INDICE

1 PREMESSE 5

2 ANALISI STORICA 5

2.1 CARTOGRAFIA STORICA 5

2.2 CONFRONTO FRA I RILIEVI DEL 1931, 1971, 2002 E 2014 8

2.3 COMMENTI 10

3 MODELLISTICA IDRODINAMICA TRIDIMENSIONALE 11

3.1 CONSIDERAZIONI GENERALI 11

3.2 IL SOFTWARE DELFT3D 12

3.2.1 Il modulo Delft3D-Flow 12

3.2.2 Il modulo Delft3D-Waves 13

4 MODELLO IDRODINAMICO E MORFOLOGICO 14

4.1 ELEMENTI DEL MODELLO 14

4.2 LA FASE DI CALIBRAZIONE 16

4.2.1 Calibrazione idrodinamica 16

4.2.2 Calibrazione morfologica 19

4.3 GLI SCENARI DI SIMULAZIONE 21

4.3.1 Caso 1: condizioni caratteristiche medie del paraggio 22

4.3.2 Caso 2: Scirocco dicembre 2013 24

4.3.3 Caso 3: Bora febbraio 2015 25

4.4 I RISULTATI OTTENUTI 26

4.4.1 Caso 1: condizioni caratteristiche medie 26

4.4.2 Caso 2: Scirocco dicembre 2013 33

4.4.3 Caso 3: Bora febbraio 2015 34

4.4.4 Considerazioni conclusive 36

5 MODELLO DI TRANSITO DELLE NAVI 37

5.1 INQUADRAMENTO TEORICO 37

5.2 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO 37

5.3 CALIBRAZIONE DEL MODELLO 38

5.3.1 Misure di riferimento 38

5.3.2 Modello di transito dei natanti nel canale Malamocco – Marghera 40

5.3.3 Risultati della calibrazione 41

5.3.4 Considerazioni conclusive 44

5.4 DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI INDAGINE 44

5.5 GRIGLIE COMPUTAZIONALI E BATIMETRIE ASSOCIATE 45

5.6 ELEMENTI DEL MODELLO 46

5.6.1 Sulla velocità dei natanti 47

5.6.2 Sui versi di percorrenza del nuovo canale 47

5.7 ANALISI DEI RISULTATI 48

5.7.1 Velocità di 6 nodi 48

5.7.2 Velocità di 8 nodi 53

5.8 ANALISI MORFOLOGICA 55

5.8.1 Sulla risospensione di sedimenti 57

6 PROGETTAZIONE OPERE DI PROTEZIONE DEI BORDI 59

6.1 DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE DI PROTEZIONE 62

6.2 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE SULLE VERIFICHE EFFETTUATE 66

7 INDIVIDUAZIONE DEI SITI DI CONFERIMENTO 67

7.1 STIMA DEI QUANTITATIVI CONFERIBILI 70

8 CONCLUSIONI 71

ELENCO ALLEGATI

1 ANALISI STORICA

1.1 Corografia di inquadramento territoriale
1.2 Planimetria Laguna di Venezia Denaix 1811
1.3 Planimetria Laguna di Venezia De Bernardi 1843
1.4 Planimetria Ufficio del Genio Civile di Venezia 1901
1.5 Ufficio Idrografico del 1931
1.5.1 Rilievo planoaltimetrico
1.5.2 Triangolazione punti di rilievo
1.5.3 Rappresentazione per batimetrie significative
1.6 Ufficio Idrografico del 1971
1.6.1 Rilievo planoaltimetrico
1.6.2 Triangolazione punti di rilievo
1.6.3 Rappresentazione per batimetrie significative
1.7 Carta della Laguna di Venezia anno 2002
1.7.1 Rilievo planoaltimetrico
1.7.2 Triangolazione punti di rilievo
1.7.3 Rappresentazione per batimetrie significative
1.8 Rilievo anno 2014
1.8.1 Rilievo planoaltimetrico
1.8.2 Triangolazione punti di rilievo
1.8.3 Rappresentazione per batimetrie significative
1.9 Volumi movimentati nell'area oggetto di studio
1.9.1 Confronto rilievi 1931-1971
1.9.2 Confronto rilievi 1931-2002
1.9.3 Confronto rilievi 1971-2002
1.9.4 Confronto rilievi 2002-2014
1.10 Confronto sezioni canale Contorta S. Angelo
1.10.1 Sezioni 1,2,3
1.10.2 Sezioni 4,5,6

2 INDIVIDUAZIONE DEI SITI DI CONFERIMENTO

2.1 Corografia di inquadramento territoriale
2.2 Planimetria percorsi di navigazione ai siti di conferimento
2.3 Fanghi tipo A
2.3.1 Corografia di inquadramento territoriale
2.3.2 Planimetria generale Laguna di Venezia Nord
2.3.3 Planimetria di dettaglio Area Cenesa
2.3.4 Planimetria di dettaglio Area Isola S. Cristina
2.3.5 Planimetria di dettaglio Area Canale Passaora ed Area Marani
2.3.6 Planimetria generale Laguna di Venezia Centrale
2.3.7 Planimetria di dettaglio Area Canale Malamocco-Marghera
2.3.8 Planimetria di dettaglio Area Fusina
2.3.9 Planimetria di dettaglio Area Lago Teneri ed Area Lago Stradoni
2.3.10 Planimetria di dettaglio Area Bastia-Battioro
2.3.11 Planimetria di dettaglio Area Canale Buello
2.3.12 Planimetria generale Laguna di Venezia Sud
2.4 Fanghi tipo B
2.4.1 Corografia di inquadramento territoriale
2.4.2 Planimetria generale Laguna di Venezia Nord
2.4.3 Planimetria generale Laguna di Venezia Centrale

3 PROGETTAZIONE OPERE DI PROTEZIONE DEI BORDI

3.1 Planimetria inquadramento Canale Malamocco Marghera
3.2 Sezione 1
3.3 Sezione 2
3.4 Sezione 3
3.5 Sezione 4
3.6 Sezione 5
3.7 Sezione 6
3.8 Sezioni a confronto rilievi 1931 - 1971
3.9 Sezioni a confronto rilievi 1971 - 2014
3.10 Planimetria di dettaglio Canale Contorta
3.11 Sezione tipo 1, fronte canale
3.12 Sezione tipo 2, canali laterali

4 MODELLO IDRODINAMICO TRIDIMENSIONALE

4.1 Griglie computazionali
4.2 Batimetrie
4.3 Caso 1: condizioni ordinarie
4.3.1 Condizioni al contorno
4.3.2 Livello della superficie libera
4.3.2.1 Confronto stato di fatto-stato di progetto con venti di bora
4.3.2.2 Confronto stato di fatto-stato di progetto con venti di scirocco
4.3.2.3 Scirocco 5 m/s – marea 0.35 m s.m.m.

4.3.2.4 Scirocco 5 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.2.5 Scirocco 5 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.2.6 Bora 10 m/s – marea 0.35 m s.m.m.
4.3.2.7 Bora 10 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.2.8 Bora 10 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.2.9 Bora 20 m/s – marea 0.35 m s.m.m.
4.3.2.10 Bora 20 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.2.11 Bora 20 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.2.12 Scirocco 15 m/s – marea 0.35 m s.m.m.
4.3.2.13 Scirocco 15 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.2.14 Scirocco 15 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.3 Velocità della corrente al fondo
4.3.3.1 Confronto stato di fatto-stato di progetto con venti di bora
4.3.3.2 Confronto stato di fatto-stato di progetto con venti di scirocco
4.3.3.3 Scirocco 5 m/s – marea 0.35 m s.m.m.
4.3.3.4 Scirocco 5 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.3.5 Scirocco 5 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.3.6 Bora 10 m/s – marea 0.35 m s.m.m.
4.3.3.7 Bora 10 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.3.8 Bora 10 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.3.9 Bora 20 m/s – marea 0.35 m s.m.m.
4.3.3.10 Bora 20 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.3.11 Bora 20 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.3.12 Scirocco 15 m/s – marea 0.35 m s.m.m.
4.3.3.13 Scirocco 15 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.3.14 Scirocco 15 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.4 Sforzi tangenziali al fondo
4.3.4.1 Scirocco 5 m/s – marea 0.35 m s.m.m.
4.3.4.2 Scirocco 5 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.4.3 Scirocco 5 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.4.4 Bora 10 m/s – marea 0.35 m s.m.m.
4.3.4.5 Bora 10 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.4.6 Bora 10 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.4.7 Bora 20 m/s – marea 0.35 m s.m.m.
4.3.4.8 Bora 20 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.4.9 Bora 20 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.4.10 Scirocco 15 m/s – marea 0.35 m s.m.m.
4.3.4.11 Scirocco 15 m/s – marea 0.00 m s.m.m.
4.3.4.12 Scirocco 15 m/s – marea -0.35 m s.m.m.
4.3.5 Salinità superficiale
4.3.5.1 Confronto stato di fatto-stato di progetto con venti di bora
4.3.5.2 Confronto stato di fatto-stato di progetto con venti di scirocco
4.3.5.3 Bora 20 m/s
4.3.5.4 Scirocco 15 m/s
4.3.6 Moto ondoso
4.3.6.1 Altezza d'onda con vento di grecale-bora
4.3.6.2 Altezza d'onda con vento di scirocco
4.3.7 Evoluzione morfologica dei fondali a un anno
4.4 Caso 2: mareggiata di Scirocco 26÷27 dicembre 2013
4.4.1 Condizioni al contorno
4.4.2 Livello della superficie libera
4.4.2.1 Confronti stato di fatto - stato di progetto
4.4.2.2 Livello della superficie libera - istante 1
4.4.2.3 Livello della superficie libera - istante 2
4.4.2.4 Livello della superficie libera - istante 3
4.4.3 Velocità della corrente al fondo
4.4.3.1 Velocità della corrente al fondo - istante 1
4.4.3.2 Velocità della corrente al fondo - istante 2
4.4.3.3 Velocità della corrente al fondo - istante 3
4.4.4 Sforzi tangenziali al fondo
4.4.4.1 Sforzi tangenziali al fondo - istante 1
4.4.4.2 Sforzi tangenziali al fondo - istante 2
4.4.4.3 Sforzi tangenziali al fondo - istante 3
4.5 Caso 3: mareggiata di Grecale-Bora 4÷5 febbraio 2015
4.5.1 Condizioni al contorno
4.5.2 Livello della superficie libera
4.5.2.1 Confronti stato di fatto - stato di progetto
4.5.2.2 Livello della superficie libera - istante 1
4.5.2.3 Livello della superficie libera - istante 2
4.5.2.4 Livello della superficie libera - istante 3
4.5.3 Velocità della corrente al fondo
4.5.3.1 Velocità della corrente al fondo - istante 1
4.5.3.2 Velocità della corrente al fondo - istante 2
4.5.3.3 Velocità della corrente al fondo - istante 3
4.5.4 Sforzi tangenziali al fondo
4.5.4.1 Sforzi tangenziali al fondo - istante 1
4.5.4.2 Sforzi tangenziali al fondo - istante 2
4.5.4.3 Sforzi tangenziali al fondo - istante 3

5 MODELLO IDRODINAMICO DI TRANSITO DEI NATANTI

5.1 Griglie computazionali
5.2 Batimetrie
5.3 Elementi del modello
5.4 Velocità di crociera 6 nodi
5.4.1 Configurazione di progetto, marea 0.00 m s.m.m.
5.4.1.1 Livello della superficie libera
5.4.1.2 Sforzi tangenziali al fondo
5.4.1.3 Velocità della corrente
5.4.1.4 Andamento temporale
5.4.2 Configurazione di progetto, marea 0.50 m s.m.m.
5.4.2.1 Livello della superficie libera
5.4.2.2 Sforzi tangenziali al fondo
5.4.2.3 Velocità della corrente
5.4.2.4 Andamento temporale
5.4.3 Configurazione di progetto, marea -0.50 m s.m.m.
5.4.3.1 Livello della superficie libera
5.4.3.2 Sforzi tangenziali al fondo
5.4.3.3 Velocità della corrente
5.4.3.4 Andamento temporale
5.4.4 Configurazione di equilibrio, marea 0.00 m s.m.m.
5.4.4.1 Livello della superficie libera
5.4.4.2 Sforzi tangenziali al fondo
5.4.4.3 Velocità della corrente
5.4.4.4 Andamento temporale
5.5 Velocità di crociera 8 nodi
5.5.1 Configurazione di progetto, marea 0.00 m s.m.m.
5.5.1.1 Livello della superficie libera
5.5.1.2 Sforzi tangenziali al fondo
5.5.1.3 Velocità della corrente
5.5.1.4 Andamento temporale
5.5.2 Configurazione di progetto, marea 0.50 m s.m.m.
5.5.2.1 Livello della superficie libera
5.5.2.2 Sforzi tangenziali al fondo
5.5.2.3 Velocità della corrente
5.5.2.4 Andamento temporale
5.5.3 Configurazione di progetto, marea -0.50 m s.m.m.
5.5.3.1 Livello della superficie libera
5.5.3.2 Sforzi tangenziali al fondo
5.5.3.3 Velocità della corrente
5.5.3.4 Andamento temporale
5.5.4 Configurazione di equilibrio, marea 0.00 m s.m.m.
5.5.4.1 Livello della superficie libera
5.5.4.2 Sforzi tangenziali al fondo
5.5.4.3 Velocità della corrente
5.5.4.4 Andamento temporale
5.6 Grafici di sintesi
5.6.1 Configurazione di progetto, confronto fra maree a -0.50÷0.00÷0.50 m s.m.m.
5.6.1.1 Punto 3, alveo canale
5.6.1.2 Punto 4, varco fra le velme
5.6.2 Configurazione di equilibrio, confronto fra nave a 6 nodi e nave a 8 nodi
5.6.2.1 Punto 3, alveo canale
5.6.2.2 Punto 4, varco fra le velme
5.7 Analisi morfologica

1 PREMESSE

Oggetto della presente relazione è la descrizione degli approfondimenti sviluppati a seguito delle osservazioni del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) relativamente a:

- l'analisi storica dell'evoluzione della porzione di Laguna centrale oggetto dell'intervento;
- la modellazione idrodinamica e morfologica finalizzata a valutare le influenze sulla generale evoluzione della Laguna, per effetto della realizzazione delle opere di adeguamento della via acquea di accesso alla Stazione Marittima di Venezia e di riqualificazione delle aree limitrofe al canale Contorta Sant'Angelo;
- la modellazione idrodinamica, in uno con una valutazione morfologica, dell'effetto delle navi in transito attraverso il nuovo canale Contorta;
- la progettazione delle conterminazioni lungo le nuove strutture morfologiche;
- l'analisi dei possibili siti di conferimento per i materiali di risulta degli scavi.

Nella successiva Figura 1, è riportata la Tavola 1.1, dove viene rappresentata una planimetria di inquadramento dell'area di laguna interessata: sono indicati il tracciato di progetto del canale Contorta Sant'Angelo, la nuova via navigabile che collega il canale Malamocco - Marghera alla Stazione Marittima di Venezia.

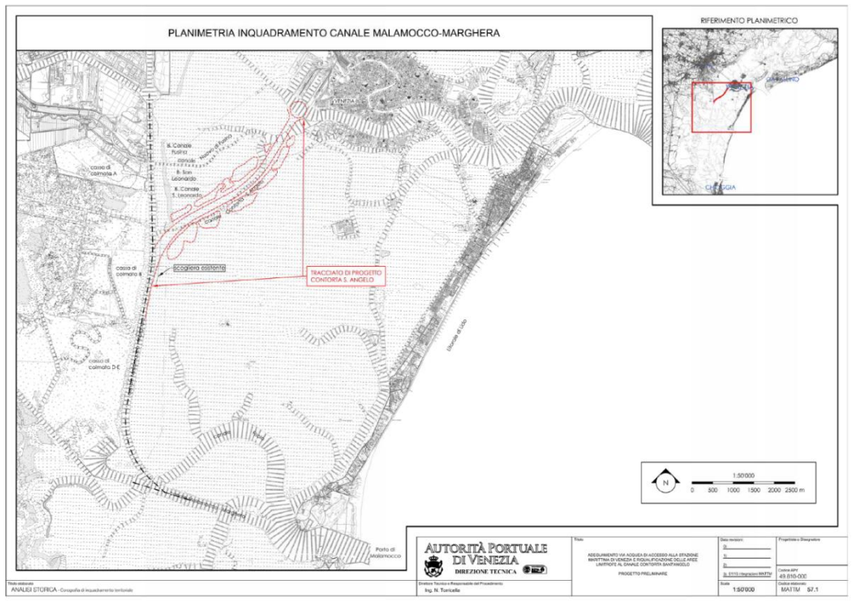


Figura 1: Planimetria di inquadramento

2 ANALISI STORICA

2.1 Cartografia storica

Il presente capitolo tratta l'analisi storica dei fondali, su cui andrà a insistere la via nuova proposta acquea di accesso alla stazione marittima di Venezia, attraverso la riqualificazione delle aree limitrofe al canale Contorta Sant'Angelo.

Si è dapprima fatto riferimento alla georeferenziazione di una serie di rilievi storici, risultato frutto dello studio del 2010 del prof. D'Alpaos "*L'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia attraverso la lettura di alcune mappe storiche e delle sue carte idrografiche*". Nelle Tavole 1.2, 1.3 e 1.4 (i relativi file sono stati scaricati dal sito dell'Atlante della Laguna di Venezia -www.silvenezia.it-) sono contenuti i seguenti rilievi:

- Denaix (1811);
- De Bernardi (1843);
- Ufficio del Genio Civile (1901).

Dall'analisi di tali documenti appare evidente come le aree barenicole abbiano evidenziato una tendenza alla crescita fra i primi due rilievi, avendone quindi osservato il relativo massimo sviluppo nel 1843. Progressivamente, nei rilievi del 1901 (e quindi nel 1931), tali superfici appaiono ridotte, segno evidente che la causa dell'erosione del sedime lagunare è antica e da ritenersi risalente alla costruzione dei moli foranei alla bocca di porto di Malamocco, avvenuta nella seconda metà del 1800.

Nel dettaglio, alcune considerazioni:

- in termini di profondità lungo il Canale Contorta, si può notare un valore medio pari a 4.8 m s.m.m. nella tavola 1.2 corrispondente al 1811, a fronte invece di 7.19 m s.m.m. nella 1.4 del 1901. Inoltre è interessante osservare:
- la significativa riduzione delle barene antistanti Punta Fusina;
- la costruzione della Stazione Marittima;
- le modeste evoluzioni nel tempo del tracciato del canale Contorta.

Le valutazioni desumibili da tali documenti sono però essenzialmente qualitative, in quanto la georeferenziazione presuppone, come noto, un raddrizzamento e una distorsione delle immagini di base, con il conseguente rischio di poterne alterare i contenuti.

Se si considera poi che:

- si è osservato come alcune aree interne dei rilievi del 1901 coincidano totalmente con quelle del 1811, circostanza questa decisamente improbabile, in virtù del fatto che nel 1843 in tali

aree si riscontrassero notevoli differenze;

- soprattutto per le porzioni interne delle barene, si sospetta che i rilievi siano stati limitati alla quantificazione dei perimetri esterni, attesa la circostanza di come si siano rilevati dei chiari all'interno di una grande superficie barenale presenti nel rilievo del 1811, assenti nel 1843 e di nuovo presenti nel 1901,

qualche cautela nell'analisi di tali documenti appare necessaria.

Si ritiene perciò che le configurazioni degli apparati barenicoli rilevati siano assolutamente significative in merito ai relativi perimetri esterni (in particolare verso la laguna *viva*), mentre qualche perplessità va posta sull'intero compendio delle superfici barenali, sovrastimabili per i motivi suindicati, per l'oggettiva difficoltà di procedere al rilievo di superfici di questo tipo.

Un'ulteriore considerazione va posta sulle batimetrie storiche, poiché una serie di cause ha impedito di proporre confronti della relativa evoluzione, tra cui:

- la mancanza di un riferimento comune, per quanto attiene il livello del medio mare di riferimento;
- la generale ridotta densità di punti quotati disponibili.

Per valutazioni analitiche, sono invece notoriamente disponibili tre rilievi completi georeferenziati della Laguna di Venezia, perfettamente sovrapponibili, effettuati nel:

- 1931, da parte del Regio Servizio Idrografico del Magistrato alle Acque;
- 1971, ancora a cura del Servizio Idrografico, non più Regio;
- 2002, da parte del Magistrato alle Acque.

A questi si aggiunge un rilievo planoaltimetrico effettuato nel corso del 2014, limitatamente però alla sola area d'intervento.

Con tali rilievi, sono state analizzate le variazioni intercorse nell'ambito d'indagine con una rappresentazione tridimensionale dei fondali, per avere la possibilità di valutare non solo l'evoluzione delle terre emerse (barene e velme), ma anche quelle dei canali e dei bassifondi adiacenti, attraverso i confronti dei periodi:

1. 1931-1971;
2. 1931-2002;
3. 1971-2002;
4. 2002-2014.

Le Tavole 1.5.1, 1.5.2 e 1.5.3 contengono un'analisi del rilievo dell'Ufficio Idrografico del 1931, schematizzate nel modo seguente:

- la 1.5.1 riporta la resa tridimensionale dei punti e delle linee di quota del rilievo planoaltimetrico;
- la 1.5.2 con la relativa triangolazione dei punti di rilievo;
- la 1.5.3 una rappresentazione con scala cromatica rappresentativa delle batimetrie significative.

In ciascuna Tavola è indicata, al fine di una pratica individuazione dell'area di progetto, la traccia delle opere in esame, indicata con linea tratteggiata.

Nella seguente Figura 2 viene riportata la Tavola 1.5.3, in cui la scala cromatica fornisce un indice della profondità del medio mare.

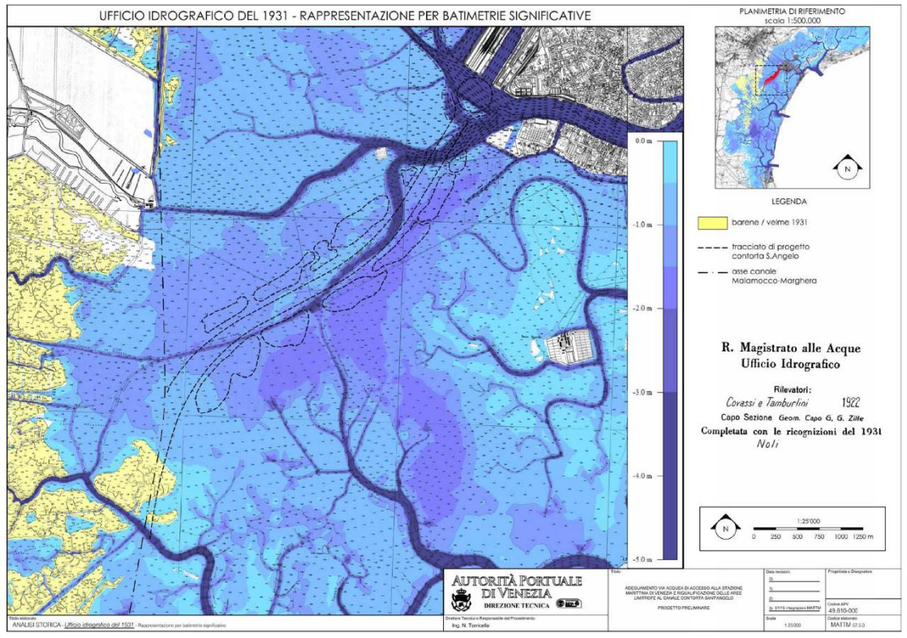


Figura 2: Batimetrie significative (Ufficio Idrografico 1931)

Va tenuto presente il fatto che nel 1931 non sia presente il canale Malamocco-Marghera, giacché l'inizio delle lavorazioni risulta essere datato 1967.

Come suaccennato, questi tre elaborati sono riferiti a quanto riportato dai dati dell'Ufficio Idrografico relativi al 1931: segue la disposizione dei risultati conseguiti nelle analoghe misurazioni effettuate nel 1971, nelle carte 1.6.1, 1.6.2 e 1.6.3.

Analogamente a quanto fatto per quelle del 1931, tali tre tavole vengono suddivise nella maniera seguente, sempre in scala 1:25000:

- la 1.6.1 contiene una schematizzazione del rilievo planoaltimetrico relativo al 1971, dove vengono sempre distinti il tracciato del canale Contorta sant'Angelo dall'asse del canale Malamocco-Marghera;
- la 1.6.2 riporta la triangolazione dei punti di rilievo, dove salta subito all'occhio la drastica riduzione della presenza di barene e velme, all'interno dell'area di canale presa in considerazione rispetto ai rilievi effettuati nel 1931;
- la 1.6.3 tratta la rappresentazione per batimetrie significative. Come per la tavola del 1931, sulla destra è riportata una scala cromatica dei valori di profondità riscontrati durante le lavorazioni. Anche in questa tavola si può riscontrare la riduzione della presenza di barene e velme, accompagnata da un notevole aumento di profondità in corrispondenza dell'asse del canale Malamocco-Marghera.

In analogia a quanto fatto per i dati del 1931, nella seguente Figura 3viene riportata la Tavola 1.6.3, che contiene la rappresentazione per batimetrie significative.

