dello spostamento del corpo (Figura 6).

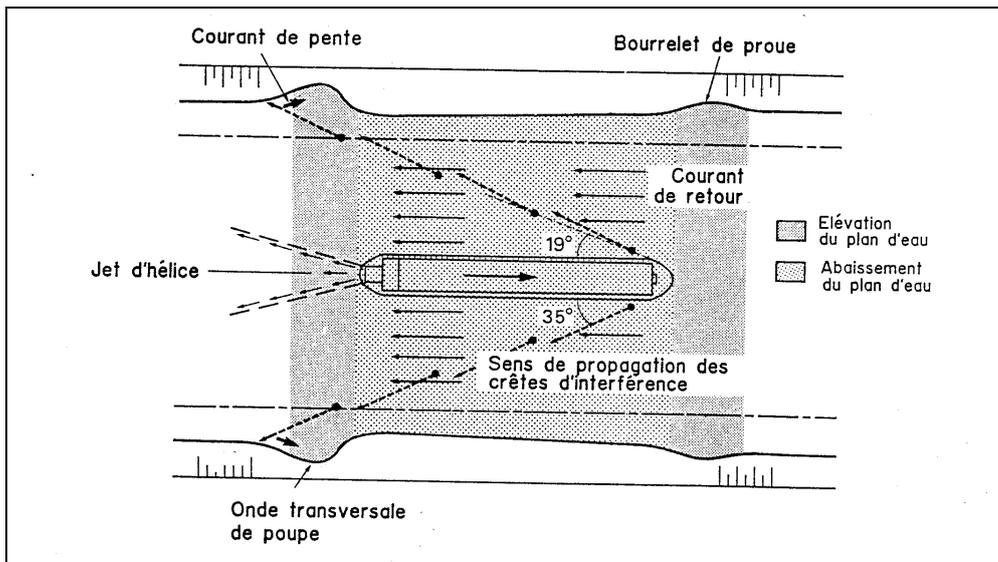


Figura 6 - Componenti dell'agitazione dell'acqua nel canale indotta dalla navigazione

In ragione del carico cinetico dell'acqua in movimento lateralmente al battello, si determina un abbassamento del piano d'acqua, in modo da mantenere costante la linea dell'energia. Il livello della superficie dell'acqua attorno al battello si abbassa dunque in funzione delle caratteristiche geometriche del canale e del natante, nonché dalla velocità di transito del battello (Figura 7).

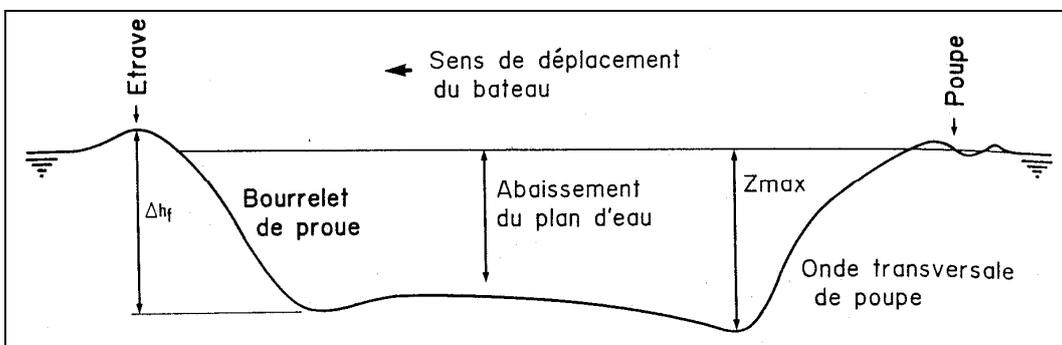


Figura 7 - Profilo del pelo libero dell'acqua nel canale durante il transito di un natante.

4. DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

Lo studio è stato eseguito impiegando il modello Mike21 prodotto dal Danish Hydraulic Institute (Copenhagen), ed utilizzando a base delle simulazioni la carta delle batimetrie della laguna di Venezia pubblicata dal Magistrato alle Acque nel 2002, opportunamente aggiornata per tener conto della realizzazione, in tale ambito, di varie nuove strutture morfologiche, avvenuta negli ultimi anni circa, da parte del Magistrato alle Acque – Consorzio Venezia Nuova.

Le simulazioni sono state eseguite nelle condizioni di progetto, apportando alcune modifiche nell'andamento planimetrico del canale per esigenze di modellazione matematica, così come descritto al paragrafo 6.1.

Nelle prove sono stati simulati gli effetti del transito di un natante nel canale in progetto, valutando sia gli aspetti idrodinamici (campi di corrente e campi di elevazione di superficie) che quelli morfologici (tendenza al deposito e all'erosione) legati agli sforzi tangenziali al fondo.

Le prove sono state effettuate per tre diversi livelli idrici, per verificare la diversa intensità dei fenomeni che genera il passaggio di un natante in diverse condizioni di marea.

Per la descrizione dei moduli idrodinamico HD e di trasporto solido non coesivo ST del pacchetto software MIKE21 si rimanda a quanto riportato nella relazione *“Studio degli effetti idrodinamici e morfologici del transito di natanti – R02 Relazione Tecnica Illustrativa - Prima configurazione”*.

5. DATI DI INPUT

Per quanto riguarda i dati di input (batimetria, sedimenti, dimensioni e velocità nave) necessari all'implementazione delle nuove simulazioni in seconda configurazione, essi restano gli stessi della prima configurazione tranne per la

batimetria, che è stata modificata per poter rispecchiare questa nuova configurazione progettuale.

5.1. BATIMETRIA

Primo passo per l'allestimento del modello è stata la creazione del dominio di calcolo. Per realizzare una adeguata rappresentazione della laguna di Venezia, con le informazioni necessarie al software di calcolo, è necessario definire il contorno della laguna, le quote batimetriche, e la mesh di calcolo.

Il contorno della laguna è stato ricavato a partire dalla cartografia digitale della Laguna di Venezia (CTR in formato vettoriale reperibili sul sito della Regione Veneto), ricostruendo i contorni in ambiente CAD georeferenziato e esportandoli in formato XYZ così da poterli caricare nel modello Mike21.

Per quanto riguarda i dati batimetrici, la griglia computazionale è stata costruita sulla carta delle batimetrie della laguna di Venezia pubblicata dal Magistrato alle Acque nel 2002, opportunamente aggiornata per tener conto della realizzazione, in tale ambito, di varie nuove strutture morfologiche, avvenuta negli ultimi anni, da parte del Magistrato alle Acque – Consorzio Venezia Nuova.

Per comprendere le batimetrie della seconda configurazione di progetto, nella zona oggetto dell'intervento sono state implementate le nuove quote del fondo del canale (fondo alla -10.50 m s.m.m., cunetta larga 120 m). Per le velme sono stati utilizzati i dati batimetrici della prima configurazione di progetto (sommità delle velme -0.10 m s.m.m.).

5.2. I SEDIMENTI

Viste le caratteristiche del modello numerico utilizzato per le simulazioni (trasporto di materiale non coesivo) e le considerazioni sui sedimenti riportate nello studio morfologico già eseguito (*“Studio morfologico – R01 Relazione Tecnica Illustrativa”*), nel modello è stata imposta una granulometria uniforme di sedimenti sabbiosi su tutto il dominio, con un diametro medio pari a 180 µm.

5.3. LA NAVE IN TRANSITO

Le caratteristiche della nave da riprodurre sul modello comunicate da APV sono:

- lunghezza nave in linea di galleggiamento 300 m;
- Larghezza nave 45 m;
- Pescaggio nave 9 m;
- Velocità di crociera: 6 kn.

Sul modello la presenza del natante in movimento nel fluido è stata schematizzata come una sovrappressione applicata sulla superficie del fluido, tale da ottenere un abbassamento locale del livello pari al pescaggio e alla forma della nave (Figura 8).

La sovrappressione è stata modificata nel tempo e nello spazio in modo da riprodurre il transito del natante lungo il canale alla velocità di crociera.

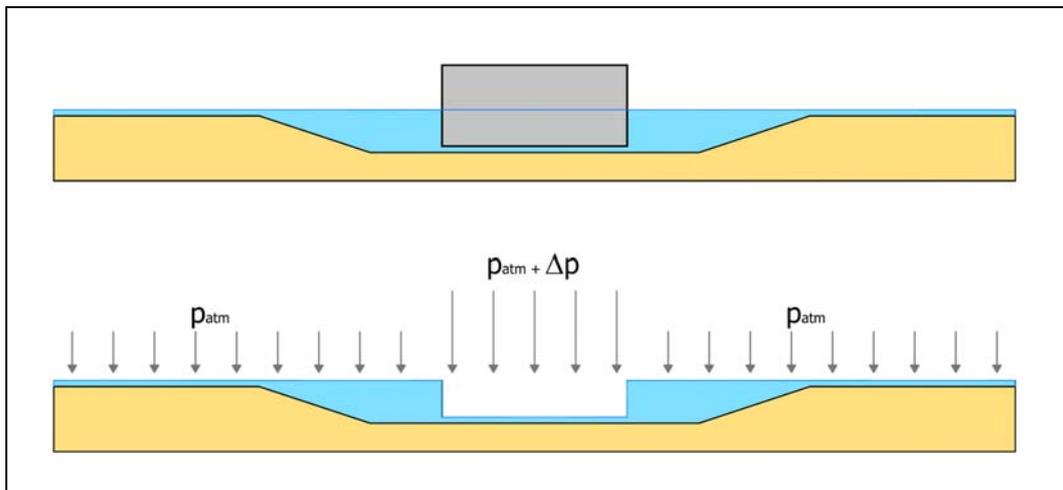


Figura 8 - Schematizzazione della nave nel modello matematico per mezzo di un campo di sovrappressione

6. ALLESTIMENTO MODELLO

6.1. TRACCIATO DEL CANALE PER IL TRANSITO DELLA NAVE

Per esigenze modellistiche, è stato deciso di modificare il tracciato planimetrico del canale in progetto, in modo tale da poter muovere la nave (cioè il campo di sovrappressione) lungo un percorso rettilineo.

Tale operazione ha reso più semplice la generazione degli input di pressione necessari al modello, senza compromettere la bontà del risultato finale.

Visto il non dissimile andamento planimetrico delle due configurazioni, è stato mantenuto il tracciato rettificato (Figura 9) usato nella prima configurazione, salvo allargare l'alveo per rappresentare le dimensioni previste nella seconda configurazione.

Rispetto a quanto implementato in prima configurazione, le velme adiacenti sono state opportunamente traslate per tener conto della maggior larghezza del canale; la loro posizione e forma comunque rispecchia quelle utilizzate in prima configurazione.

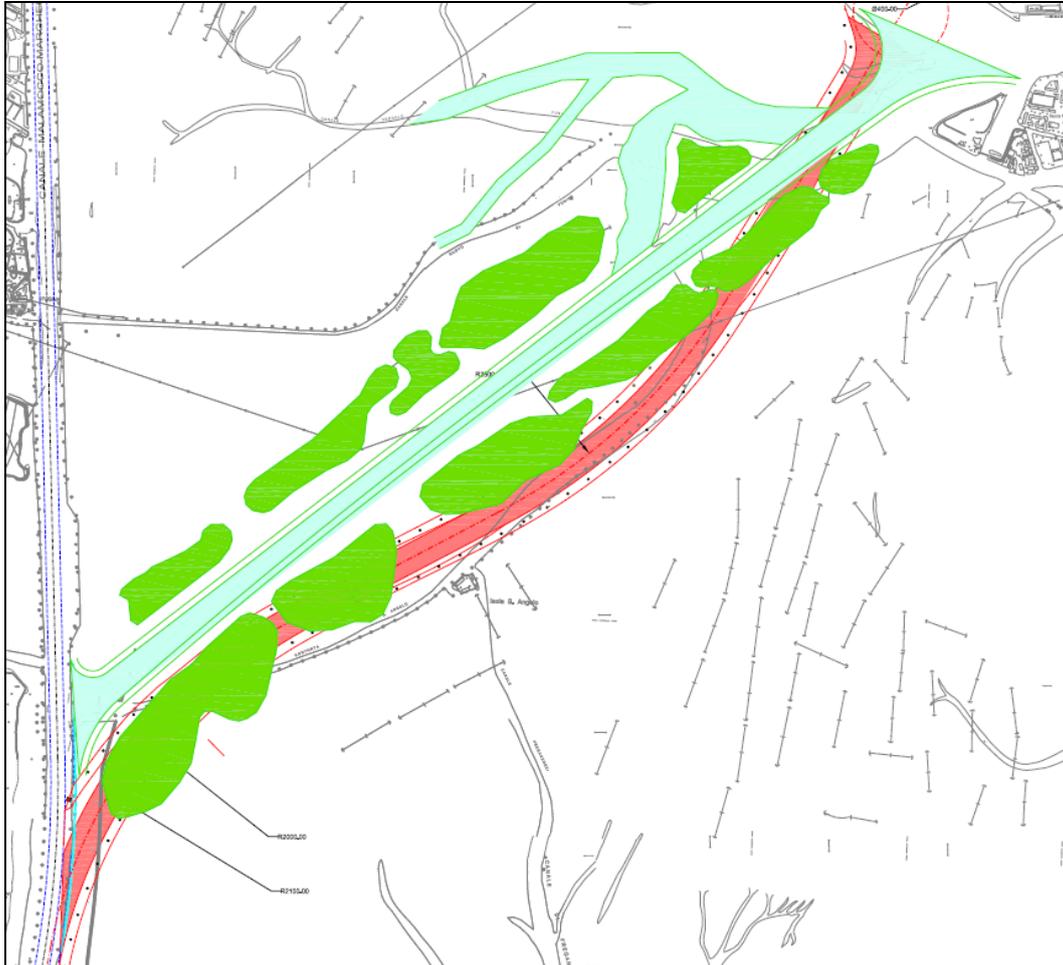


Figura 9 - Confronto tra l'andamento planimetrico del canale in progetto (seconda configurazione) e quello "rettificato" utilizzato nelle simulazioni matematiche. In rosso il canale originale, in azzurro il tracciato rettificato. In verde sono evidenziate le velme spostate lungo il canale rettificato.

Inoltre, sempre per esigenze modellistiche, il canale è stato prolungato sia verso nord che verso sud per circa 3 km, creando anche zone di bassofondo ad esso adiacenti. Questi due tratti di canale e bassofondo "fittizi" sono stati utilizzati per dare alla nave un certo tempo e spazio per:

- la calata in acqua (aumento graduale della pressione) in una zona a circa 3 km dalla zona di interesse, per un tempo pari a 10',

- il ripristino delle condizioni di pelo libero indisturbato (nave ferma alla posizione di partenza), per un tempo pari a 30',
- la fase di accelerazione (in uno spazio di circa 2km) per raggiungere lentamente la velocità di crociera, per un tempo di circa 20'

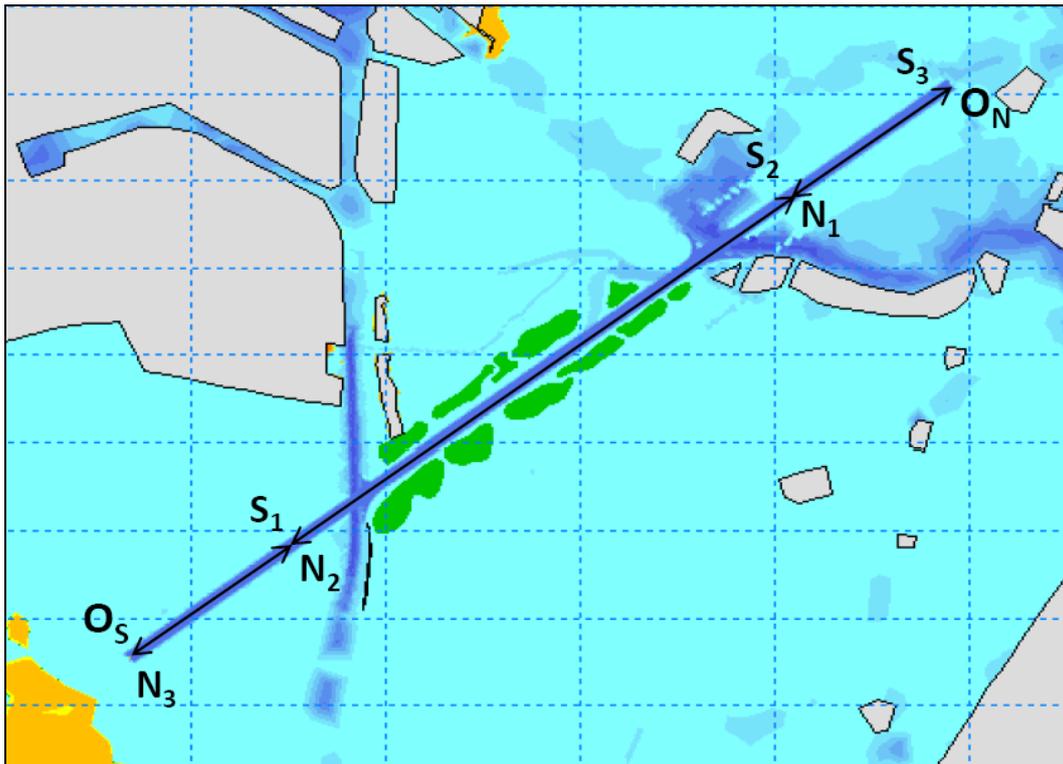


Figura 10 - Batimetria di calcolo con evidenziate le due zone di canale e bassofondo "fittizie": O_S e O_N sono i due punti di calata della nave, rispettivamente per la direzione di transito sud-nord e nord-sud; i tratti O_S-S_1 e O_N-N_1 sono i due tratti di accelerazione per le due direzioni di transito.

In questo modo quando la nave raggiunge la zona di interesse si trova a velocità di regime e sono scomparsi gli effetti modello dovuti alla perturbazione causata dall'ingresso della sovrappressione e alla sua accelerazione.

Nella generazione del dominio di calcolo è stato creato un "binario" centrale all'alveo del canale, largo 45 m, in cui è stata fatta scorrere la sagoma della nave. In tal modo la mesh poi generata presenta triangoli appoggiati agli archi di tale binario e i lati della nave vengono riprodotti bene, senza spigoli.

6.2. DOMINIO

Il modello numerico MIKE21 risolve numericamente le equazioni del moto in un dominio discretizzato con elementi triangolari, utilizzando il metodo ai volumi finiti. La risoluzione del modello aumenta tanto più piccoli, e perciò numerosi, sono gli elementi triangolari che discretizzano il dominio di calcolo. A ciò corrisponde un aumento del tempo di calcolo necessario ad ottenere la soluzione voluta. Per questo motivo il modello consente la differenziazione delle dimensioni della mesh nelle zone di diverse caratteristiche e interesse.

Poiché si intende indagare la morfodinamica nella zona interessata dagli interventi, ed in quelle limitrofe in cui è possibile risentirne gli effetti, a causa del passaggio di natanti nel nuovo canale, il dominio di calcolo comprende la zona centrale della laguna di Venezia: la zona di bassofondo a nord e sud del canale in progetto, più, come descritto al precedente paragrafo, due ampie zone attorno ai tratti di canale fittizi (Figura 11).

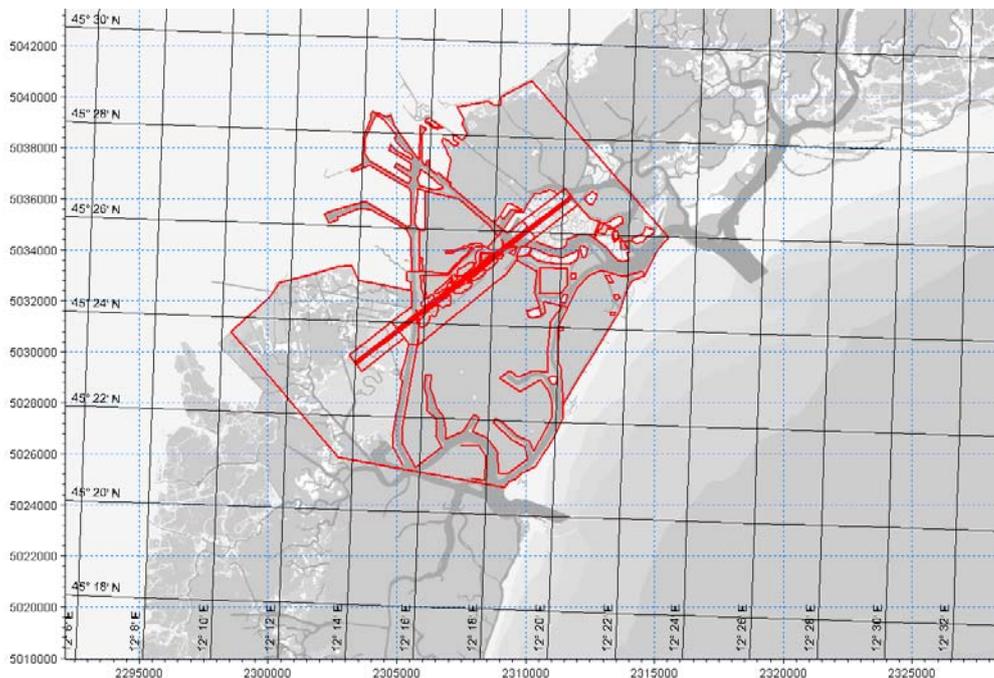


Figura 11 - Estensione del dominio di calcolo.

6.3. MESH DI CALCOLO

Il dominio di calcolo è stato suddiviso in zone a differente dimensione degli elementi triangolari per ottimizzare i tempi di calcolo ed ottenere una soluzione maggiormente accurata nella zona di interesse.

Come fatto nell'analogo studio in prima configurazione, sono state utilizzate le seguenti dimensioni massime dei triangoli (Figura 12 e Figura 13):

- elementi di area massima di 20 m² per il “binario” di scorrimento della nave nella zona di interesse;
- elementi di area massima di 40 m² per l'alveo del canale adiacente al binario nella zona di interesse;
- elementi di area massima di 80 m² per le sponde del canale nella zona di interesse e per i tratti di canale fittizio;
- elementi di area massima di 400 m² per la zona delle velme;
- elementi di area massima di 1 000 m² per le due zone di bassofondo fittizio;
- elementi di area massima di 50 000 m² per tutte le altre aree.

La mesh è risultata composta complessivamente da circa 110 000 elementi e 55 000 nodi.

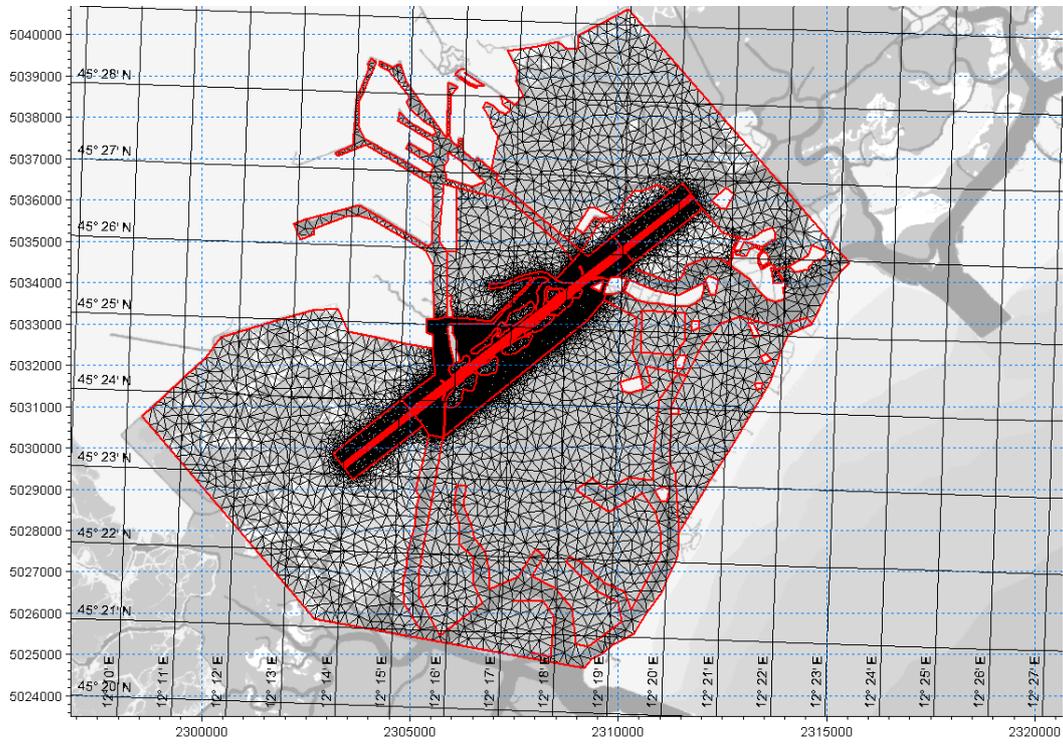


Figura 12 - Mesh di calcolo sull'intero dominio.