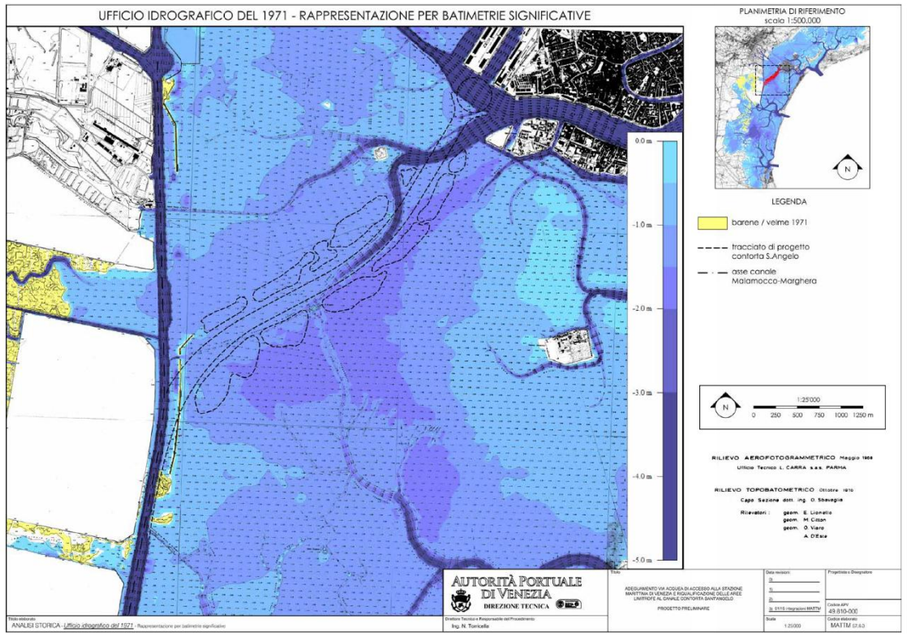


Figura 3: Batimetrie significative (Ufficio Idrografico 1971)

Come riportato all'inizio della trattazione, ci si è posti l'obiettivo di offrire un confronto tra i rilievi effettuati nell'area del canale presa in esame, relativamente a quattro anni: 1931, 1971, 2002 e 2014.

La successiva terna di Tavole 1.7.1, 1.7.2 e 1.7.3 riporta la stessa suddivisione di lavori aggiornati al 2002, sempre in scala 1:25000. In quest'occasione, i lavori sono stati invece condotti dalla *Carta della Laguna di Venezia*, per la precisione:

- la 1.7.1 contiene i risultati del rilievo planoaltimetrico, dove sono state ben delineate le postazioni nelle quali siano state condotte le misurazioni;
- la 1.7.2 presenta la triangolazione dei punti di rilievo: appare evidente come, con il passare del tempo, diminuisca la presenza di barene e velme;
- la 1.7.3 offre la corrispondente rappresentazione per batimetrie significative, munita di un'apposita scala cromatica. Tale elaborato registra un progressivo incremento medio dei valori di profondità.

Tali elaborati riportano una planimetria di riferimento in scala [1:500000], cui segue una legenda per giustificare le caratteristiche del riquadro centrale. Da un confronto fra i risultati ottenuti, si evince l'evoluzione dei fondali con il susseguirsi dei lavori. La seguente Figura 4 certifica quanto suaccennato in termini di batimetrie significative.

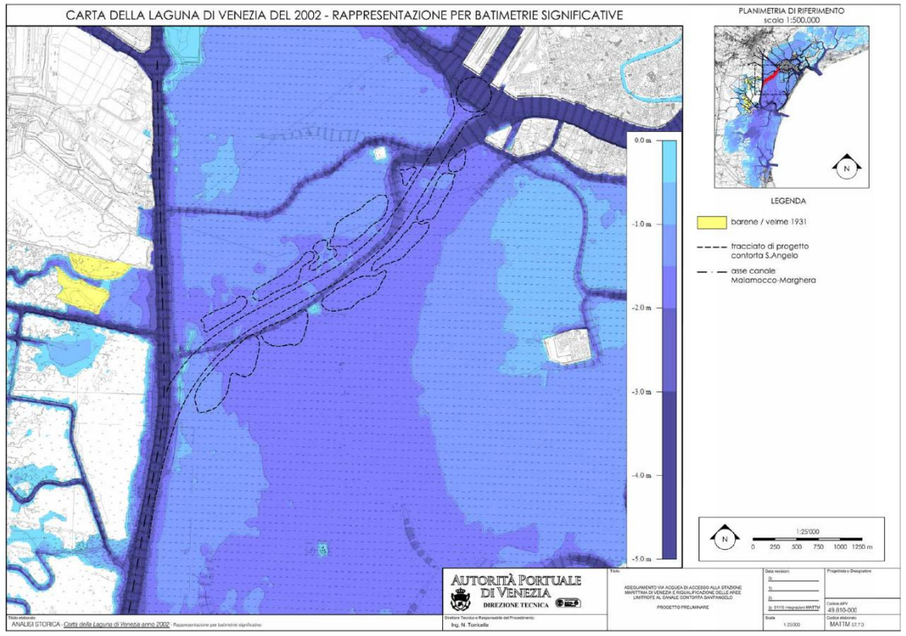


Figura 4: Batimetrie significative (Carta della Laguna di Venezia 2002)

Seguono infine le tre tavole riferite ai rilievi dell'anno 2014, ovvero gli elaborati 1.8.1, 1.8.2 e 1.8.3 Sono strutturate nella maniera seguente:

- la 1.8.1 presenta il rilievo planoaltimetrico del 2014. È indicato il particolare di un lato del canale alla sinistra della Stazione Marittima; a differenza delle precedenti, questa tavola annota anche la presenza di barene e velme all'interno dalla sezione di Laguna considerata;
- la 1.8.2 riporta la triangolazione dei punti di rilievo conseguita;
- la 1.8.3 (cfr. Figura 5) infine contiene una rappresentazione per batimetrie significative relativa all'anno 2014. Si nota immediatamente come le profondità maggiori siano concentrate nei pressi del canale Contorta sant'Angelo, rispetto a quanto si possa percepire con il progressivo allontanamento dal suddetto.

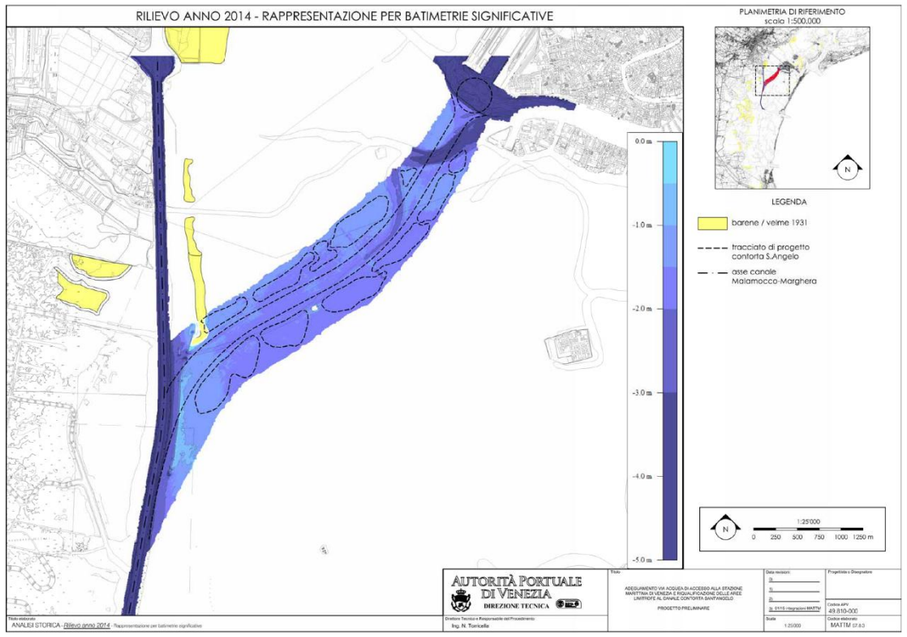


Figura 5: Batimetrie significative (Rilievo anno 2014)

2.2 Confronto fra i rilievi del 1931, 1971, 2002 e 2014

In questo paragrafo viene fatto un confronto fra i risultati ottenuti dai tre rilievi completi georeferenziati della Laguna di Venezia.

Nelle successive immagini, vengono rapportate le coppie di risultati ottenuti in questi quattro periodi. Sulla destra di ciascun elaborato si trova una scala cromatica, dove il colore rosso indica il grado crescente di erosione, mentre in verde c'è livello di interramento.

- La Figura 6 comprende la tavola n. 1.9.1, relativa al confronto fra i rilievi del 1931 e del 1971. Si tratta dell'inizio delle lavorazioni, dove vengono considerati i risultati dei primi due interventi: si può già constatare un livello medio di erosione intorno alla quota di -0.5 m, i valori massimi della quale si individuano in corrispondenza del canale Malamocco-Marghera e davanti all'ingresso della Stazione Marittima. Gli interramenti maggiori, invece, sono nella zona adiacente al suddetto canale e nella zona antistante l'ingresso della Stazione Marittima stessa, laddove termina il canale Contorta Sant'Angelo, con valori intorno ai 1.0÷1.5 m. In sintesi si osserva la progressione dei noti fenomeni di cambiamento della morfologia lagunare, con l'erosione dei bassifondali e l'interramento dei canali lagunari, particolarmente quelli secondari, proseguendo la sopracitata erosione della Laguna avviata con la costruzione dei moli foranei alle bocche di porto.

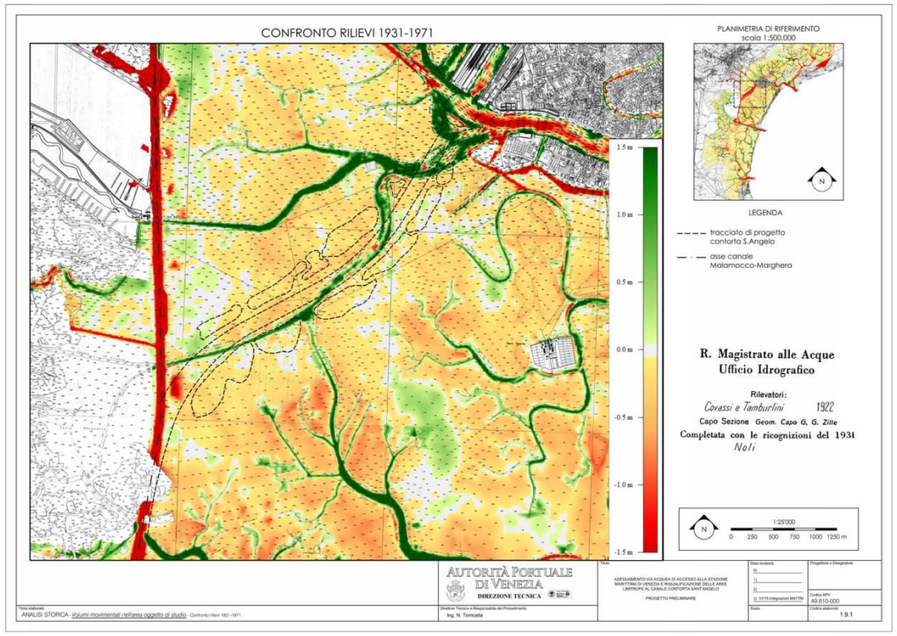


Figura 6: Confronto rilievi 1931 – 1971

- La Figura 7 riporta la tavola n. 1.9.2, dove è inquadrato il confronto fra i risultati del 1931 e quelli del 2002. Le aree più erose e interrate sono le medesime della tavola precedente: in quest'elaborato, il livello medio di erosione risulta però decisamente superiore, soprattutto nella zona circostante la bocca di lago di *Lussariol* e il canale di *Freganzorzi*, con valori medi di -1.0 m. Appaiono invece mediamente ridotti gli interventi di interramento rispetto a quelli del 1931.
- La Figura 8 inquadra la tavola n. 1.9.3, che tratta il confronto fra i rilievi del 1971 e quelli del 2002 (non prendendo più quindi il 1931 come primo termine di paragone). Rispetto alla

tavola precedente, si denota una diminuzione del livello medio di erosione nella porzione di laguna considerata, di valori intorno ai 0.0÷-0.5 m; tutto questo, invece, a fronte di un progressivo interrimento medio, soprattutto in prossimità del canale Malamocco-Marghera.

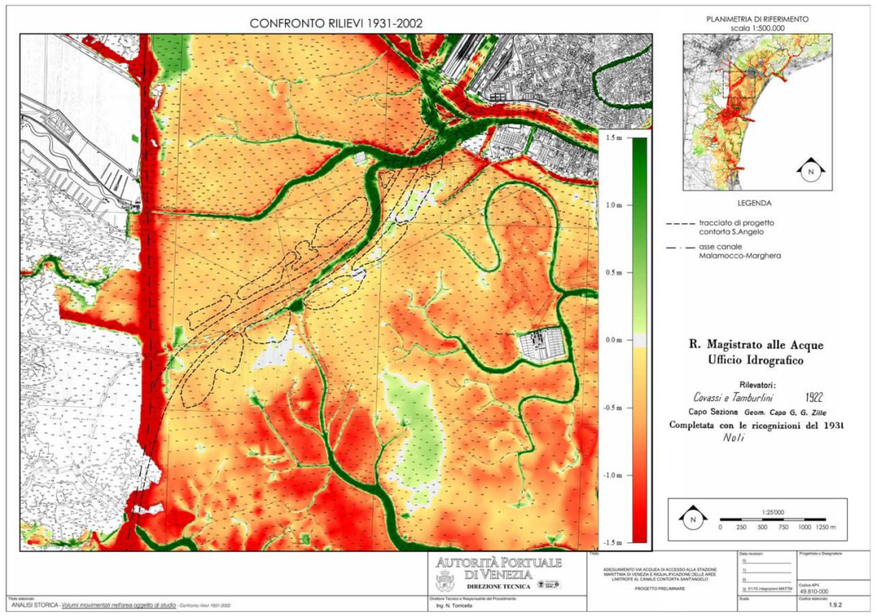


Figura 7: Confronto rilievi 1931 – 2002

- La Figura 9 è infine relativa alla tavola n. 1.9.4: è presente il confronto fra i rilievi del 2002 e quelli del 2014, ultime date in cui siano stati registrati i risultati. In quest'ultimo elaborato viene indicata la situazione unicamente lungo il canale Malamocco-Marghera e in prossimità del Contorta sant'Angelo. Quest'ultimo presenta lungo il percorso mediamente un interramento intorno ai valori 0.0÷0.5 m, mentre all'ingresso della Stazione Marittima è presente un notevole livello di erosione, di estremi individuabili -1.0÷-1.5 m. Lungo il Malamocco-Marghera è invece presente solo il livello di erosione lungo tutto il tracciato, fatto prevedibile trattandosi dell'ultimo periodo di lavorazione.

  A ridosso di tale canale è quindi intercorso un abbassamento, segno di una progressiva erosione indotta dal traffico delle navi, che sta aggravando il fenomeno erosivo già in atto in Laguna. Su questa scala le modifiche non paiono comunque significative, benché si tratti di progressivi abbassamenti del fondale dovuti a erosioni dell'ordine di 0.5÷1.0 m. In questo intervallo di tempo tutta l'area ha subito un qualche interramento, segno della prosecuzione della citata tendenza ad appiattirsi del sedime lagunare, con erosione dei bassifondi e interramento dei canali.

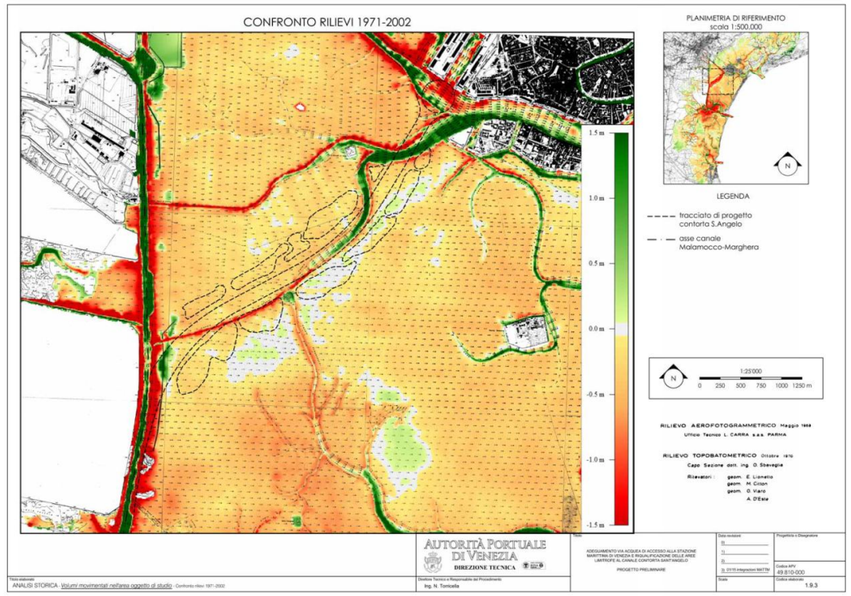


Figura 8: Confronto rilievi 1971 – 2002

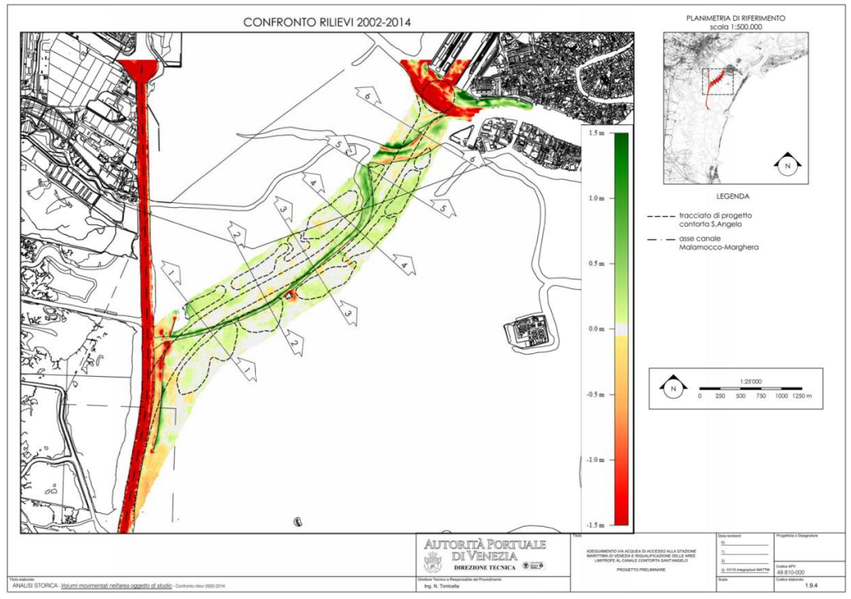


Figura 9: Confronto rilievi 2002 – 2014

Ciascuna delle Tavole 1.9.1÷1.9.4 è stata riprodotta in scala 1:25000, con i volumi movimentati nell'area oggetto di studio.

Sono anche indicate le sei sezioni tracciate all'interno del canale Contorta Sant'Angelo: su di esse sono state condotte apposite operazioni utili a pervenire ai risultati finali, di cui le immagini riportate. Le successive Tavole 1.10.1÷1.10.2 riportano le sezioni nei vari periodi di lavoro in rapporto al tracciato di progetto, accompagnate da una legenda a titolo esplicativo dei contenuti. Le sezioni sono state rappresentate in scala distorta 1:500 per le altezze e 1:5000 per le lunghezze, così distribuite:

- la Figura 10 riporta la Tavola 1.10.1, dove sono analizzate le sezioni 1-2-3;
- la Figura 11 riporta la Tavola 1.10.2, dove sono analizzate le sezioni 4-5-6.

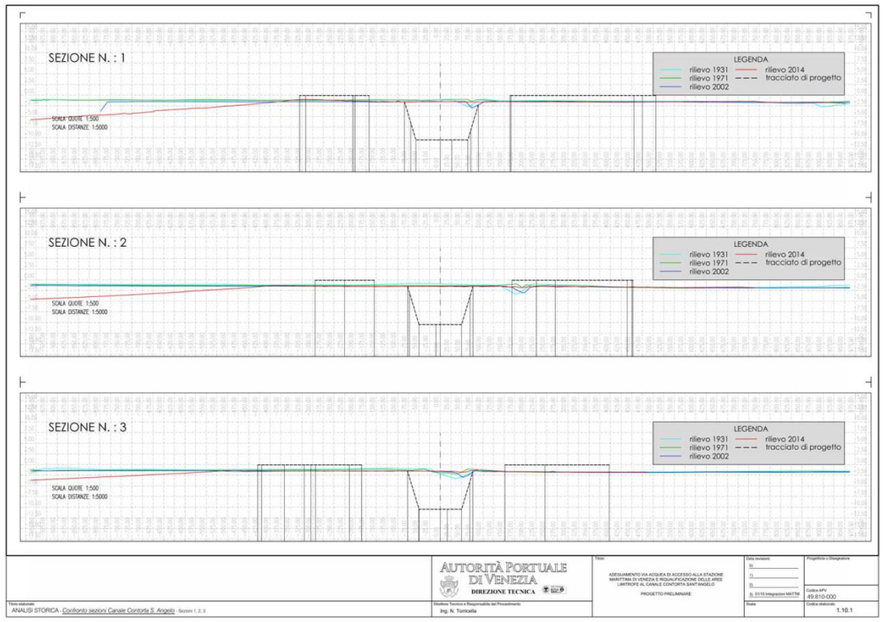


Figura 10: Confronto sezioni 1-2-3 canale Contorta sant'Angelo

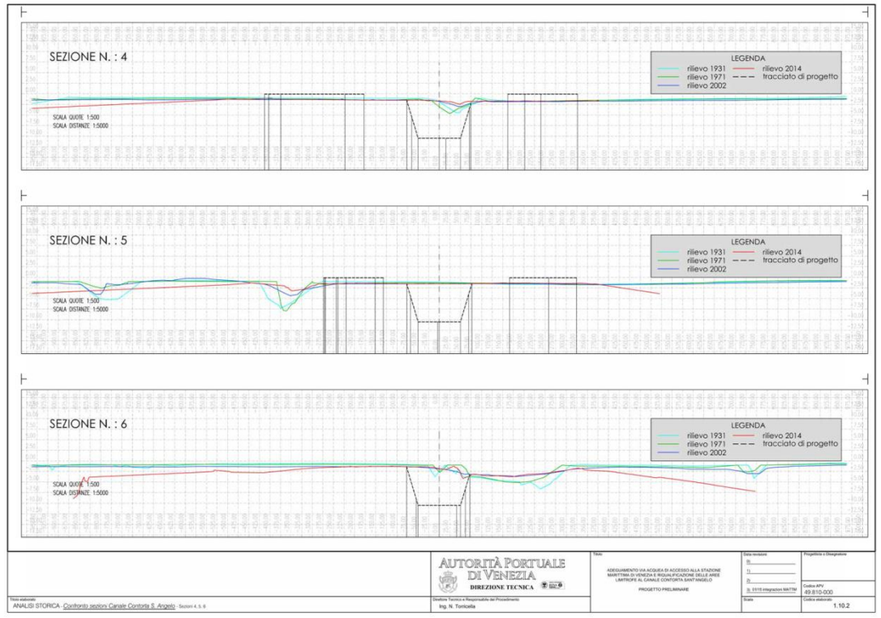


Figura 11: Confronto sezioni 4-5-6 canale Contorta sant'Angelo

2.3 Commenti

Relativamente ai due rilievi di epoca meno recente (1931 e 1971), il procedimento adottato per tale rappresentazione tridimensionale ha seguito i seguenti passaggi:

- **scannerizzazione**, **raddrizzamento** e **georeferenziazione** dei fogli originali del rilievo, allo scopo di permetterne la sovrapposizione con gli altri a disposizione;
- **digitalizzazione** dei punti quota e successiva rappresentazione sulla base del rilievo presente in origine. Nella costruzione del modello tridimensionale del terreno, hanno anche assunto un'importante valenza le linee della cartografia (dette anche *linee di vincolo*), che rappresentano i limiti di canali e strutture emerse (barene e velme), in quota sulla base del corrispondente livello;
- **triangolazione dei punti** in coordinate tridimensionali e tracciamento delle curve di livello. La campitura dei colori è stata scelta per raffigurare il progressivo approfondimento dei fondali.

Per quanto riguarda i rilievi datati 2002 e 2014, l'elaborazione dei dati a disposizione non ha richiesto la stessa quantità di lavoro: infatti, i punti sono già in coordinate georeferenziate (x,y,z),

risultando quindi utilizzabili come base per la costruzione del modello tridimensionale. Anche in questa situazione tali punti quotati sono stati infittiti con le linee di vincolo (messe in quota allo stesso modo), per ottenere una miglior restituzione della rete di canali. A partire dai rilievi disponibili, sono stati costruiti altrettanti modelli tridimensionali del terreno (allo scopo di rappresentarne la morfologia), con i quali è stato dato seguito a due tipi di applicazioni:

1. la valutazione delle differenze di quota fra i fondali dei diversi rilievi, per rappresentare le erosioni e i riporti fra prefissati intervalli di tempo (1931-1971, 1971-2002, 1931-2002 e 2002-2014):tale confronto è consistito nella costruzione di mappe tematiche in cui, secondo una scala cromatica, vengono rappresentate le erosioni e i riporti nei succitati periodi; gli intervalli selezionati per queste rappresentazioni sono quelli di interesse per gli interventi morfologici, avendo scelto il colore rosso per le erosioni e il verde per evidenziare i riporti;
2. il tracciamento di sezioni trasversali.