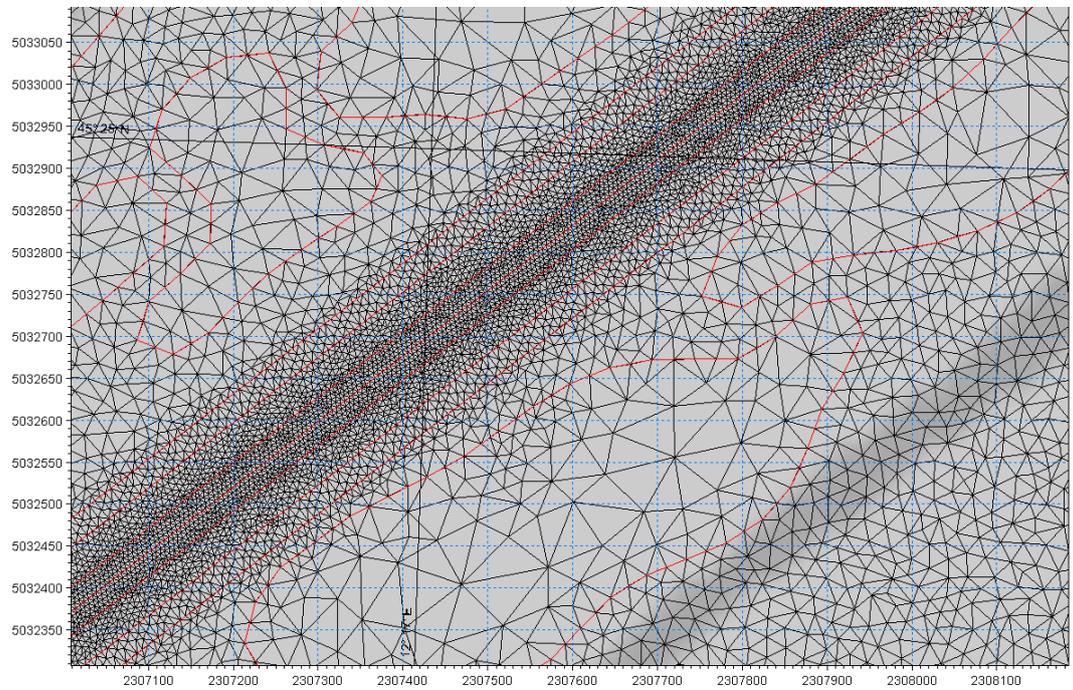


Figura 13 - Mesh di calcolo, zoom sul canale in progetto. Si notano le zone a differente risoluzione.

I dati batimetrici sono stati interpolati su questa griglia ad elementi triangolari ottenendo la batimetria di calcolo (Figura 14). Sono state apportate alcune modifiche a mano per meglio definire i varchi tra le velme (Figura 15).

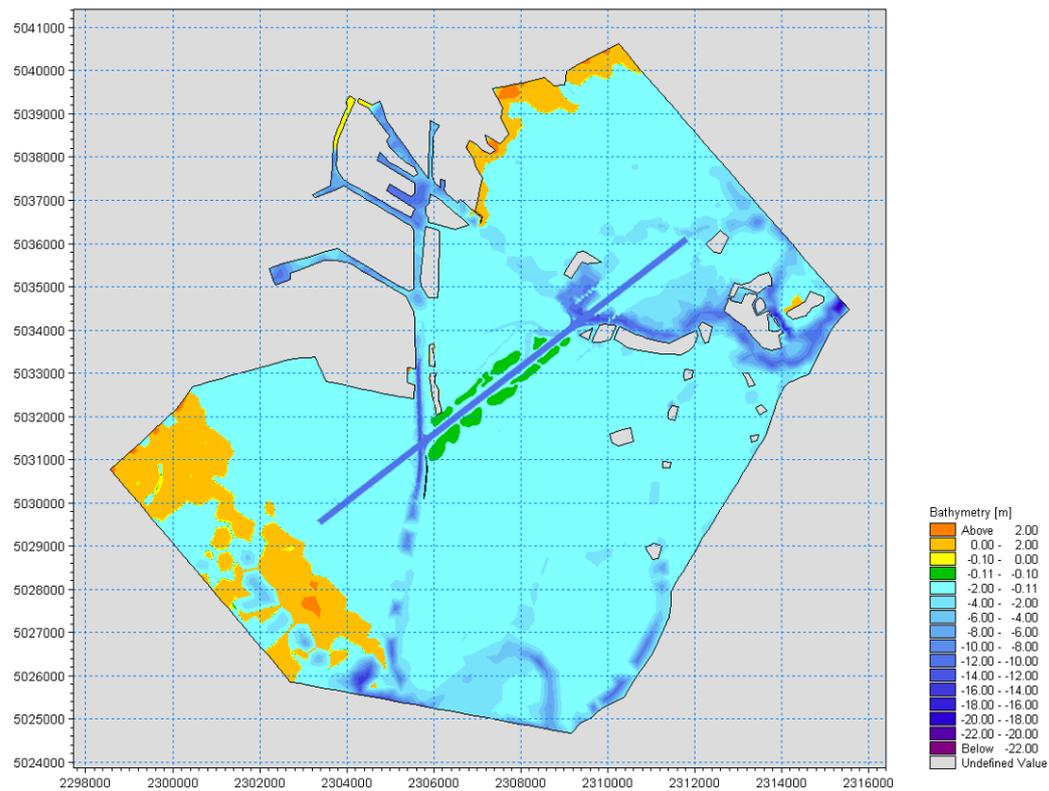


Figura 14 – Batimetria di calcolo; in verde sono state evidenziate le velme.

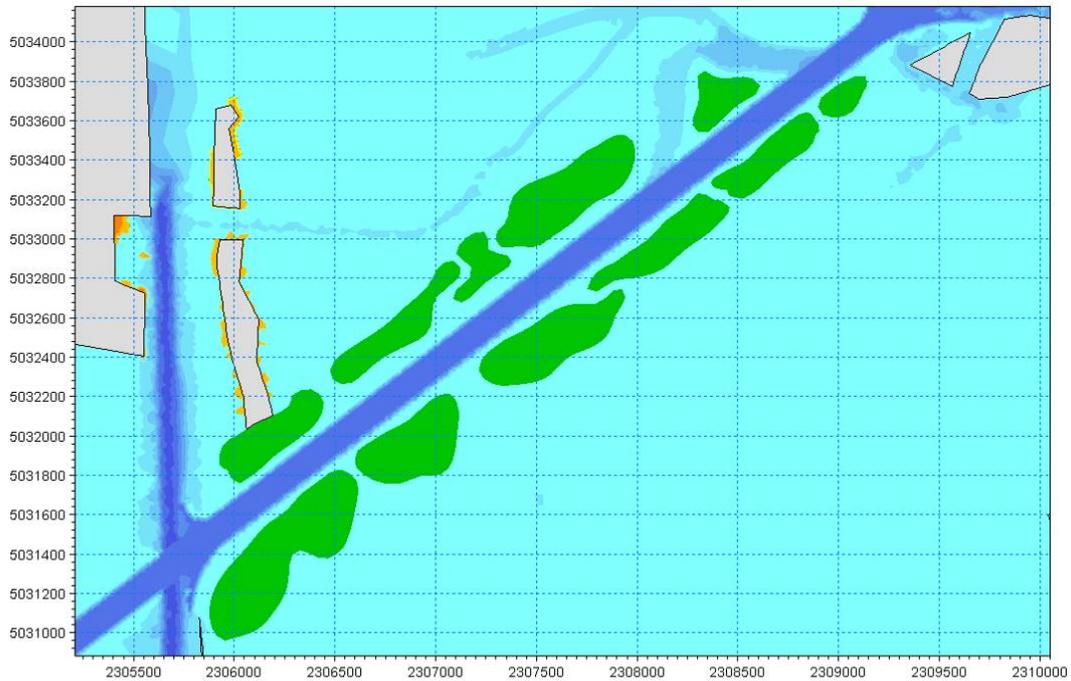


Figura 15 – Batimetria di calcolo, zoom sulla zona di interesse.

6.4. INPUT NAVE IN TRANSITO

Per poter dare in input al modulo idrodinamico la sovrappressione che schematizza il transito della nave nel canale, è stato creato un file nel formato “.dfsu” composto da tre *item* (così come richiesto dal modello): componente del vento lungo X, componente del vento lungo Y, pressione.

Il file copre il dominio di calcolo ed è composto da un numero di passi temporali pari a quello delle simulazioni.

Con un codice Matlab appositamente creato, sono stati inseriti i valori della sovrappressione, variabile nel tempo e nello spazio, secondo le fasi descritte al paragrafo 6.1. Il valore finale della sovrappressione, corrispondente al pescaggio di 9 m, è stato determinato come:

$$\Delta p[mbar] = pesc[m] \cdot 98.06[mbar / m]$$

Su tutto il dominio è stata quindi imposta una pressione neutra di 1013 mbar e localmente dove transita la nave una pressione di 1895.54 mbar.

Naturalmente, i campi di vento comunque richiesti come input dal modello sono stati dati pari a zero.

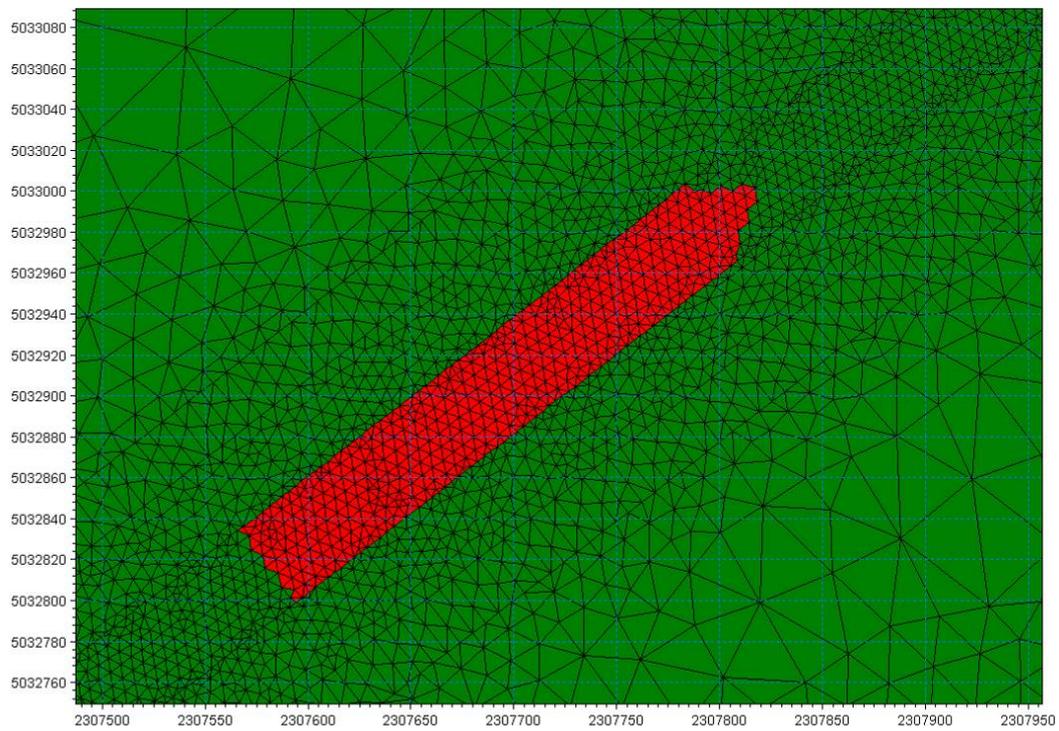


Figura 16 – Dettaglio della forma della sovrappressione durante il transito nel canale in progetto. È stata schematizzata come una nave con corpo rettangolare e prua triangolare.

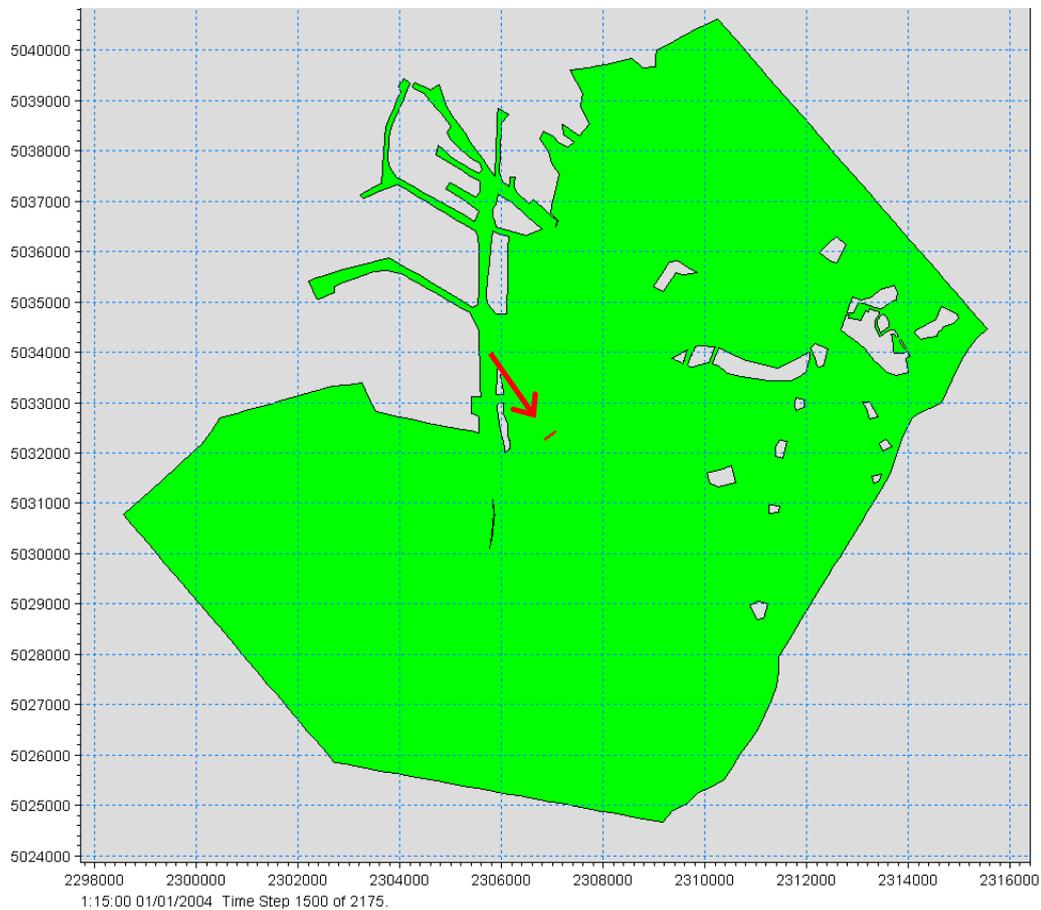


Figura 17 –Posizione della sovrappressione in un istante durante il transito nel canale in progetto.

6.5. MODALITÀ E PROGRAMMA PROVE

Sono state eseguite le stesse prove già effettuate per la prima configurazione e descritte nella relazione “*Studio degli effetti idrodinamici e morfologici del transito di natanti – R02 Relazione Tecnica Illustrativa - Prima configurazione*”, così da poter confrontare i risultati di quella alternativa di progetto con la seconda configurazione qui studiata.

I modelli idrodinamico, HD, e di trasporto solido, ST, in modalità morfologica, sono stati utilizzati in maniera accoppiata così che ad ogni passo di calcolo il

modello tenesse conto dei risultati ottenuti dai diversi moduli e, in particolare, aggiornasse le quote del fondo.

Il modulo idrodinamico è stato forzato con un campo di pressione variabile nel tempo e nello spazio tale da riprodurre la sagoma della nave in transito, mentre il modulo di trasporto solido si è interfacciato dinamicamente con il modulo idrodinamico.

Sono state riprodotti circa 1h50m di simulazione, comprensivi delle varie fasi descritte al paragrafo 6.1 (calata della nave, riposo, accelerazione, transito a velocità uniforme nella zona di interesse). La parte morfologica è iniziata circa a metà simulazione, in corrispondenza del momento in cui la nave ha raggiunto la velocità di regime ed è ormai prossima (a circa 1 km) all'imbocco del Canale Contorta - Sant'Angelo, per non tener conto di modifiche del fondo legate alla prima fase di messa a regime del modello e quindi non reali.

Sono state effettuate simulazioni considerando i seguenti diversi input:

- Configurazione:
 - stato di progetto con canale rettificato, largo 120 m, profondo 10.5 m;
- Livello idrico iniziale:
 - 0.00 m s.m.m.;
 - 0.50 m s.m.m.;
 - 1.00 m s.m.m.;
- Caratteristiche sedimento:
 - sabbia fine $d_{50}=0.180$ mm, granulometria uniforme;
- Caratteristiche della nave:
 - Larghezza 45 m;
 - Lunghezza alla linea di galleggiamento 300 m;
 - Pescaggio 9 m;
- Velocità e direzione di transito della nave:

- 6 nodi, in ingresso verso Venezia (direzione sud-nord, denominata “SN”);
- 6 nodi, in uscita da Venezia (direzione nord-sud, denominata “NS”).

Nella tabella seguente si riassume il programma prove con le relative condizioni testate; per ognuna è stata eseguita una simulazione accoppiando il modulo idrodinamico HD con il modulo di trasporto solido ST.

Nome prova	larghezza. Canale [m]	transito		Livello [m s.m.m.]	D ₅₀ [mm]
		Dir.	Vel. [kn]		
conf2_SN_6kn_liv0.00	120	SN	6	0.00	0.18
conf2_SN_6kn_liv0.50	120	SN	6	0.50	0.18
conf2_SN_6kn_liv1.00	120	SN	6	1.00	0.18
conf2_NS_6kn_liv0.00	120	NS	6	0.00	0.18
conf2_NS_6kn_liv0.50	120	NS	6	0.50	0.18
conf2_NS_6kn_liv1.00	120	NS	6	1.00	0.18

Tabella 1 – Elenco delle prove effettuate con modello sedimentologico.

7. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Nei paragrafi seguenti si riportano i risultati delle simulazioni come:

- serie temporale della elevazione di superficie per le alcuni punti significativi posti circa a metà canale (punti identificati con il numero “3” in Tabella 2, Figura 18 e Figura 19);
- mappe di elevazione di superficie per un istante rappresentativo del transito della nave nel canale;
- mappe della velocità della corrente per lo stesso istante;

- tabella con i valori estremi di sovrizzo del pelo libero per tutti i punti elencati in Tabella 2;
- mappa della variazione del livello del fondo a fine simulazione, sottolineando la tendenza all'erosione o al deposito.

Tra le diverse prove è stata mantenuta la stessa gradazione di colori per poter facilmente confrontare le mappe; in particolare, la scala di colori per l'elevazione di superficie è stata adattata in modo che al variare della prova (con diverso livello iniziale) uno stesso colore corrisponda allo stesso dislivello rispetto alla elevazione iniziale.

I punti di estrazione dei risultati (Tabella 2) sono stati posizionati con gli stessi criteri usati nella prima configurazione.

Tutti i punti denominati "centro alveo", "alveo nord" e "alveo sud" sono esattamente gli stessi usati anche nella precedente configurazione. Gli altri si trovano necessariamente traslati verso l'esterno a causa della maggior larghezza del canale nella nuova configurazione qui testata.

nome punto	X	Y
centro alveo 2	2305990.760	5031579.509
centro alveo 3	2307904.900	5033069.473
centro alveo 4	2309094.030	5033995.089
alveo nord 2	2305970.797	5031605.155
alveo nord 3	2307884.937	5033095.119
alveo nord 4	2309074.067	5034020.736
alveo sud 2	2306010.723	5031553.863
alveo sud 3	2307924.863	5033043.827
alveo sud 4	2309113.993	5033969.443
sponda nord 2	2305931.178	5031656.053
sponda nord 3	2307845.319	5033146.017
sponda nord 4	2309034.448	5034071.633
sponda sud 2	2306050.342	5031502.965
sponda sud 3	2307964.482	5032992.929
sponda sud 4	2309153.612	5033918.545
velma nord	2307735.975	5033286.490
bassof nord	2307634.332	5033417.069
velma sud	2308041.206	5032894.363
bassof sud	2308121.551	5032791.144

numero punto:	localizzazione in direzione longitudinale:
2	a 300 m a nord dell'imbocco del contorta nel canale malam-m.
3	a 300 m a nord della mezzeria del contorta rettificato
4	a 400 m a sud dell'imbocco del contorta nel canale giudecca

nome punto:	localizzazione in direzione trasversale al canale:
centro alveo	lungo l'asse del canale
alveo nord	a 10 m esternamente al "binario" verso nord
alveo sud	a 10 m esternamente al "binario" verso sud
sponda nord	a 10 m esternamente al limite sponda, verso nord
sponda sud	a 10 m esternamente al limite sponda, verso sud
velma	sopra la velma, in linea con il punto n 3
bassof	a 50 m oltre la velma, in linea con il punto n 3

Tabella 2 – Punti di estrazione delle serie temporali: nome assegnato al punto, sue coordinate, descrizione delle nome in base alla posizione rispetto al canale.

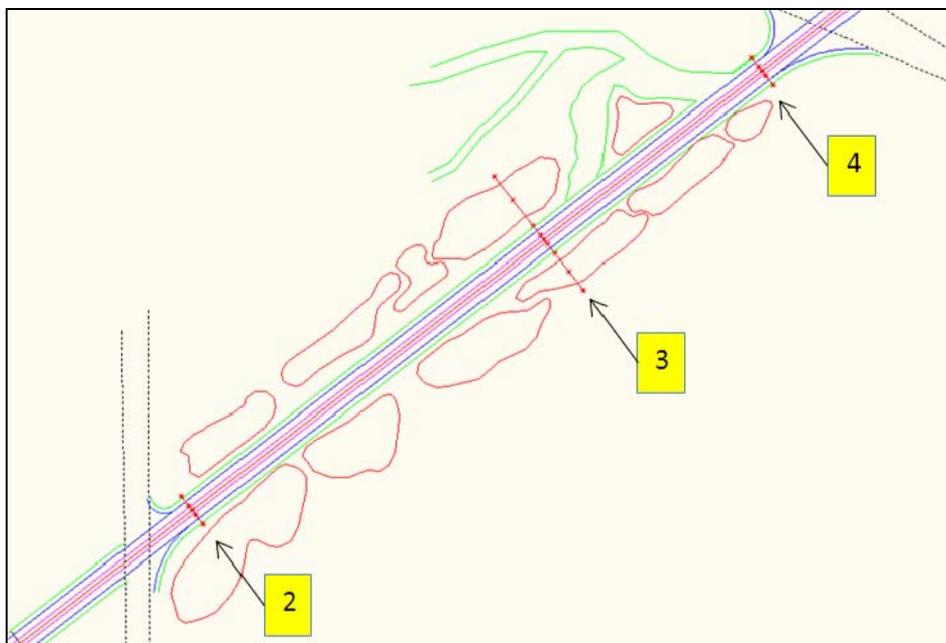


Figura 18 – Denominazione dei punti sulla base della loro posizione lungo il canale.

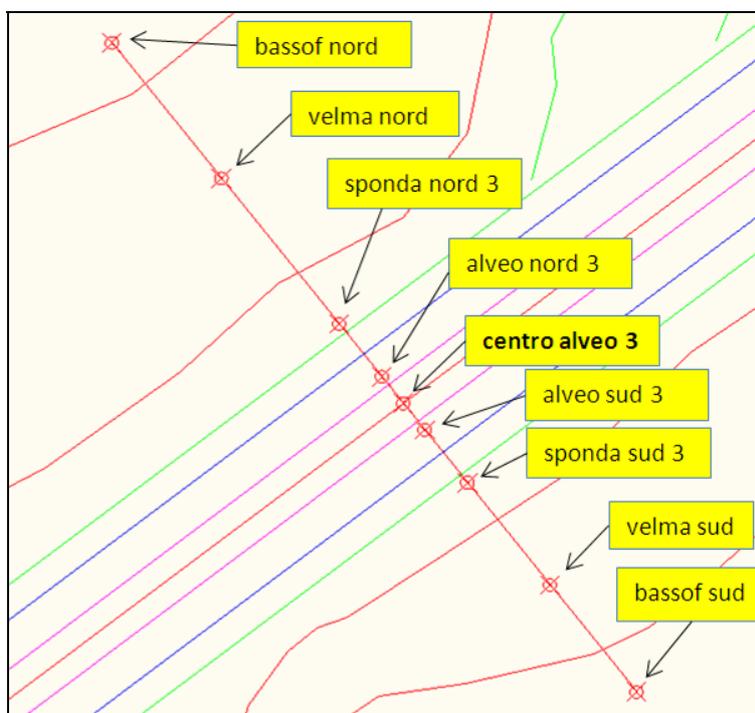
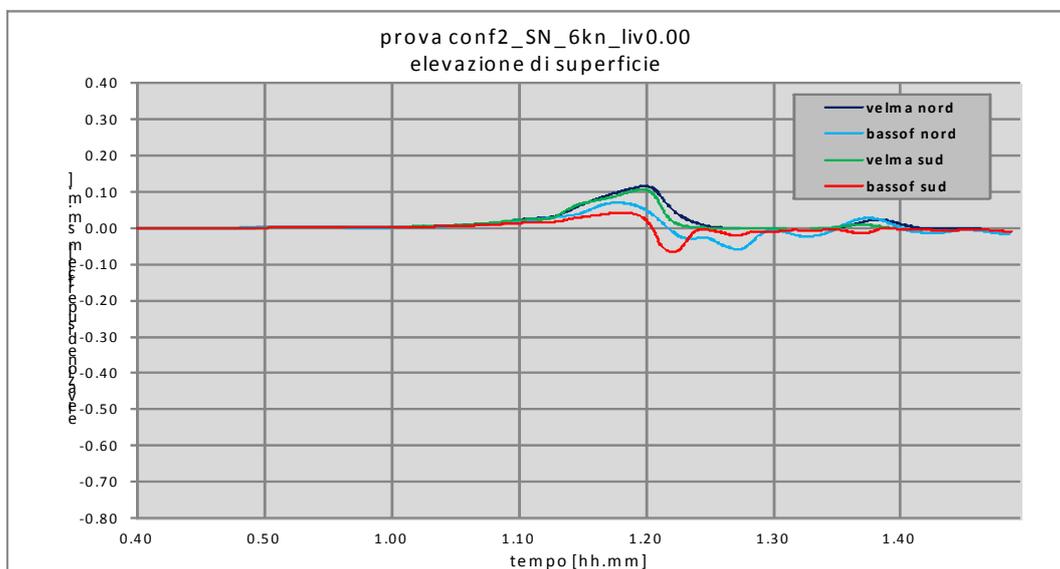
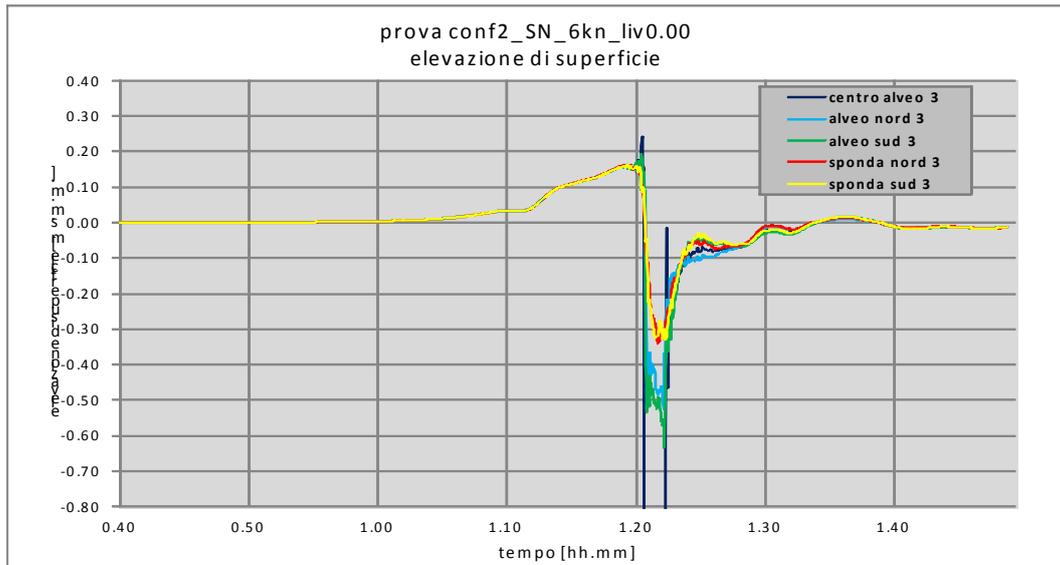


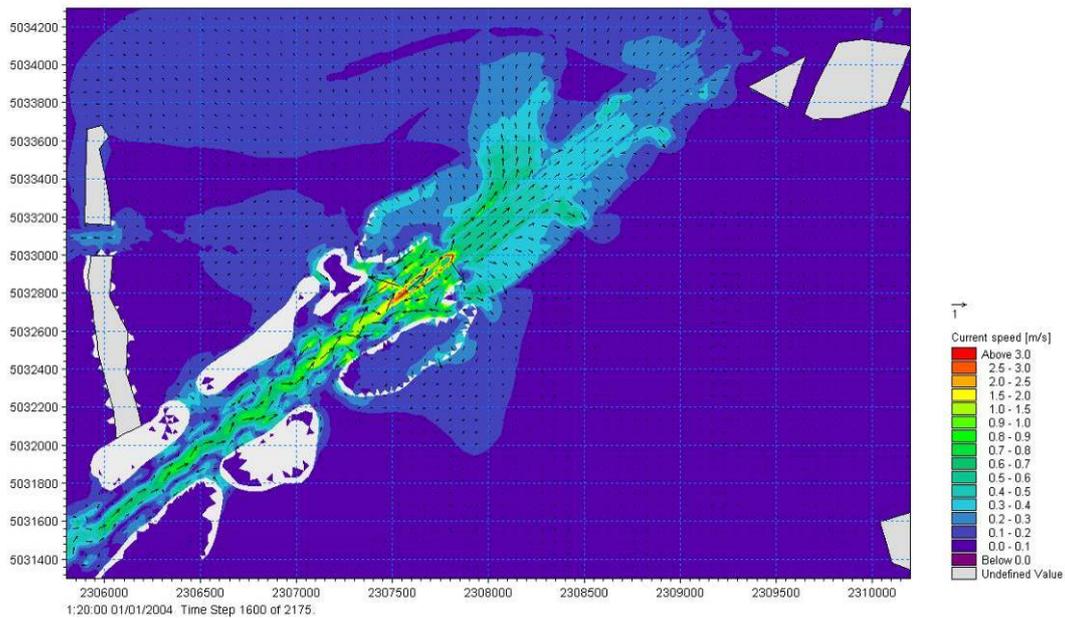
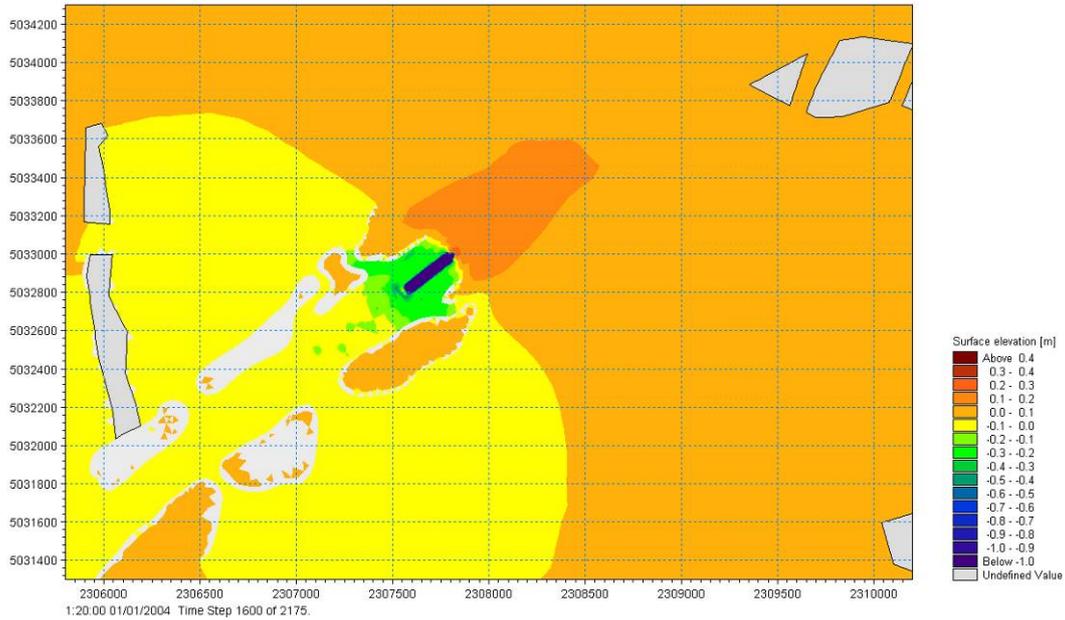
Figura 19 – Denominazione dei punti sulla base della loro posizione trasversale al canale. I punti in figura si riferiscono alla posizione longitudinale numero 3; per le posizioni 2 e 4 poste verso le estremità dei canali si ha la stessa denominazione dei punti ma mancano i punti “velma nord”, “bassof nord”, “velma sud”, “bassof sud”.

7.1. CONF2_SN_6KN_LIV0.00

Prova con nave in direzione sud-nord, velocità 6 kn, livello iniziale 0.00 m s.m.m.

7.1.1. Modulo idrodinamico





Le serie temporali dell'elevazione di superficie nei punti posti nel canale e lungo le sponde adiacenti mostrano un andamento tra loro simile: un sovrizzo del pelo libero che anticipa il passaggio del natante, il successivo abbassamento concomitante al passaggio dello scafo e un successivo ritorno alle condizioni di

pelo libero indisturbato dopo circa 15'-20' (già dopo una decina di minuti comunque il pelo libero risulta abbassato di pochi centimetri).

Tralasciando il dato di abbassamento massimo rilevato in centro alveo, in cui transita lo scafo e quindi valore fittizio corrispondente al pescaggio della nave e non reale abbassamento del pelo libero, si rileva nelle zone di alveo adiacente al binario di scorrimento della nave un abbassamento massimo di quasi 80 cm, valore che va smorzandosi allontanandosi dal canale. Lungo le sponde infatti, nella zona a quota -1.50 m s.m.m., l'abbassamento massimo è di circa 35 cm.

Con tali valori, le velme presentano quindi momenti di emersione, e il bassofondo al di là di esse viene abbastanza riparato, presentando infatti valori di abbassamento massimo minori di 10 cm.

I sovralti massimi, di quasi 30 cm, si hanno in alveo qualche istante prima del passaggio della nave; anch'essi vanno smorzandosi allontanandosi dal canale.

Sopra le velme il sovralto è di poco superiore ai 10 cm e nel bassofondo esterno ad esse è minore dei 10 cm.

Come si nota da questi valori, nonché dalla mappa delle elevazioni di superficie, le modifiche del pelo libero sono per lo più contenute nell'area compresa tra canale e velme e quelle più intense sono comprese in circa 200-300 m di fronte la nave e dietro la nave.

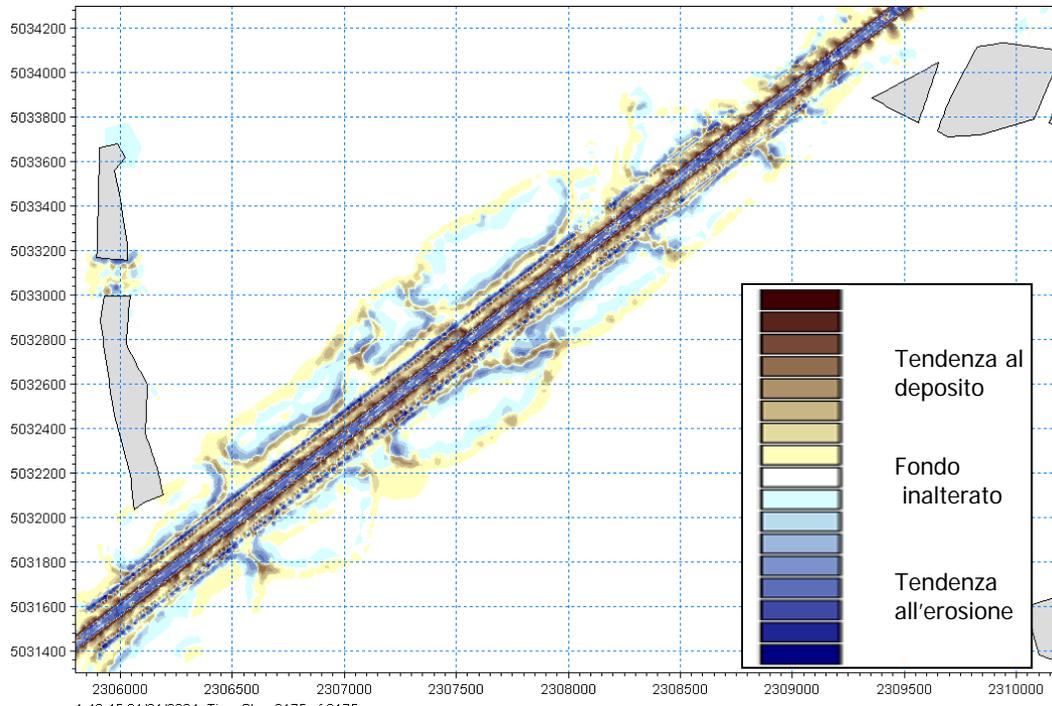
Anche per quanto riguarda l'andamento del campo di corrente, si nota come le perturbazioni maggiori siano localizzate nel canale, mentre al di fuori delle velme le velocità siano basse. L'andamento della corrente attorno alla nave mostra una scia dietro la poppa, nel verso del transito, e una corrente di ritorno esternamente ad essa, lungo alveo e sponde.

La superficie delle velme e i varchi tra esse nel momento del passaggio della nave vengono interessati da una certa corrente in uscita verso la zona di bassofondo a causa del sovralto che anticipa la nave, corrente che poi quasi scompare dopo il transito del natante.

	Conf2_SN_6kn_liv0.00			
	livello [m s.m.m.]		variazione livello [m]	
	Minimo	Massimo	abbassamento	sovrizzo
centro alveo 2	-	0.29	-	0.29
centro alveo 3	-	0.24	-	0.24
centro alveo 4	-	0.21	-	0.21
alveo nord 2	-0.42	0.23	0.42	0.23
alveo nord 3	-0.53	0.19	0.53	0.19
alveo nord 4	-0.77	0.14	0.77	0.14
alveo sud 2	-0.43	0.24	0.43	0.24
alveo sud 3	-0.63	0.19	0.63	0.19
alveo sud 4	-0.53	0.16	0.53	0.16
sponda nord 2	-0.19	0.12	0.19	0.12
sponda nord 3	-0.34	0.16	0.34	0.16
sponda nord 4	-0.20	0.07	0.20	0.07
sponda sud 2	-0.13	0.14	0.13	0.14
sponda sud 3	-0.33	0.16	0.33	0.16
sponda sud 4	-0.22	0.06	0.22	0.06
velma nord	0.00	0.12	0.00	0.12
bassof nord	-0.06	0.07	0.06	0.07
velma sud	0.00	0.11	0.00	0.11
bassof sud	-0.07	0.04	0.07	0.04

Tabella 3 – Prova conf2_SN_6kn_liv0.00. Valori estremi del pelo libero e della sua variazione.

7.1.2. Modulo morfologico



La mappa delle zone in deposito e in erosione a fine simulazione mostra come le variazioni di livello del fondo dovute al passaggio di natanti siano totalmente contenute nella zona interna alle velme, non comportando modifiche nei bassofondi esterni. Questo sottolinea la funzione protettiva svolta dalle velme.

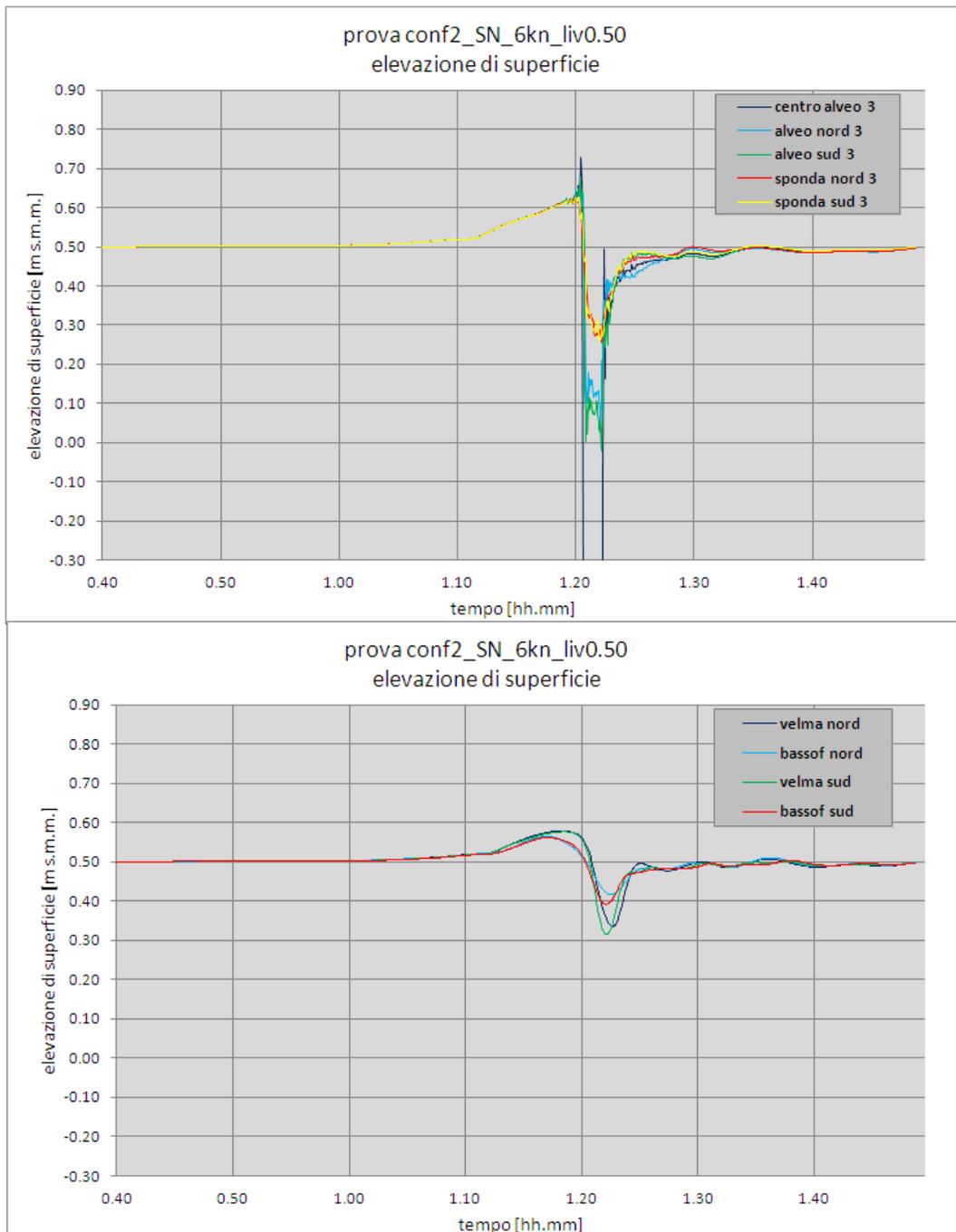
Le zone a più intensa modifica sono localizzate lungo il canale: appaiono in erosione nella zona di passaggio dello scafo e in deposito nelle zone esterne. Una tendenza erosiva si nota poi in una stretta fascia di sponda dove si ha il cambio di pendenza tra i lati del canale e il bassofondo.

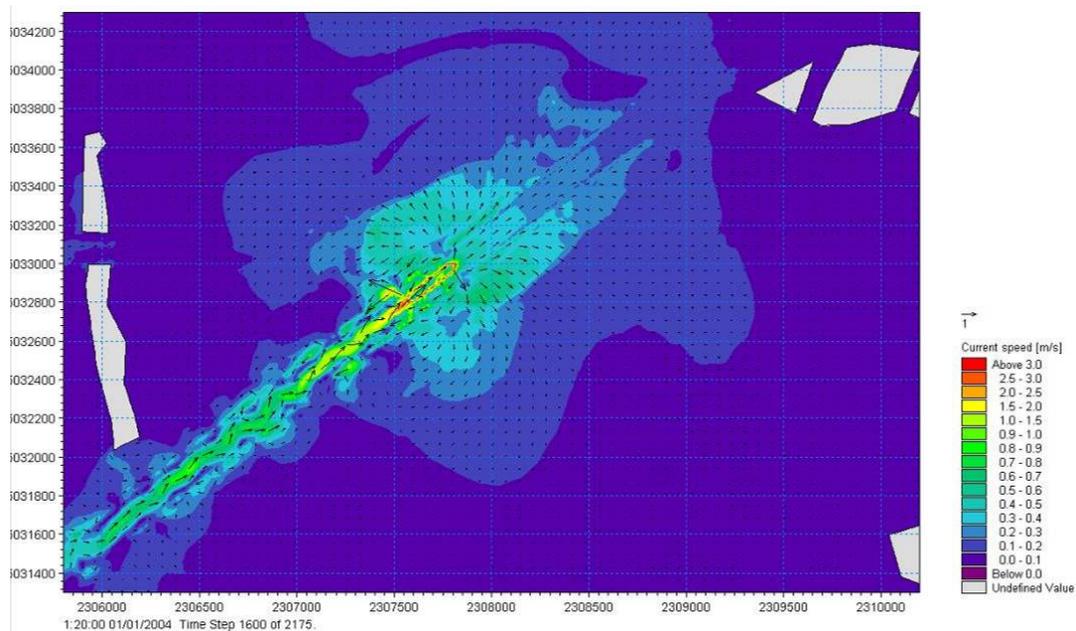
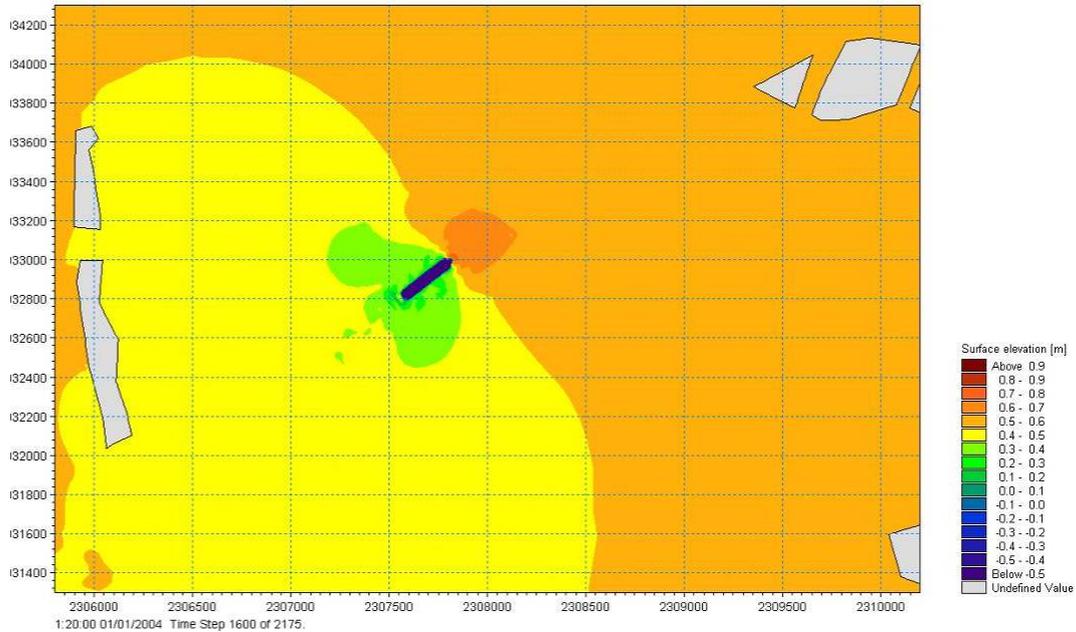
Anche le velme sono interessate da modifiche morfologiche molto leggere, con tendenze erosive ai loro bordi e depositi attorno ad esse e nei varchi verso il bassofondo.

7.2. CONF2_SN_6KN_LIV0.50

Prova con nave in direzione sud-nord, velocità 6 kn, livello iniziale 0.50 m s.m.m.

7.2.1. Modulo idrodinamico





Le considerazioni riguardo questa prova sono del tutto simili a quanto già osservato nella prova precedente; si evidenzia però una generale attenuazione dei fenomeni connessi al transito della nave.

Le serie temporali dell'elevazione di superficie nei punti posti nel canale e lungo le sponde adiacenti mostrano un andamento tra loro simile: un sovrizzo del pelo libero che anticipa il passaggio del natante, il successivo abbassamento concomitante al passaggio dello scafo e un successivo ritorno alle condizioni di pelo libero indisturbato dopo circa 10'.

Si rileva nelle zone di alveo adiacente al binario di scorrimento della nave un abbassamento massimo di circa 75 cm, valore che va smorzandosi allontanandosi dal canale. Lungo le sponde infatti, nella zona a quota -1.50 m s.m.m., l'abbassamento massimo è di circa 25 cm.

Rispetto alla prova precedente, le velme restano sempre sommerse e il bassofondo al di là di esse viene comunque abbastanza riparato, presentando valori di abbassamento massimo di circa 10 cm.

I sovrizzi massimi, di circa 25 cm, si hanno in alveo qualche istante prima del passaggio della nave; anch'essi vanno smorzandosi allontanandosi dal canale.

Sopra le velme il sovrizzo è di quasi 20 cm e nel bassofondo esterno ad esse è di circa 10 cm.

Come si nota da questi valori, nonché dalla mappa delle elevazioni di superficie, le variazioni maggiori del pelo libero sono ancora contenute nell'area compresa tra canale e velme e rispetto alla prova precedente risultano meno intense e con uno smorzamento più evidente allontanandosi dalla nave.

Per quanto riguarda l'andamento del campo di corrente, si nota come le perturbazioni maggiori siano localizzate nel canale, mentre al di fuori delle velme le velocità siano basse. L'andamento della corrente attorno alla nave mostra una scia dietro la poppa, nel verso del transito, e una corrente di ritorno esternamente ad essa, lungo alveo e sponde.

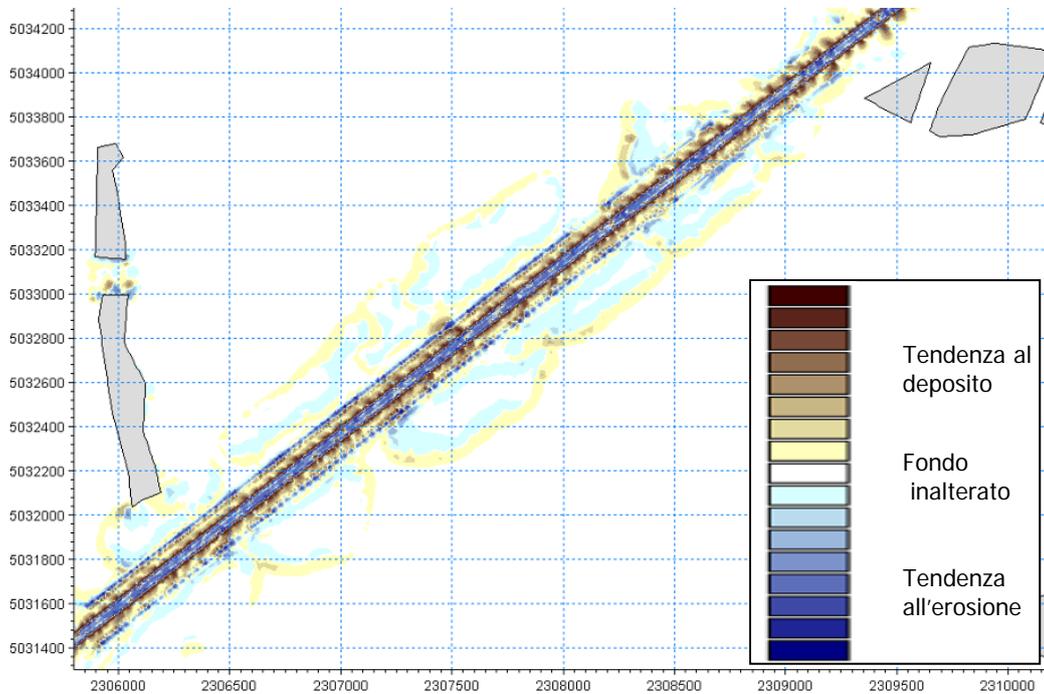
Anche la superficie delle velme e i varchi tra esse nel momento del passaggio della nave vengono interessati da una certa corrente in uscita verso la zona di bassofondo a causa del sovrizzo che anticipa la nave, corrente che poi quasi scompare dopo il transito del natante.