In generale nei bassifondi della Laguna centrale, si può chiaramente osservare l'azzeramento della morfologia originaria, con l'approfondimento dei bassifondali e l'interramento dei canali, messa in risalto dal colore verde scelto per i riporti;

È interessante osservare il fenomeno di "autoalimentazione" delle barene, che evidenziano nel tempo un innalzamento della relativa quota assoluta a causa del progressivo deposito di materiale organico, pur mantenendo le aree stesse il connotato tipico di superficie barenicola, per il contemporaneo innalzamento del livello medio mare e dell'abbassamento del terreno per subsidenza.

Tra il 2002 e il 2014,si osserva il progredire dell'erosione lungo le sponde delle casse di colmata e l'erosione stessa sui bassifondali al di sotto del canale Contorta Sant'Angelo. In sintesi, si può ritenere che:

- la prevalenza del colore rosso (indice di erosione) nei bassifondi prospicienti l'area di intervento è di tutta evidenza, potendo individuare un gradiente maggiore nell'intervallo 1971÷2002, che non nel quarantennio precedente;
- contestualmente si osserva un interramento dei canali, nei quali sedimentano i materiali asportati dai bassifondi, venendo meno così la relativa presenza nel contesto degli attuali bassifondali;
- le barene tendono nel lungo periodo a mantenersi (con il progressivo deposito di sostanza organica) e a seguire l'evoluzione del medio mare, come evidenziato dai riporti osservati sulle strutture morfologiche esistenti.

3 MODELLISTICA IDRODINAMICA TRIDIMENSIONALE

3.1 Considerazioni generali

Molti punti della richiesta di integrazione da parte della Commissione VIA Nazionale richiedono, come noto, l'implementazione di un modello idrodinamico e morfologico tridimensionale. A tal fine è stato utilizzato il software Delft3D, prodotto dall'istituto di ricerca olandese Deltares, di uso generalizzato nel mondo per gli studi di idraulica lagunare, i cui dettagli sono descritti nel successivo paragrafo 3.2.

Qui di seguito si vuole brevemente descrivere quali siano gli obiettivi perseguiti con la presente indagine, finalizzata a fornire un'attendibile previsione degli effetti idrodinamici e morfologici legati alla ricalibratura del canale Contorta, adeguandolo alle dimensioni necessarie per garantire la navigazione delle navi da crociera: una volta entrate in Laguna attraverso la Bocca di Porto di Malamocco, quest'ultime saranno dirette alla Stazione Marittima di Venezia.

Pur demandando i necessari approfondimenti alla lettura degli specifici elaborati, si rammenta come i lavori consistano nell'adeguamento del canale Contorta dai punti di vista sia planimetrico che dimensionale, con l'escavo dell'attuale sezione, tipica di un canale secondario lagunare, realizzando una cunetta di larghezza 100 m e profondità -10.50 m s.m.m., con una serie di strutture morfologiche sui relativi bordi, finalizzate a contenere gli effetti della navigazione.

Per prima cosa, si vuole evidenziare come quanto qui prodotto non sia una ricerca scientifica finalizzata all'approfondimento di specifiche tematiche lagunari, quanto uno studio di dettaglio a supporto della progettazione preliminare delle opere in titolo, con due specifici obiettivi:

1. fornire un confronto del regime idrodinamico lagunare nelle condizioni attuali e in quelle prospettate di riforma, a seguito della realizzazione del nuovo canale;
2. acquisire opportuni elementi di dettaglio, che si rivelino utili agli sviluppi della progettazione delle strutture morfologiche previste in fregio al canale.

Le attività sono state quindi sviluppate attraverso svariate fasi, distinte in funzione delle diverse condizioni al contorno imposte al modello. In particolare, si vuole qui evidenziare come si sia scelto di indagare un ampio numero di casi, variando non solo le condizioni di marea, ma anche quelle del vento, con una combinazione dei relativi valori: non solo quindi venti estremali di bora o di scirocco, ma una combinazione di differenti velocità di vento e livelli di marea, in modo che il giudizio sull'effettiva influenza delle nuove opere sia giustificato da una significativa casistica, in aggiunta alle sole condizioni particolari, poiché potenzialmente non rappresentative dell'effettiva influenza del canale.

Prima di procedere all'applicazione del modello nei diversi casi di studio, sì è ovviamente proceduto a una calibrazione dello stesso, sulla base però dei dati effettivamente disponibili: si tratta dei livelli di marea registrati nelle diverse stazioni di misura, distribuite all'interno del sedime lagunare.
Sono stati quindi studiati gli effetti delle seguenti condizioni.

1. Dapprima è stata considerata la marea ordinaria (escursione da +0.35 a -0.35 m s.m.m.), nella convinzione che in queste condizioni potenzialmente più frequenti, potessero sussistere gli effetti di modifica legati alle nuove opere. Con la marea cosiddetta *morfologica* (MAV, CVN, TCH 2002) per tre distinte condizioni (alta marea, bassa e medio mare) sono stati studiati gli effetti di diverse velocità di vento (Bora e Scirocco). Fra le infinite combinazioni effettivamente simulate e descritte nel seguito, sono stati rappresentati graficamente dodici istanti significativi con specifiche tavole tematiche, in modo da fornire un'ampia casistica a supporto del seguente giudizio. Per ciascun istante sono stati rappresentati i valori delle velocità e degli sforzi tangenziali al fondo, dei livelli, della salinità in una particolare condizione, oltre a una valutazione sul moto ondoso in due casi estremi. Per l'effettiva comprensione del fenomeno, saranno di fondamentale importanza le tavole rappresentative delle differenze fra i valori calcolati per:
   - l'attuale Laguna di Venezia, così come desunta dalla Carta della Laguna 2002 del MAV, a cui sono state aggiunte le opere del sistema MOSE e le barene realizzate dal MAV-CVN negli ultimi 15 anni circa,
   - la configurazione precedente integrata con le opere del presente progetto,

   volendo ribadire come l'importanza dell'indagine stia proprio nella stima delle differenze del regime idraulico lagunare nelle due succitate condizioni. Fra i diversi risultati conseguiti, è contenuta anche una previsione dell'evoluzione morfologica dell'area, la cui valutazione assume un significato interessante, se confrontata con le analisi dell'evoluzione storica del paraggio oggetto di intervento.
2. Sono stati analizzati gli effetti di mareggiate intense combinate con alte maree importanti, sia di bora che di scirocco. Si è infatti provveduto a ricostruire gli andamenti dei vari parametri idrodinamici, verificatisi per la mareggiata di scirocco nel mese di dicembre 2013 e per quella di bora nel febbraio di quest'anno. Senza volerne anticipare i risultati, appare interessante osservare come quelli ottenuti con le varie maree, sia ordinarie che eccezionali, paiano assolutamente omogenei.
3. L'ultima parte della modellistica riguarda lo studio degli effetti della navigazione all'interno del canale Contorta, nella relativa configurazione di progetto. Per una nave tipo di grandi dimensioni, sono state valutate due diverse velocità di crociera (6÷8 nodi), con l'obiettivo di approfondire non solo l'idrodinamica del canale, ma anche gli effetti di contenimento delle sollecitazioni idrodinamiche indotti dalle strutture morfologiche in fregio allo stesso, oltre che fornire elementi utili al dimensionamento delle conterminazioni. Anche la modellistica delle navi è stata oggetto di una specifica calibratura, sulla base delle misure in questo caso disponibili.

Sin da questo momento, si vuole anticipare come la valutazione degli effetti morfologici, legati al prospettato traffico lagunare, sia stata affrontata con un approccio ingegneristico - sperimentale, ponendo come base di riferimento l'evoluzione del canale Malamocco-Marghera, nella maniera in cui questa è osservabile sulla base dei diversi rilievi storici a disposizione. Si ritiene che questo tipo di approccio sia assolutamente cautelativo da un punto di vista ingegneristico, attesa la circostanza di come non sia nemmeno ipotizzabile che il traffico crocieristico, cui sarà soggetto il nuovo canale Contorta, sia superiore a quello che ha interessato il canale industriale (a partire dalla relativa costruzione nella seconda metà degli anni '60).

3.2 Il software Delft3D

Il software utilizzato è Deltares Delft3D, di diffuso utilizzo nel mondo per simulazioni idrodinamiche e morfologiche in ambienti fluviali, lagunari e costieri. Il programma è composto da svariati moduli fra i quali ne sono stati scelti due adatti agli obiettivi della presente analisi: D-Flow e D-Waves, dei quali si propone la descrizione nei successivi paragrafi.

3.2.1 Il modulo Delft3D-Flow

Il modulo Delft3D-Flow simula fenomeni di trasporto e di flusso instabile risultanti da forzanti meteorologiche e di marea, includendo l'effetto delle differenze di densità dovute ad una distribuzione non uniforme di temperatura e salinità.
Un numeroso insieme di fenomeni fisici viene preso in considerazione dal modello:

- gradienti di superficie libera;
- effetto della rotazione terrestre, la cosiddetta forza di *Coriolis*;
- acqua con diverse densità;
- gradienti di densità orizzontale per la pressione;
- turbolenza indotta da flussi di massa e momento;
- trasporto di sali, calore ed altri costituenti conservativi;
- forzanti di marea al contorno;

- sforzo di taglio dovuto alla variazione spazio temporale del vento sulla superficie dell'acqua;
- variazione spaziale dello sforzo di taglio sul fondo;
- variazione spazio temporale della pressione atmosferica sulla superficie dell'acqua;
- apporti di portata variabili nel tempo;
- sommersioni ed emersioni di bassifondi;
- scambio di calore attraverso la superficie libera;
- evaporazione e precipitazione;
- forze generate dalle maree;
- effetto del flusso secondario sulle equazioni dei momenti a media profondità;
- sforzo di taglio laterale sulle pareti;
- scambio verticale del momento dovuto al moto ondoso interno;
- influenza delle onde sullo sforzo tangenziale di fondo;
- sollecitazioni indotte dalle onde e dai flussi di massa;
- flusso attraverso strutture idrauliche;
- flussi derivanti da vento inclusi cicloni ad uragani.

La modellazione numerica idrodinamica risolve nello spazio e nel tempo le equazioni di *Navier – Stokes* per fluidi incomprimibili sotto le assunzioni di *Boussinesq* e di acque poco profonde. Nel modello 3D le velocità verticali sono computate dall'equazione di continuità e l'insieme delle equazioni differenziali parziali, combinate con un appropriato set di condizioni iniziali ed al contorno, è risolto per una griglia computazionale curvilinea.

Superfluo appare, nel caso in esame, proporre una descrizione dei fondamenti matematici del modello demandando eventuali approfondimenti al riguardo alla lettura dei manuali d'uso del programma, che rappresenta uno strumento di uso consolidato e riconosciuto a livello internazionale. La modellazione è basata sulla costruzione di una griglia computazionale dell'area oggetto d'indagine, con associata batimetria dei fondali.

3.2.2 Il modulo Delft3D-Waves

Il modulo Delft3D-Waves può essere usato per simulare la propagazione e la trasformazione di onde da vento in mare aperto, acque costiere, estuari, canali ed ambienti a marea. Viene calcolata l'evoluzione delle onde su profondità variabili, per predeterminate condizioni di vento e di marea.

Il programma è in grado di considerare la generazione dell'onda dovuta al vento e la relativa dissipazione dell'energia dovuta all'attrito di fondo, oltre alle interazioni non lineari fra onda e onda, quali ad esempio rifrazione e diffrazione.

Il modello matematico utilizzato per il calcolo delle onde, della cosiddetta terza generazione, è denominato SWAN (*SimulatingWavesNearshore*) ed è stato validato e verificato con successo da *Ris*, 1997 e *Booij*, 1999, essendo stato sviluppato dall'Università tecnica di Delft e continuamente applicato a casi di studio in tutto il mondo.

Il modello matematico SWAN si basa sull'equazione discreta di bilancio dell'azione spettrale e premette di coprire tutte le direzioni e frequenze. Di conseguenza può modellare un campo di moto per onde a cresta corta, che si propagano simultaneamente da differenti direzioni.

SWAN tiene conto di una serie di fenomeni connessi alla propagazione di un'onda, riconducibili a:

- lo *shoaling* ovvero la progressiva crescita dell'onda all'avvicinarsi della terraferma;
- la rifrazione indotta sia dalla corrente che dalla profondità;
- il vento;
- il *whitecapping*, ovvero il frangimento per raggiunta ripidità limite dell'onda, con conseguente dissipazione di energia;
- l'attrito di fondo;
- il frangimento dovuto alla profondità del fondale;
- l'interazione non lineare tra le onde.

4 MODELLO IDRODINAMICO E MORFOLOGICO

4.1 Elementi del modello

Il modello idrodinamico realizzato per il presente studio, è basato sul sistema di cinque griglie computazionali descritto nell'elaborato4.1 e qui di seguito riprodotto in Figura 12. Un'apposita funzione del programma Delft 3D chiamata *domain decomposition* permette infatti di scomporre il dominio di calcolo in diverse griglie di computazionali a diverso grado di accuratezza.

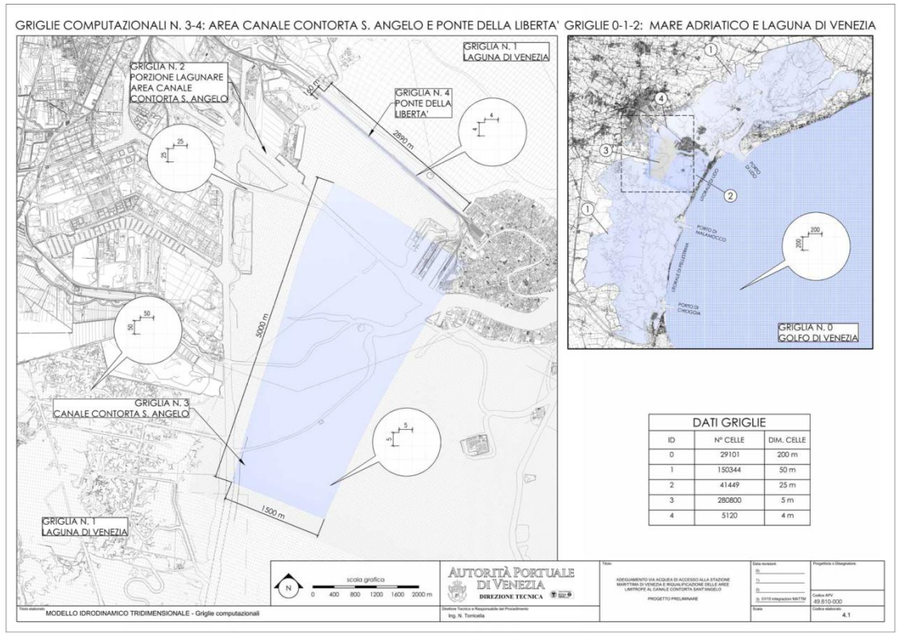


Figura 12: griglie computazionali

La griglia n.0, composta da circa 29'000 celle di dimensioni 400 m, copre il tratto del mare Adriatico antistante la Laguna di Venezia. La griglia n.1 invece copre lo spazio acqueo lagunare al di fuori dell'area del canale Contorta S. Angelo, sia a nord di Venezia che fra le bocche di porto di Malamocco e Chioggia. Tale griglia è composta da oltre 150'000 celle di dimensioni medie 50 metri.

La griglia n. 2 è stata costruita nella porzione lagunare attorno al Canale Contorta S. Angelo, a sud di Venezia, con oltre 41'000 celle di dimensioni medie 20 metri. Nell'area dove sorgerà il nuovo canale è stata inoltre costruita una griglia più fitta, la n.3 composta da circa 280'000 celle di dimensioni medie 5 metri, complessivamente lunga cinque chilometri e larga 1.5 chilometri.

La griglia n.4 è stata infine realizzata per l'area del Ponte della Libertà al fine di rappresentare correttamente i varchi che costituiscono il ponte con celle di dimensioni medie 4 metri. La griglia per il Ponte della Libertà è costituita da 5120 celle ed ha un'altezza di 160 metri per una larghezza di 2890 metri. Come già specificato nelle premesse alla modellazione, la batimetria del modello è stata desunta dalla Carta della Laguna 2002 del MAV, a cui sono state aggiunte le opere del sistema MOSE e le barene realizzate dal CVN.

Nel successivo elaborato grafico 4.2 vengono rappresentate le batimetrie associate a ciascuna delle cinque griglie che costituiscono il modello, oltre alla schematizzazione del carattere tridimensionale dello stesso.

Tre sono i piani (layer), in cui è stata suddivisa la profondità lagunare secondo le percentuali indicate riferite alla profondità di ciascuna cella, volendo qui evidenziare come la velocità del fondo sia, ad esempio, la velocità media del layer 3, che interessa la porzione del 20% inferiore del tirante d'acqua lagunare.

In maniera analoga è stata valutata la velocità superficiale della corrente, volendo qui evidenziare come il numero ridotto di layer (il programma consente la rappresentazione di layer fino al numero di 100 contemporaneamente) sia stato consigliato dalla presenza di un'area complessivamente vasta, con ampie aree a bassofondo.

Relativamente alla salinità, è stato considerato un valore costante su tutta la Laguna di 27 ppt (acqua salmastra) ad eccezione del flusso entrante dalle bocche di porto con 36 ppt (acqua salata). Su questo specifico punto si rimanda alla lettura del paragrafo 4.4.1.

Per quanto riguarda le caratteristiche dei sedimenti del fondale lagunare è stata presa come riferimento la *Mappa attuale della granulometria dei sedimenti (0-20 cm) nei bassifondi della Laguna di Venezia,* (Magistrato alle Acque di Venezia, Consorzio Venezia Nuova, Thetis 2002), di seguito rappresentata in Figura 13.

Nella succitata mappa sono rappresentate otto diverse classificazioni presenti all'interno dell'intero ambito lagunare e comprendenti argille, limi e sabbie, mentre per la zona di progetto si osserva una condizione piuttosto omogenea, con l'individuazione di materiali tendenzialmente fini, a comportamento coesivo, come limi argillosi debolmente sabbiosi (LADS).

Detta condizione di omogeneità trova riscontro anche nella documentazione prodotta in occasione della campagna di indagini effettuata dall'Autorità Portuale di Venezia lungo il tracciato di progetto del canale Contorta Sant'Angelo.

In particolare, in riferimento alla caratterizzazione fisica dei sedimenti eseguita su campioni prelevati nei primi tre metri di fondale, si identificano materiali con bassi contenuti sabbiosi e forte presenza di limi e argille.

Per la schematizzazione del fondale è stato considerato un sedimento a carattere coesivo avente le seguenti caratteristiche geotecniche medie:

- densità specifica 2650 kg/m³;
- densità di tempo secco 1800÷1850 kg/m³;
- angolo di attrito interno 22°÷23°;
- coesione non drenata 0.05 kg/cm²;
- velocità di sedimentazione 0.5 mm/s.

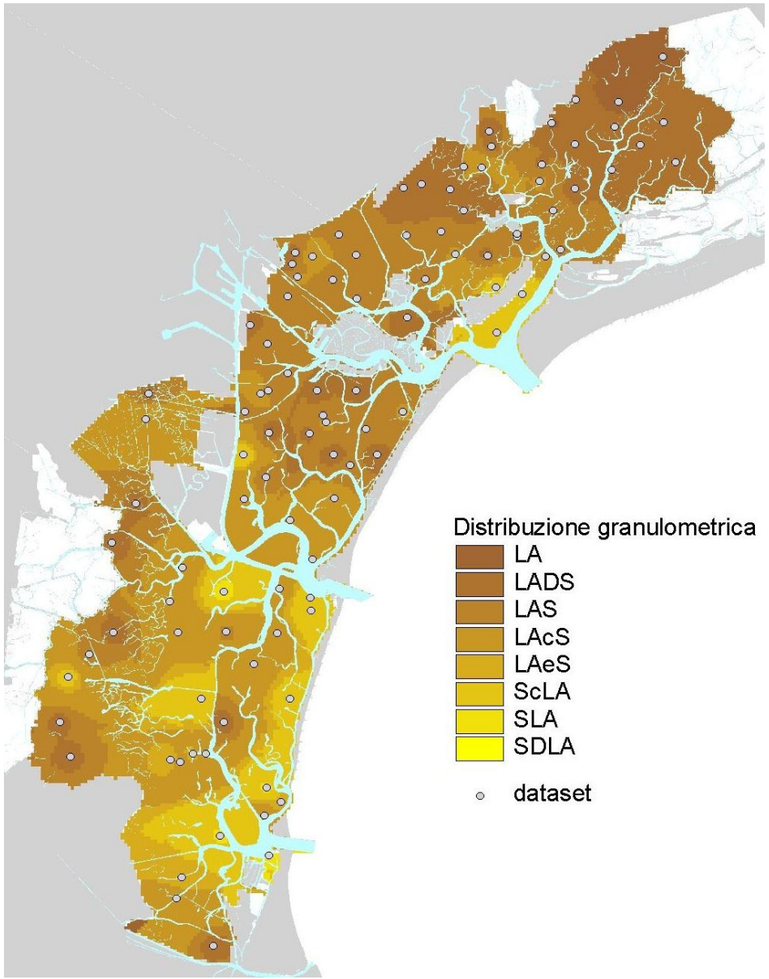


Figura 13: mappa della granulometria

La presenza di vegetazione, a diverso livello di copertura sulle superfici lagunari e barenicole esistenti, deve essere altresì considerata, dal momento che le piante offrono una resistenza al moto evidentemente diversa da quella dei fondali lagunari, privi di copertura vegetale.

Tali elementi, come noto, contribuiscono ad intrappolare i sedimenti, influenzandone il trasporto, che avviene attraverso il flusso indotto dalle forzanti di marea ed il vento.

Il primo parametro che deve essere identificato, al fine di considerare la presenza della vegetazione sul suolo è la scabrezza di fondo, espressa secondo diverse formulazioni quali Manning, Chézy e White-Colebrook. Nella fase di calibrazione è stato fatto riferimento alla formulazione di Chézy, valutandola come la più appropriata a modellare i processi morfologici. A tal fine, è importante notare che, utilizzando la formula di Chézy, lo sforzo tangenziale al fondo varia solamente con la velocità mediata lungo l'asse verticale, che è sempre inferiore nei bassifondi, risultando in questo modo pressoché ininfluente la dipendenza diretta della scabrezza dal valore della profondità lagunare, venendo quindi meno la possibilità che si ingenerino instabilità nel modello, a fronte di bruschi gradienti della quota del terreno, come presente ad esempio a ridosso di strutture morfologiche.

Con la formula di Manning invece lo sforzo tangenziale sul fondo è inversamente proporzionale alla profondità, cosicché a parità di velocità è possibile avere diversi sforzi tangenziali, per aree con diverse profondità. Di conseguenza nelle zone con bassi fondali si possono generare sforzi tangenziali al fondo, troppo elevati rispetto alla realtà, venendo quindi indotti localizzati fenomeni erosivi non veritieri, con la conseguente possibilità che, come sopra accennato, possano generarsi instabilità di calcolo.

I dati di partenza per la scabrezza sono stati reperiti dallo C.2.2/VII – "*Sviluppo e calibrazione di un modello matematico a maglia curvilinea per le analisi morfologiche e ambientali della laguna di Venezia*" (MAV, CVN, TCH 2002). In particolare alle superfici con presenza di vegetazione è stato attribuito il valore di 30 in $m^{1/2}s$, mentre per le restanti superfici caratterizzate da un valore di scabrezza pari a 60 $m^{1/2}s$.Come descritto in seguito, all'interno del paragrafo 4.2.1 riguardante la calibrazione idrodinamica, tali valori sono stati oggetto di modifica al fine di pervenire ad un corretto funzionamento del modello, in termini di riproduzione dell'escursione di marea all'interno della Laguna.

L'altro parametro variabile in funzione della presenza di vegetazione al suolo è lo sforzo tangenziale critico per l'erosione, parametro che quantifica lo sforzo tangenziale limite, al di sotto del quale non avviene alcun fenomeno erosivo.

Secondo quanto reperito in letteratura (*Amos et al.,* 2004), i valori dello sforzo tangenziale critico per l'erosione sono stati posti pari a:

- 0.5 N/m² per le superfici di suolo nudo;
- 0.8 N/m² per le aree vegetate;
- 1 N/m² per i canali.

E' stata infine considerata la presenza del Naviglio Brenta, con riferimento ai dati tratti dall'analisi idrologica del Bacino Naviglio Inferiore nello studio *Valutazione degli apporti di acque dolci sversate in laguna di Venezia dal bacino scolante e dal F. Sile durante le stagioni 1997 e 1998* (MAV-CVN, D. Rinaldo, 1999).