Le velocità quindi appaiono del tutto simili alla prova con livello 0.00 m s.m.m. ma meno intense e interessanti uno spazio meno esteso attorno alla nave.

	Conf2_SN_6kn_liv0.50			
	livello [m s.m.m.]		variazione livello [m]	
	Minimo	Massimo	abbassamento	sovrizzo
centro alveo 2	-	0.76	-	0.26
centro alveo 3	-	0.73	-	0.23
centro alveo 4	-	0.71	-	0.21
alveo nord 2	0.12	0.71	0.38	0.21
alveo nord 3	0.02	0.67	0.48	0.17
alveo nord 4	-0.24	0.64	0.74	0.14
alveo sud 2	0.10	0.72	0.40	0.22
alveo sud 3	-0.02	0.68	0.52	0.18
alveo sud 4	0.00	0.66	0.50	0.16
sponda nord 2	0.34	0.60	0.16	0.10
sponda nord 3	0.25	0.63	0.25	0.13
sponda nord 4	0.32	0.56	0.18	0.06
sponda sud 2	0.38	0.61	0.12	0.11
sponda sud 3	0.26	0.63	0.24	0.13
sponda sud 4	0.28	0.57	0.22	0.07
velma nord	0.33	0.58	0.17	0.08
bassof nord	0.42	0.56	0.08	0.06
velma sud	0.32	0.58	0.18	0.08
bassof sud	0.39	0.56	0.11	0.06

Tabella 4 - Prova conf2_SN_6kn_liv0.50. Valori estremi del pelo libero e della sua variazione.

7.2.2. Modulo morfologico



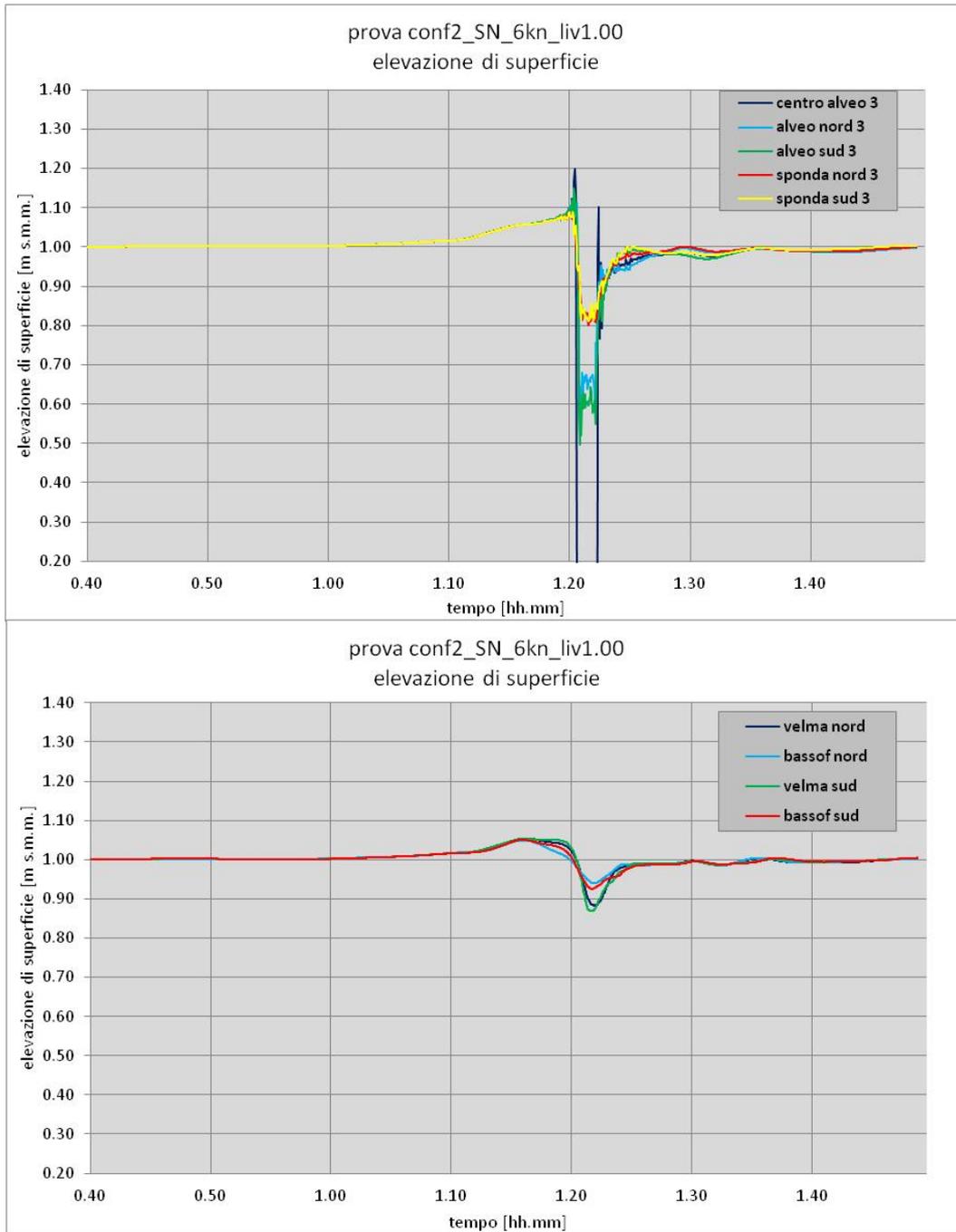
La mappa delle zone in deposito e in erosione a fine simulazione mostra una situazione assolutamente analoga a quanto rilevato nella prova precedente con livello iniziale minore, con variazioni di livello del fondo contenute nella zona interna alle velme e zone a più intensa modifica concentrate nel canale.

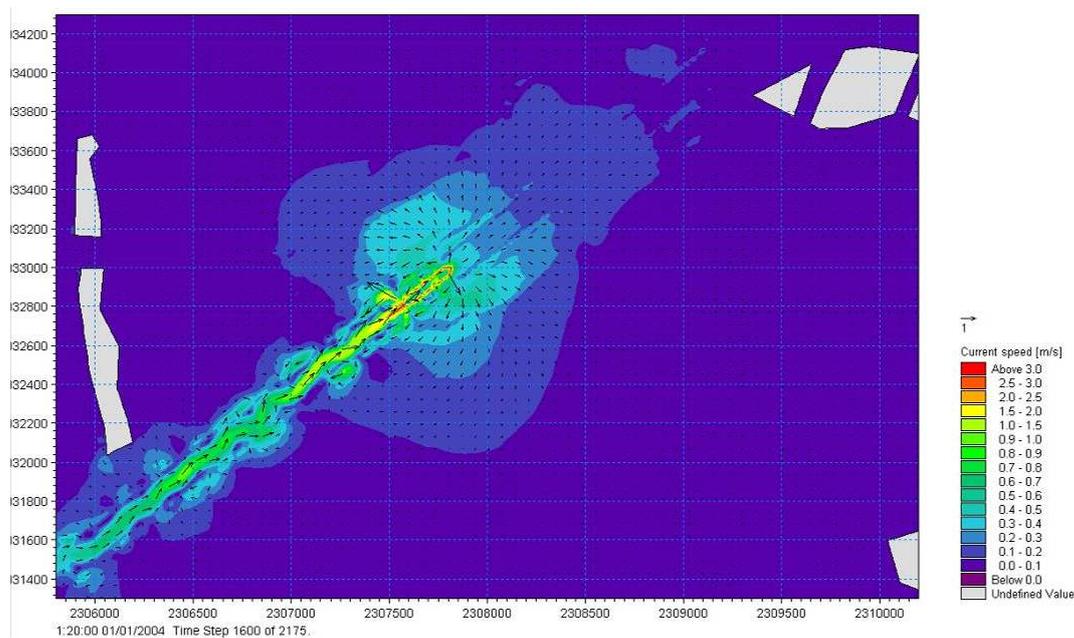
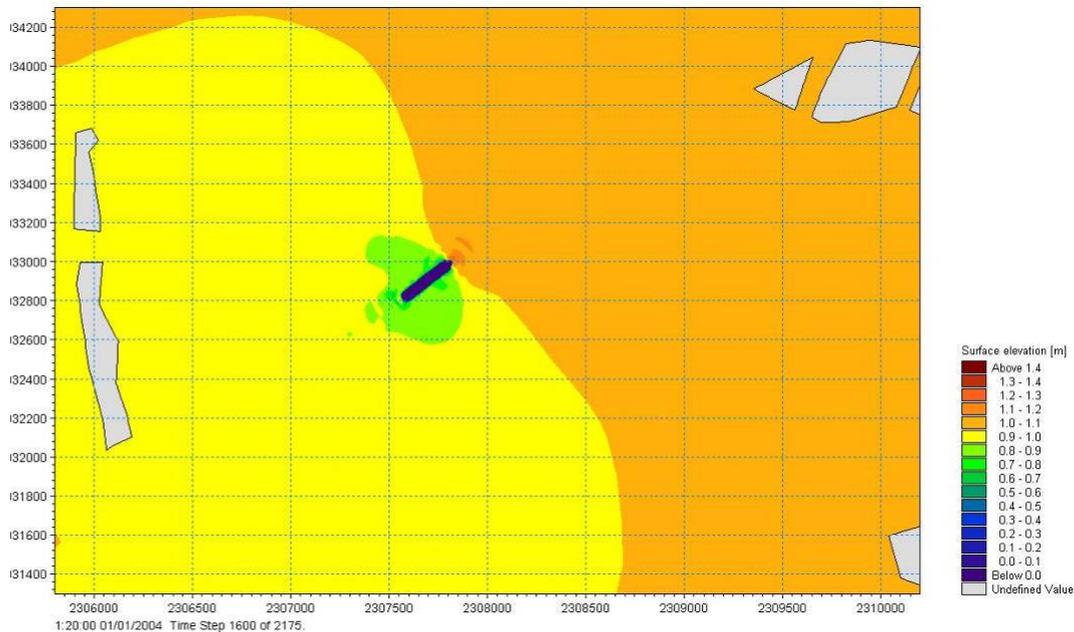
Si ha la stessa localizzazione delle zone a tendenza erosiva e di quelle in deposito, ma per tutte rispetto alla prova precedente si nota una attenuazione dell'intensità del fenomeno. In particolare, esternamente al canale le modifiche morfologiche risultano molto attenuate, con quindi un minor interessamento della zona delle velme.

7.3. CONF2_SN_6KN_LIV1.00

Prova con nave in direzione sud-nord, velocità 6 kn, livello iniziale 1.00 m s.m.m.

7.3.1. Modulo idrodinamico





Le considerazioni riguardo questa prova sono del tutto simili a quanto già osservato nella prova precedente; si evidenzia una generale attenuazione dei fenomeni connessi al transito della nave.

Le serie temporali dell'elevazione di superficie nei punti posti nel canale e lungo le sponde adiacenti mostrano un andamento tra loro simile: un sovrizzo del pelo

libero che anticipa il passaggio del natante, il successivo abbassamento concomitante al passaggio dello scafo e un successivo ritorno alle condizioni di pelo libero indisturbato dopo circa 10'.

Si rileva nelle zone di alveo adiacente al binario di scorrimento della nave un abbassamento massimo di circa 70 cm, valore che va smorzandosi allontanandosi dal canale. Lungo le sponde infatti, nella zona a quota -1.50 m s.m.m., l'abbassamento massimo è di circa 20 cm.

Le velme restano sempre sommerse e il bassofondo al di là di esse viene comunque abbastanza riparato, presentando valori di abbassamento massimo di inferiori ai 10 cm.

I sovralti massimi, attorno ai 25 cm, si hanno in alveo qualche istante prima del passaggio della nave; anch'essi vanno smorzandosi allontanandosi dal canale.

Sopra le velme e nel bassofondo esterno ad esse il sovralto è di circa 5 cm.

Come si nota da questi valori, nonché dalla mappa delle elevazioni di superficie, le modifiche del pelo libero interessano un'area di minor estensione rispetto alla prova precedente e risultano meno intense.

Anche per quanto riguarda l'andamento del campo di corrente, si nota come le perturbazioni maggiori siano localizzate nel canale, mentre al di fuori delle velme le velocità siano basse. L'andamento della corrente attorno alla nave mostra una scia dietro la poppa, nel verso del transito, e una corrente di ritorno esternamente ad essa, lungo alveo e sponde.

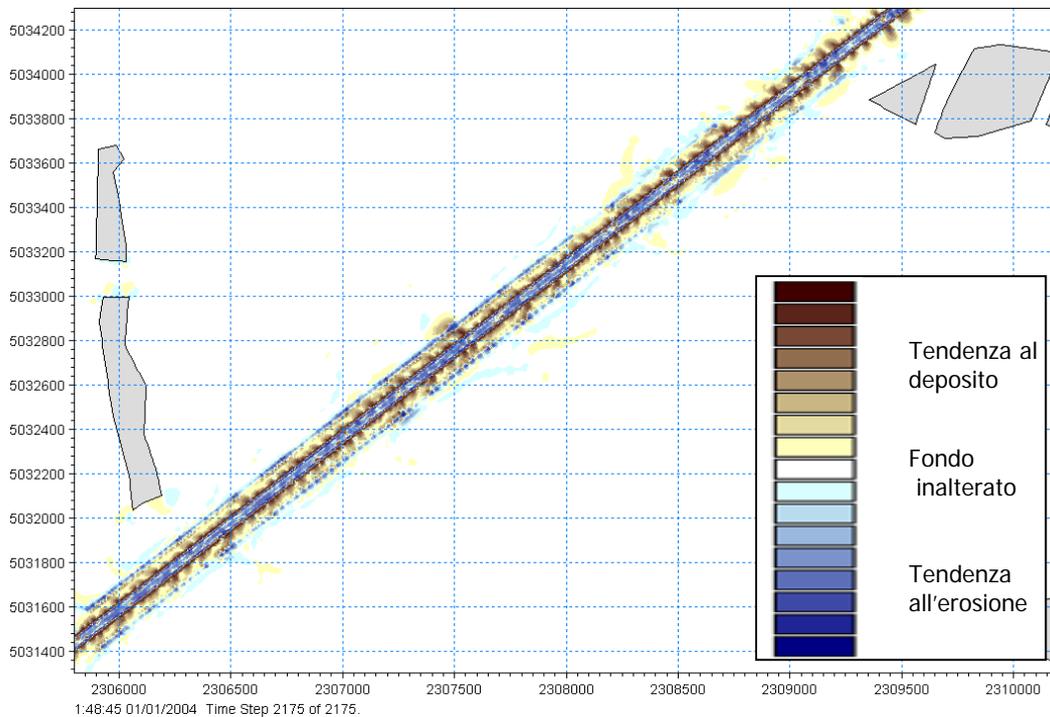
La superficie delle velme e i varchi tra esse nel momento del passaggio della nave vengono interessati da una certa corrente in uscita verso la zona di bassofondo a causa del sovralto che anticipa la nave, corrente che poi quasi scompare dopo il transito del natante.

Le velocità quindi presentano una distribuzione analoga a quella nella prova con livello 0.00 m s.m.m. ma sono meno intense e interessano uno spazio meno esteso attorno alla nave.

	Conf2_SN_6kn_liv1.00			
	livello [m s.m.m.]		variazione livello [m]	
	Minimo	Massimo	abbassamento	sovrizzo
centro alveo 2	-	1.24	-	0.24
centro alveo 3	-	1.20	-	0.20
centro alveo 4	-	1.21	-	0.21
alveo nord 2	0.65	1.20	0.35	0.20
alveo nord 3	0.51	1.14	0.49	0.14
alveo nord 4	0.28	1.15	0.72	0.15
alveo sud 2	0.61	1.20	0.39	0.20
alveo sud 3	0.50	1.15	0.50	0.15
alveo sud 4	0.53	1.16	0.47	0.16
sponda nord 2	0.85	1.09	0.15	0.09
sponda nord 3	0.80	1.09	0.20	0.09
sponda nord 4	0.86	1.07	0.14	0.07
sponda sud 2	0.89	1.10	0.11	0.10
sponda sud 3	0.81	1.09	0.19	0.09
sponda sud 4	0.81	1.07	0.19	0.07
velma nord	0.88	1.05	0.12	0.05
bassof nord	0.94	1.05	0.06	0.05
velma sud	0.87	1.05	0.13	0.05
bassof sud	0.93	1.05	0.07	0.05

Tabella 5 - Prova conf2_SN_6kn_liv1.00. Valori estremi del pelo libero e della sua variazione.

7.3.2. Modulo morfologico



La mappa delle zone in deposito e in erosione a fine simulazione mostra una situazione assolutamente simile a quanto rilevato nella prova precedente con livello iniziale minore, con variazioni di livello del fondo contenute nella zona interna alle velme e zone a più intensa modifica concentrate nel canale.

Si ha la stessa localizzazione delle zone a tendenza erosiva e di quelle in deposito, ma per tutte rispetto alla prova precedente si nota una attenuazione dell'intensità del fenomeno. In particolare si nota una forte attenuazione delle variazioni morfologiche delle velme e dei varchi, che qui appaiono quasi non interessati da modifiche batimetriche.

7.4. CONFRONTO PROVE SN

Dal confronto delle tre prove con la nave in transito in direzione Sud – Nord, si nota per tutte un simile andamento sia delle variazioni del pelo libero che del campo di corrente che delle variazioni morfologiche.

Si ha una generale attenuazione dell'intensità dei fenomeni e una diminuzione delle aree interessate dalle perturbazioni all'aumentare della quota iniziale del pelo libero. Il passaggio dei natanti avrà quindi generalmente un impatto maggiore sulla idro-morfodinamica locale nei momenti di minimo mareale.

Per tutte le prove comunque risulta che le modifiche sono contenute nella zona compresa tra velme e canale, con un debole interessamento delle aree esterne.

Nei grafici e nelle tabelle seguenti si mostrano i valori massimi di variazione del pelo libero rilevati per i punti confrontati tra le diverse prove.

n.	nome	Conf2_SN_6kn_liv0.00		Conf2_SN_6kn_liv0.50		Conf2_SN_6kn_liv1.00	
		abbassamento [m]	sovrizzo [m]	abbassamento [m]	sovrizzo [m]	abbassamento [m]	sovrizzo [m]
1	centro alveo 2	-	0.29	-	0.26	-	0.24
2	centro alveo 3	-	0.24	-	0.23	-	0.20
3	centro alveo 4	-	0.21	-	0.21	-	0.21
4	alveo nord 2	0.42	0.23	0.38	0.21	0.35	0.20
5	alveo nord 3	0.53	0.19	0.48	0.17	0.49	0.14
6	alveo nord 4	0.77	0.14	0.74	0.14	0.72	0.15
7	alveo sud 2	0.43	0.24	0.40	0.22	0.39	0.20
8	alveo sud 3	0.63	0.19	0.52	0.18	0.50	0.15
9	alveo sud 4	0.53	0.16	0.50	0.16	0.47	0.16
10	sponda nord 2	0.19	0.12	0.16	0.10	0.15	0.09
11	sponda nord 3	0.34	0.16	0.25	0.13	0.20	0.09
12	sponda nord 4	0.20	0.07	0.18	0.06	0.14	0.07
13	sponda sud 2	0.13	0.14	0.12	0.11	0.11	0.10
14	sponda sud 3	0.33	0.16	0.24	0.13	0.19	0.09
15	sponda sud 4	0.22	0.06	0.22	0.07	0.19	0.07
16	velma nord	0.00	0.12	0.17	0.08	0.12	0.05
17	bassof nord	0.06	0.07	0.08	0.06	0.06	0.05
18	velma sud	0.00	0.11	0.18	0.08	0.13	0.05
19	bassof sud	0.07	0.04	0.11	0.06	0.07	0.05

Tabella 6 – Seconda configurazione. Confronto degli abbassamenti e sovrizzi massimi in diversi punti rilevati nelle tre prove con nave in transito in direzione Sud – Nord. Il numero progressivo serve per identificare i vari punti nei grafici successivi.

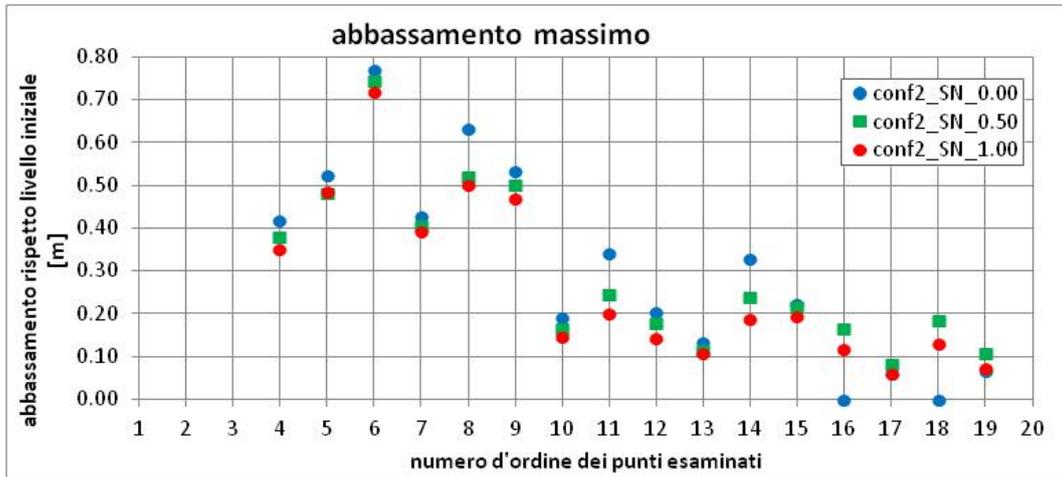


Figura 20 – Seconda configurazione. Confronto degli abbassamenti massimi in diversi punti rilevati nelle tre prove con nave in transito in direzione Sud – Nord. Il numero progressivo si riferisce ai punti presenti in Tabella 6.

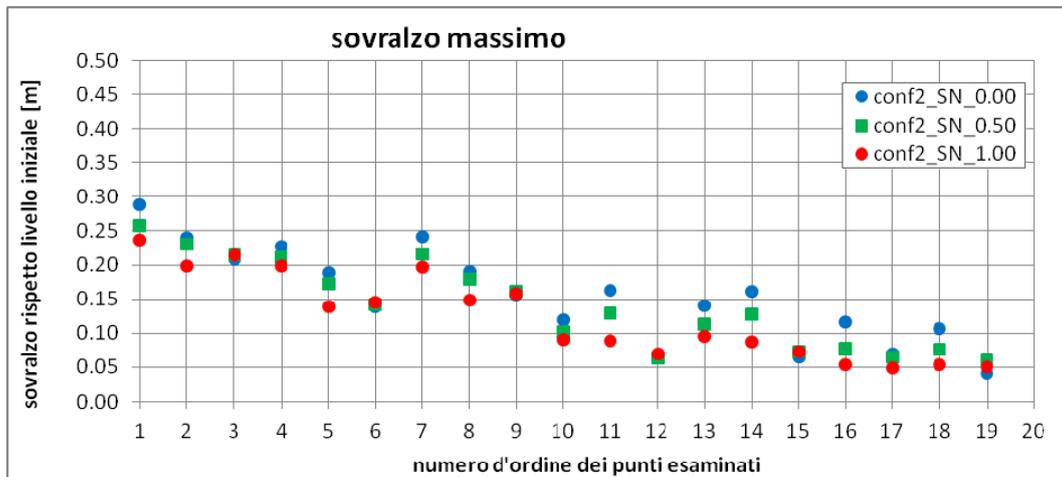
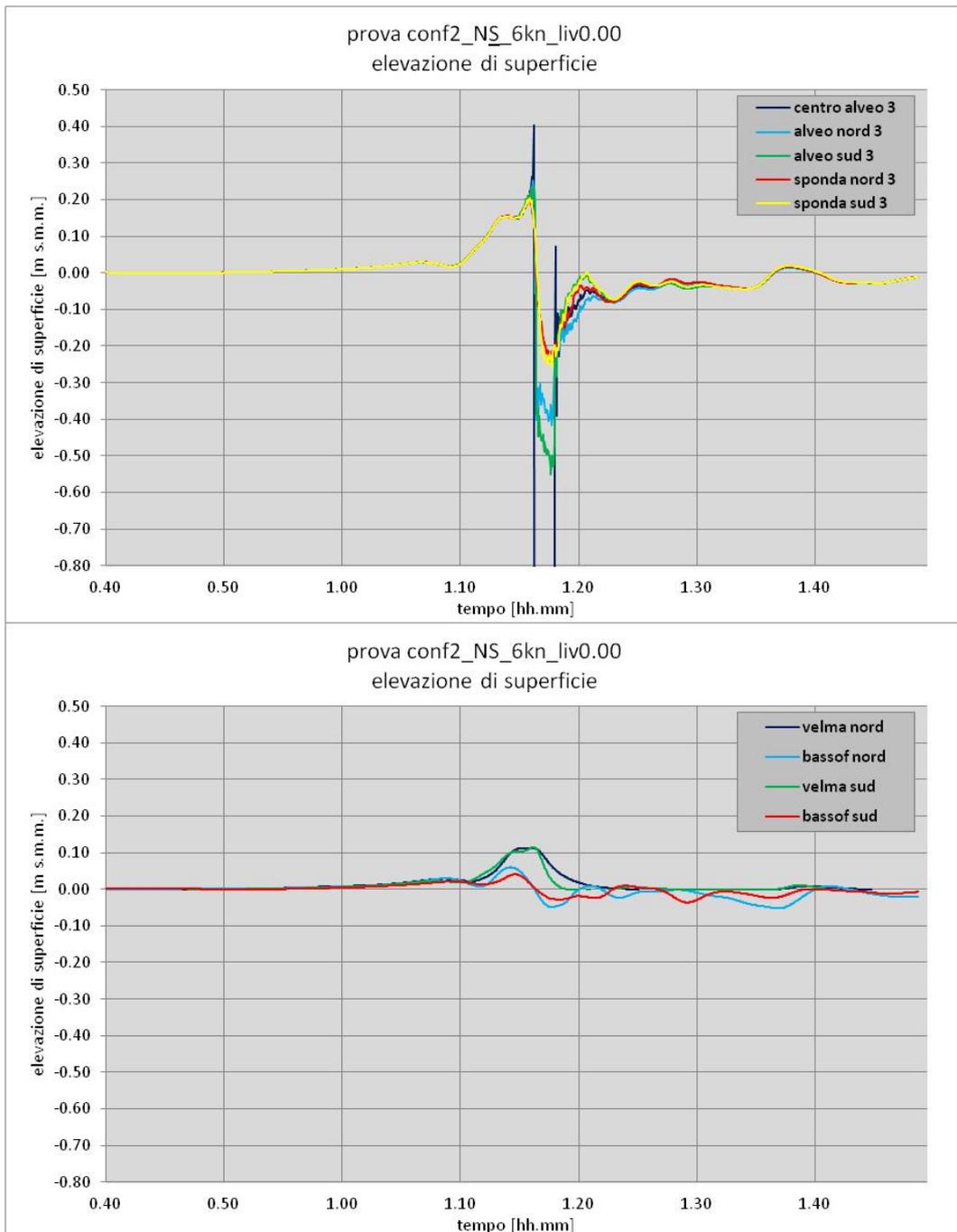


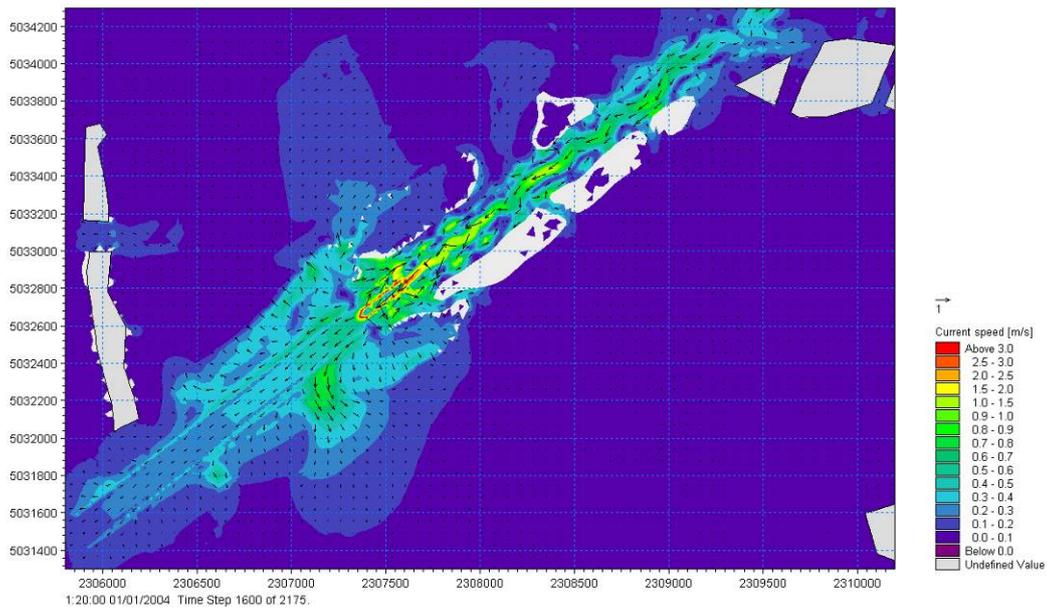
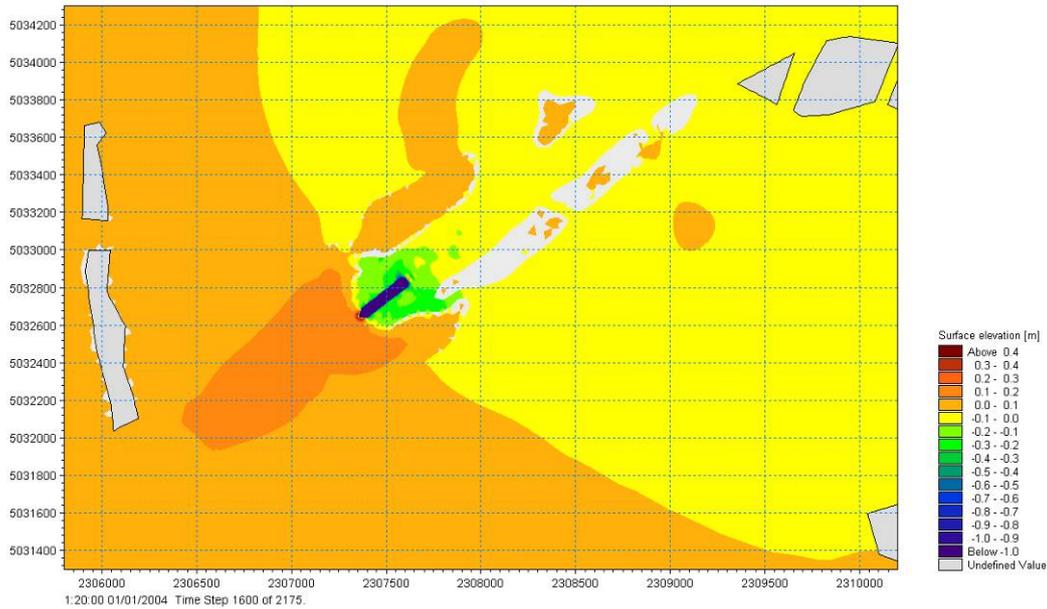
Figura 21 - Seconda configurazione. Confronto dei sovrizzi massimi in diversi punti rilevati nelle tre prove con nave in transito in direzione Sud – Nord. Il numero progressivo si riferisce ai punti presenti in Tabella 6.

7.5. CONF2_NS_6KN_LIV0.00

Prova con nave in direzione nord-sud, velocità 6 kn, livello iniziale 0.00 m s.m.m.

7.5.1. Modulo idrodinamico





Le serie temporali dell'elevazione di superficie nei punti posti nel canale e lungo le sponde adiacenti mostrano lo stesso andamento visto nelle prove precedenti: un sovrizzo del pelo libero che anticipa il passaggio del natante, il successivo abbassamento concomitante al passaggio dello scafo e un successivo ritorno alle

condizioni di pelo libero indisturbato dopo circa 15'-20' (già dopo una decina di minuti comunque il pelo libero risulta abbassato di pochi centimetri).

Nelle zone di alveo adiacente al binario di scorrimento della nave si rileva un abbassamento massimo di circa 60 cm, valore che va smorzandosi allontanandosi dal canale. Lungo le sponde infatti, nella zona a quota -1.50 m s.m.m., l'abbassamento massimo è di circa 25 cm.

Con tali valori, le velme presentano quindi momenti di emersione e il bassofondo al di là di esse viene abbastanza riparato, presentando infatti valori di abbassamento massimo attorno ai 5 cm.

I sovralti massimi, di circa 40 cm in centro alveo e circa 25 cm in alveo adiacente al "binario", si hanno qualche istante prima del passaggio della nave; anch'essi vanno smorzandosi allontanandosi dal canale.

Sopra le velme il sovralto è minore di 15 cm, e nel bassofondo esterno ad esse è minore dei 10 cm.

Come si nota da questi valori, nonché dalla mappa delle elevazioni di superficie, le modifiche del pelo libero sono per lo più circoscritte all'area compresa tra canale e velme e quelle più intense sono comprese in circa 200-300 m di fronte e dietro la nave.

Anche per quanto riguarda l'andamento del campo di corrente, si nota come le perturbazioni maggiori siano localizzate nel canale, mentre al di fuori delle velme le velocità siano basse. L'andamento della corrente attorno alla nave mostra una scia dietro la poppa, nel verso del transito, e una corrente di ritorno esternamente ad essa, lungo alveo e sponde.

La superficie delle velme e i varchi tra esse nel momento del passaggio della nave vengono interessati da una certa corrente in uscita verso la zona di bassofondo a causa del sovralto che anticipa la nave, corrente che poi quasi scompare dopo il transito del natante.

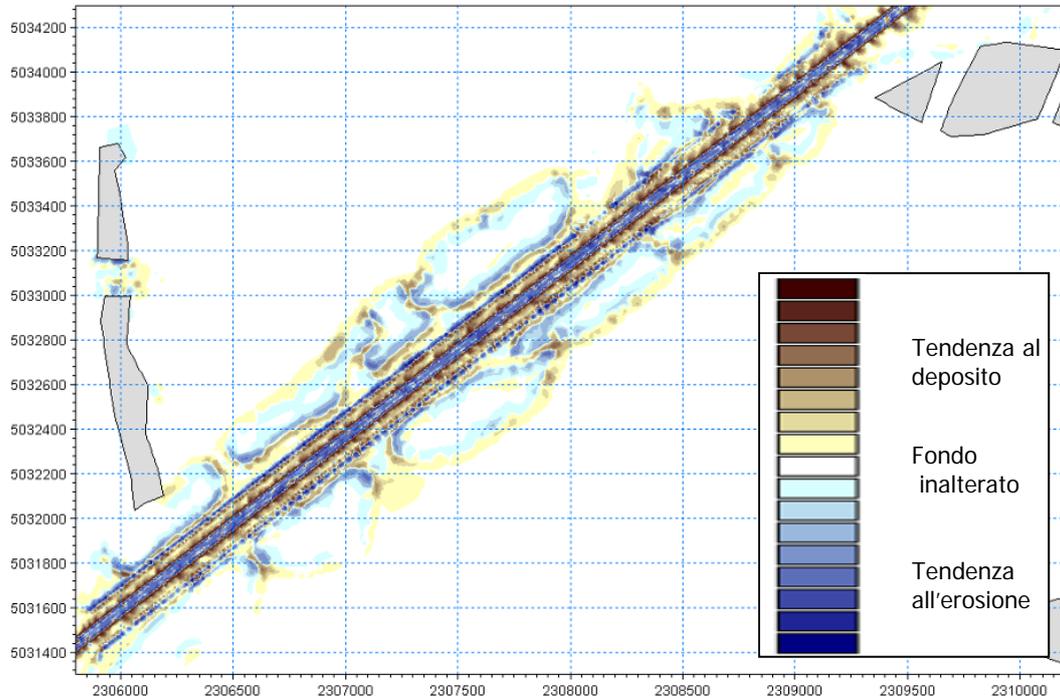
I risultati appaiono quindi del tutto simili a quanto ottenuto nelle simulazioni con nave in transito in direzione sud - nord. Rispetto a questa il sovralto che anticipa

l'arrivo della nave è leggermente maggiore (di circa 5-10 cm a seconda del punto), probabilmente perché in direzione sud - nord il sovrizzo viaggia verso una zona più aperta (in particolare, nell'ultimo tratto del nuovo canale prima dell'immissione nel canale della Giudecca, sul lato nord) mentre in direzione nord - sud il nuovo canale appare molto chiuso tra le velme su entrambi i lati e prima dell'immissione nel canale S.Leonardo – Marghera sono presenti anche delle barene.

	Conf2_NS_6kn_liv0.00			
	livello [m s.m.m.]		variazione livello [m]	
	Minimo	Massimo	abbassamento	sovrizzo
centro alveo 2	-	0.17	-	0.17
centro alveo 3	-	0.40	-	0.40
centro alveo 4	-	0.31	-	0.31
alveo nord 2	-0.42	0.10	0.42	0.10
alveo nord 3	-0.42	0.25	0.42	0.25
alveo nord 4	-0.60	0.21	0.60	0.21
alveo sud 2	-0.51	0.12	0.51	0.12
alveo sud 3	-0.55	0.24	0.55	0.24
alveo sud 4	-0.49	0.21	0.49	0.21
sponda nord 2	-0.24	0.07	0.24	0.07
sponda nord 3	-0.24	0.20	0.24	0.20
sponda nord 4	-0.13	0.12	0.13	0.12
sponda sud 2	-0.18	0.09	0.18	0.09
sponda sud 3	-0.26	0.20	0.26	0.20
sponda sud 4	-0.20	0.14	0.20	0.14
velma nord	0.00	0.11	0.00	0.11
bassof nord	-0.05	0.06	0.05	0.06
velma sud	0.00	0.12	0.00	0.12
bassof sud	-0.04	0.04	0.04	0.04

Tabella 7 - Prova conf2_NS_6kn_liv0.00. Valori estremi del pelo libero e della sua variazione.

7.5.2. Modulo morfologico



La situazione morfologica a fine simulazione è assolutamente affine a quanto accadeva con la nave in direzione sud-nord: le variazioni di livello del fondo dovute al passaggio di natanti sono totalmente contenute nella zona interna alle velme, non comportando modifiche nei bassofondi esterni. Questo sottolinea la funzione protettiva svolta dalle velme.

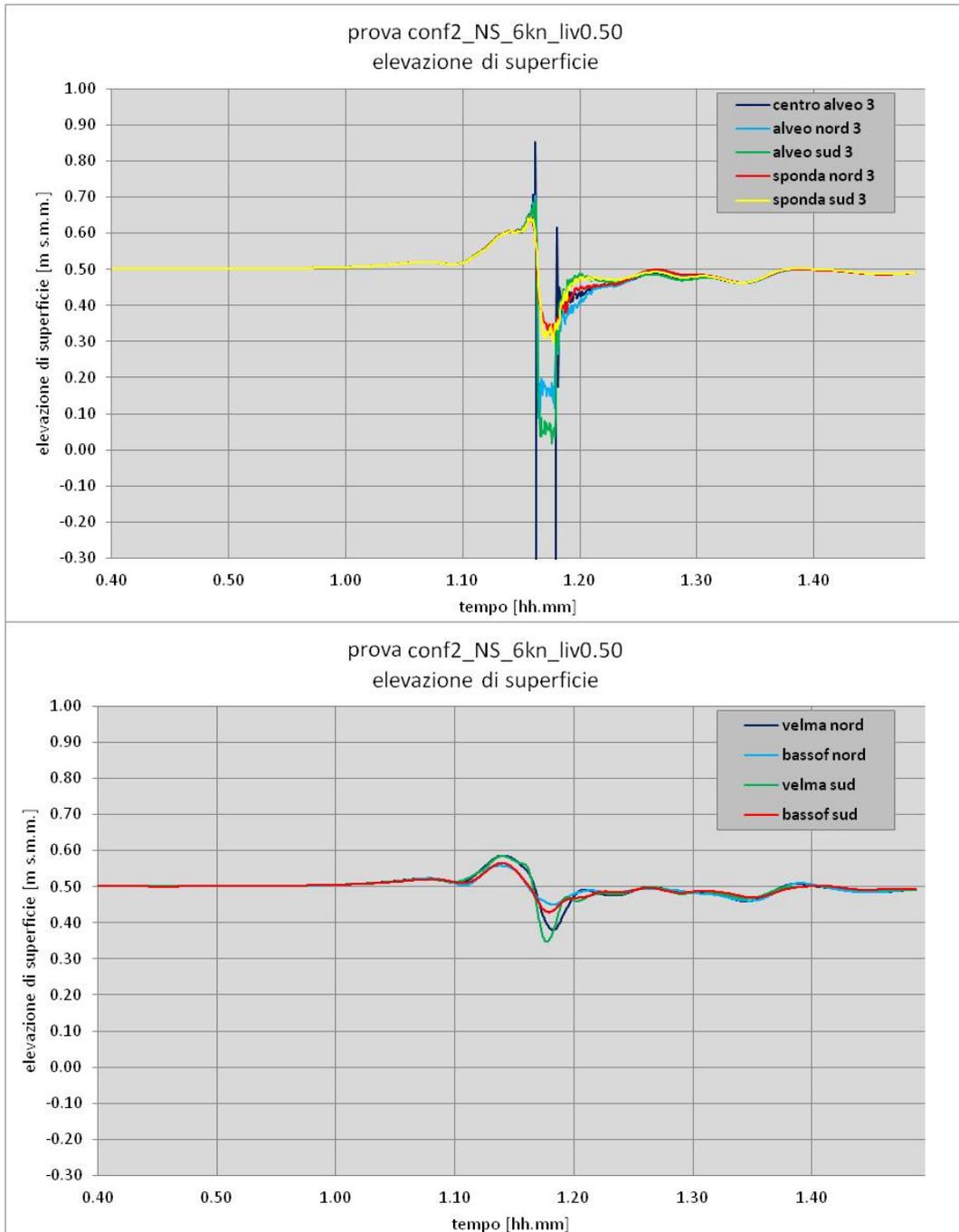
Le zone a più intensa modifica sono quelle di alveo, che appaiono in erosione nella zona di passaggio dello scafo e in deposito nelle zone esterne. Una tendenza erosiva si nota poi nella fascia di sponda compresa tra la fine dei lati in pendenza del canale e l'inizio del bassofondo.

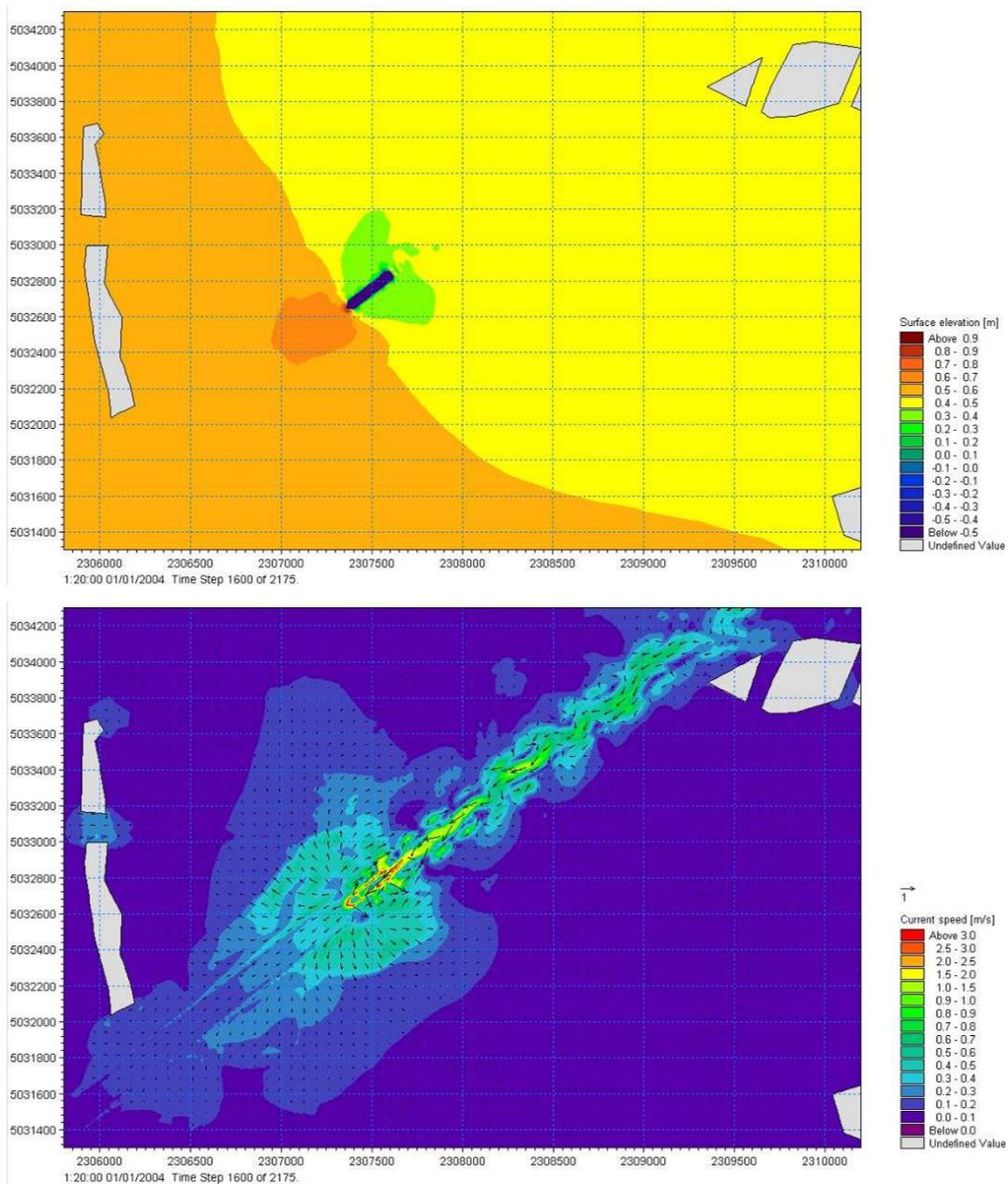
Anche le velme sono interessate da modifiche morfologiche molto leggere, con tendenze erosive ai loro bordi e depositi attorno ad esse e nei varchi verso il bassofondo.

7.6. CONF2_NS_6KN_LIV0.50

Prova con nave in direzione nord-sud, velocità 6 kn, livello iniziale 0.50 m s.m.m.

7.6.1. Modulo idrodinamico





Le considerazioni riguardo questa prova sono del tutto simili a quanto già osservato nella prova precedente; si evidenzia però una generale attenuazione dei fenomeni connessi al transito della nave.

Le serie temporali dell'elevazione di superficie nei punti posti nel canale e lungo le sponde adiacenti mostrano lo stesso andamento: un sovrizzo che anticipa il

passaggio del natante, abbassamento concomitante al passaggio dello scafo, e ritorno alle condizioni di pelo libero indisturbato dopo circa 10'.

Si rileva nelle zone di alveo adiacente al binario di scorrimento della nave un abbassamento massimo di inferiore ai 60 cm, valore che va smorzandosi allontanandosi dal canale. Lungo le sponde infatti, nella zona a quota -1.50 m s.m.m., l'abbassamento massimo è di circa 20 cm.

Rispetto alla prova precedente, le velme restano sempre sommerse, e il bassofondo al di là di esse viene comunque abbastanza riparato, presentando valori di abbassamento massimo inferiori ai 10 cm.

I sovralti massimi, di circa 35 cm in centro alveo e di circa 20 cm in alveo adiacente al "binario", si hanno qualche istante prima del passaggio della nave; anch'essi vanno smorzandosi allontanandosi dal canale.

Sopra le velme il sovralto è di circa 10 cm e nel bassofondo esterno ad esse è minore dei 10 cm.

Come si nota da questi valori, nonché dalla mappa delle elevazioni di superficie, le modifiche del pelo libero sono per lo più circoscritte all'area compresa tra canale e velme e rispetto alla prova precedente risultano meno intense e con uno smorzamento più evidente allontanandosi dalla nave.

Anche per quanto riguarda l'andamento del campo di corrente, si nota come le perturbazioni maggiori siano localizzate nel canale, mentre al di fuori delle velme le velocità siano basse. L'andamento della corrente attorno alla nave mostra una scia dietro la poppa, nel verso del transito, e una corrente di ritorno esternamente ad essa, lungo alveo e sponde.

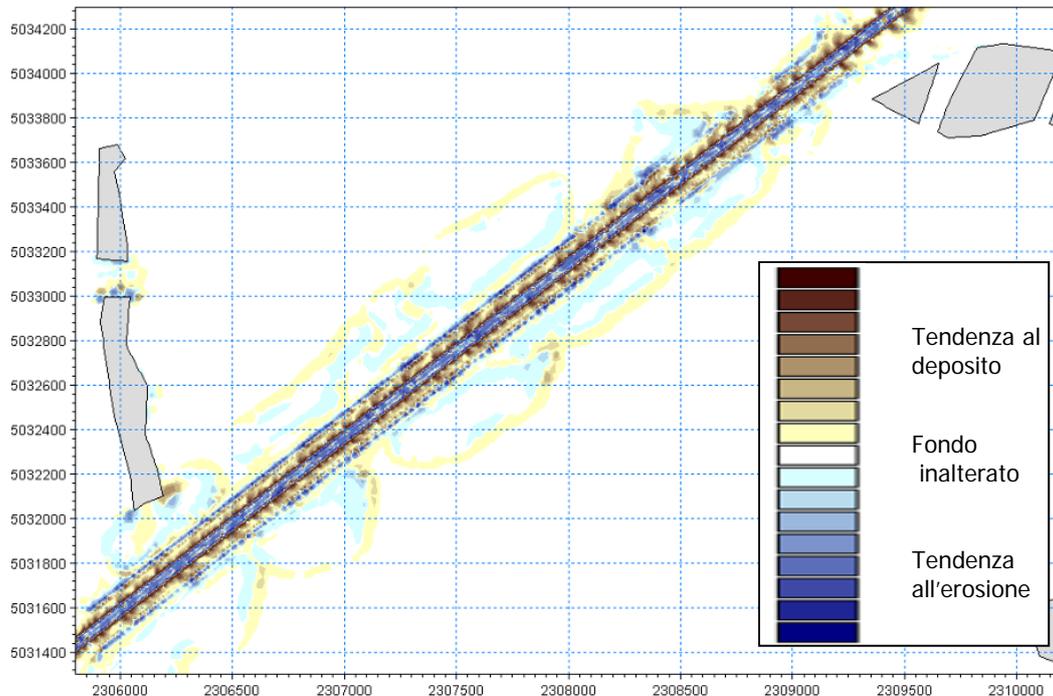
La superficie delle velme e i varchi tra esse nel momento del passaggio della nave vengono interessati da una certa corrente in uscita verso la zona di bassofondo a causa del sovralto che anticipa la nave, corrente che poi quasi scompare dopo il transito del natante.

Le velocità quindi appaiono del tutto similari alla prova con livello 0.00 m s.m.m. ma meno intense e interessanti uno spazio minore attorno alla nave.