Considerando la portata media nelle due annate di riferimento, si ottiene un valore di 6.43 m³/s che è stato utilizzato come condizione al contorno in corrispondenza allo sbocco del Naviglio Brenta nella zona di Fusina.

Relativamente alla portata solida, con riferimento a studi effettuati nella Laguna di Venezia e in mancanza di misurazioni sul campo, si ritiene che una realistica concentrazione di sedimento proveniente dal Naviglio Brenta sia pari a 30 mg/l.

4.2 La fase di calibrazione

Al fine di assicurare l'effettiva capacità del modello di simulare i parametri idrodinamici e morfologici d'interesse, è stata effettuata una calibrazione idrodinamica e morfologica dello stesso.

4.2.1 Calibrazione idrodinamica

La calibrazione idrodinamica è stata effettuata considerando condizioni di vento e di marea ordinarie, come quelle registrate nei giorni 12 e 13 luglio 2010, di seguito riportate.

A tal fine le condizioni al contorno prescelte per il modello, appositamente fornite dal PIOP ad APV per il presente studio, sono:

- livelli di marea alle bocche di porto, compresi tra -0.60 m e +0.60 m s.m.m., come rappresentato in Figura 14;
- velocità e direzione del vento alla piattaforma CNR (cfr. Figura 15 e Figura 16), con intensità comprese entro gli 8 m/s e provenienze dai quadranti di nordest e sudest.

Il controllo dei risultati ottenuti, in termini di livelli dell'acqua all'interno della Laguna, è stato effettuato con riferimento ai dati delle stazioni dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT).

Fra le stazioni presenti nella Laguna di Venezia, ne sono state scelte cinque la cui posizione è successivamente rappresentata in Figura 18:

1. Murano in Laguna Settentrionale;
2. San Nicolò in Laguna Settentrionale;
3. Torson di Sotto in Laguna Centrale;
4. Faro Rocchetta in Laguna Centrale;
5. Chioggia Vigo in Laguna Meridionale.

I confronti fra i livelli di marea misurati in ciascuna di queste cinque stazioni e quelli simulati dal modello nelle varie prove, sono di seguito rappresentati in Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23.

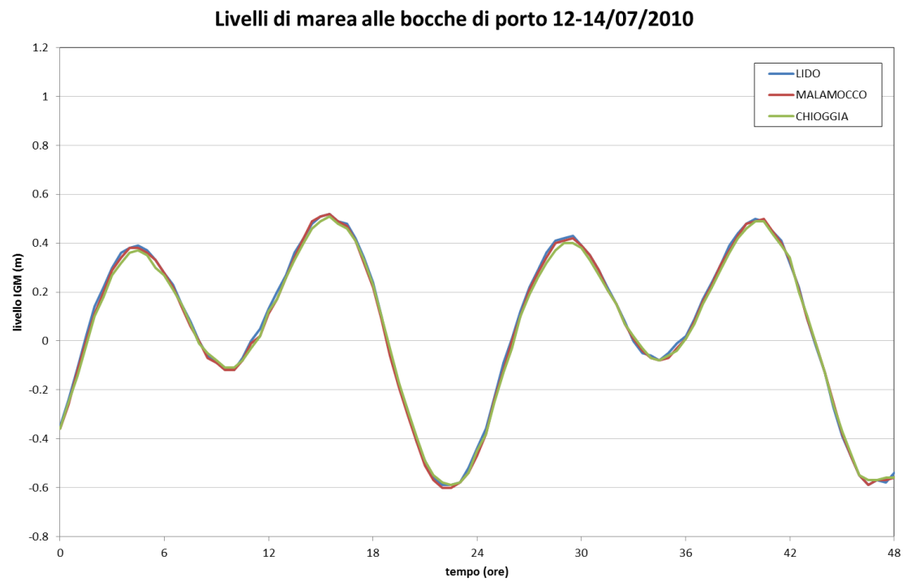


Figura 14

Figura 15

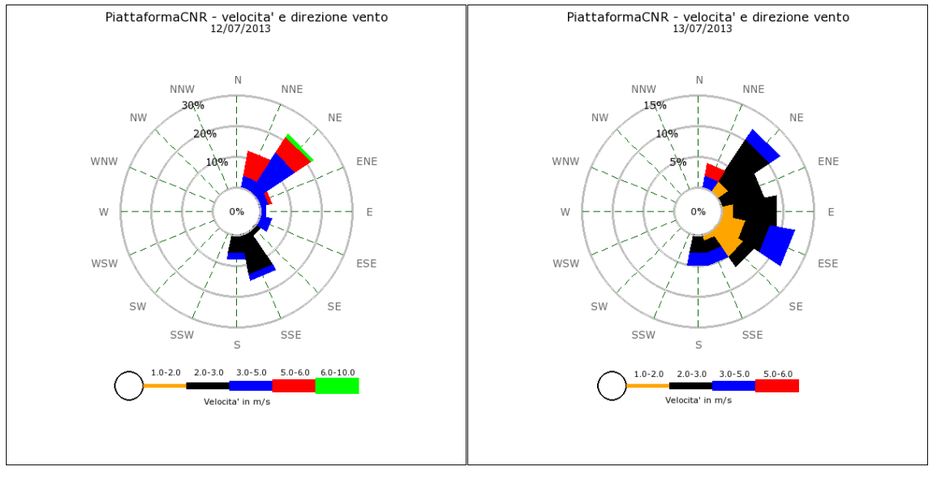


Figura 16

Sono state effettuate quattro distinte prove di calibrazione idrodinamica, nelle quali sono stati variati i valori delle scabrezze al fondo nelle varie aree della Laguna, coperte dalle griglie computazionali, descritte precedentemente nel paragrafo 4.1. Il prospetto delle prove effettuate è qui di seguito riportato in Tabella 1.

PROVA	SCABREZZE ($m^{1/2}/s$)					
	barene	bassifondi	canali	Chioggia	Malamocco	Lido
1	30	60	60	60	60	60
2	25	35	45	20	20	20
3	25	35	45	20	35	30
4	25	35	45	20	30	30

Tabella 1

Nella prima prova sono stati mantenuti i valori utilizzati nel succitato studio C.2.2/VII (MAV, CVN, TCH, 2002), ovvero 30 $m^{1/2}/s$ per le barene e 60 $m^{1/2}/s$ per tutte le altre superfici.

Dai grafici comparativi delle cinque stazioni lagunari si osserva che in tutti i casi le curve di marea simulate anticipano le maree reali e le sovrastimano sia nei colmi che nei cavi.

Appare quindi necessario ritardare la propagazione dell'onda di marea dalle bocche di porto fino all'interno della Laguna, con una generale aumento delle scabrezze, che nel caso della formulazione di Chézy significa diminuirne i valori rispetto al caso precedente.

Nella prova 2 quindi, i valori scelti sono pari a 25 $m^{1/2}/s$ per le barene, 35 $m^{1/2}/s$ nei bassifondali e 45 $m^{1/2}/s$ nei canali, ad eccezione delle bocche di porto per le quali, a giudizio dello scrivente, la scabrezza deve essere ulteriormente diminuita a 20 $m^{1/2}/s$. Si osserva come ora l'onda di marea simulata sia sincronizzata con quella reale, pur se le creste e i cavi sono ora minori che nel caso reale.

Nella successiva prova 3, di conseguenza, vengono aumentate le scabrezze alle bocche di porto di Malamocco e Lido, rispettivamente a 35 $m^{1/2}/s$ e 30 $m^{1/2}/s$. La scabrezza relativa alla bocca di porto di Chioggia non viene variata, in quanto il risultato ottenuto in corrispondenza alla stazione di Chioggia-Vigo viene già ritenuto soddisfacente. Un ulteriore prova, la numero 4, viene effettuata mantenendo lo stesso valore di e 30 $m^{1/2}/s$, per entrambe le bocche di porto di Malamocco e Lido.

In tutte e quattro le prove di simulazione, la scabrezza nell'area del Ponte della Libertà è stata mantenuta pari a 10 $m^{1/2}/s$, date le caratteristiche dell'area di scarso ricambio idrico.

Sulla base dei confronti rappresentati nei cinque successivi grafici delle stazioni lagunari, si ritiene che la prova 3 sia quella maggiormente significativa e capace di meglio riprodurre l'effettiva propagazione dell'onda di marea all'interno della Laguna. Si ritiene che quanto assunto sia sufficientemente accurato per gli obiettivi del presente studio, essenzialmente riconducibili alla valutazione di un differenziale fra stato di fatto e di progetto, con due configurazioni affette dal medesimo errore.

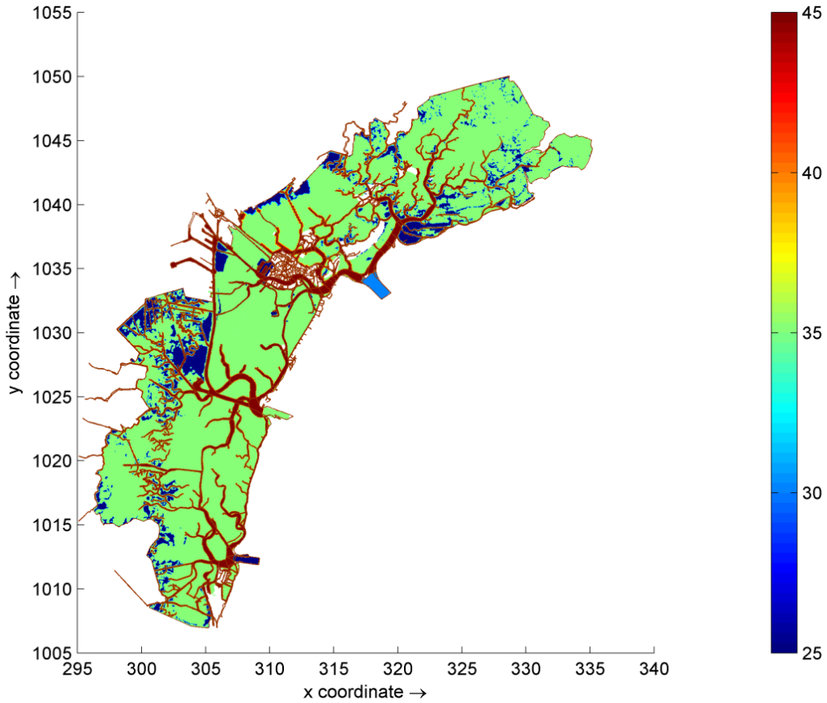


Figura 17: mappa delle scabrezze ($m^{1/2}/s$) della prova 3

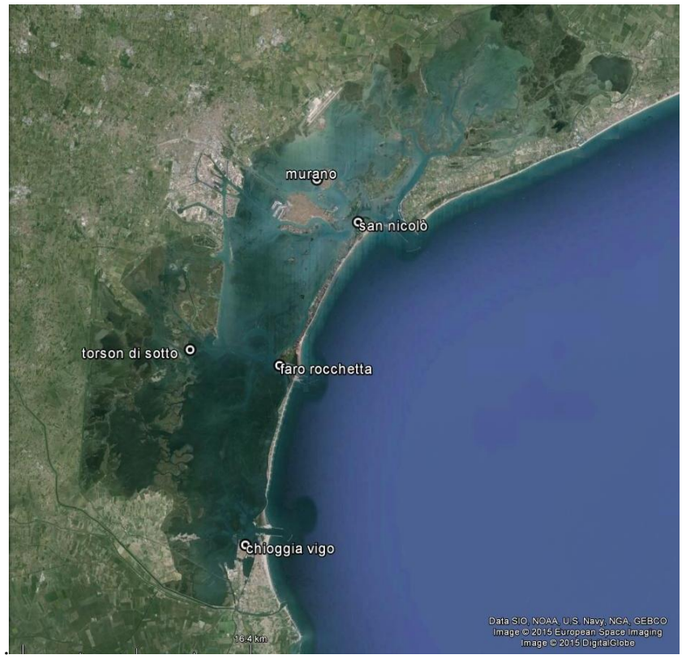


Figura 18: stazioni APAT considerate per la calibrazione (immagine tratta da Google Earth Pro)

Nella precedente Figura 17, è rappresentata la mappa delle scabrezze utilizzate nella prova 3, i cui valori sono stati scelti per le simulazioni idrodinamiche di seguito descritte.

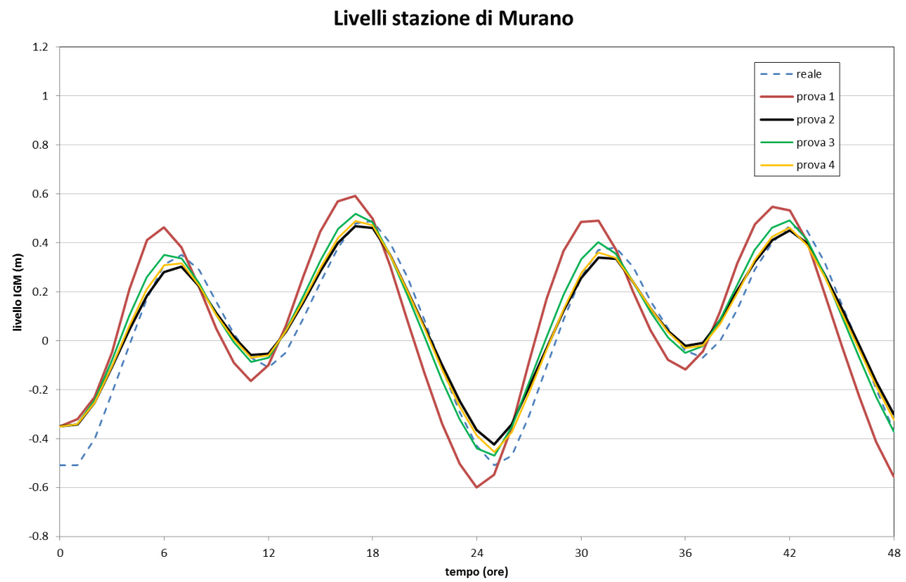


Figura 19

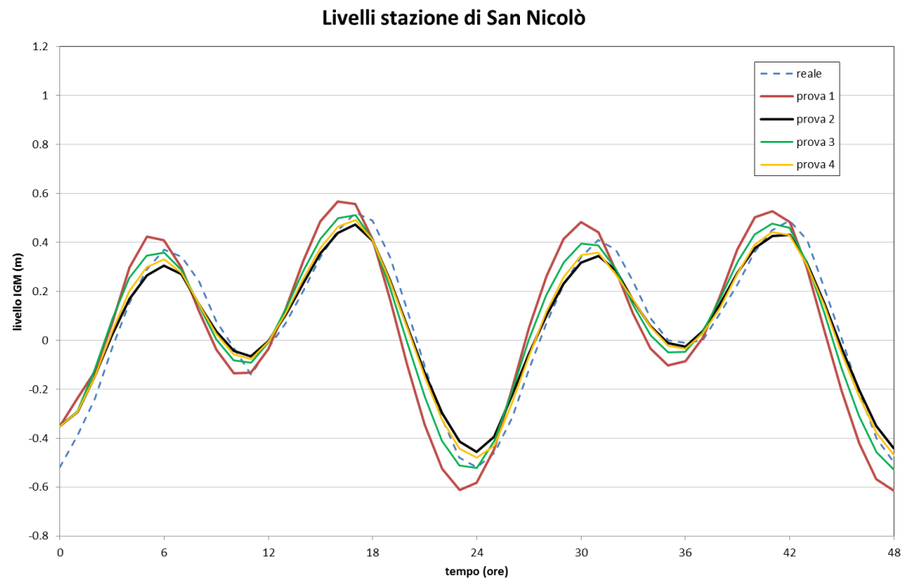


Figura 20

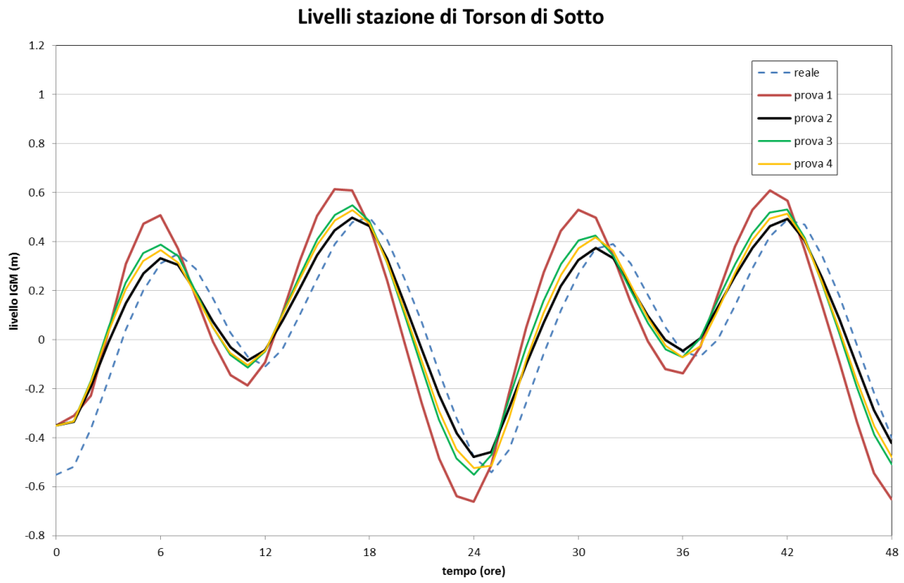


Figura 21

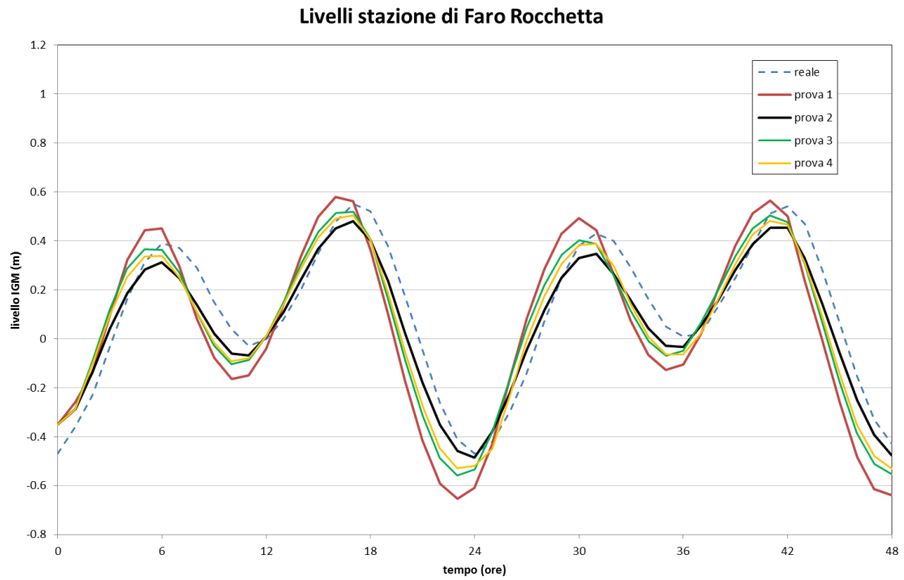


Figura 22

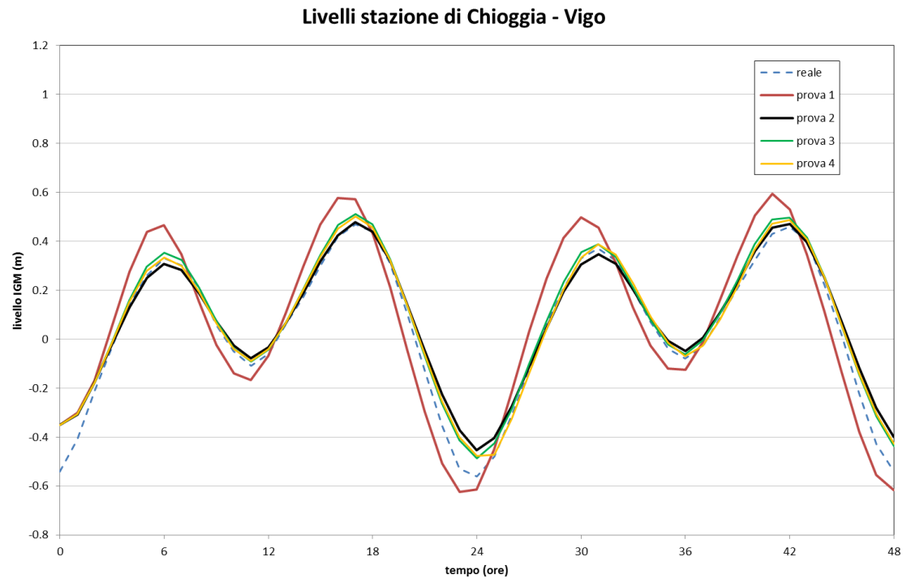


Figura 23

4.2.2 Calibrazione morfologica

Con il presente studio si vuole anche fornire un confronto della prevedibile evoluzione morfologica, in termini di erosioni e riporti, dell'area attorno al Canale Contorta S. Angelo in modo da valutarne eventuali differenze, dovute alla presenza del canale e delle velme lungo i bordi.

A tal fine sono stati presi come riferimento i parametri utilizzati in quattro modelli idrodinamici di diverse porzioni della Laguna centrale e meridionale, effettuati da Studio Rinaldo per conto di PIOP - CVN, che li ha approvati tramite il proprio Comitato Tecnico (CTM):

- *Ripristino morfologico ed ambientale dell'area del canale Bastia. Progetto esecutivo di 1° stralcio - Modello idrodinamico tridimensionale*, settembre 2010 (cfr. Figura 25 e Figura 27)e *Modello idrodinamico tridimensionale per lo studio dell'evoluzione dei fondali nella zona di Val da Rio*, maggio 2011;
- *Ripristino morfologico ed ambientale dell'area dei laghi Battioro e Raina. Progetto definitivo – Modello idrodinamico*, maggio 2012;
- *Strutture morfologiche per la protezione di bassifondali adiacenti il canale "S. Leonardo – Marghera". Progetto esecutivo 1° stralcio 2° fase 2° lotto, attività di monitoraggio - Modello idrodinamico*, aprile 2013 (cfr. Figura 24 e Figura 26).

In tali studi, mediante l'uso del modello idrodinamico di evoluzione morfologica Delft3D, è stata ricostruita l'evoluzione morfologica nelle aree d'interesse della Laguna di Venezia, fra il 1971 e il 2002.Particolarmente utile, a tal fine, è stata la disponibilità di due rilievi dettagliati della Laguna risalenti al 1971 (effettuato dall'Ufficio Idrografico del MAV) ed al 2002 (direttamente effettuato dal MAV), essendo tali configurazioni assolutamente in grado di rappresentare le condizioni iniziali e finali delle simulazioni.

In particolare, nei modelli sopra citati sono stati posti a confronto i risultati, in termini di variazione media annua delle quote di fondo, dopo una simulazione di un anno medio di evoluzione morfologica.

Nelle successive Figura 24 e Figura 25 sono riportate le mappe della variazione media annuale fra i due rilievi a disposizione (1971 e 2002), avendo rappresentato con tonalità di rosso le erosioni e con tonalità di verde i depositi di sedimenti, come definito dalla relativa scala cromatica rappresentata a destra.

Nelle successive Figura 26 e Figura 27 sono invece contenute le rappresentazioni delle differenze fra il risultato reale (ottenuto dal confronto fra i rilievi del 1971 e del 2002) e quello simulato.

Si osserva che negli ambiti di studio gli scarti sono dell'ordine del centimetro, e presentano minimi errori relativi.