	Conf2_NS_6kn_liv0.50			
	livello [m s.m.m.]		variazione livello [m]	
	Minimo	Massimo	abbassamento	sovralzo
centro alveo 2	-	0.69	-	0.19
centro alveo 3	-	0.85	-	0.35
centro alveo 4	-	0.78	-	0.28
alveo nord 2	0.09	0.63	0.41	0.13
alveo nord 3	0.09	0.70	0.41	0.20
alveo nord 4	-0.07	0.70	0.57	0.20
alveo sud 2	0.02	0.65	0.48	0.15
alveo sud 3	0.02	0.69	0.48	0.19
alveo sud 4	0.03	0.69	0.47	0.19
sponda nord 2	0.27	0.59	0.23	0.09
sponda nord 3	0.32	0.64	0.18	0.14
sponda nord 4	0.38	0.60	0.12	0.10
sponda sud 2	0.34	0.61	0.16	0.11
sponda sud 3	0.30	0.64	0.20	0.14
sponda sud 4	0.33	0.63	0.17	0.13
velma nord	0.38	0.59	0.12	0.09
bassof nord	0.45	0.56	0.05	0.06
velma sud	0.35	0.58	0.15	0.08
bassof sud	0.43	0.57	0.07	0.07

Tabella 8 - Prova conf2_NS_6kn_liv0.50. Valori estremi del pelo libero e della sua variazione.

7.6.2. Modulo morfologico



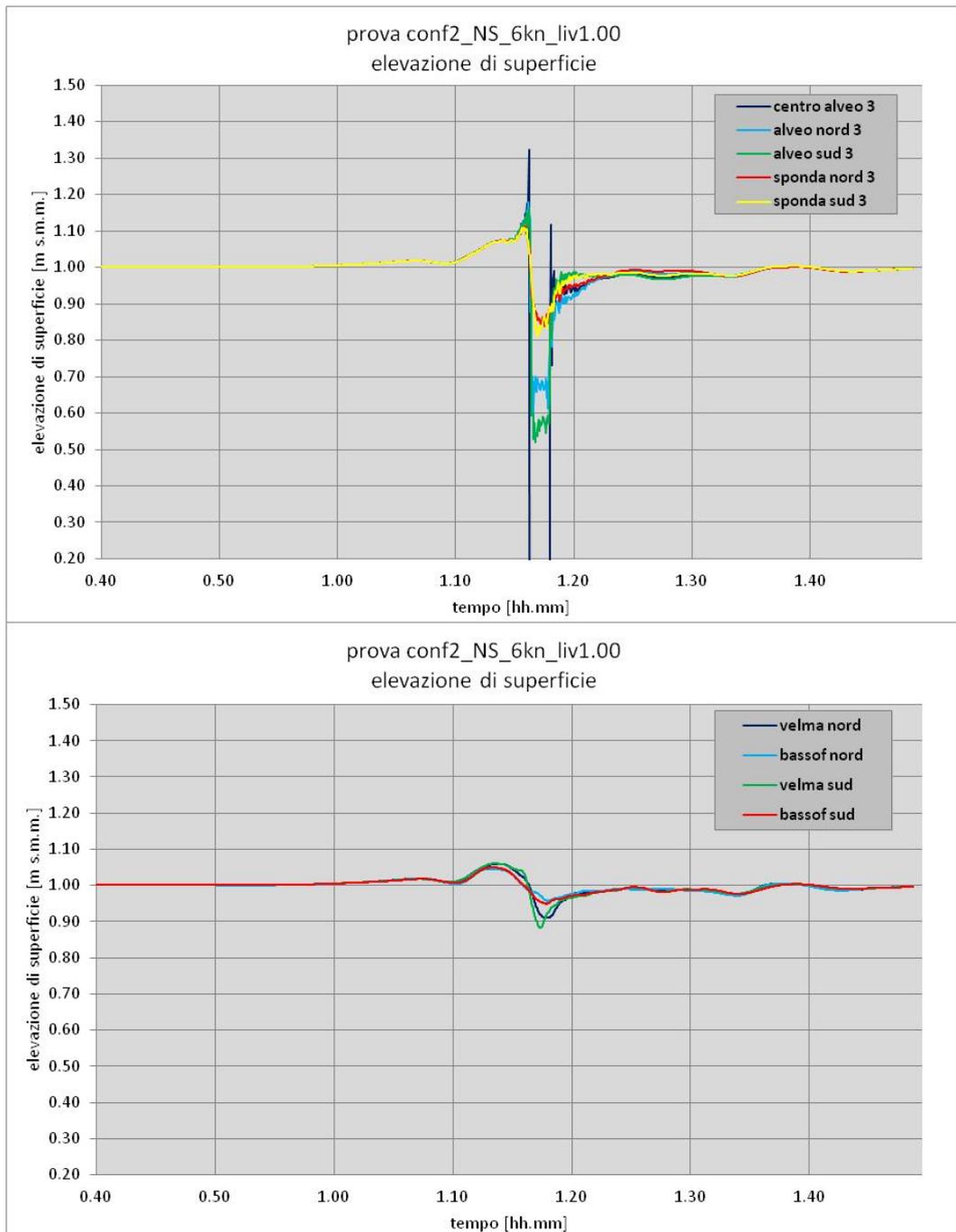
La mappa delle zone in deposito e in erosione a fine simulazione mostra una situazione simile a quanto rilevato nella prova precedente che aveva livello idrico iniziale minore, con variazioni di livello del fondo contenute nella zona interna alle velme e zone a più intensa modifica concentrate nel canale.

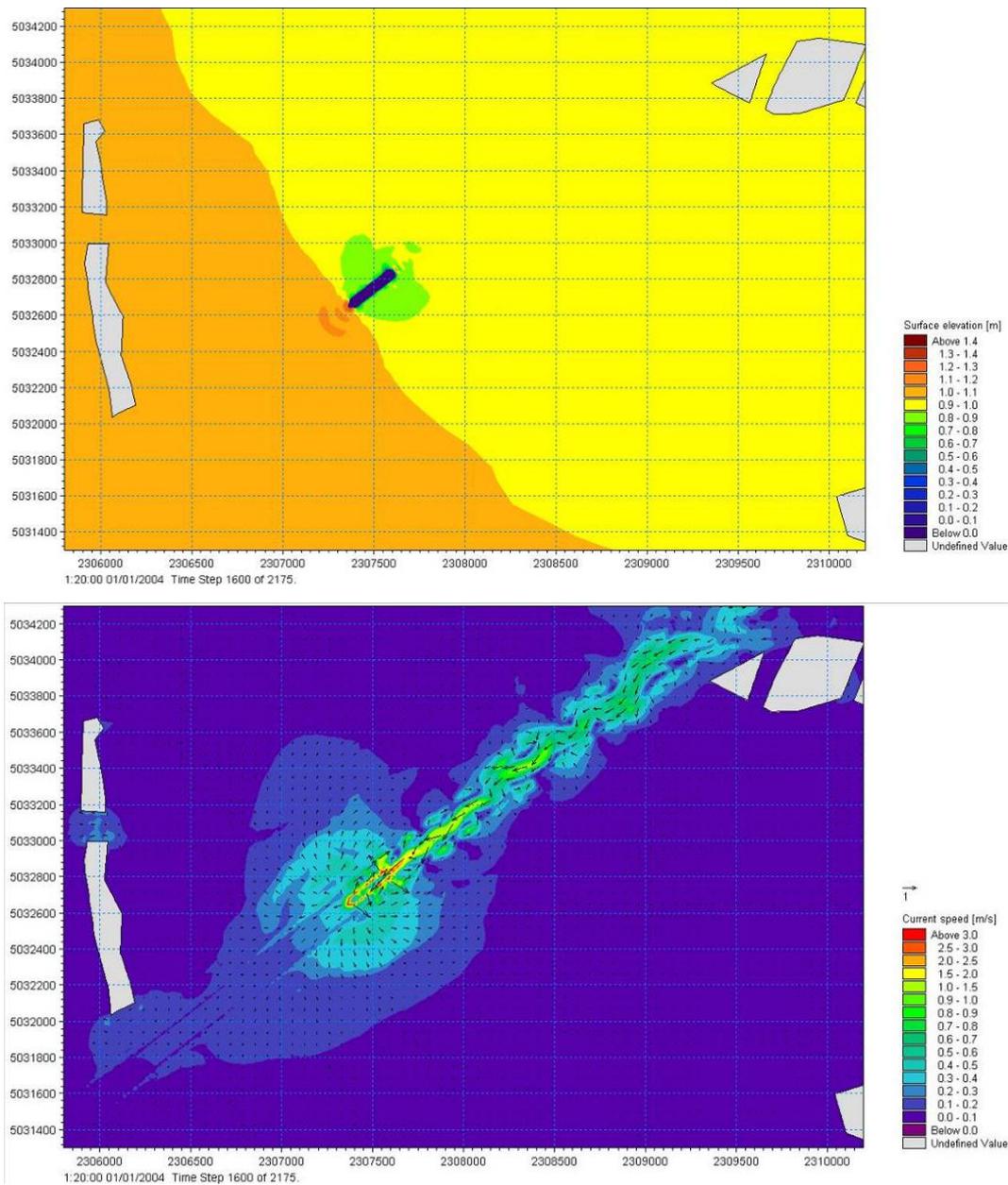
Si ha la stessa localizzazione delle zone a tendenza erosiva e di quelle in deposito, ma per tutte rispetto alla prova precedente si nota una attenuazione dell'intensità del fenomeno. In particolare, esternamente al canale le modifiche morfologiche risultano molto attenuate, con quindi un minor interessamento della zona delle velme.

7.7. CONF2_NS_6KN_LIV1.00

Prova con nave in direzione sud-nord, velocità 6 kn, livello iniziale 1.00 m s.m.m.

7.7.1. Modulo idrodinamico





Le considerazioni riguardo questa prova sono paragonabili a quanto già osservato nella prova precedente; si evidenzia però la generale attenuazione dei fenomeni connessi al transito della nave.

Le serie temporali dell'elevazione di superficie nei punti posti nel canale e lungo le sponde adiacenti mostrano: un sovrizzo del pelo libero che anticipa il passaggio

del natante, il successivo abbassamento concomitante al passaggio dello scafo, e un successivo ritorno alle condizioni di pelo libero indisturbato dopo meno di 10'. Si rileva nelle zone di alveo adiacente al binario di scorrimento della nave un abbassamento massimo inferiore ai 60 cm, valore che va smorzandosi allontanandosi dal canale. Lungo le sponde infatti, nella zona a quota -1.50 m s.m.m., l'abbassamento massimo è di circa 20 cm.

Le velme restano sempre sommerse e il bassofondo al di là di esse viene comunque abbastanza riparato, presentando valori di abbassamento massimo di circa 10 cm.

I sovralti massimi, attorno ai 30 cm in centro alveo e ai 20 cm a lato del binario, si hanno in alveo qualche istante prima del passaggio della nave; anch'essi vanno smorzandosi allontanandosi dal canale.

Sopra le velme il sovralto è inferiore ai 10 cm e nel bassofondo esterno ad esse è attorno ai 5 cm.

Come si nota da questi valori, nonché dalla mappa delle elevazioni di superficie, le modifiche del pelo libero sono contenute in un'area di minor estensione rispetto alla prova precedente e risultano meno intense.

Anche per quanto riguarda l'andamento del campo di corrente, si nota come le perturbazioni maggiori siano localizzate nel canale, mentre al di fuori delle velme le velocità siano basse. L'andamento della corrente attorno alla nave mostra una scia dietro la poppa, nel verso del transito, e una corrente di ritorno esternamente ad essa, lungo alveo e sponde.

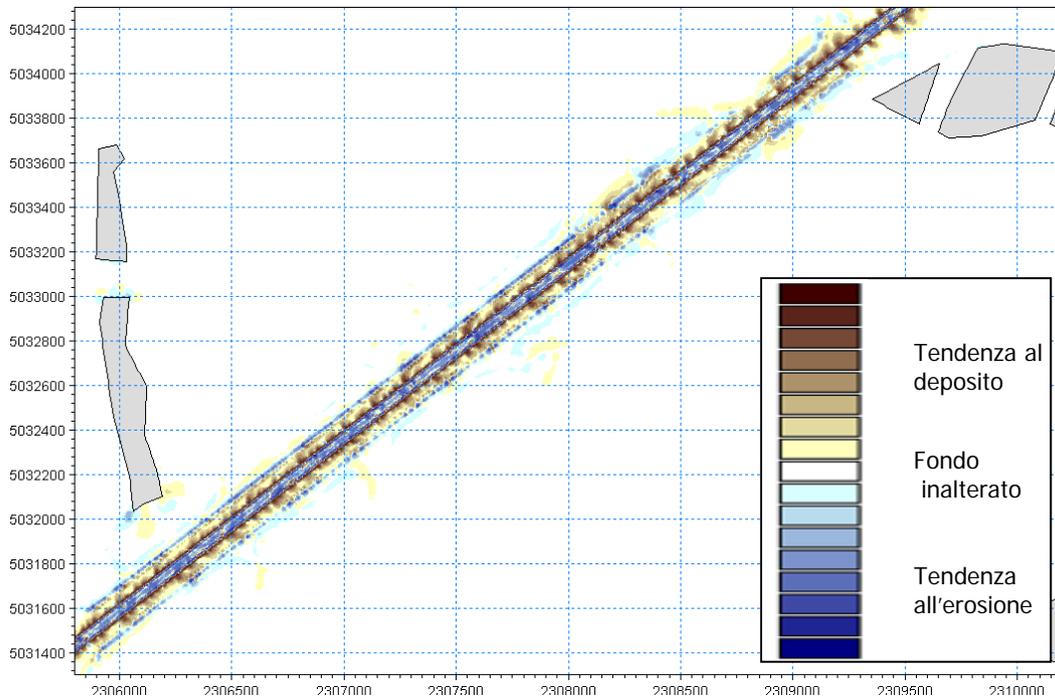
La superficie delle velme e i varchi tra esse nel momento del passaggio della nave vengono interessati da una certa corrente in uscita verso la zona di bassofondo a causa del sovralto che anticipa la nave, corrente che poi quasi scompare dopo il transito del natante.

Le velocità quindi appaiono del tutto similari alla prova con livello 0.00 m s.m.m. ma meno intense e interessanti uno spazio minore attorno alla nave.

	Conf2_NS_6kn_liv1.00			
	livello [m s.m.m.]		variazione livello [m]	
	Minimo	Massimo	abbassamento	sovralzo
centro alveo 2	-	1.19	-	0.19
centro alveo 3	-	1.32	-	0.32
centro alveo 4	-	1.32	-	0.32
alveo nord 2	0.58	1.12	0.42	0.12
alveo nord 3	0.59	1.18	0.41	0.18
alveo nord 4	0.46	1.19	0.54	0.19
alveo sud 2	0.56	1.15	0.44	0.15
alveo sud 3	0.52	1.16	0.48	0.16
alveo sud 4	0.55	1.18	0.45	0.18
sponda nord 2	0.78	1.08	0.22	0.08
sponda nord 3	0.84	1.11	0.16	0.11
sponda nord 4	0.89	1.09	0.11	0.09
sponda sud 2	0.85	1.10	0.15	0.10
sponda sud 3	0.81	1.11	0.19	0.11
sponda sud 4	0.83	1.12	0.17	0.12
velma nord	0.91	1.06	0.09	0.06
bassof nord	0.96	1.04	0.04	0.04
velma sud	0.88	1.06	0.12	0.06
bassof sud	0.95	1.05	0.05	0.05

Tabella 9 - Prova conf2_NS_6kn_liv1.00. Valori estremi del pelo libero e della sua variazione.

7.7.2. Modulo morfologico



La mappa delle zone in deposito e in erosione a fine simulazione mostra una situazione affine a quanto rilevato nella prova precedente con livello iniziale minore, con variazioni di livello del fondo contenute nella zona interna alle velme e zone a più intensa modifica concentrate nel canale.

Si ha la stessa localizzazione delle zone a tendenza erosiva e di quelle in deposito, ma per tutte rispetto alla prova precedente si nota un calo dell'intensità del fenomeno. In particolare si nota una forte attenuazione delle variazioni morfologiche per le velme e nei varchi.

7.8. CONFRONTO PROVE NS

Dal confronto delle tre prove con la nave in direzione Nord-Sud, si nota per tutte un simile andamento sia delle variazioni del pelo libero che del campo di corrente che delle variazioni morfologiche.

Si ha una generale attenuazione dell'intensità dei fenomeni e una diminuzione delle aree interessate dalle perturbazioni all'aumentare della quota iniziale del pelo libero. Il passaggio dei natanti avrà generalmente un impatto maggiore sulla idro-morfodinamica locale nei momenti di minimo mareale.

Per tutte le prove comunque risulta che le modifiche sono circoscritte alla zona compresa tra velme e canale, con un debole interessamento delle aree esterne.

Nei grafici e nelle tabelle seguenti si mostrano i valori massimi di variazione del pelo libero rilevati per i punti confrontati tra le diverse prove.

n.	nome	Conf2_NS_6kn_liv0.00		Conf2_NS_6kn_liv0.50		Conf2_NS_6kn_liv1.00	
		abbassamento [m]	sovrizzo [m]	abbassamento [m]	sovrizzo [m]	abbassamento [m]	sovrizzo [m]
1	centro alveo 2	-	0.17	-	0.19	-	0.19
2	centro alveo 3	-	0.40	-	0.35	-	0.32
3	centro alveo 4	-	0.31	-	0.28	-	0.32
4	alveo nord 2	0.42	0.10	0.41	0.13	0.42	0.12
5	alveo nord 3	0.42	0.25	0.41	0.20	0.41	0.18
6	alveo nord 4	0.60	0.21	0.57	0.20	0.54	0.19
7	alveo sud 2	0.51	0.12	0.48	0.15	0.44	0.15
8	alveo sud 3	0.55	0.24	0.48	0.19	0.48	0.16
9	alveo sud 4	0.49	0.21	0.47	0.19	0.45	0.18
10	sponda nord 2	0.24	0.07	0.23	0.09	0.22	0.08
11	sponda nord 3	0.24	0.20	0.18	0.14	0.16	0.11
12	sponda nord 4	0.13	0.12	0.12	0.10	0.11	0.09
13	sponda sud 2	0.18	0.09	0.16	0.11	0.15	0.10
14	sponda sud 3	0.26	0.20	0.20	0.14	0.19	0.11
15	sponda sud 4	0.20	0.14	0.17	0.13	0.17	0.12
16	velma nord	0.00	0.11	0.12	0.09	0.09	0.06
17	bassof nord	0.05	0.06	0.05	0.06	0.04	0.04
18	velma sud	0.00	0.12	0.15	0.08	0.12	0.06
19	bassof sud	0.04	0.04	0.07	0.07	0.05	0.05

Tabella 10 – Seconda configurazione. Confronto degli abbassamenti e sovrizzi massimi in diversi punti rilevati nelle tre prove con nave in transito in direzione Nord - Sud. Il numero progressivo serve per identificare i vari punti nei grafici sottostanti.

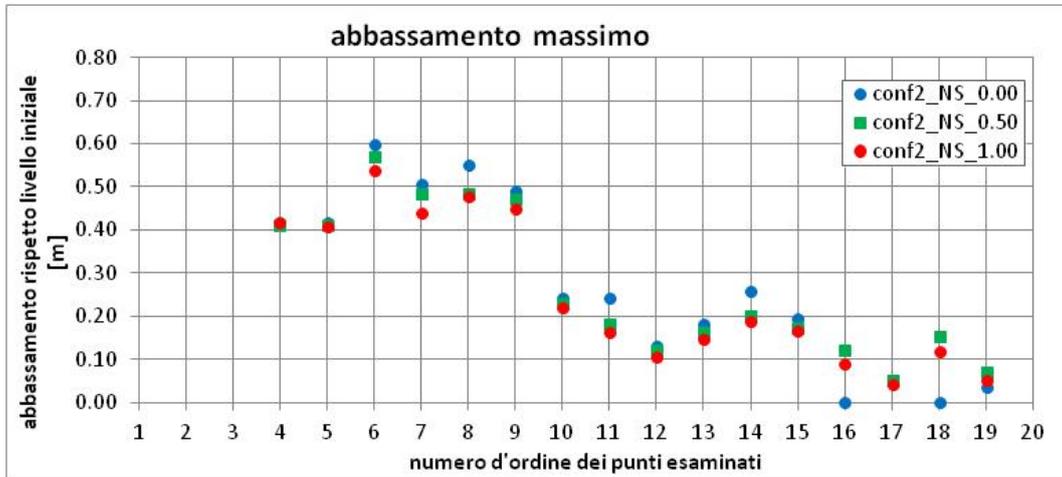


Figura 22 – Seconda configurazione. Confronto degli abbassamenti massimi in diversi punti rilevati nelle tre prove con nave in transito in direzione Nord - Sud. Il numero progressivo si riferisce ai punti presenti in Tabella 10.

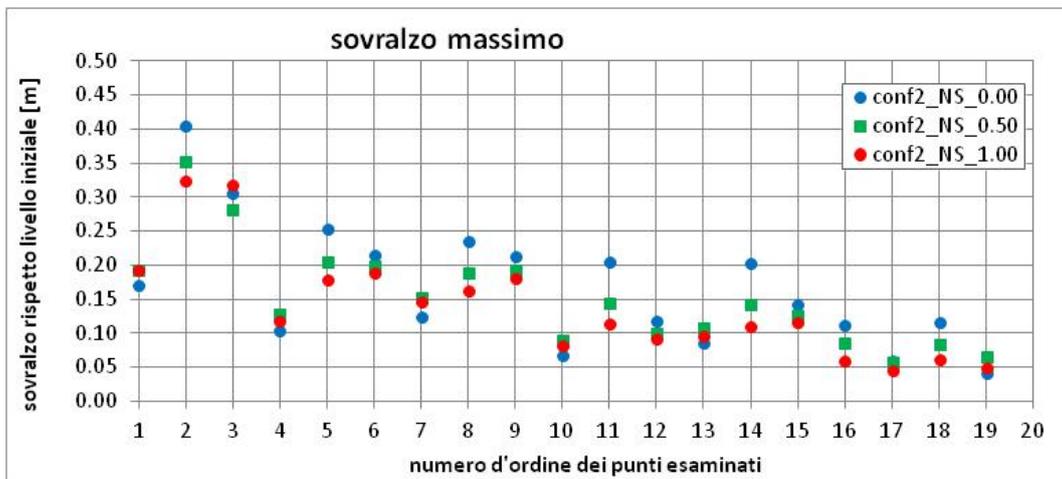


Figura 23 - Seconda configurazione. Confronto dei sovrizzi massimi in diversi punti rilevati nelle tre prove con nave in transito in direzione Nord - Sud. Il numero progressivo si riferisce ai punti presenti in Tabella 10.

7.9. CONFRONTO PRIMA CONFIGURAZIONE – SECONDA CONFIGURAZIONE

Si riportano in questo paragrafo tabelle e grafici che permettono un confronto sintetico dei risultati ottenuti in prima e seconda configurazione di progetto.

Per la trattazione completa delle simulazioni effettuate in prima configurazione si rimanda alla relazione “*Studio degli effetti idrodinamici e morfologici del transito di natanti – R02 Relazione Tecnica Illustrativa - Prima configurazione*”.

Nelle tabelle e nei grafici successivi vengono riportati, prova per prova, i valori delle variazioni massime del pelo libero rispetto al livello iniziale, valutate nei punti descritti al paragrafo 7.

Per ogni prova sono messi a confronto i risultati ottenuti nelle due configurazioni di progetto testate.

Si nota come in generale la seconda configurazione, caratterizzata da una cunetta più larga, presenti valori di abbassamento e sovrizzo tendenzialmente minori rispetto a quanto si ottiene nella prima configurazione.

Le differenze vanno dai pochi centimetri all’interno dell’alveo ad oltre 10 cm in alcuni punti lungo la sponda. Presso le velme e nel bassofondo esterno a queste, le differenze tornano ad essere di pochi centimetri.

Tale tendenza si rileva per tutte le prove, in entrambe le direzioni di transito della nave, e sono più accentuate nelle due prove più “gravose”, quelle cioè con livello iniziale pari a 0.00 m s.m.m.