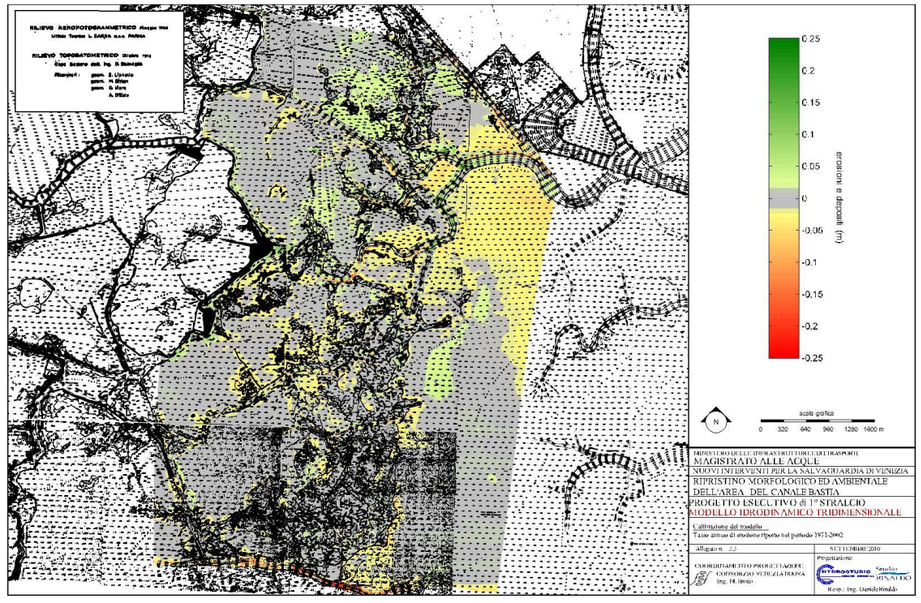


Figura 25: erosione media annuale nel periodo fra 1971 e 2002 – modello canale Bastia

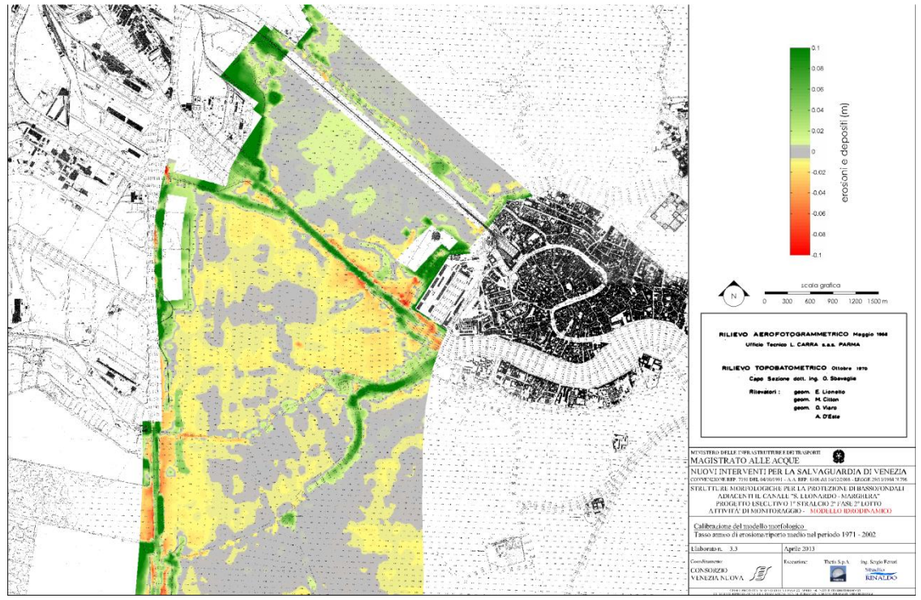


Figura 24: erosione media annuale nel periodo fra 1971 e 2002 – modello S. Leonardo - Marghera

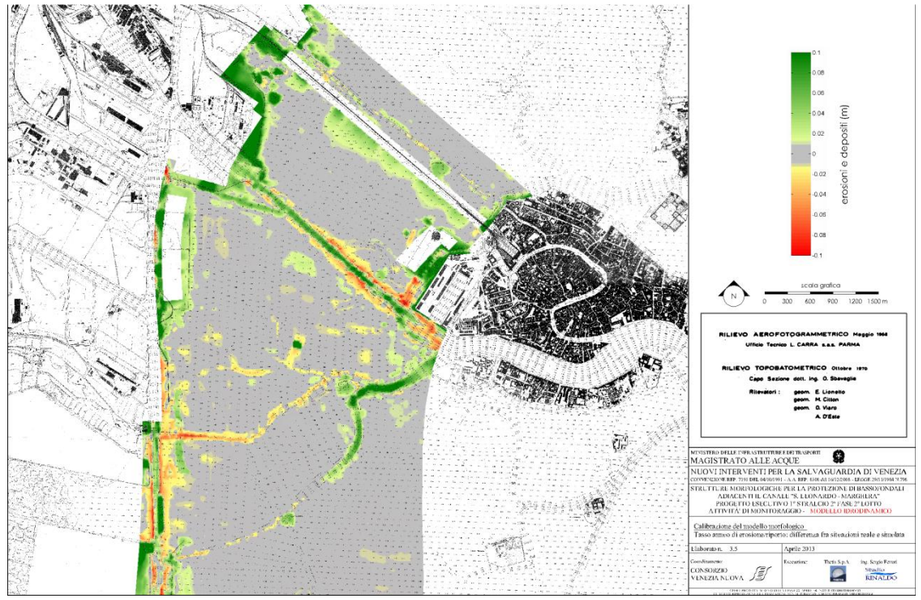


Figura 26: differenza fra risultato reale e simulato – modello S. Leonardo - Marghera

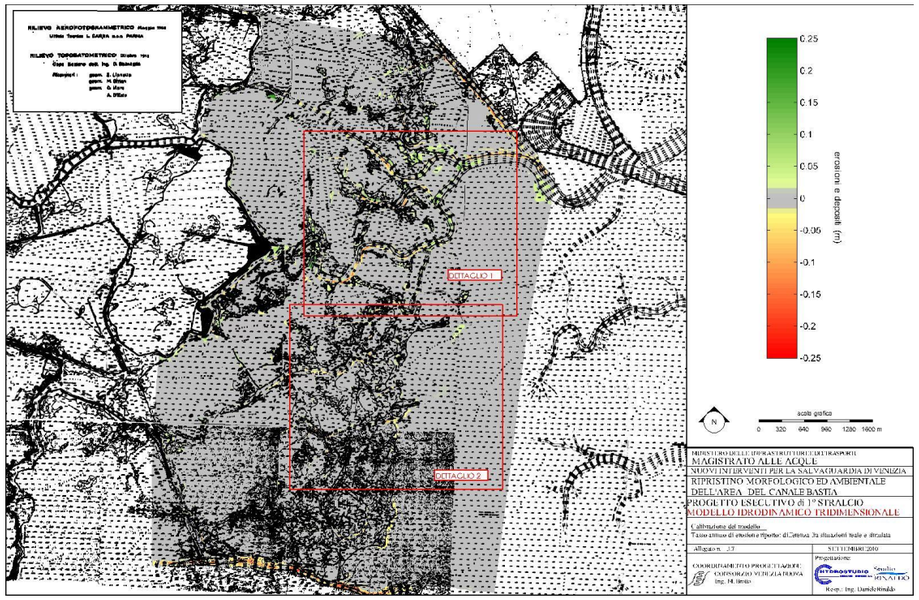


Figura 27: differenza tra situazione reale e simulata – modello canale Bastia

Nei modelli presentati i parametri oggetto di calibrazione sono stati principalmente quattro:

- il tasso di erosione dei sedimenti;
- gli sforzi critici per la sedimentazione;
- gli sforzi critici per l'erosione;
- la velocità di sedimentazione.

Nella formulazione di *Partheniades – Krone* (adottata nel codice Delft3D-Flow), il flusso di erosione risulta direttamente proporzionale al tasso di erosione dei sedimenti, che per impostazione predefinita viene posto pari a $1 \cdot 10^{-4}$ kg/m²s.

Sulle base delle valutazioni contenute nei sopracitati studi, nel presente modello sono stati adottati i seguenti valori: $2 \cdot 10^{-6}$ kg/m²s nelle barene e nei bassifondali, $2 \cdot 10^{-7}$ kg/m²s nei canali e $2 \cdot 10^{-8}$ kg/m²s nell'area del Ponte della Libertà.

Il secondo parametro oggetto di calibrazione è lo sforzo critico per la sedimentazione che corrisponde al valore oltre il quale non viene considerata la sedimentazione delle particelle solide e assume per impostazione predefinita un valore molto elevato, pari a 1000 N/m².

Sulla base delle esperienze pregresse il valore scelto per le barene e i bassifondi è pari a 100 N/m², mentre viene distinto un valore di 50 N/m² per i canali lagunari.

Lo sforzo critico per l'erosione indica invece la tensione tangenziale minima al di sotto della quale non avviene erosione dei sedimenti del fondo. Il valore critico è posto pari a 1 N/m² in corrispondenza dei canali, 0.5 N/m² in corrispondenza ai bassifondi lagunari e pari a 0.8 N/m² per le barene.

La velocità di sedimentazione delle particelle solide, indice della mobilità dei sedimenti coesivi, viene invece posta di default pari a 0.25 mm/s. Tale valore è stato tuttavia modificato sulla base delle passate modellazioni e posto pari a 0.50 mm/s nella presente modellazione.

La descrizione dettagliata delle calibrazioni sviluppate è comunque contenuta nelle relazioni specialistiche, allegate agli studi citati, alle quali si rimanda per ogni necessario approfondimento.

Sulla base si tali considerazioni, si riporta di seguito nella Tabella 2, l'insieme dei parametri utilizzati per la simulazione dell'evoluzione morfologica ad un anno, i cui risultati sono presentati nel successivo paragrafo 4.4

PARAMETRI	barene	bassifondi	canali
tasso di erosione dei sedimenti (kg/m²s)	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$
sforzo critico per la sedimentazione (N/m²)	100	100	50
sforzo critico per l'erosione (N/m²)	0.8	0.5	1
velocità di sedimentazione (mm/s)	0.5		

Tabella 2

4.3 Gli scenari di simulazione

Gli scenari di simulazione sono complessivamente tre, dei quali il primo rappresenta un insieme di condizioni medie per la Laguna e gli altri due sono condizioni estreme realmente accadute di recente, rappresentative di condizioni di vento estreme dalle traversie principali di grecale-bora e di scirocco.

In particolare con il caso 1, sulle base dei dati disponibili, è stato ricostruito un anno medio di condizioni tipiche per la Laguna, utilizzato poi anche per la previsione delle erosioni e dei depositi annuali. Per tale caso è stato fatto riferimento ai quattro modelli MAV-CVN di cui si è discusso nel paragrafo precedente.

Gli altri due casi sono stati simulati al fine di verificare l'eventuale impatto del nuovo canale, in condizioni meteomarine estreme, sui fenomeni di "acqua alta".

4.3.1 Caso 1: condizioni caratteristiche medie del paraggio

Al fine di costruire un modello idrodinamico, con le finalità esposte nelle premesse, è necessario fornire una generale ricostruzione del regime meteomarino dell'ambito oggetto d'intervento, che contenga i seguenti dati:

- il regime dei venti incidenti nel paraggio oggetto d'indagine;
- i livelli di marea tipici del sedime lagunare.

Per quanto riguarda il fetch dell'ambito oggetto d'indagine, occorre evidenziare come in questa porzione della Laguna, le due traversie principali di Bora e Scirocco hanno fetch di estensione del tutto simile, essendo limitate la traversia di grecale-bora dal Ponte della Libertà e la traversia di scirocco dal litorale di Lido.

Il regime anemometrico dell'area del canale Contorta è stato indagata al fine di ottenere indicazioni relative alla direzione prevalente dei venti ed alle relative varie intensità, così come rilevate dalle stazioni di Venezia. Obiettivo generale della ricerca, oltre ad una valutazione generale del fenomeno, è la predisposizione della statistica delle ore di vento registrate in funzione delle relative diverse direzioni, sulla base dei dati registrati negli scorsi decenni.

La fonte utilizzata per i dati anemometrici del caso 1 è la distribuzione delle intensità di vento registrate alla torre del CNR nel periodo 1997 – 2014 (dati CVN), nella successiva Tabella 3.

DISTRIBUZIONE DELLA VELOCITA' DEL VENTO PER CLASSI DI INTENSITA' E DIREZIONE												
Dir \ Vel	**0÷2.5**	**2.5÷5.0**	**5.0÷7.5**	**7.5÷10.0**	**10.0÷12.5**	**12.5÷15.0**	**15.0÷17.5**	**17.5÷20.0**	**20.0÷22.5**	**22.5÷25.0**	**>25**	
0	2.3%	4.5%	1.3%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**8.6%**
30	2.1%	5.3%	3.9%	2.0%	0.9%	0.4%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	**14.8%**
60	2.2%	4.9%	3.9%	3.0%	1.9%	1.2%	0.7%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%	**18.3%**
90	1.7%	2.9%	1.5%	0.9%	0.6%	0.3%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	**8.2%**
120	1.9%	3.1%	1.0%	0.4%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**6.8%**
150	2.1%	3.9%	1.6%	0.5%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**8.4%**
180	2.0%	3.1%	1.3%	0.4%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**7.0%**
210	1.9%	2.3%	0.8%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**5.4%**
240	2.0%	2.6%	0.9%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**5.8%**
270	1.9%	2.9%	0.7%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**5.6%**
300	1.9%	2.7%	0.4%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**5.2%**
330	2.0%	2.7%	0.5%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**5.4%**
	24.0%	**40.9%**	**17.9%**	**8.5%**	**4.2%**	**2.3%**	**1.1%**	**0.5%**	**0.2%**	**0.0%**	**0.0%**	

Tabella 3: frequenza direzionale del vento alla torre CNR 1997-2014

I dati della suindicata Tabella 3 sono stati oggetto di graficizzazione nella successiva Figura 28, contenente la rosa dei venti ed una distribuzione polare della relativa intensità, dalla cui osservazione può essere tratto che i venti di Bora (provenienti da NE) risultano prevalenti, per intensità e frequenza, rispetto a quelli provenienti dalla traversia sud-est.

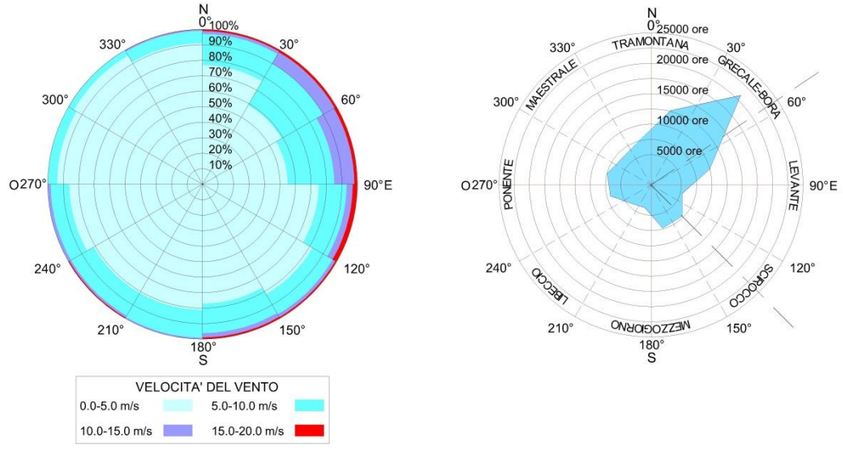


Figura 28: rosa dei venti (dati CVN)

Quattro le traversie considerate:

1. Grecale – Bora(45°): comprendente per semplicità tutti i venti con direzione compresa tra 0° e 90°, la cui frequenza annuale è pari al 37% per una velocità corrispondente di 10 m/s ed al 3% per una velocità di 20 m/s;
2. Scirocco (135°): comprendente il quadrante 90°-180° con frequenza del 21% per una velocità del vento pari a 5 m/s ed al 1% per una corrispondente velocità di 15 m/s;
3. Libeccio (225°) che comprende il quadrante 180°-270° con frequenza 16% ed una velocità di 5 m/s;
4. Tramontana (315°) che comprende il quadrante 270°-360° con frequenza 17% e velocità sempre pari a 5 m/s.

Oltre a tali condizioni è stata considerata l'assenza di vento, con una frequenza pari al 5%.

Per quanto riguarda l'oscillazione della superficie libera lagunare, in questo caso è stata utilizzata la marea sintetica individuata nell'ambito dello studio C.2.2/VII (MAV, CVN, TCH, 2002).

Si è di conseguenza ritenuto di applicare una marea media con escursione di 70 cm, livello massimo pari a 35 cm e gradiente medio di 11.67 cm/ora, con due massimi e due minimi e periodo 12 ore.

In un modello morfologico è necessario inoltre costruire il periodo di riferimento all'interno del quale calcolare i parametri di interesse, componendo i dati di marea e di vento appena descritti.

Nella Tavola 4.3.1 (cfr. Figura 29) è riportato l'insieme delle condizioni al contorno utilizzate per il modello finalizzato alla valutazione dell'evoluzione idrodinamica e morfologica del sito, volendo qui di seguito descrivere in sintesi la sequenza delle operazioni effettuate a tale scopo.

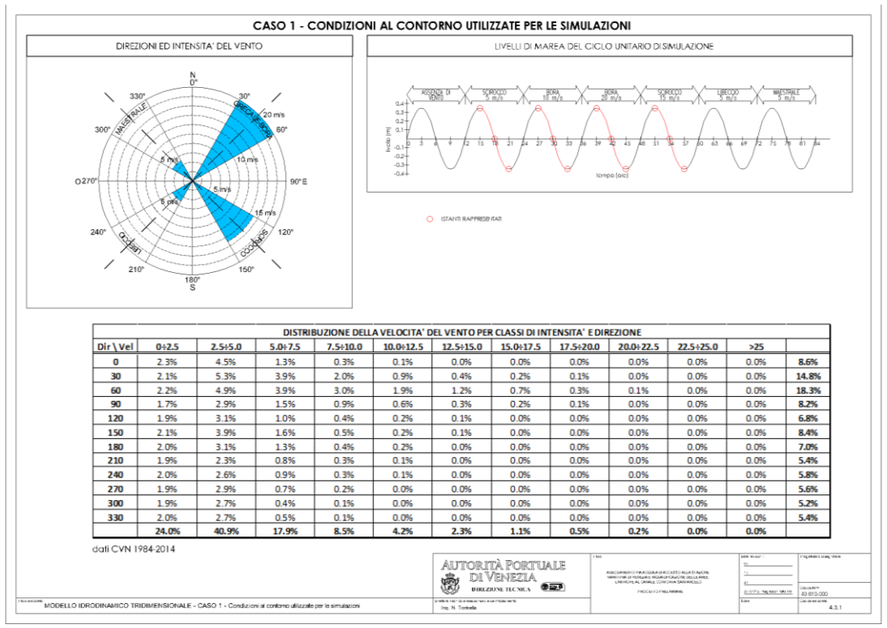


Figura 29: condizioni al contorno caso 1

In particolare:

- noto il ciclo base delle maree, è stata realizzata la sequenza delle condizioni di vento, così come registrate e descritte in precedenza. Il ciclo base per ciascuna condizione di vento ha durata 12 ore, come evidenziato nel grafico delle maree di durata 84 ore, in Figura 29;
- in funzione dell'incidenza annuale misurata per ogni singolo vento, è stato assegnato il relativo coefficiente morfologico, in modo che il ciclo base di 84 ore abbia una durata di calcolo annuale;
- nella successiva Tabella 4 è contenuto il compendio dei coefficienti morfologici assegnati, che di fatto sono un fattore moltiplicativo della durata della condizione assegnata, utile per il solo calcolo delle variazioni morfologiche.

CONDIZIONE	%	MFT	ORE
ASSENZA DI VENTO	5%	37	444
SCIROCCO 5 m/s	21%	153	1836
BORA 10 m/s	37%	270	3240
BORA 20 m/s	3%	22	264
SCIROCCO 15 m/s	1%	7	84
LIBECCIO	16%	117	1404
TRAMONTANA	17%	124	1488
TOTALE	100%	730	8760

Tabella 4: fattori morfologici per una simulazione annuale

I modelli di previsione morfologica, basati su dati idrodinamici, devono essere in grado di prevedere variazioni che si sviluppano lungo una scala temporale molto più lunga rispetto a quella dei cambiamenti idrici, come ad esempio le variazioni del livello di marea.

Mentre la marea cambia significativamente nell'intervallo di qualche ora, la morfologia di una barena o di un bassofondo potrà subire variazioni di un certo rilievo, solo in settimane, mesi o anni.

Per modelli di questo tipo, il software Delft3D utilizza la tecnica del fattore temporale di scala morfologica (*Morphological Scale Factor - MFT*), un fattore moltiplicativo per i flussi morfologici di erosione e deposito, che permette di accelerarne le variazioni ad ogni passo temporale, incorporato dal programma nel calcolo idrodinamico.

In altre parole se, ad esempio, la simulazione idrodinamica dura 24 ore ed il fattore temporale di scala morfologica è posto pari a 365, significa che verranno simulate le variazioni morfologiche all'interno della griglia computazionale, corrispondenti alla durata di un anno. Nella simulazione oggetto della presente relazione, a ciascuna delle cinque condizioni di vento prima elencate, sono stati attribuiti i suindicati fattori morfologici.

Come si osserva in Tabella 4, a ciascuna condizione viene attribuito un diverso fattore morfologico a seconda della frequenza rilevata in un anno. Dal momento che ciascuna condizione di vento (o di assenza di vento) viene simulata per un intero ciclo di marea di durata dodici ore, tale quantità viene ragguagliata alla quantità corrispondente di ore, in cui tale condizione accade in un anno.

Prendendo ad esempio la condizione di vento dal quadrante sud-ovest di libeccio, essa ha una durata annuale di 1404 ore (circa il 16% delle ore di un anno) e quindi il corrispondente fattore morfologico si ottiene dividendo 1404 per 12 ore: 1404/12=117.

Sempre nel caso 1, al fine di simulare l'eventuale variazione di salinità che il canale e le velme possono provocare nell'area, interponendosi tra i principali afflussi di acqua dolce e la laguna aperta, è stata considerata la presenza del Naviglio Brenta.

I valori di portata, come descritto nel precedente paragrafo 4.1, sono stati tratti dall'analisi idrologica del Bacino Naviglio Inferiore nel succitato studio (MAV-CVN, D. Rinaldo, 1999).

Considerando la portata media nelle due annate di riferimento, si ottiene un valore di 6.43 m^3/s che è stato utilizzato come condizione al contorno in corrispondenza allo sbocco del Naviglio Brenta.

Dall'analisi del regime idraulico del fiume, si possono trarre indicazioni relative alle piene ed al regime ordinario del fiume, in termini di percentuali in un anno medio.

Tale analisi porta a stimare che il 30% della portata solida fuoriesca dal fiume nel 5% dell'anno mentre il restante 70% sia immesso in laguna nel restante 95% del tempo di un anno.

Tali quantità sono state ragguagliate alla durata della simulazione (84 ore) al fine di ottenere le concentrazioni immesse in Laguna dal fiume, ottenendo i seguenti valori:

- 0.180 kg/m³ per 4 ore;
- 0.022 kg/m³ per le restanti 80 ore.

Le caratteristiche del sedimento in questione, in mancanza di dati precisi, sono state considerate identiche a quelle del sedimento del fondale lagunare. Come valore di salinità sono stati considerati 15 ppt che tipicamente descrivono un acqua *dolce.*

4.3.2 Caso 2: Scirocco dicembre 2013

Il primo caso estremo considerato si riferisce al mese di dicembre del 2013,in corrispondenza delle festività natalizie, quando i fenomeni di acqua alta furono favoriti da venti di scirocco con velocità fino a oltre 19 m/s. (cfr. Figura 31 e Figura 32).

Considerando in particolare le giornate del 26 e 27 dicembre 2013, si osserva come i livelli di marea misurati alle bocche (cfr. Figura 30) siano compresi sempre tra 0 e 1 m sullo zero IGM.

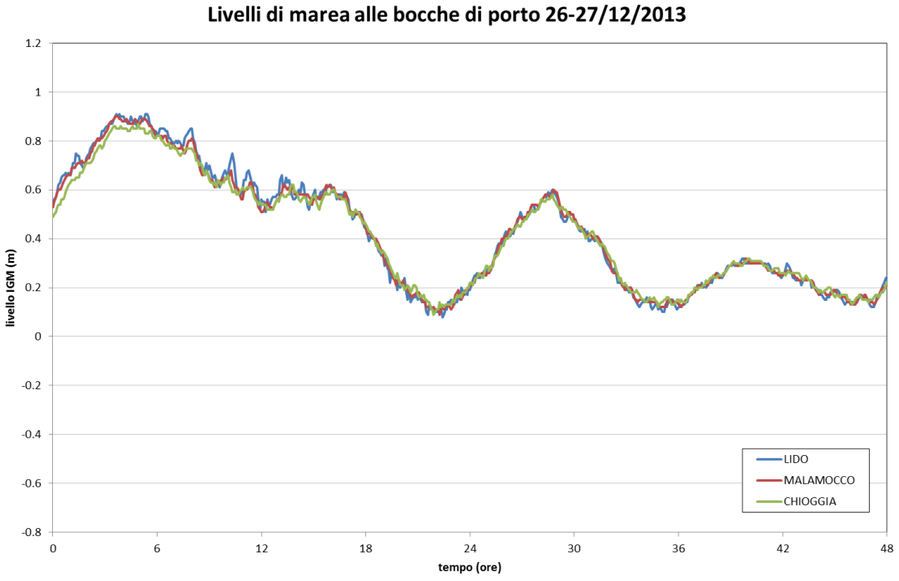


Figura 30

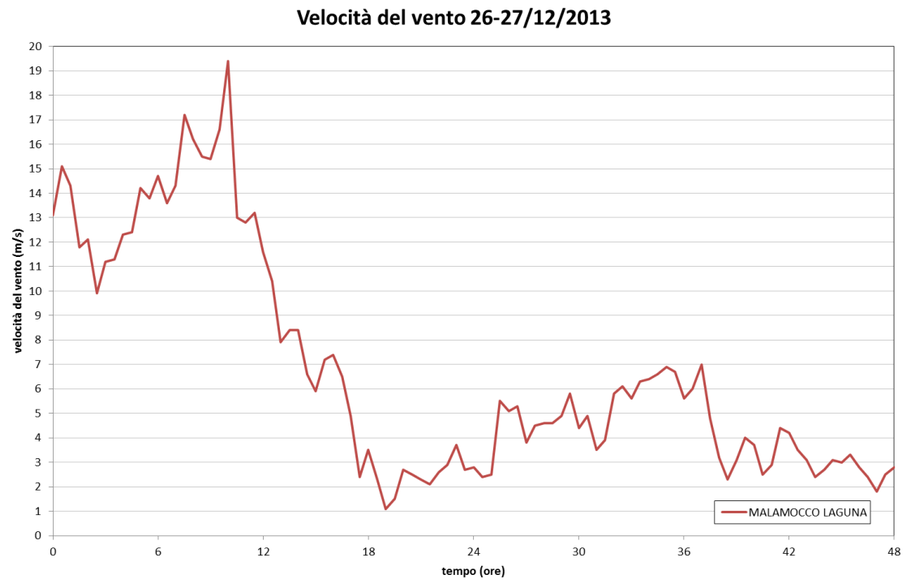


Figura 31

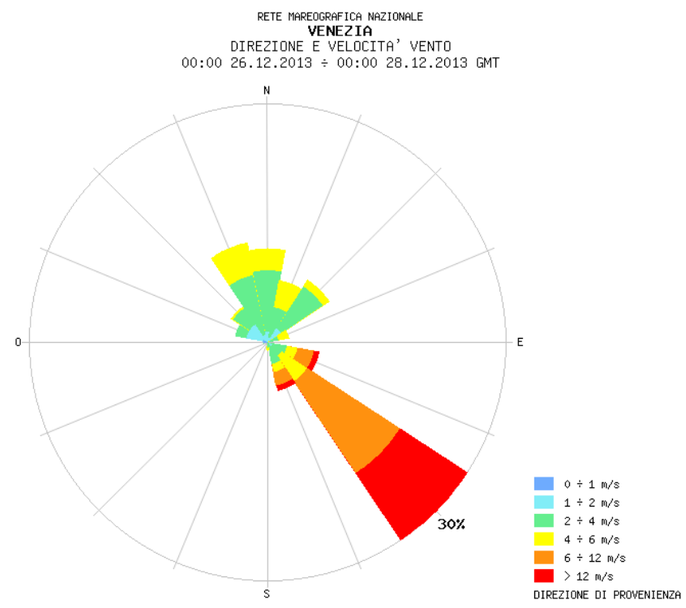


Figura 32

La simulazione effettuata con il modello Delft 3D, ha avuto una durata di 24 ore (26/12/2013), all'interno delle quali sono stati scelti tre istanti per la rappresentazione degli istanti di interesse:

1. ore 7 (26/12/2013, 7:00) con livello di marea alle bocche pari a 0.79 m IGM e vento a 14.3 m/s dalla direzione 141°;
2. ore 10 (26/12/2013, 10:00) con livello di marea alle bocche pari a 0.75 m IGM e vento a 19.4 m/s, direzione 147°;
3. ore 13 (26/12/2013, 13:00) con livello di marea alle bocche pari a 0.58 m IGM e vento a 7.9 m/s dalla direzione 130°.

L'insieme delle condizioni al contorno utilizzate per il caso 2, costituite dai livelli di marea alle bocche di porto (fonte PIOP) e dall'intensità e direzione del vento alla stazione di Malamocco Laguna (fonte PIOP), sono contenuti nel disegno 4.4.1.

4.3.3 Caso 3: Bora febbraio 2015

Il terzo caso simulato si riferisce a quanto realmente accaduto nei primi giorni dello scorso mese di febbraio, durante i quali sono stati registrati valori di marea superiori al metro sullo zero IGM (cfr. Figura 33), con la concomitanza di venti di grecale-bora (cfr. Figura 35) che hanno raggiunto velocità fino a 19 m/s (cfr. Figura 34).

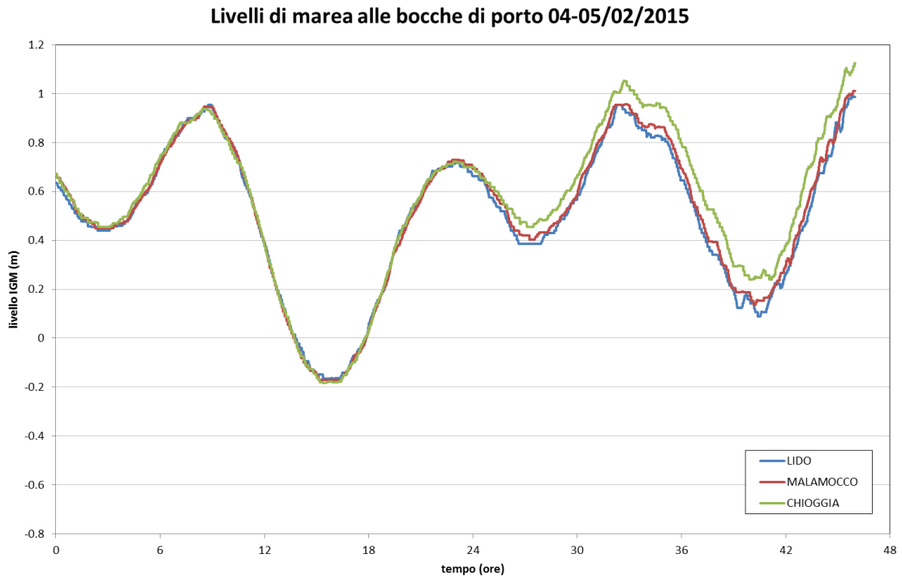


Figura 33

Tale condizioni hanno provocato diversi giorni consecutivi di "acqua alta" a Venezia, oltre a estesi fenomeni di allagamento, che hanno colpito particolarmente l'abitato di Chioggia.

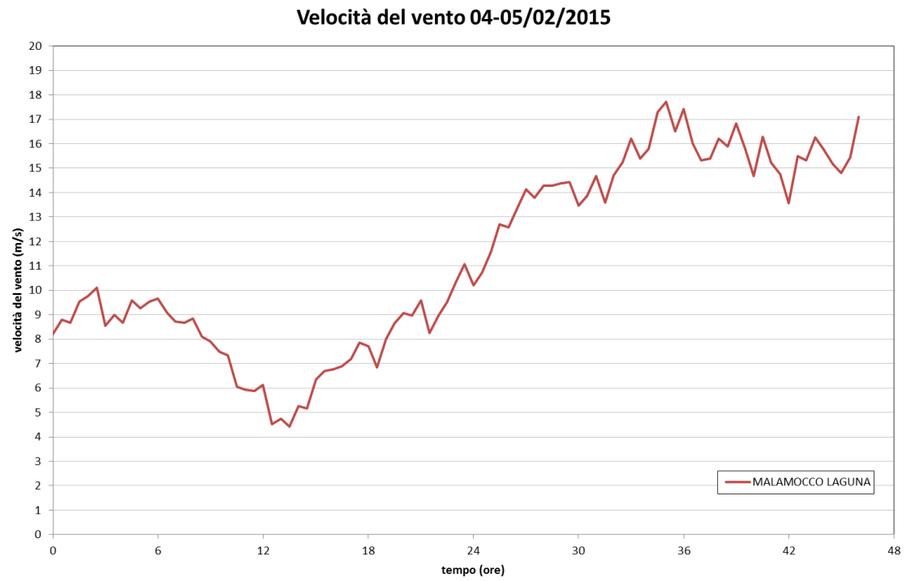


Figura 34

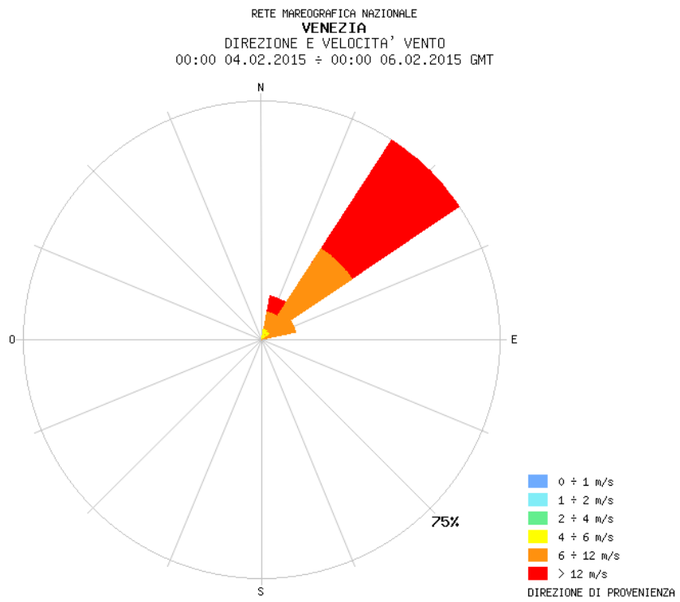


Figura 35

Le condizioni al contorno del caso 3, raggruppate nell'elaborato grafico 4.5.1, sono costituite da:

- i livelli registrati alle tre bocche di porto nelle giornate del 4 e 5 febbraio, forniti dal PIOP;
- la direzione e l'intensità del vento, registrate nei medesimi giorni, alla stazione di Malamocco Laguna, sempre messi a disposizione dal PIOP;

L'intervallo scelto per la simulazione corrisponde alla giornata del 5 febbraio 2015, nella quale sono stati raggiunti i picchi massimi di vento e marea. All'interno di tale simulazione, sono stati selezionati i seguenti istanti significativi:

1. ore 33 (05/02/2015, 9:00) con livello di marea alla bocca di Chioggia pari a 1.12 m IGM e vento a 16.21 m/s dalla direzione 30°;
2. ore 40 (05/02/2015, 16:00) con livello di marea alla bocca di Chioggia pari a 0.24 m IGM e vento a 14.67 m/s e direzione 36°;
3. ore 46 (05/02/2015, 22:00) con livello di marea alla bocca di Chioggia pari a 1.03 m IGM e vento a 17.09 m/s dalla direzione 38°.

Per tali istanti sono stati estratti i vari parametri oggetto d'interesse, che costituiscono i risultati della presente modellazione.

Come indicato in precedenza, sia il caso 3 appena descritto che il caso 2, discusso nel precedente paragrafo 4.3.2, saranno utili per valutare gli eventuali effetti della realizzazione del Canale Contorta sui "fenomeni di acqua alta", al fine di verificare la trascuratezza del fenomeno.

4.4 I risultati ottenuti

Nel presente capitolo sono commentati i risultati ottenuti per i tre casi appena descritti, avendo scelto per ciascuna serie temporale simulata, alcuni istanti di calcolo significativi.

Come indicato nelle premesse, l'obiettivo principale delle presenti simulazioni è la rappresentazione delle eventuali differenze nell'area oggetto d'intervento, per i parametri idrodinamici e morfologici d'interesse, fra stato di fatto e di riforma. Sarà in tal modo possibile quantificare gli eventuali impatti, in termini di variazioni di assetto idrodinamico e di evoluzione morfologica, conseguenti allo scavo del nuovo canale.

4.4.1 Caso 1: condizioni caratteristiche medie

Il primo caso simula condizioni meteomarine medie per il paraggio oggetto d'indagine, considerando sia venti frequenti per la Laguna di Venezia che condizioni di vento forte (20 m/s). L'escursione di marea è quella sintetica utilizzata nel già citato studio (MAV, CVN, TCH, 2002) per una durata di 84 ore che, con il meccanismo dei fattori morfologici, rappresenta un anno medio ai fini della quantificazione di erosioni e depositi. I dodici istanti riportati nelle mappe tematiche, rappresentativi sia di condizione di vento praticamente assente che di vento forte, sono indicati nella Tavola 4.3.1 delle condizioni al contorno di Figura 29:

- scirocco a 5 m/s con marea +0.35, 0 e -0.35 m s.m.m.;
- bora a 10 m/s con marea +0.35, 0 e -0.35 m s.m.m.;
- bora a 20 m/s con marea +0.35, 0 e -0.35 m s.m.m.;
- scirocco a 15 m/s con marea +0.35, 0 e -0.35 m s.m.m..

I parametri oggetto di rappresentazione sono invece:

- il livello della superficie libera [m];
- la velocità della corrente al fondo in modulo e direzione [m/s];
- gli sforzi tangenziali al fondo [N/m²];
- la salinità superficiale [ppt];
- il moto ondoso [m];
- le erosioni e i depositi [m].

Per i parametri: livello della superficie libera, velocità della corrente al fondo e salinità superficiale, sono inoltre fornite le rappresentazioni delle differenze fra stato di progetto e stato di fatto. Nel caso della velocità della corrente, il programma, di default, calcola le differenze in modulo, quindi sempre maggiori di zero. Se d'interesse, potranno essere generate in un secondo tempo anche le differenze effettive.

Livello della superficie libera

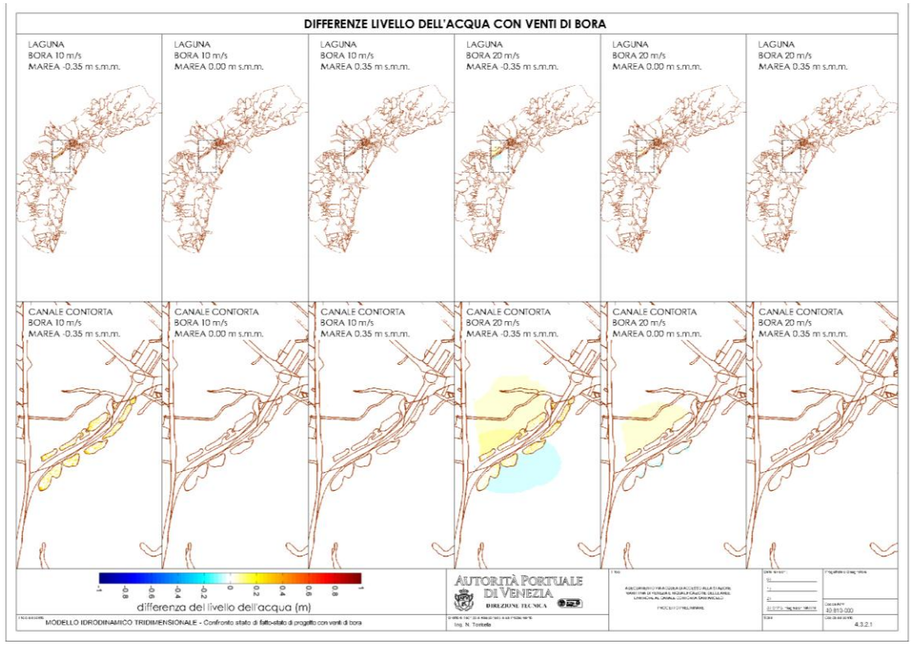


Figura 36: differenze dei livelli dell'acqua per vento di bora

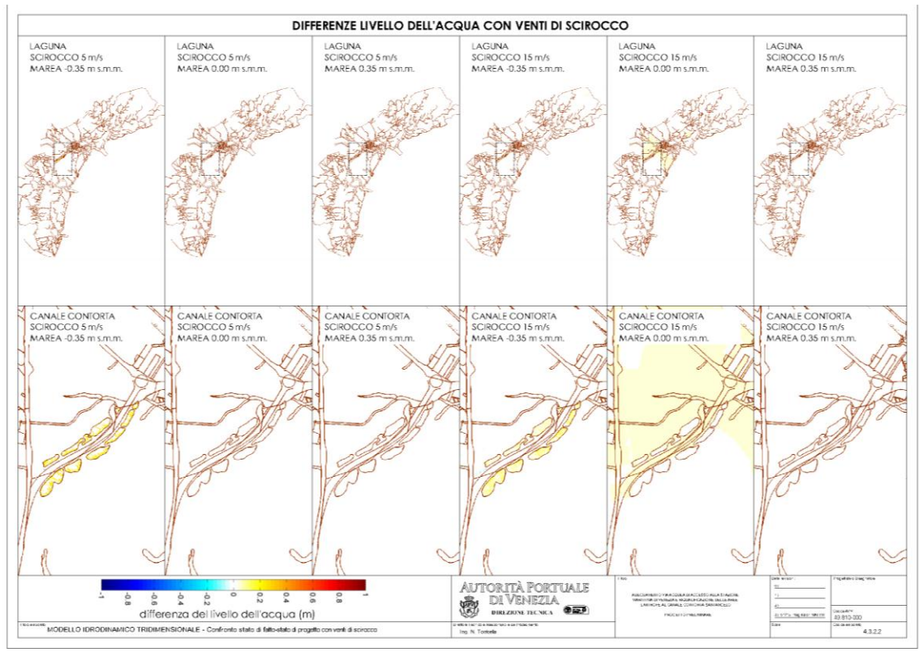


Figura 37: differenze dei livelli dell'acqua per vento di scirocco

Le differenze dei livelli per i sei istanti rappresentativi del vento di bora sono contenuti nell'elaborato 4.3.2.1 di Figura 36, mentre per gli istanti di scirocco l'elaborato è il 4.3.2.2, nella precedente Figura 37. In tali mappe i valori maggiori di zero, colorati in giallo, arancione e rosso, rappresentano aree in cui i livelli sono aumentati nello stato di progetto rispetto allo stato di fatto, mentre viceversa le aree in azzurro e blu rappresentano le zone dove i livelli sono diminuiti nello stato di progetto.

In tutti gli istanti di rappresentazione si osservano differenze minime, dell'ordine della decina di centimetri, localizzate unicamente nell'intorno dell'area di progetto, a nord del canale.

Le immagini relative all'intera Laguna di Venezia, nella parte superiore degli elaborati 4.3.2.1 e 4.3.2.2, sono particolarmente esemplificative in tal senso: le minime differenze nei livelli sono tutte concentrate nell'intorno del canale, senza che siano state riscontrate variazioni di livello significative in altre zone della Laguna.

Nello spazio acqueo fra le velme a nord del canale Contorta S. Angelo ed il canale Vittorio Emanuele III, si osserva un aumento dei livelli dell'ordine dei dieci centimetri, solamente nei casi di scirocco a 15 m/s con marea a medio mare e bora a 20 m/s con maree -0.35 m e 0.00 m s.m.m., in questi ultime due configurazioni esteso soltanto fino al Canale Nuovo di Fusina.

Nei successivi elaborati 4.3.2.3÷4.3.2.14 sono contenute le rappresentazioni dei livelli, nei dodici istanti significativi di rappresentazione, sia per lo stato di fatto che per quello prospettato di riforma, avendo fornito sia un inquadramento generale della Laguna che di dettaglio dell'area d'intervento.

La scala di rappresentazione varia da -1.00 m e +1.00 m s.m.m., potendo fin da porre alcune considerazioni a commento:

- è evidente la presenza del Ponte della Libertà nel modello di calcolo, dal momento che i livelli a nord e a sud dello stesso sono differenti in ragione dell'interramento dei varchi;
- nella condizione di bora a 20 m/s (cfr. 4.3.2.9, 4.3.2.10 e 4.3.2.11), le differenze di livelli fra Chioggia e Venezia, come verrà evidenziato anche nel caso 3, sono dell'ordine dei 50 centimetri, senza aver riscontrato fenomeni di aumento dei livelli nell'area oggetto di studio, dovuti alla presenza del nuovo canale, nemmeno in corrispondenza del centro storico di Venezia;
- nella condizione di scirocco a 15 m/s (cfr. 4.3.2.12, 4.3.2.13 e 4.3.2.14) il fenomeno di aumento dei livelli è invece riscontrabile tra il bordo orientale ed il margine occidentale del sedime lagunare, ragion per cui particolarmente nel caso di marea a medio mare le velme fanno da schermo alla zona retrostante in cui i livelli aumentano pur se in maniera limitata.

Velocità della corrente al fondo

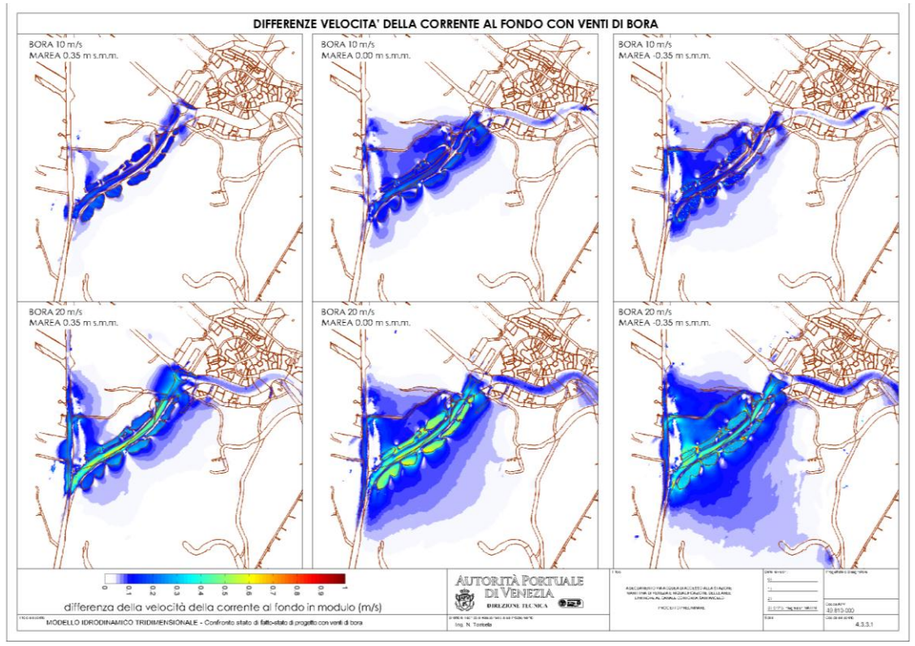


Figura 38: differenze delle velocità della corrente al fondo per vento di bora

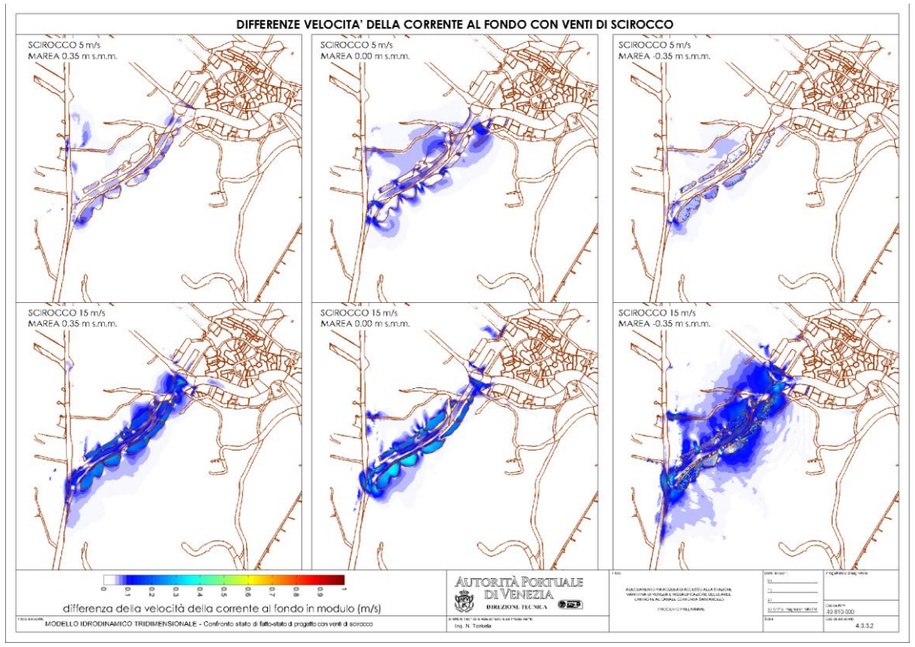


Figura 39: differenze delle velocità della corrente al fondo per vento di scirocco

Il secondo parametro rappresentato è la velocità della corrente al fondo, per la quale sono state rappresentate, similmente al livello, le differenze sia per il vento di bora, elaborato 4.3.3.1 in Figura 38, che di scirocco (cfr. 4.3.3.2 e Figura 39). Come specificato nelle premesse, tali differenze sono da intendersi soltanto in modulo (in quanto sempre maggiori di zero), utili comunque ad identificare i fondali oggetto di variazione nei vari istanti raffigurati, ancora una volta localizzati nell'intorno del canale.

Gli elaborati grafici relativi agli istanti di scirocco a 5 e 15 m/s (cfr. 4.3.3.3÷4.3.3.5 e 4.3.3.12÷4.3.3.14) mostrano un atteso aumento della velocità al fondo in corrispondenza delle velme e nei varchi fra queste. Contemporaneamente le velocità al fondo diminuiscono, nello spazio acqueo a nord delle velme, dal momento che tali strutture fungono da barriera nei confronti della traversia di sud-est.

Le differenze sono dell'ordine dei 10÷20 cm/s, con picchi di 35 cm/s unicamente sulle velme per l'istante con vento di scirocco a 15 m/s e marea a medio mare.

Particolarmente interessante risulta l'elaborato grafico 4.3.3.4, che rappresenta l'istante con marea 0 m s.m.m. e vento di scirocco 5 m/s, condizione quindi nella quale la corrente è influenzata in maniera minima dal vento. Si può osservare infatti, dalla direzione delle frecce, come il nuovo canale Contorta S. Angelo non influenza la linea di partiacque fra la bocca di porto di Lido e la bocca di porto di Malamocco, essendo localizzato proprio in corrispondenza di essa.