Nelle altre prove in generale l’entità delle variazioni del pelo libero causate dal passaggio dei natanti si attenua, e così anche le differenze tra i valori ottenuti in prima configurazione e quelli di seconda configurazione.

prova	variazione massima rispetto al livello iniziale [m]	centro alveo 2	centro alveo 3	centro alveo 4	alveo nord 2	alveo nord 3	alveo nord 4	alveo sud 2	alveo sud 3	alveo sud 4	sponda nord 2	sponda nord 3	sponda nord 4	sponda sud 2	sponda sud 3	sponda sud 4	velma nord	bassof nord	velma sud	bassof sud
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SN_0.00	abbassamento																			
	conf1				-0.56	-0.79	-0.51	-0.45	-0.79	-0.64	-0.20	-0.48	-0.23	-0.18	-0.39	-0.30	0.00	-0.08	0.00	-0.09
	conf2				-0.42	-0.53	-0.77	-0.43	-0.63	-0.53	-0.19	-0.34	-0.20	-0.13	-0.33	-0.22	0.00	-0.06	0.00	-0.07
	sovrалzo																			
	conf1	0.33	0.32	0.24	0.28	0.26	0.14	0.30	0.27	0.15	0.18	0.26	0.11	0.22	0.27	0.10	0.17	0.09	0.16	0.06
conf2	0.29	0.24	0.21	0.23	0.19	0.14	0.24	0.19	0.16	0.12	0.16	0.07	0.14	0.16	0.06	0.12	0.07	0.11	0.04	
SN_0.50	abbassamento																			
	conf1				-0.53	-0.66	-0.46	-0.45	-0.71	-0.61	-0.17	-0.37	-0.20	-0.15	-0.27	-0.29	-0.19	-0.10	-0.20	-0.13
	conf2				-0.38	-0.48	-0.74	-0.40	-0.52	-0.50	-0.16	-0.25	-0.18	-0.12	-0.24	-0.22	-0.17	-0.08	-0.18	-0.11
	sovrалzo																			
	conf1	0.28	0.28	0.26	0.24	0.21	0.15	0.25	0.22	0.16	0.15	0.19	0.11	0.17	0.20	0.11	0.11	0.08	0.10	0.08
conf2	0.26	0.23	0.21	0.21	0.17	0.14	0.22	0.18	0.16	0.10	0.13	0.06	0.11	0.13	0.07	0.08	0.06	0.08	0.06	
SN_1.00	abbassamento																			
	conf1				-0.51	-0.59	-0.43	-0.44	-0.70	-0.58	-0.16	-0.30	-0.16	-0.13	-0.22	-0.27	-0.16	-0.08	-0.15	-0.09
	conf2				-0.35	-0.49	-0.72	-0.39	-0.50	-0.47	-0.15	-0.20	-0.14	-0.11	-0.19	-0.19	-0.12	-0.06	-0.13	-0.07
	sovrалzo																			
	conf1	0.25	0.23	0.26	0.21	0.16	0.15	0.22	0.17	0.15	0.13	0.13	0.11	0.14	0.14	0.11	0.07	0.06	0.07	0.06
conf2	0.24	0.20	0.21	0.20	0.14	0.15	0.20	0.15	0.16	0.09	0.09	0.07	0.10	0.09	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	

Tabella 11 – Prima e seconda configurazione. Confronto degli abbassamenti e sovrалzi massimi in diversi punti rilevati nelle prove con nave in transito in direzione Sud - Nord. Il numero progressivo serve per identificare i vari punti nei grafici successivi.

prova	variazione massima rispetto al livello iniziale [m]	centro alveo 2	centro alveo 3	centro alveo 4	alveo nord 2	alveo nord 3	alveo nord 4	alveo sud 2	alveo sud 3	alveo sud 4	sponda nord 2	sponda nord 3	sponda nord 4	sponda sud 2	sponda sud 3	sponda sud 4	velma nord	bassof nord	velma sud	bassof sud
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		NS_0.00	abbassamento																	
conf1					-0.58	-0.40	-0.50	-0.51	-0.75	-0.51	-0.21	-0.27	-0.17	-0.18	-0.26	-0.26	0.00	-0.06	0.00	-0.04
conf2					-0.42	-0.42	-0.60	-0.51	-0.55	-0.49	-0.24	-0.24	-0.13	-0.18	-0.26	-0.20	0.00	-0.05	0.00	-0.04
sovrizzo																				
conf1	0.15		0.48	0.32	0.11	0.35	0.23	0.11	0.34	0.26	0.09	0.30	0.16	0.11	0.31	0.14	0.17	0.08	0.18	0.05
conf2	0.17	0.40	0.31	0.10	0.25	0.21	0.12	0.24	0.21	0.07	0.20	0.12	0.09	0.20	0.14	0.11	0.06	0.12	0.04	
NS_0.50	abbassamento																			
	conf1				-0.56	-0.41	-0.46	-0.49	-0.72	-0.49	-0.21	-0.22	-0.15	-0.15	-0.20	-0.23	-0.14	-0.07	-0.16	-0.08
	conf2				-0.41	-0.41	-0.57	-0.48	-0.48	-0.47	-0.23	-0.18	-0.12	-0.16	-0.20	-0.17	-0.12	-0.05	-0.15	-0.07
	sovrizzo																			
	conf1	0.19	0.40	0.29	0.14	0.27	0.20	0.14	0.26	0.22	0.11	0.21	0.13	0.13	0.21	0.12	0.11	0.08	0.11	0.08
conf2	0.19	0.35	0.28	0.13	0.20	0.20	0.15	0.19	0.19	0.09	0.14	0.10	0.11	0.14	0.13	0.09	0.06	0.08	0.07	
NS_1.00	abbassamento																			
	conf1				-0.56	-0.43	-0.42	-0.47	-0.71	-0.47	-0.21	-0.21	-0.13	-0.15	-0.17	-0.21	-0.12	-0.06	-0.12	-0.06
	conf2				-0.42	-0.41	-0.54	-0.44	-0.48	-0.45	-0.22	-0.16	-0.11	-0.15	-0.19	-0.17	-0.09	-0.04	-0.12	-0.05
	sovrizzo																			
	conf1	0.19	0.35	0.27	0.14	0.22	0.18	0.14	0.22	0.20	0.10	0.16	0.11	0.11	0.16	0.10	0.08	0.06	0.08	0.06
conf2	0.19	0.32	0.32	0.12	0.18	0.19	0.15	0.16	0.18	0.08	0.11	0.09	0.10	0.11	0.12	0.06	0.04	0.06	0.05	

Tabella 12 - Prima e seconda configurazione. Confronto degli abbassamenti e sovrizzi massimi in diversi punti rilevati nelle prove con nave in transito in direzione Nord - Sud. Il numero progressivo serve per identificare i vari punti nei grafici successivi.

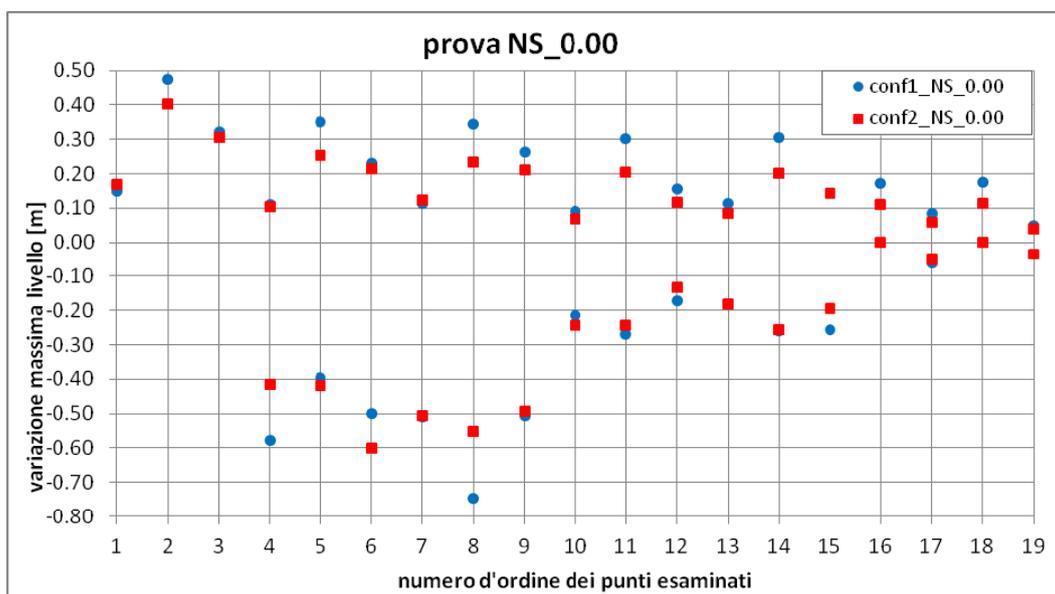
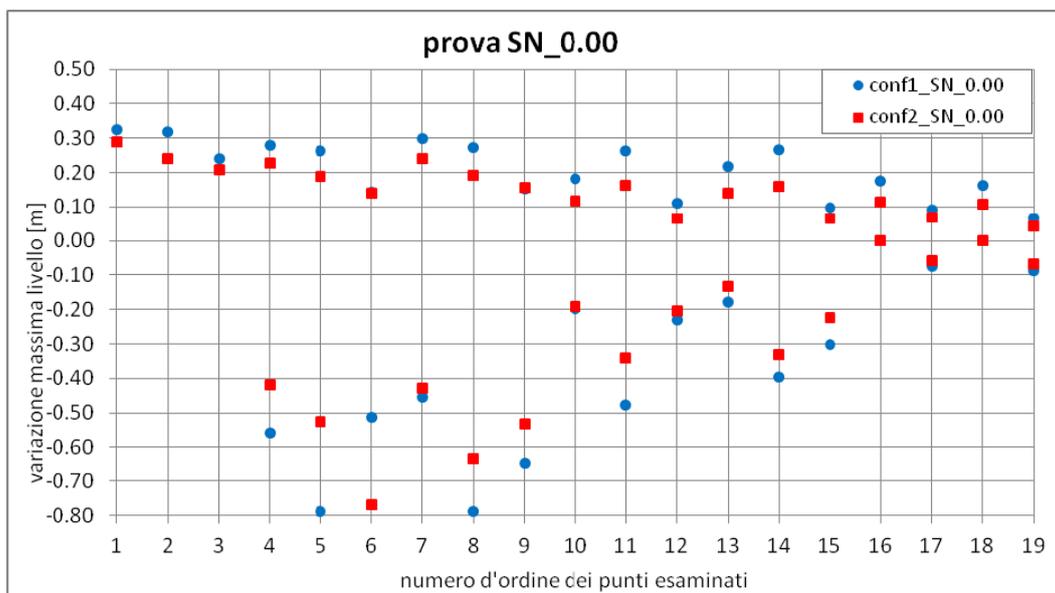


Figura 24 – Prove con livello iniziale 0.00 m s.m.m. Prima e seconda configurazione: confronto tra abbassamenti e sovralti per le prove con la nave nelle due direzioni di transito.

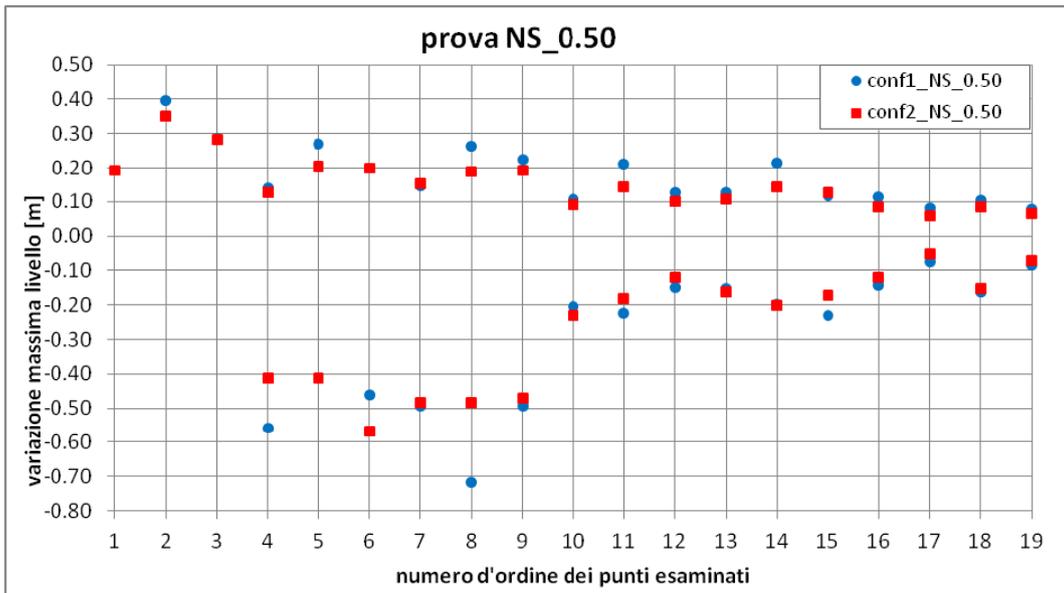
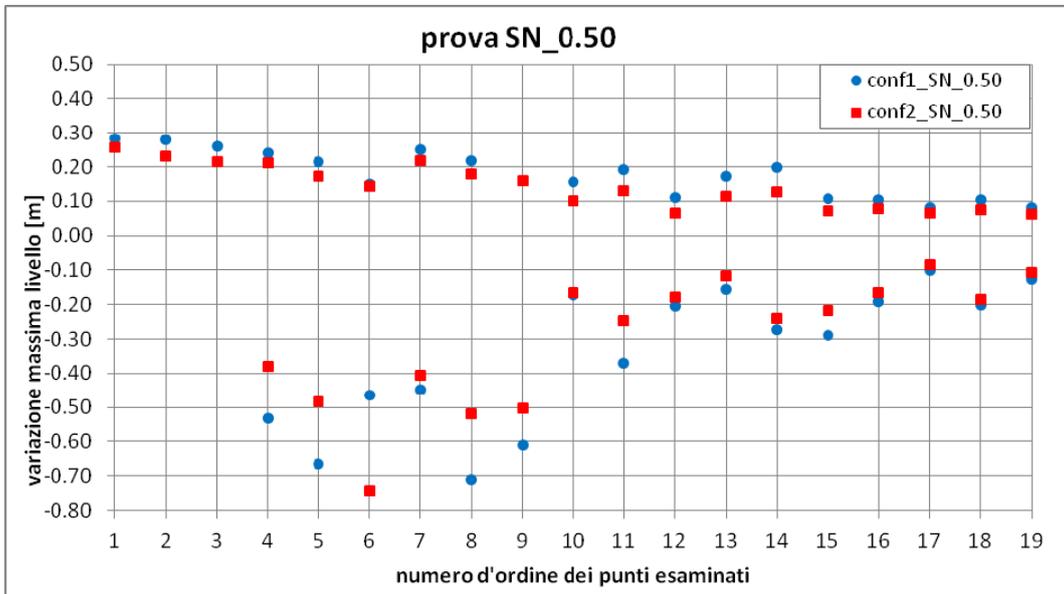


Figura 25 - Prove con livello iniziale 0.50 m s.m.m. Prima e seconda configurazione: confronto tra abbassamenti e sovralti per le prove con la nave nelle due direzioni di transito.

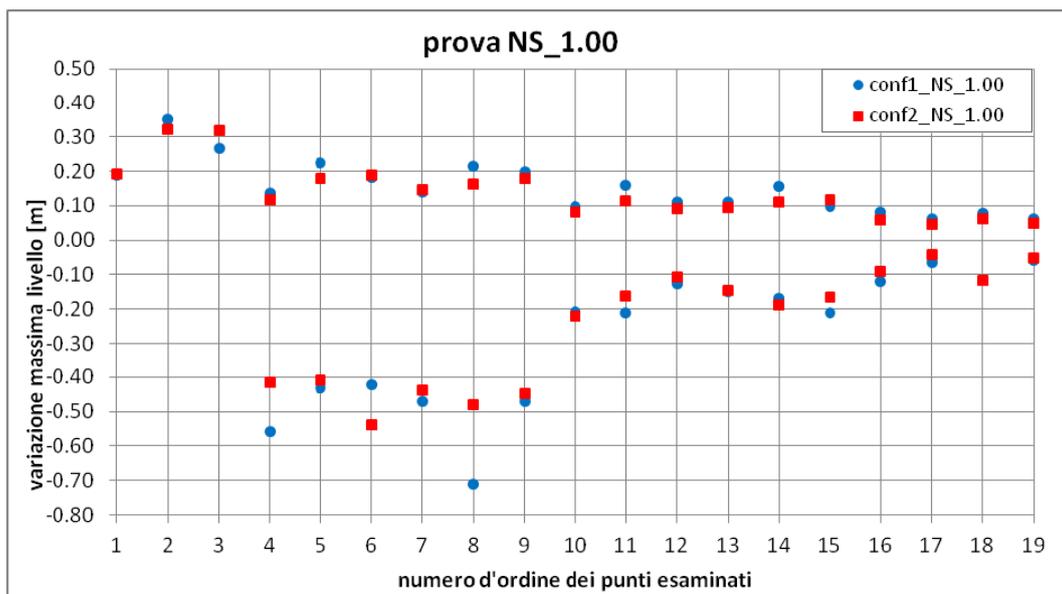
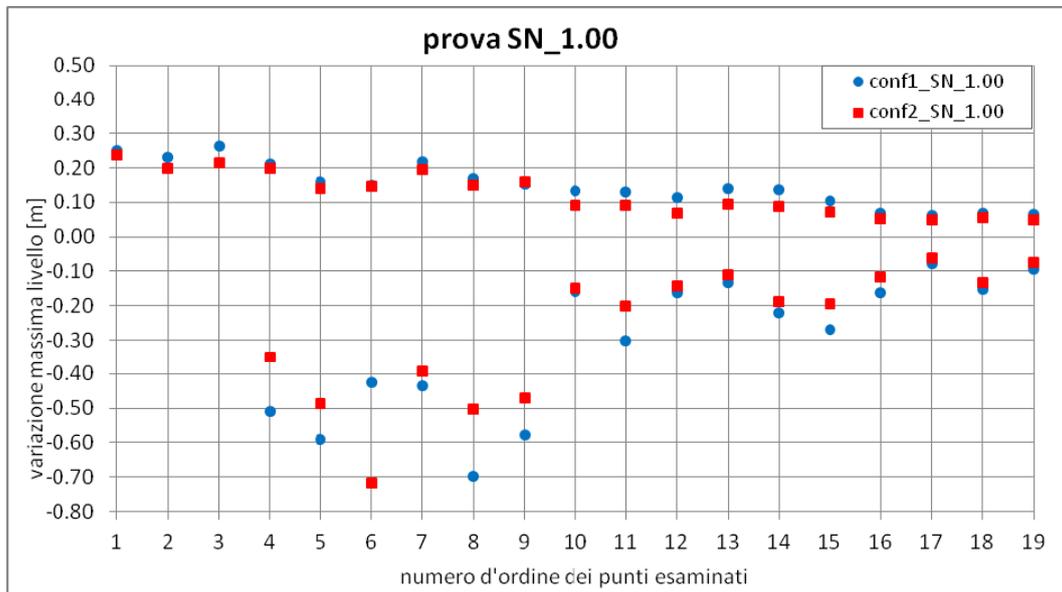


Figura 26 - Prove con livello iniziale 1.00 m s.m.m. Prima e seconda configurazione: confronto tra abbassamenti e sovralti per le prove con la nave nelle due direzioni di transito.

Come accade per le variazioni del pelo libero, anche le correnti che si generano e le modifiche morfologiche cui va incontro il fondale risultano di minor intensità nella seconda configurazione. In particolare, ciò si nota non tanto in alveo, dove le grandezze citate sono simili in prima e seconda configurazione, quanto piuttosto nello spazio tra sponde e velme, sulle velme, e nel bassofondo oltre le velme.

A titolo di esempio di riportano due mappe della velocità della corrente e due mappe della variazione del fondo per la prova Sud – Nord livello 0.00 m s.m.m.

Mantenendo le stesse scale grafiche nelle figure, si nota come nella seconda configurazione l'intensità della corrente generata dal transito della nave sia simile a quella in prima configurazione nei dintorni della nave stessa, mentre essa si smorza in maniera più evidente allontanandosi dalla nave. Per esempio, all'istante rappresentato nelle figure successive, la zona di fronte alla nave interessata da correnti di intensità maggiore di 0.5 m/s ha una estensione di circa 700 m x 400 m in prima configurazione e di circa 400 m x 100 m in seconda configurazione. Analogamente, anche la scia dietro la nave appare esaurire le alte velocità in uno spazio minore in seconda configurazione.

Considerazioni analoghe si possono fare per quanto riguarda le modifiche morfologiche, legate all'andamento delle correnti e alla loro variazione.

In entrambe le configurazioni le aree a tendenza erosiva e al deposito hanno una simile localizzazione, ma l'intensità delle modifiche risulta minore nella seconda configurazione, sia in alveo sia, con maggior evidenza, presso le velme .

Il minor impatto che il transito di natanti produce sia nelle modifiche dell'idrodinamica che nella morfologia è dovuto alla maggior larghezza della cunetta e quindi al minor rapporto tra sezione del natante e sezione dell'alveo rispetto a quanto si ha in prima configurazione.

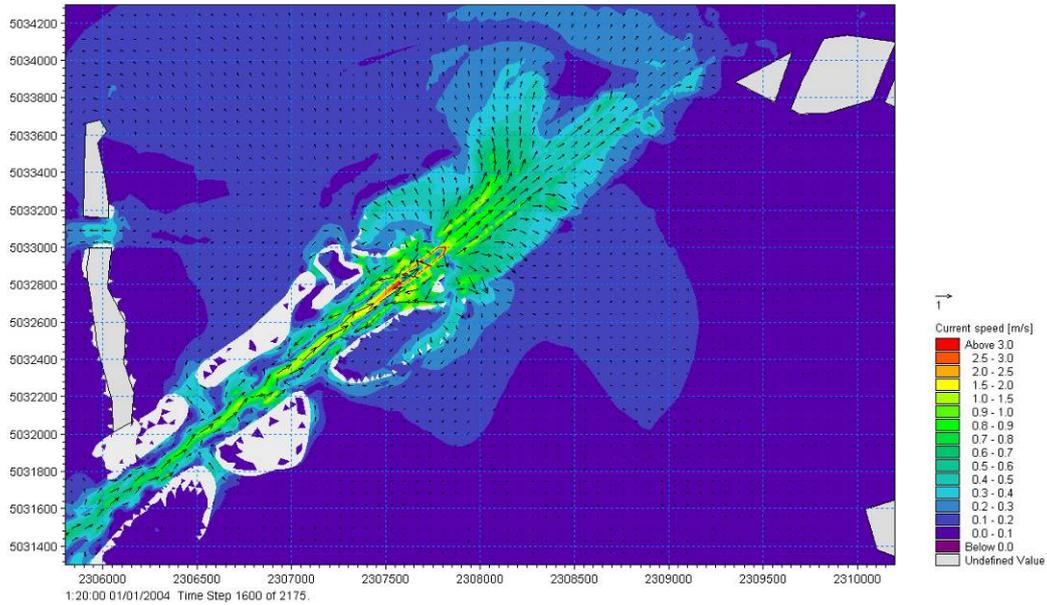


Figura 27 – Prima configurazione. Mappa della velocità della corrente ad un certo istante della simulazione.

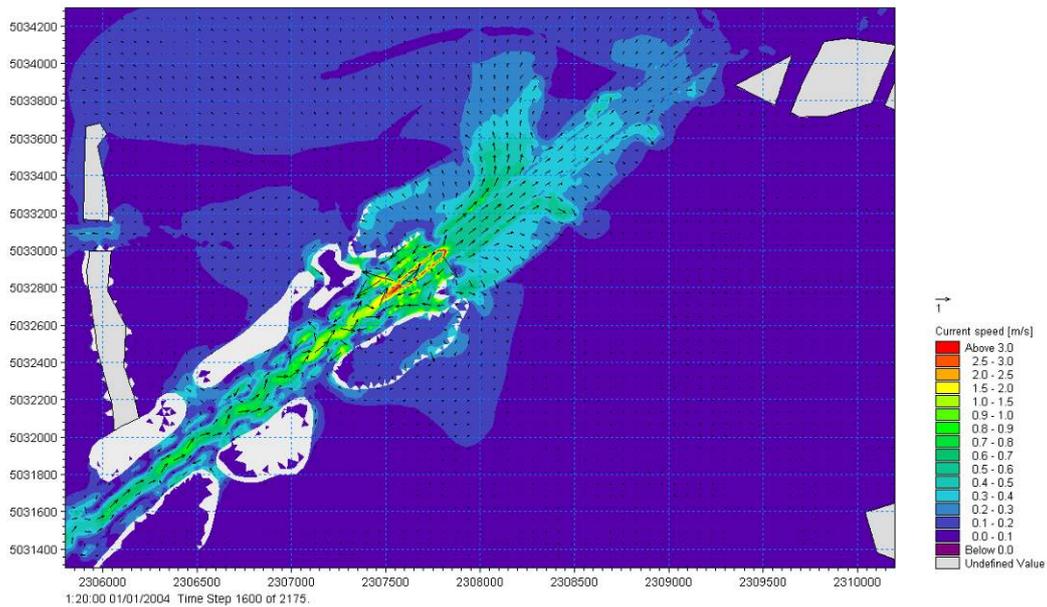


Figura 28 – Seconda configurazione. Mappa della velocità della corrente ad un certo istante della simulazione.

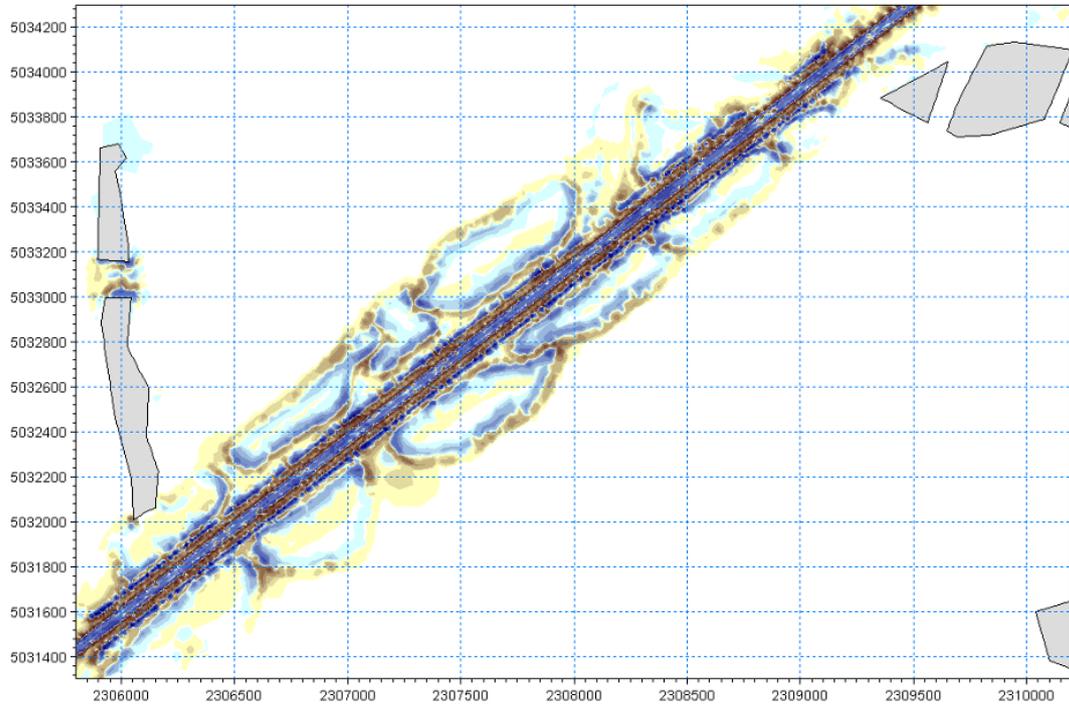


Figura 29 - Prima configurazione. Mappa delle variazioni di fondo a fine simulazione.