Gli elaborati grafici relativi alla traversia di bora, 4.3.3.6÷4.3.3.8 e 4.3.3.9÷4.3.3.11, mostrano anch'esse un aumento delle velocità in corrispondenza delle nuove velme e a nord di queste e del nuovo canale. Si può notare inoltre una variazione di velocità, di fatto una lieve diminuzione di meno di 10 cm/s, lungo il canale della Giudecca e una diminuzione più marcata (circa 35 cm/s) lungo il canale Contorta, ora protetto dalle velme. Pur se in questo caso le aree in cui sono state calcolate variazioni di velocità, rispetto allo stato di fatto, sono più estese rispetto al caso del vento di scirocco, si tratta di variazioni attorno ai 10 cm/s o inferiori, nelle zone al di fuori del canale e delle velme. Infine per quanto riguarda i varchi fra le velme, i valori di velocità all'interno raggiungono nei casi di vento di bora a 20 m/s, picchi di 60 cm/s, ragion per cui potrebbe essere studiato un possibile allargamento degli stessi con isola di protezione a tergo, nei successivi livelli progettuali.

Sforzi tangenziali al fondo

Gli sforzi tangenziali al fondo sono strettamente collegati alla velocità della corrente al fondo, ragion per cui non vengono presentate le tavole delle differenze, che anche in questo caso di default escono solamente in modulo e sarebbero del tutto simili alle differenze delle velocità. Se d'interesse si potrà comunque procedere a generarle in un secondo momento.

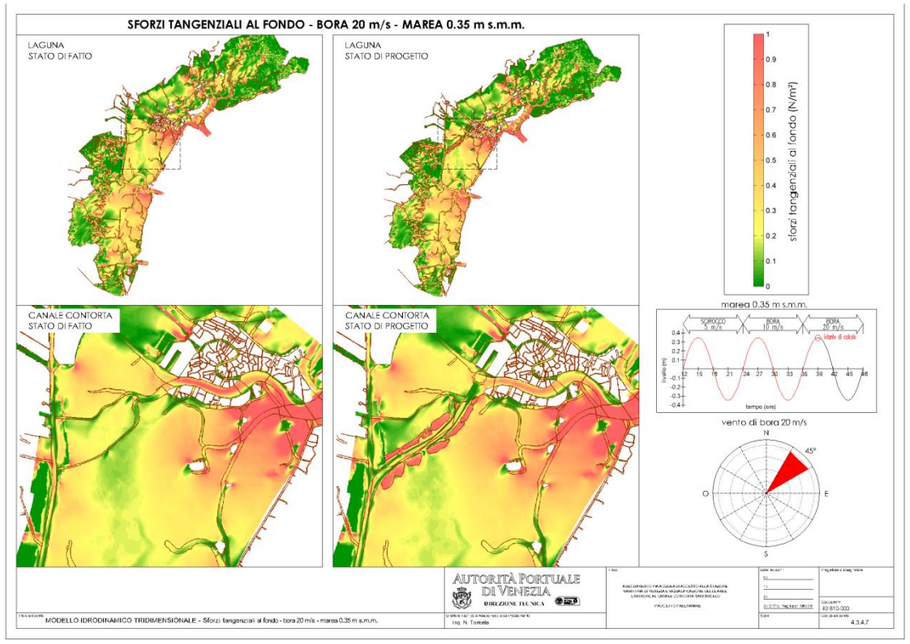


Figura 40: sforzi tangenziali al fondo per vento di bora a 20 m/s e marea a +0.35 m s.m.m.

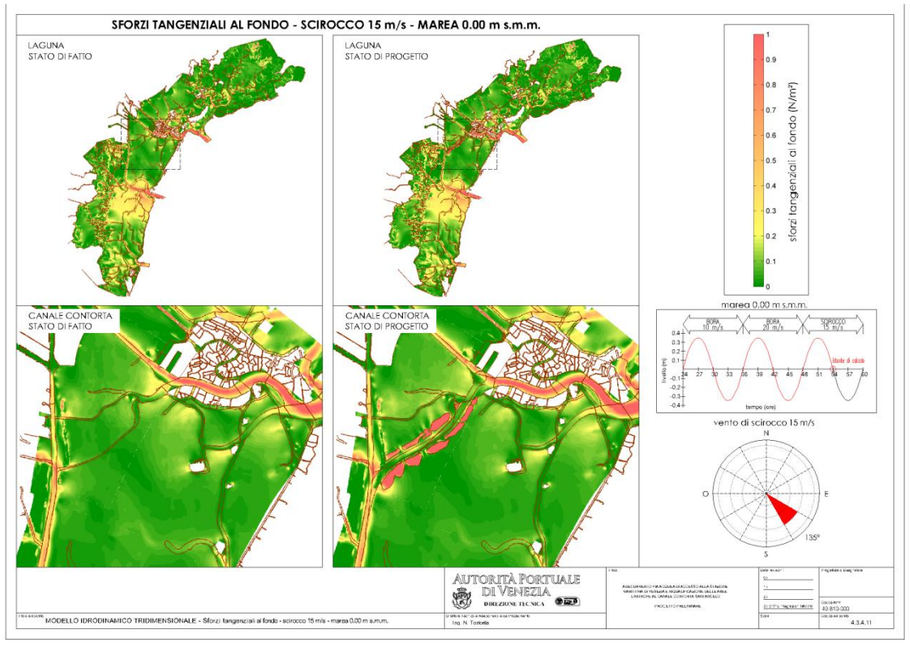


Figura 41: sforzi tangenziali al fondo per vento di scirocco a 15 m/s e marea a 0.00 m s.m.m.

Gli elaborati grafici descrittivi degli sforzi tangenziali al fondo sono numerati 4.3.4.1÷4.3.4.12, di cui in Figura 40 si riporta la tavola 4.3.4.7, relativa al vento di bora e marea +0.35 m s.m.m. e in Figura 41 la 4.3.4.11, relativa al vento di scirocco a medio mare.

Dall'analisi di tali elaborati grafici possono essere poste alcune considerazioni a commento:

- Scirocco a 5 m/s – negli istanti rappresentati, gli sforzi dell'area del Canale Contorta sono compresi attorno a valori di 0.10 N/m² sia allo stato di fatto che di progetto. Si osservi il caso con marea a medio mare dove gli sforzi lungo i varchi assumono valori di circa 0.20 N/m²;
- Bora a 10 m/s – gli sforzi tangenziali in corrispondenza delle superfici delle velme aumentano a 0.5 N/m² ed in generale si osserva una diminuzione dei valori nella zona fra il canale Contorta e il canale Nuovo di Fusina;
- Bora a 20 m/s – si riscontrano anche in questi tre istanti le tendenze descritte per il caso di bora a 10 m/s, oltre a una lieve diminuzione degli sforzi lungo il canale della Giudecca. Non stupisce una qualche criticità degli sforzi sulle velme che, con questo vento, raggiungono valori, potenzialmente critici per l'erosione, di oltre 0.8 N/m², data la quota sommitale a -0.10 m s.m.m.. A tal proposito potrà essere valutata, nei successivi livelli progettuali, una stabilizzazione delle superfici delle velme con tecniche di ingegneria naturalistica;
- Scirocco a 15 m/s –anche in questo ultimo caso gli sforzi sulle velme raggiungono valori critici per l'erosione nel caso di marea a medio mare.

Salinità superficiale

Il tema delle valutazioni in merito alla potenziale modifica della salinità lagunare è stato qui affrontato in via preliminare, che non ha consentito l'implementazione di un modello ecologico complessivo, che tenesse effettivamente conto di tutti i fattori che incidono su questo aspetto.

Nondimeno però, non si poteva non tenere conto anche di questo aspetto, in considerazione del fatto che il canale Contorta si trova in una posizione assai vicina, alla principale foce del Naviglio Inferiore in località Fusina.

Come noto in corrispondenza al nodo di Strà vengono immessi nel sistema del Naviglio consistenti volumi di acqua dolce dal fiume Brenta, con una portata media dell'ordine di 8.5 m³/s. Questa portata si ripartisce nel sistema storico del Naviglio, con uno sversamento terminale in Laguna, in corrispondenza alla foce di Fusina, stimabile dell'ordine di 6 m³/s.

Essendo tale sbocco in Laguna ubicato di fronte all'incivile del canale lagunare Nuovo di Fusina, è del tutto prevedibile che il flusso di acqua dolce si ripartisca in parte sul canale Malamocco Marghera, e in parte nel sopra citato canale lagunare, in funzione dei venti e delle maree incidenti.

Considerato che il canale Contorta è ubicato immediatamente a sud del canale Nuovo di Fusina, è ragionevolmente prevedibile, che le strutture morfologiche in fregio allo stesso possano fungere da ostacolo per lo spagliamento di tali acque superficiali, potendo ragionevolmente ritenere che a nord del canale Contorta possa essere osservato in futuro una qualche riduzione della salinità.

Del tutto ovvio, che l'andamento della distribuzione delle concentrazioni di acque dolci e salate, stante il relativo diverso peso, non possa che essere sviluppato con una modellazione idrodinamica tridimensionale, che tenga anche conto dell'andamento delle temperature fra le varie condizioni al contorno.

Una tale ipotesi, comunque, parrebbe confermata dalle prime valutazioni effettuate, riprodotte in quattro distinti elaborati grafici: il 4.3.5.1 in Figura 42 e il 4.3.5.2 in Figura 43, che rappresentano rispettivamente le differenze per vento di bora e di scirocco nell'area del canale Contorta, il 4.3.5.3 raffigura alcuni degli istanti più significativi con vento di bora e il 4.3.5.4 con vento di scirocco.

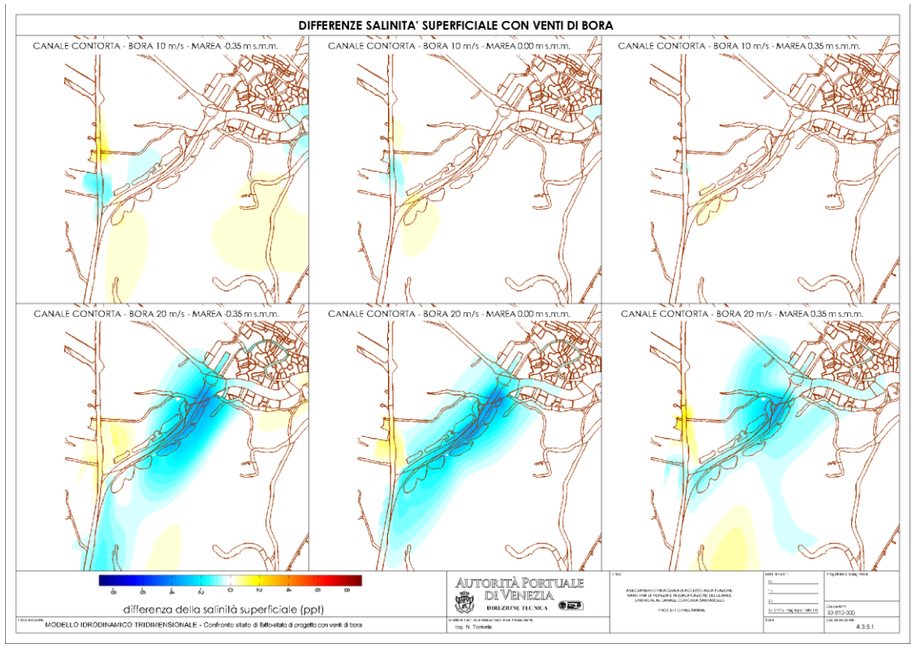


Figura 42: differenze di salinità con vento di bora

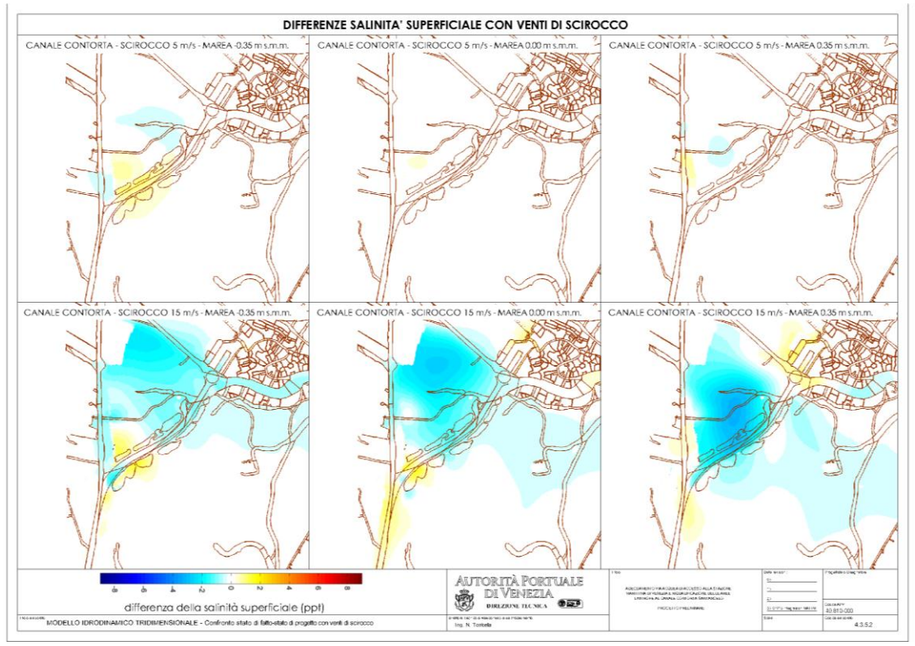


Figura 43: differenze di salinità con vento di scirocco

Nelle tavole di Figura 42 e Figura 43, che riproducono le differenze fra stato di progetto e di fatto, i valori minori di zero (colori azzurro e blu) sono indice di una diminuzione della salinità dello stato di progetto rispetto alla situazione attuale, mentre viceversa i valori maggiori di zero (colori giallo, arancione e rosso) indicano un aumento del parametro, dopo la realizzazione del canale e delle velme. Come era ragionveole attendersi, la presenza del canale e delle velme causa una diminuzione della salinità entro i 2 ppt nella zona a nord che, nei casi con vento di scirocco a 15 m/s, si estende fino al sedime del canale Vittorio Emanuele III. Negli istanti con vento di bora tale variazione risulta perlopiù contenuta nell'area attorno al nuovo canale ed alle velme lungo i bordi.

In ogni caso questo specifico aspetto non può ritenersi compiutamente indagato con le analisi qui contenute, essendo necessario un approfondimento che dovrà essere sviluppato nelle sedi opportune.

Moto ondoso da vento

Il calcolo del moto ondoso da vento è stato effettuato in corrispondenza di due casi estremi:

- vento di bora a 20 m/s e marea +0.50 m s.m.m., nell'elaborato 4.3.6.1 in Figura 44;
- vento di scirocco a 15 m/s e marea a +1.00 m s.m.m., nel disegno 4.3.6.2 di Figura 45;

per ciascuno dei quali è rappresentata l'altezza d'onda significativa H_s in metri.

E' chiaro che il nuovo sistema di velme costituisce un'interruzione del *fetch* lagunare nella zona dei bassifondi a sud di Venezia, più efficace per la traversia di scirocco che di bora, dal momento che il progetto è orientato a circa 45° rispetto al Nord.

Se si osserva la tavola relativa al moto ondoso per vento di bora, si vede che il moto ondoso nella zona fra il canale Contorta e il canale Nuovo di Fusina diminuisce da circa 0.60 m a 0.50 m, mentre l'altezza resta del tutto simile fra il canale Nuovo di Fusina e Vittorio Emanuele III.

Nella configurazione di progetto, in corrispondenza delle velme l'onda subisce una variazione fra 0.5 m e 0.2 m circa, per effetto dell'improvvisa diminuzione di fondale.

Nella parte superiore del medesimo elaborato grafico in Figura 44, è utile osservare le due mappe dell'altezza d'onda nella Laguna di Venezia, perché danno immediatamente il colpo d'occhio della variazione dell'onda indotta dalla presenza delle opere di progetto, la cui area d'influenza risulta all'incirca localizzata fra i suddetti canali Contorta S. Angelo e Nuovo di Fusina.

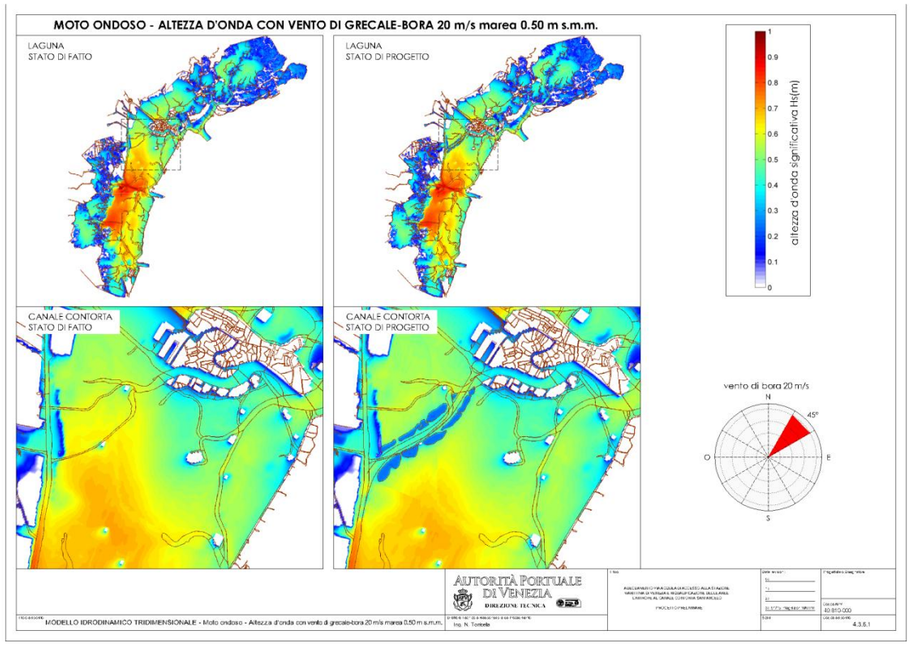


Figura 44: moto ondoso con vento di bora

In corrispondenza del moto ondoso prodotto dal vento di scirocco (cfr. Figura 45), le velme di progetto agiscono di fatto come una barriera soffolta nei confronti della zona settentrionale, essendo di fatto perpendicolari alla direzione del vento.

L'effetto dell'opera, in termini di interruzione del fetch, si estende allo spazio acqueo circondato da: le velme di progetto, le barene S. Leonardo, l'isola delle Tresse e il canale Vittorio Emanuele III.

In termini quantitativi l'abbattimento del moto ondoso a nord delle velme è di circa il 18% corrispondente ad una variazione dell'altezza d'onda significativa da circa 0.55 a 0.45 m, essendo tale effetto limitato dal tirante idrico elevato, pari a un metro.

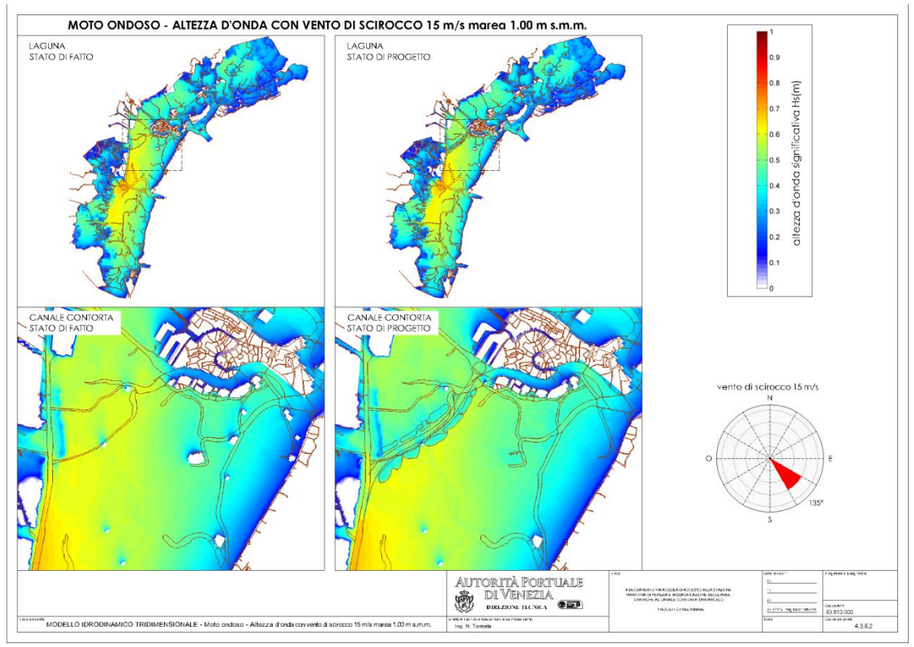


Figura 45: moto ondoso con vento di scirocco

<u>*Evoluzione morfologica a un anno*</u>

A conclusione dei risultati ottenuti per il caso 1, si riportano le mappe delle erosioni e dei depositi a confronto fra stato di fatto e di progetto, per l'anno medio considerato (cfr. elaborato 4.3.7 e successiva Figura 46).

Tale output modellistico risulta particolarmente interessante e significativo, in quanto riproduce, nello stato di fatto, fedelmente le tendenze già riscontrate nell'analisi comparativa dei rilievi storici della Laguna, nella direzione dell'erosione generalizzata dei bassifondali e il contemporaneo deposito di sedimento dei canali.

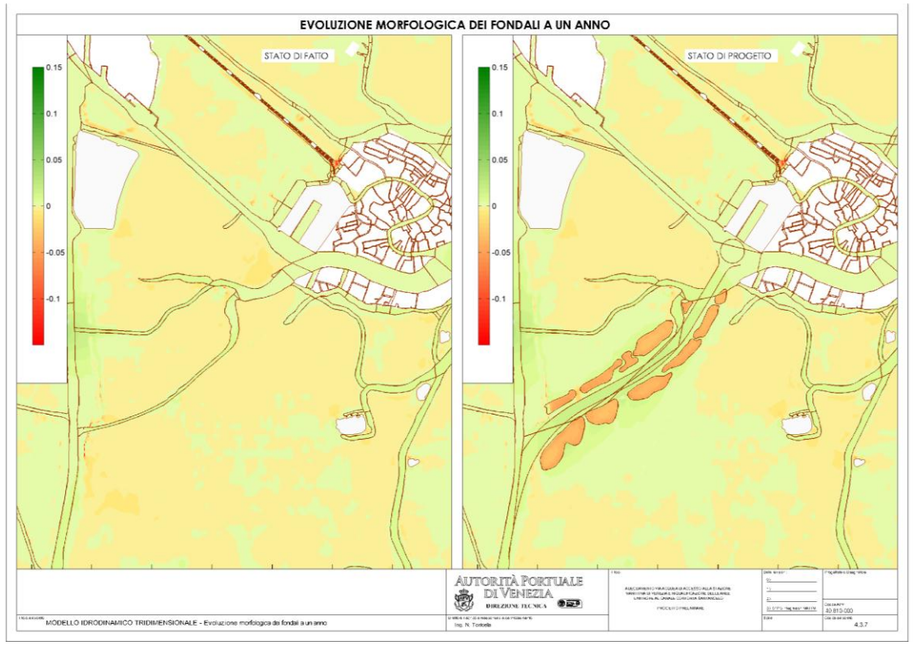


Figura 46: evoluzione morfologica dei fondali a un anno – stato di fatto e di progetto

Non è infatti presunzione di questa analisi modellistica fornire una quantificazione al centimetro delle erosioni e dei riporti, bensì simulare un trend di evoluzione morfologica che sia realistico, valutando la presenza del nuovo canale nella porzione lagunare d'interesse.

In tal senso, se si osserva la Figura 46 con le due immagini affiancate, di stato di fatto e di progetto, è possibile concludere che:

- le superfici delle velme di progetto sembrano essere sottoposte ad erosione (dell'ordine dei 5 centimetri all'anno) e sarà necessario pertanto, come già detto in precedenza, adottare tecniche ecocompatibili di stabilizzazione delle superfici, qualora tale tendenza fosse poi effettivamente riscontrata sul campo, sulla base delle apposite verifiche che saranno contenute nel Piano di Monitoraggio;
- a nord e sud del nuovo canale viene di fatto interrotto il trend erosivo dei bassifondali, sia per effetto della deposizione del materiale eroso dalle velme, che per la protezione che queste offrono nei confronti delle mareggiate insistenti, in particolare da Bora in bassa marea, avendo ridotto il fetch geografico; in particolare a nord l'effetto erosivo si annulla nell'area compresa fra il canale Contorta S. Angelo e il canale Nuovo di Fusina;
- nelle aree al di fuori dell'intorno del nuovo canale non sono prevedibili variazioni morfologiche dovute alla presenza del nuovo canale, rispetto all'attuale tendenza.

A margine della presente analisi vengono poste alcune considerazioni riguardanti la concentrazione di solidi in sospensione in alcuni istanti caratteristici della simulazione. Ciò ad indicare l'area di influenza della presenza del nuovo canale sui fenomeni di torbidità causati dalle condizioni meteomarine caratteristiche, simulate nel caso 1. In particolare, nelle rappresentazioni riportate di seguito in Figura 47 e Figura 48, è indicata in colore blu l'area all'interno della quale la suddetta concentrazione supera la soglia di 40 mg/l, allo stato di fatto e quello di progetto, in uno con le relative differenze indicate in colore arancione. Questo valore indica la soglia sopra alla quale, qualora gli effetti permanessero nel tempo, potrebbe verificarsi un impatto sulla flora e la fauna nell'ambito di indagine. Su tale aspetto si rimanda alla lettura della Valutazione dell'Incidenza Ambientale.