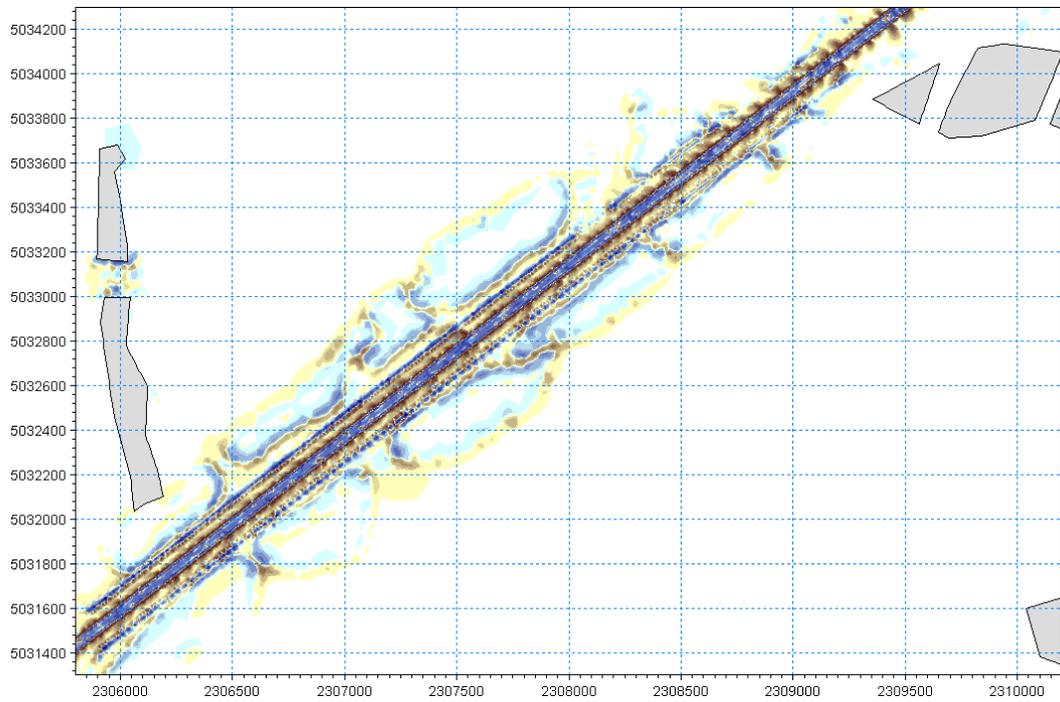


Figura 30 – Seconda configurazione. Mappa delle variazioni di fondo a fine simulazione.

8. CONCLUSIONI

Il presente studio indaga, nell'area interessata dal progetto del nuovo canale Contorta – Sant'Angelo, secondo una configurazione di progetto che propone una cunetta di 120 m di larghezza e qui denominata “seconda configurazione”, l'idrodinamica e la morfodinamica legate al transito delle grandi navi in ingresso e uscita dalla Stazione Marittima di Venezia.

Esso completa quanto già presentato nello “*Studio degli effetti idrodinamici e morfologici del transito di natanti – R02 Relazione Tecnica Illustrativa - Prima configurazione*”, in cui le stesse analisi sono state svolte per la configurazione di progetto con cunetta larga 80 m.

È stato utilizzato il modello matematico Mike21 con il quale si è simulato il transito di una nave tipo nelle due direzioni di transito (Sud-Nord e Nord-Sud) e per tre diversi livelli del pelo libero (0.00, 0.50 e 1.00 m s.m.m.) e si sono ottenuti i campi di variazione della elevazione di superficie, di velocità della corrente e di variazione del livello del fondo.

Tutte le prove hanno presentato un simile andamento delle grandezze indagate.

Le serie temporali dell'elevazione di superficie nei punti posti nel canale e lungo le sponde adiacenti mostrano lo stesso andamento per tutte le prove: un sovrizzo del pelo libero che anticipa il passaggio del natante, il successivo abbassamento concomitante al passaggio dello scafo, e un successivo ritorno alle condizioni di pelo libero indisturbato dopo circa 10'-20'.

L'abbassamento massimo si verifica nelle zone di alveo adiacente al binario di scorrimento della nave e va attenuandosi man mano che ci si allontana dal canale. Tale abbassamento è di quasi 80 cm per le prove con livello iniziale di 0.00 m s.m.m., e diminuisce a circa 70 cm per le prove con livello maggiore.

I sovrizzi massimi si hanno in alveo qualche istante prima del passaggio della nave; anch'essi vanno smorzandosi allontanandosi dal canale.

Il sovrizzo massimo è di circa 40 cm e si verifica nella prova Nord - Sud con livello iniziale di 0.00 m s.m.m.

Le oscillazioni del pelo libero sono per lo più contenute nell'area compresa tra canale e velme, mentre esternamente ad esse il bassofondo ne è solo blandamente interessato.

L'andamento della corrente attorno alla nave mostra una scia dietro la poppa e una corrente di ritorno esternamente ad essa, lungo alveo e sponde.

Anche la superficie delle velme e i varchi tra esse nel momento del passaggio della nave vengono interessati da una certa corrente in uscita verso la zona di bassofondo a causa del sovrizzo che anticipa la nave, corrente che poi quasi scompare dopo il transito del natante.

Comunque si nota come le perturbazioni maggiori siano localizzate nel canale, mentre al di fuori delle velme le velocità sono basse.

Per quanto riguarda le variazioni di livello del fondo, esse sono contenute nella zona interna alle velme e non si rilevano modifiche nei bassofondi esterni. Questo sottolinea la funzione protettiva svolta dalle velme.

Nel canale si nota una tendenza all'erosione nella zona centrale direttamente interessata dal passaggio del natante e tendenza al deposito nelle fasce adiacenti.

Anche le velme sono interessate da modifiche morfologiche leggere, con tendenze erosive ai loro bordi e depositi attorno ad esse e nei varchi verso il bassofondo.

Per tutte le simulazioni, si può concludere che il transito dei natanti comporta leggere variazioni della idro- e morfo-dinamica contenute comunque nella zona interna alle due serie di velme, e che queste variazioni calano di intensità e di estensione all'aumentare del livello idrico. Il bassofondo risulta perciò protetto dalle velme.

Tutte queste considerazioni sono del tutto analoghe a quanto rilevato nelle simulazioni in prima configurazione.

Dal confronto invece tra prima e seconda configurazione, sia per quanto riguarda l'entità delle variazioni del pelo libero, che l'intensità della corrente e le variazioni morfologiche, in seconda configurazione si è ottenuta una leggera diminuzione delle grandezze citate.

Le differenze nelle variazioni del pelo libero si notano maggiormente nelle prove più gravose, quelle con livello iniziale pari a 0.00 m s.m.m., e vanno da pochi centimetri ad oltre 10 cm.

Per quanto riguarda l'andamento delle correnti, si nota come in seconda configurazione le velocità si smorzino in uno spazio di minor estensione rispetto a quanto rilevato in prima configurazione. Per esempio, nella prova SN con livello iniziale 0.00 m s.m.m., la zona di velocità superiori a 0.5 m/s occupa uno spazio di fronte alla nave di circa 400 m x 100 m in seconda configurazione, contro i 700 m x 400 m che si rilevano in prima configurazione.

L'attenuazione degli effetti dovuti al transito del natante che si ha in seconda configurazione rispetto alla prima si nota soprattutto esternamente al canale, lungo le sponde e nella zona delle velme.

NOTA INTEGRATIVA AGLI STUDI ESEGUITI DA PROTECNO SRL SULLE MODIFICHE IDRAULICHE E MORFOLOGICHE INDOTTE IN LAGUNA CENTRALE DALLA REALIZZAZIONE DEL NUOVO CANALE CONTORTA.

1. Premesse

Come è noto, una delle proposte presentate per evitare la presenza delle grandi navi nel bacino di San Marco e nel Canale della Giudecca prevede l'allargamento del Canale Contorta, attualmente con dimensioni molto ridotte. Allo scopo, l'APV ha presentato uno Studio di Fattibilità (2012) per il progetto che prevede il percorso di Figura 1 perché le navi possano raggiungere la Stazione Marittima attuale, entrando dalla Bocca di Malamocco.

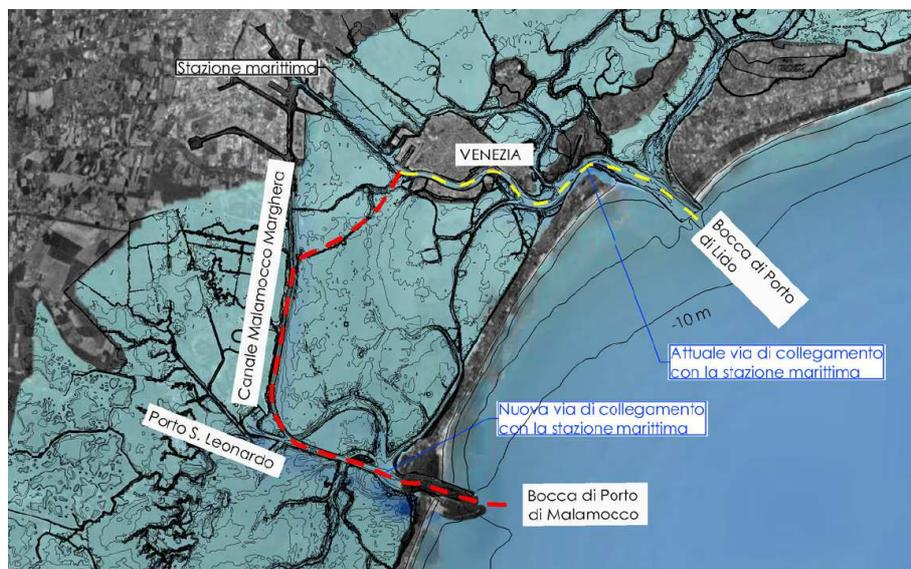


Figura 1 - Percorso attuale (in giallo) e nuovo percorso in progetto (in rosso) per l'accesso alla Stazione Marittima di Venezia (fonte: Studio di fattibilità)

Successivamente, la stessa APV ha incaricato la Protecno S.r.l. di eseguire un esame su modello matematico per approfondire le modifiche all'idrodinamica

lagunare nella porzione di laguna interessata nonché le eventuali modifiche all'evoluzione morfologica della stessa zona.

Ad integrazione di queste indagini, svolte utilizzando input di vento e marea, sono state richieste e svolte analisi per valutare gli effetti idromorfodinamici causati dal transito delle grandi navi da crociera nel nuovo canale in progetto.

1.a. Configurazioni di progetto studiate su modello matematico.

Entrambi gli studi, morfologico e transito natanti, sono stati eseguiti per due diverse configurazioni di progetto:

- lo stato di progetto come da Studio di Fattibilità, con cunetta larga 80 m;
- uno stato di progetto con cunetta larga 120 m e andamento planimetrico leggermente modificato rispetto alla precedente configurazione.

Per entrambe le configurazioni esaminate, il progetto prevede di centrare l'andamento planimetrico del nuovo alveo per lo più sull'attuale Canale Contorta S. Angelo, scostandosene leggermente solo per minimizzare le interferenze con strutture preesistenti, quali l'isola di S. Angelo, e per mantenere un raggio di curvatura idoneo alla manovrabilità delle navi di cui deve permettere il transito. È prevista inoltre la realizzazione di una serie di velme a lato del canale con l'obiettivo di proteggere i fondali adiacenti dalla risacca indotta dal transito delle navi, ma anche per contribuire a garantire il mantenimento dei fondali del canale stesso.

La prima configurazione di progetto di cui si sono studiati gli aspetti di modifica della idrodinamica e morfologia lagunare e gli effetti del passaggio di natanti è stata quella presentata nello Studio di Fattibilità, con una cunetta larga 80 m e profonda -10 m s.m.m. (dato poi rettificato da APV in -10.50 m s.m.m.) con sponde con pendenza 1:3.

La seconda configurazione di progetto prevede una cunetta di 120 m e profondità -10.50 m s.m.m. e con sponde con pendenza 1:4.

Le due configurazioni presentano un andamento planimetrico leggermente diverso (Figura 2) che comunque mantiene approssimativamente gli stessi punti di ingresso del nuovo canale sia verso il canale S. Leonardo - Marghera che verso il Canale della Giudecca.



Figura 2 - Confronto dell'andamento planimetrico della prima configurazione di progetto (in verde) e della seconda configurazione di progetto (in rosso).

1.b. Modello matematico utilizzato.

Per il presente studio è stato utilizzato il pacchetto software MIKE21 di produzione DHI (Danish Hydraulic Institute), release 2008 (*Danish Hydraulic Institute. MIKE21. Release 2008. Scientific Documentation*).

In particolare sono stati implementati i moduli:

- di generazione, trasformazione e decrescita del moto ondoso (Spectral Wave, SW);
- idrodinamico (Hydrodynamic, HD);
- di trasporto dei sedimenti non coesivi (Sediment Transport, ST) e aggiornamento della quota batimetrica (morfologico).

Con la combinazione di questi tre moduli sono stati indagati i diversi aspetti che caratterizzano la morfodinamica lagunare.

Le simulazioni sono state eseguite nelle condizioni attuali ed in quelle prospettate di progetto.

Nelle prove dello studio morfologico sono stati simulati gli effetti sui sedimenti del moto ondoso da vento (di Bora e di Scirocco) accoppiato alla propagazione della marea all'interno della laguna. In questo modo sono stati ricostruiti l'andamento della velocità della corrente e delle eventuali variazioni di livello della superficie libera lagunare nell'area considerata ed è stato possibile produrre una mappatura della capacità di trasporto dei sedimenti.

Il modello idrodinamico delle correnti di marea infatti rende conto degli effetti di risospensione e trasporto dei sedimenti all'interno dei canali lagunari principali.

Il modello di moto ondoso da vento genera gli sforzi tangenziali al fondo che regolano il verificarsi di questi fenomeni nelle rimanenti superfici lagunari.

Gli sforzi tangenziali, e quindi le correnti prodotte al fondo dal moto ondoso da vento, unitamente alle correnti di marea e all'interazione fra i due fenomeni sono l'input che, assegnato al modello di trasporto dei sedimenti, governa la stabilità del fondale.

Sono stati realizzati due blocchi di simulazioni a crescente onere computazionale. Il primo fornisce un'interpretazione sedimentologica delle dinamiche del trasporto, il secondo un vero e proprio modello morfologico.

Dal primo si ricavano delle rappresentazioni istantanee della capacità di trasporto, mentre il secondo consente di apprezzare le tendenze erosive e di deposizione complessive conseguenti ad un certo evento meteorico.

Nelle prove di transito del natante sono stati simulati gli effetti del passaggio di un natante che avanza a velocità costante nel canale in progetto, valutando sia gli aspetti idrodinamici (campi di corrente e campi di elevazione di superficie) che quelli morfologici (tendenza al deposito e all'erosione) legati agli sforzi tangenziali al fondo. Le prove sono state effettuate per tre diversi livelli idrici, per verificare la diversa intensità dei fenomeni che genera il passaggio di un natante in diverse condizioni di marea.

Sul modello la presenza del natante in movimento nel fluido è stata schematizzata come una sovrappressione applicata sulla superficie del fluido, tale da ottenere un abbassamento locale del livello pari al pescaggio e alla forma della nave (Figura 3). La sovrappressione è stata modificata nel tempo e nello spazio in modo da riprodurre il transito del natante lungo il canale alla velocità di crociera.

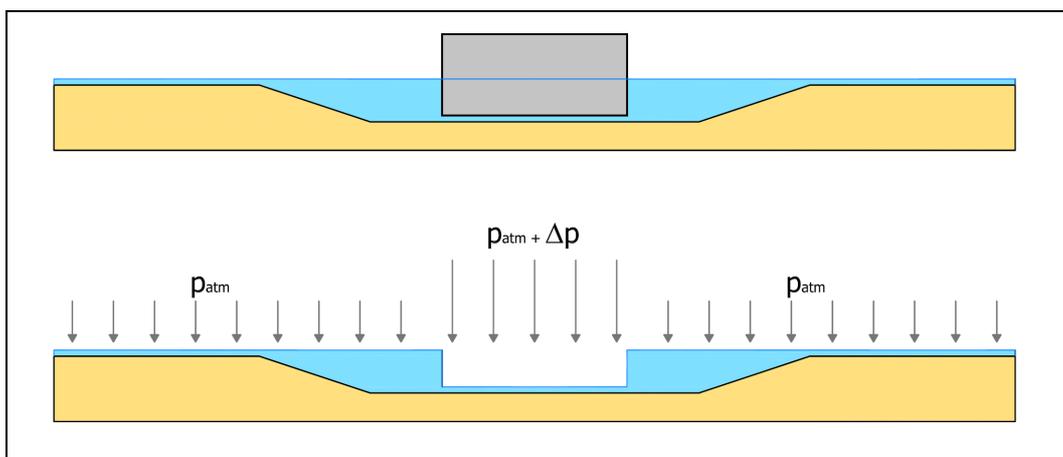


Figura 3 - Schematizzazione della nave nel modello matematico per mezzo di un campo di sovrappressione

1.c Risultati ottenuti.

Le simulazioni eseguite e i risultati ottenuti sono riportate nella seguenti relazioni:

- *“Studio morfologico – R01 Relazione Tecnica Illustrativa”*
- *“Studio degli effetti idrodinamici e morfologici del transito di natanti – R02 Relazione Tecnica Illustrativa - Prima configurazione”*.
- *“Studio morfologico – R03 Relazione Tecnica Illustrativa – Seconda configurazione”*
- *“Studio degli effetti idrodinamici e morfologici del transito di natanti – R04 Relazione Tecnica Illustrativa - Seconda configurazione”*.

Le prime relazioni riguardano la configurazione di progetto con cunetta da 80 m, le ultime due la configurazione di progetto con cunetta da 120 m.

Comparando i risultati ottenuti nella prima e nella seconda configurazione, si può affermare che dal punto di vista dell'idrodinamica e morfodinamica generale della laguna e locale della zona interessata dalle opere, esse siano praticamente equivalenti.

Per entrambe non si notano modifiche nella morfodinamica lagunare generale rispetto a quanto ottenuto nelle simulazioni di stato attuale mentre si hanno alcune blande modifiche nella zona interessata dalle opere. Queste modifiche sono comunque di poca entità e si notano solo negli istanti di bassa marea quando le velme intercettano maggiormente il flusso in direzione nord-sud o viceversa.

Tendenzialmente negli istanti caratterizzati da bassa marea l'effetto di schermatura delle velme in progetto risulta più evidente, con un calo delle velocità nelle zone a nord o sud delle stesse e un aumento in alcuni punti in cui il flusso è “costretto” a transitare. In altri istanti invece le velocità e le capacità di trasporto di materiale risultano simili a quanto accade in stato attuale.

All'interno del canale in progetto si alternano istanti in cui velocità e capacità di trasporto sono rilevanti ad altri in cui sono molto basse, senza mostrare quindi una tendenza evidente al trasporto o al deposito.

La successione delle velme previste in fregio al canale costituisce uno sbarramento che attraversa, dal Canale S. Leonardo Marghera alla Stazione Marittima l'intera zona di spartiacque fra i bacini di Lido e di Malamocco. Questa interruzione si fa sentire nelle fasi di flusso e riflusso della marea, costringendo la corrente ad aggirare l'ostacolo concentrandosi nel Canale S. Leonardo Marghera e all'imbocco del Canale della Giudecca.

Per tutte le prove con transito di natanti, si nota come le perturbazioni maggiori siano localizzate nel canale, mentre al di fuori delle velme le velocità sono basse. Le oscillazioni del pelo libero sono per lo più contenute nell'area compresa tra canale e velme, mentre esternamente ad esse il bassofondo ne è solo blandamente interessato.

L'andamento della corrente attorno alla nave mostra una scia dietro la poppa e una corrente di ritorno esternamente ad essa, lungo alveo e sponde.

Per quanto riguarda le variazioni di livello del fondo, esse sono contenute nella zona interna alle velme e non si rilevano modifiche nei bassofondi esterni. Questo sottolinea la funzione protettiva svolta dalle velme.

Per tutte le simulazioni, si può concludere che il transito dei natanti comporta leggere variazioni della idro- e morfo-dinamica contenute comunque nella zona interna alle due serie di velme, e che queste variazioni calano di intensità e di estensione all'aumentare del livello idrico. Il bassofondo risulta perciò protetto dalle velme.

Tutte queste considerazioni valgono per prima e seconda configurazione, per la quale però si è ottenuta una leggera diminuzione delle grandezze citate.

2. I nuovi quesiti

Recentemente l'APV ha posto allo scrivente due nuovi quesiti riguardanti in qualche modo gli studi descritti nelle premesse.

Il primo quesito riguarda gli effetti prevedibili se nella soluzione definitiva la larghezza in cunetta del canale viene fissata in 100 m, intermedia tra le larghezze di 80 m e di 120 m esaminate su modello matematico.

A questo riguardo si fanno le seguenti considerazioni.

Le prove fin qui eseguite sul modello hanno mostrato che il canale si trova in una zona a scarsa dinamica idraulica per la vicinanza alla linea di spartiacque tra i bacini di Lido e di Malamocco. Di conseguenza le velocità di marea sono sempre assai contenute e così l'attività di trasporto solido. Nei due casi esaminati (cunetta 80 m e cunetta 120 m, analogo ma non identico andamento planimetrico) il comportamento è molto simile e le variazioni riscontrate rispetto allo stato attuale sono locali ed esigue sia nella modifica delle velocità dei flussi che nella movimentazione di sedimenti.

Alla luce di ciò, si ritiene che un canale con cunetta larga 100 m avrà effetti affini e intermedi a quelli ottenuti per le due precedenti configurazioni.

In definitiva, anche se in idraulica non ci sia niente di lineare, con elevata probabilità un nuovo esame su modello di questa soluzioni indicherà valori vicini al valor medio di quelli già ottenuti ed esposti nelle relazioni citate nelle premesse.

Il secondo quesito di APV riguarda gli effetti sul fenomeno dell'acqua alta derivanti dalla realizzazione del nuovo canale.

La risposta non può che essere articolata e parte dall'osservazione che fino a cinquant'anni fa questo dubbio non esisteva, nel senso che nessuno pensava che lo scavo di un nuovo canale potesse far variare il livello della marea; questo aspetto non è stato tenuto presente in tutto l'iter di approvazione del progetto per la

realizzazione della terza zona industriale di Marghera, con lo scavo del nuovo canale, fino alla Bocca di Malamocco. La cosa può essere spiegata da una parte perché il fatto è scarsamente intuibile, ma anche perché a quei tempi mancavano i mezzi matematici per il calcolo della propagazione della marea in contorni di forma complessa.

L'idea, o meglio il sospetto, nacque all'indomani della grande acqua alta del novembre 1966: a fronte di un evento così catastrofico e del tutto inatteso si pensò che il fatto non fosse del tutto dovuto alla meteorologia ma che dovesse esistere un legame di causa-effetto che dipendeva dalle variazioni morfologiche subite dalla laguna in epoche recenti. Le modifiche più rilevanti consistevano nel dragaggio del canale Malamocco Marghera (che non era ancora terminato) con fondali profondi fino a 15 m e nell'imbonimento (col materiale dragato) di una vasta area di barene che così era sottratta all'espansione della marea, per formare la terza zona industriale di Marghera.

Ci si appellò al principio giuridico romano "post hoc propter hoc" (dopo di questo quindi a causa di questo) per comprovare il nesso di causalità tra i due fatti. Questa ipotesi trovò terreno fertile tra i "media" e nella pubblica opinione che come conseguenza portò alla richiesta a gran voce dell'annullamento del canale e all'apertura delle valli da pesca per compensare la riduzione di superficie a disposizione della marea.

Tuttavia, il nesso di causa ed effetto tra scavo del canale e acqua alta disastrosa rimaneva una supposizione, che mancava di supporto teorico, data la difficoltà dei calcoli.

La situazione si complicò perché quasi contemporaneamente nel 1972 comparvero due studi teorici contrastanti tra di loro.

Da una parte Giulio Supino, forse il più influente idraulico di allora, analizzò una laguna schematica di forma rettangolare, usando equazioni molto semplificate, arrivando alla conclusione che il canale aveva incrementato il livello dell'acqua alta.

Poco dopo, apparvero i primi risultati di un modello matematico approntato nell'Istituto di Idraulica di Padova, nel quale la laguna era schematizzata come una rete di canali. Il modello indicava invece che il livello dell'acqua alta risentiva del canale per pochi centimetri.

Il risultato del modello matematico non riscosse una elevata credibilità in ambiente veneziano, mentre il risultato di Supino ebbe grande risonanza e convinse i mezzi di stampa di dare ancor più risalto al caso Venezia. Memorabili furono gli articoli infocati che Indro Montanelli dedicò all'argomento, fino a ripudiarlo del tutto con un articolo dal titolo "una laguna di chiacchiere" in cui lamentava l'inconcludenza dei veneziani.

Successivamente i modelli matematici si diffusero rapidamente e tutti convergevano sulla modesta influenza del nuovo canale sull'acqua alta a Venezia. Oggi siamo tutti d'accordo sul fatto che i bacini di Chioggia e di Malamocco, in laguna, sono corti, con una grossa comunicazione col mare, con fondali abbastanza profondi perché la marea possa propagarsi al loro interno senza subire sensibili modifiche di forma. La situazione è diversa per il bacino settentrionale, alimentato dalla bocca di Lido, la cui morfologia complessa interferisce sulla propagazione della marea.

Di conseguenza, si può rispondere al quesito affermando che la variazione di livello della marea, soprattutto nei casi di acqua alta, sarà trascurabile.

Padova, 4 settembre 2014,

Prof. Ing. Attilio Adami