Figura 47: vento di Scirocco, 5 m/s - stato di fatto, stato di progetto e relative differenze

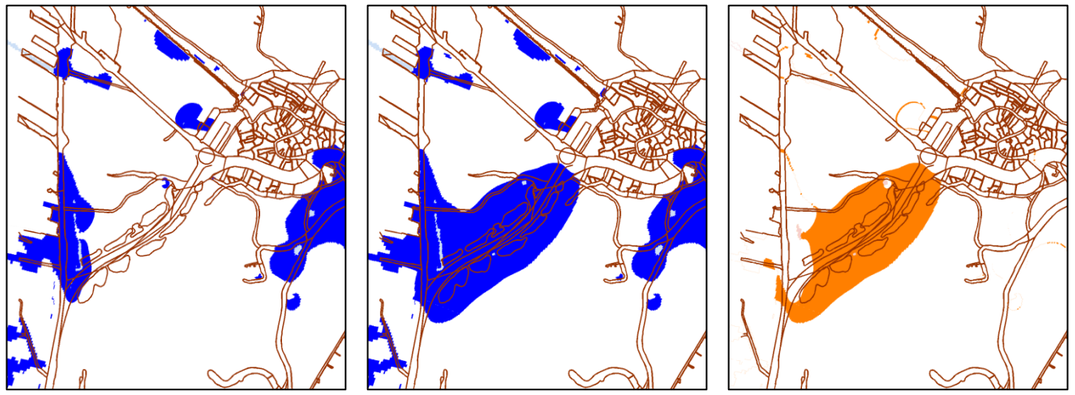


Figura 48: vento di Bora, 10 m/s - stato di fatto, stato di progetto e relative differenze

Dalle figure sopra indicate si osserva che l'area di influenza, con riferimento agli effetti di torbidità, è limitata all'intorno delle opere di progetto.

4.4.2 Caso 2: Scirocco dicembre 2013

Il caso n.2 è il primo delle due simulazioni di eventi gravosi, realmente accaduto di recente in Laguna, avendo qui simulato una condizione di alta marea e di scirocco con intensità fino a 19.4 m/s (cfr. Figura 49).

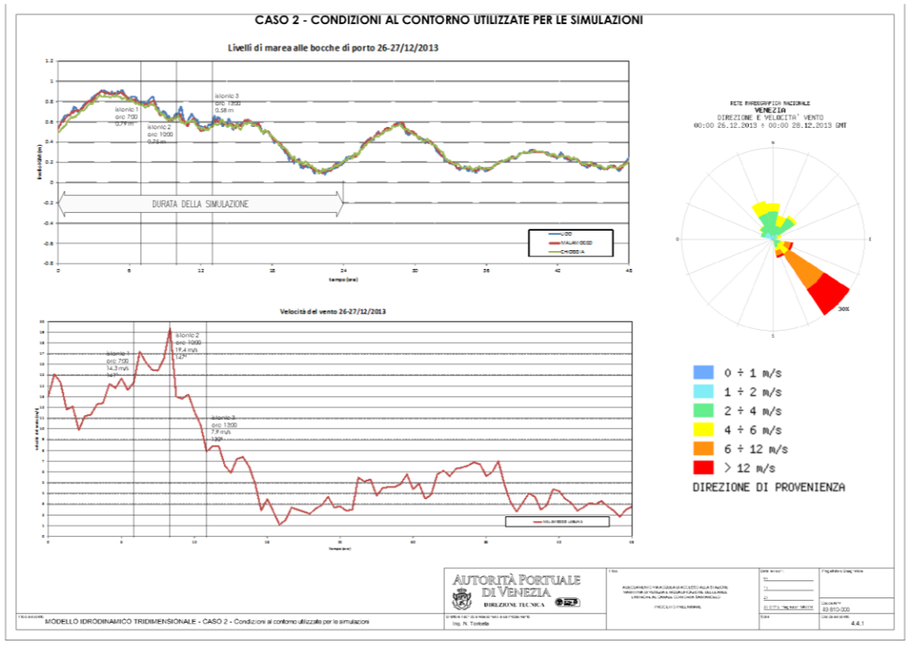


Figura 49: condizioni al contorno caso 2

Come detto in precedenza, tre sono gli istanti di calcolo rappresentati, corrispondenti alle ore 7:00, 10:00 e 13:00 del 26 dicembre 2013, come tre sono i parametri estratti dal modello: livello dell'acqua con le relative differenze fra stato di fatto e di progetto, velocità della corrente al fondo e sforzi tangenziali al fondo.

Nei successivi sottoparagrafi vengono quindi riportate le descrizioni dei risultati ottenuti, tenendo in considerazione che l'obbiettivo principale di questo caso, come del successivo, è verificare l'eventuale esistenza di variazioni del regime idrodinamico dovute alla presenza del nuovo canale, in casi di marea e vento eccezionali.

<u>Livello della superficie libera</u>

Gli elaborati grafici di confronto fra stato di fatto e di progetto, per quanto riguarda i livelli della superficie libera sono le Tavole 4.4.2.1 (cfr. Figura 50)÷4.4.2.4

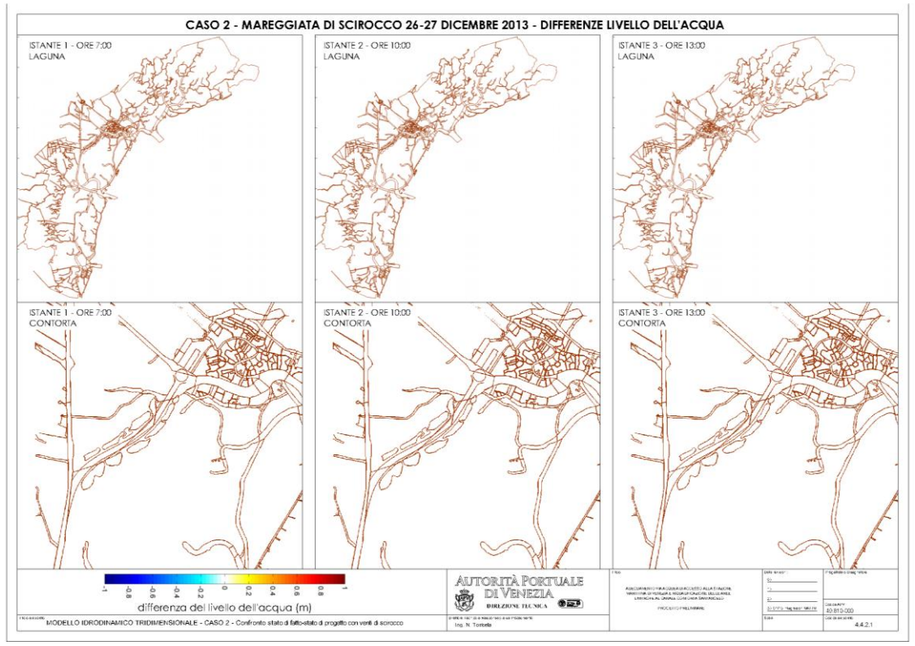


Figura 50: differenze dei livelli dell'acqua - caso 2

In particolare nell'elaborato 4.4.2.1 di Figura 50, vengono raffigurate le mappe delle differenze fra stato di progetto e stato di fatto, immagini queste particolarmente significative perché mostrano la totale assenza di variazioni nei livelli idraulici dell'intera Laguna di Venezia, per effetto dello scavo del nuovo canale e della realizzazione del velme.

Si è avuta in tal modo una prima conferma del fatto che l'effetto del nuovo canale Contorta sui fenomeni di acqua alta sia nullo.

Tale circostanza può essere dedotta anche dall'osservazione degli elaborati relativi ai tre istanti di rappresentazioni, nei quali è interessante anche notare come in corrispondenza dell'istante 2 (cfr. elaborato grafico 4.4.2.3), con marea entrante di +0.66 m s.m.m., il vento di scirocco a 19.4 m/s causi un innalzamento del livello lungo il margine occidentale della Laguna fino a circa +0.90 m s.m.m.

Gli estremi della scala di rappresentazione dei livelli per il caso 2, e per il caso 3, differiscono da quelli del caso1 in ragione delle diverse condizioni al contorno di vento e marea.

Mentre nel caso 1 i livelli sono disegnati fra -1 m e +1 m, nei casi due e tre un'efficace rappresentazione viene fornita con una scala compresa tra +0.2 m e +1.2 m, mantenendo il medesimo cromatismo.

Velocità della corrente al fondo

I designi che espongono i risultati relativi alla velocità della corrente al fondo nei tre istanti, sono numerati 4.4.3.1, 4.4.3.2 (cfr. Figura 51) e 4.4.3.3.

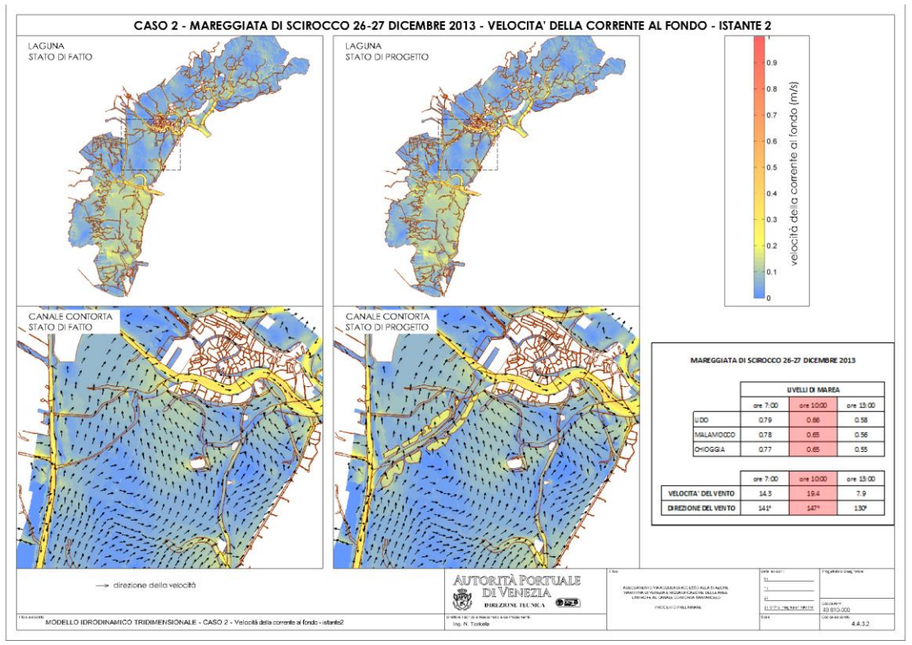


Figura 51: velocità della corrente al fondo - istante 2

Non si osservano variazioni di rilievo nella velocità al fondo, al di fuori dell'area del nuovo canale e delle velme, dove essa aumenta negli istanti 1 e 2 mentre si osserva una leggera diminuzione nell'istante 3.

Similmente al caso precedente, l'area fra il canale Contorta S. Angelo e il canale Nuovo di Fusina risente, pur se in maniera minima di una diminuzione di velocità per effetto della presenza delle velme.

Sforzi tangenziali al fondo

Infine vengono presentati tre disegni relativi agli sforzi tangenziali al fondo, n. 4.4.4.1, 4.4.4.2(in Figura 52) e 4.4.4.3, per i quali valgono considerazioni del tutto simili a quanto già espresso in precedenza.

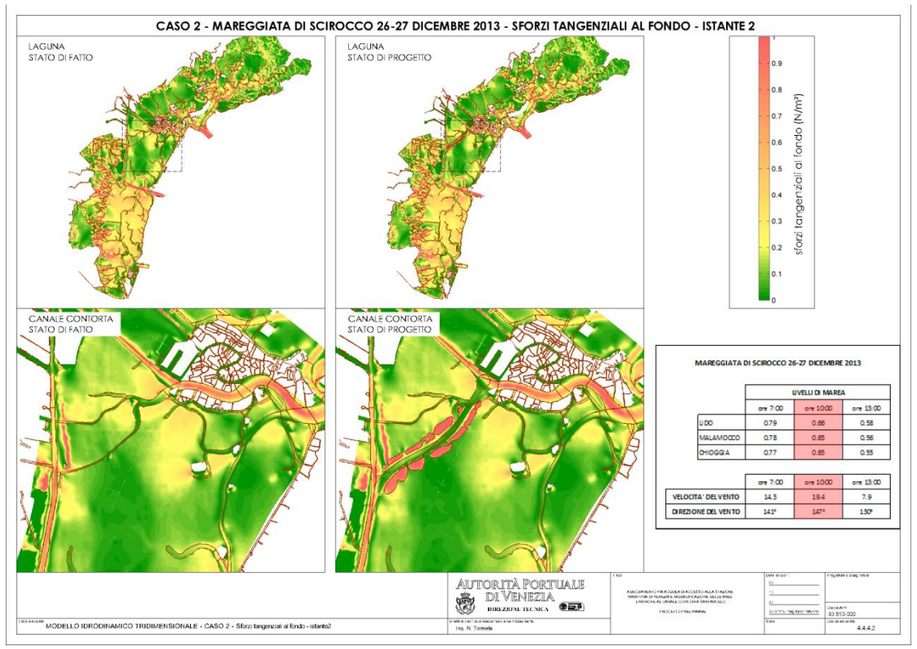


Figura 52: sforzi tangenziali al fondo – istante 2

Si assiste a condizioni di sforzo elevato, potenzialmente causa di erosione, sulla superficie delle velme, in corrispondenza degli istanti 1 e 2, oltre ad una lieve diminuzione degli sforzi (istante 2) nell'area a nord del canale, compresa fra le velme, il canale Nuovo di Fusina e le barene S. Leonardo.

4.4.3 Caso 3: Bora febbraio 2015

Il caso n. 3 simula quanto realmente accaduto nella Laguna di Venezia, all'inizio dello scorso mese di febbraio. Si rammenta come in quell'occasione, furono registrate diverse giornate consecutive di acqua alta a Venezia, dovute alla compresenza di alte maree sospinte da venti di grecale-bora fino ad oltre 17 m/s, come si osserva dalla tavola delle condizioni al contorno 4.5.1, in Figura 53.

In particolare dal grafico delle maree, si osserva come l'innalzamento della velocità del vento di bora nella giornata del 5 febbraio, abbia provocato un particolare innalzamento del livello dell'acqua a Chioggia, rispetto ai livelli registrati a Malamocco e a Lido. Similmente al caso 2 sono stati scelti tre istanti di rappresentazioni, corrispondenti alle ore 9:00, 16:00 e 22:00 del 5 febbraio 2015, per i quali sono stati estratti i parametri livello della superficie libera, velocità della corrente al fondo e sforzi tangenziali al fondo.

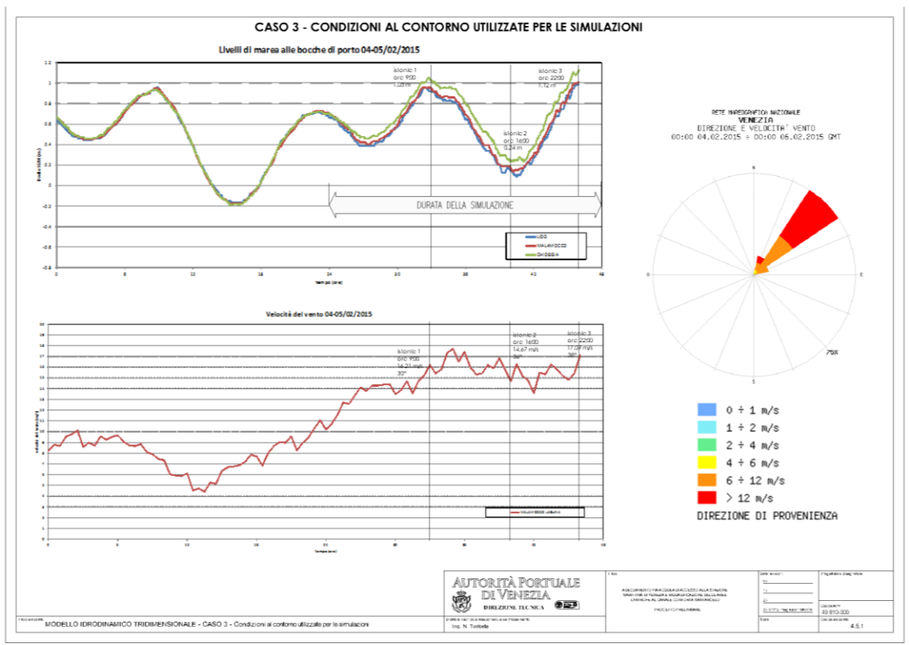


Figura 53: condizioni al contorno caso 3

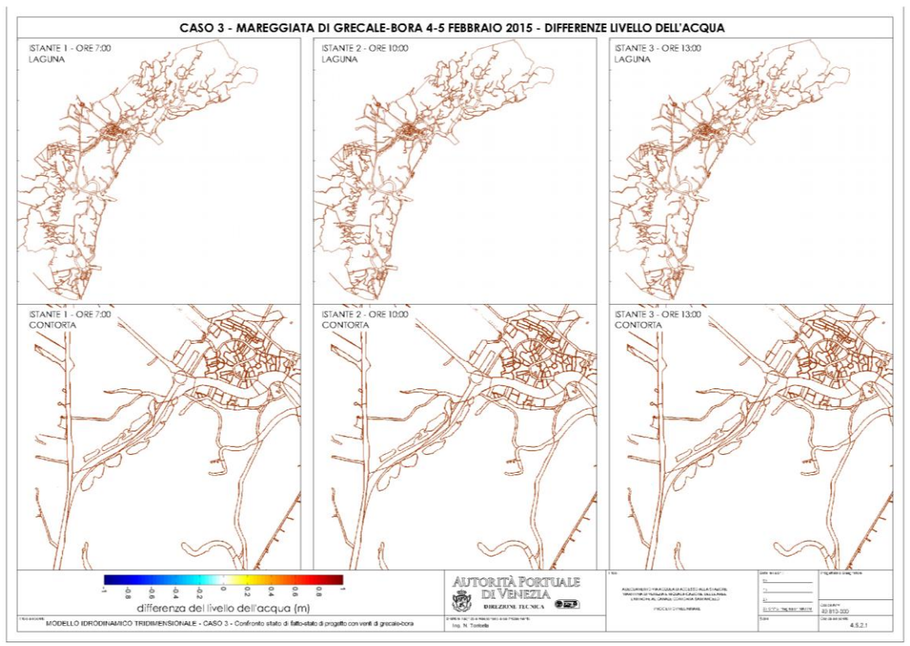


Figura 54: differenze dei livelli dell'acqua - caso 3

Livello della superficie libera

Precede la rappresentazione dei tre istanti calcolo (n. 4.5.2.2, 4.5.2.3 e 4.5.2.4), un elaborato grafico (n. 4.5.2.1) relativo alle differenze dei livelli fra stato di progetto e stato di fatto, riprodotto nella successiva Figura 54.

Anche in questo caso, similmente al caso 2, non si osservano differenze di nessun tipo nell'intero spazio acqueo lagunare, ragione per il quale, sulla base delle simulazioni effettuate è possibile escludere qualsiasi effetto del canale Contorta sui fenomeni di acqua alta.

Anche dall'osservazione degli elaborati grafici n. 4.5.2.2, 4.5.2.3 e 4.5.2.4, si può giungere facilmente a tale conclusione, dal momento che sia le immagini della Laguna che dell'area del canale Contorta, per lo stato di fatto e di progetto sono praticamente identiche.

Velocità della corrente al fondo

Gli elaborati grafici che raffigurano la velocità della corrente al fondo, sono i numero 4.5.3.1, 4.5.3.2 e 4.5.3.3, quest'ultimo riprodotto anche nella successiva Figura 55.

Questo terzo caso risulta particolarmente interessante in quanto il vento di bora ha una direzione praticamente parallela al nuovo canale, all'interno del quale si assiste quindi ad un aumento delle velocità della corrente al fondo, comunque limitato entro i 0.20 m/s. Lo spazio acqueo del canale è infatti protetto dalle velme nella configurazione di riforma e quindi la corrente sospinta da bora può svilupparsi in maniera differente rispetto allo stato di fatto.

Ciò accade anche in corrispondenza della superficie delle nuove velme, in ragione della variazione di fondale dovuto alla loro realizzazione a quota -0.10 m s.m.m. Tali superfici infatti sono al momento dei bassifondali a quota di circa -1.50 m s.m.m.

Come già riscontrato negli altri casi simulati, anche qui si assiste ad una diminuzione delle velocità nell'area compresa fra il canale Contorta ed il canale nuovo di Fusina, comunque inferiore a 0.10 m/s.

In nessuno dei tre istanti oggetto di raffigurazione si assiste ad una modifica nella direzione delle velocità della corrente al fondo per effetto delle opere di progetto, al di fuori del sedime del nuovo canale.

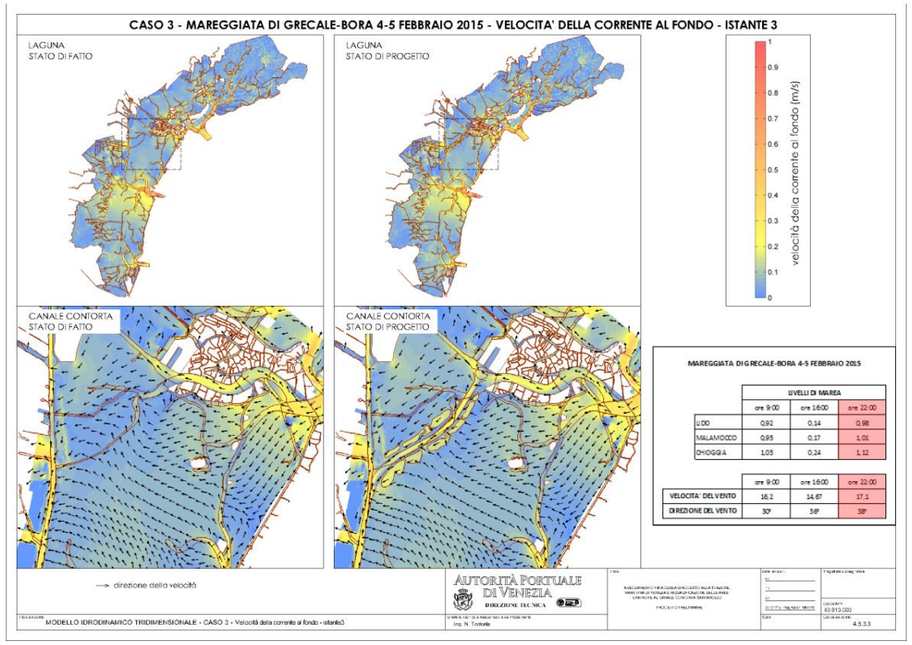


Figura 55: velocità della corrente al fondo - istante 3

<u>*Sforzi tangenziali al fondo*</u>

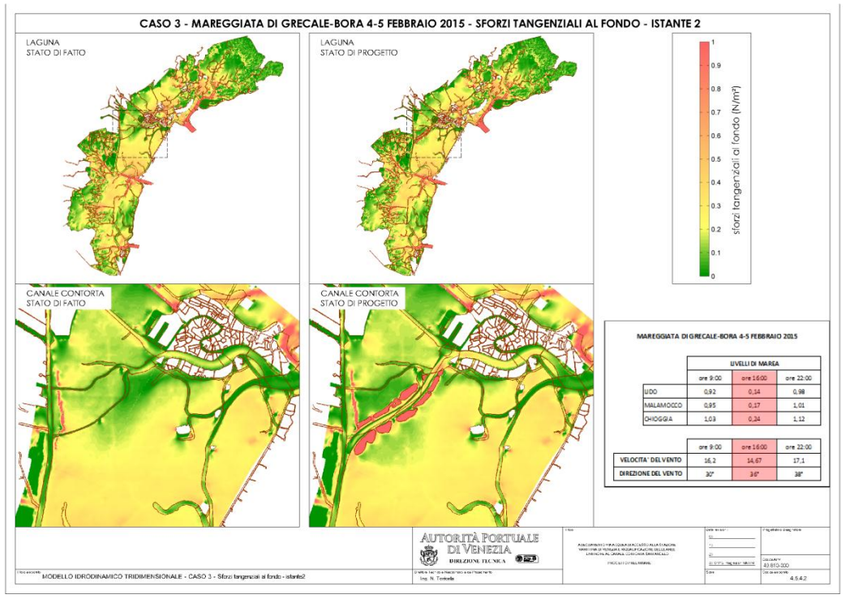


Figura 56: sforzi tangenziali al fondo – istante 2

Negli elaborati grafici n. 4.5.4.1, 4.5.4.2 (cfr. Figura 56) e 4.5.4.3 sono infine presentate le mappe relative agli sforzi tangenziali al fondo.

Le considerazioni a commento che possono essere poste, dall'analisi dei suddetti elaborati sono del tutto simili a quanto già commentato per i casi precedenti.

Nella configurazione di progetto, in corrispondenza alle superfici delle nuove velme, gli sforzi tangenziali al fondo superano i valori critici per l'erosione (0.5 N/m²) e di ciò si dovrà tenere conto nei successivi livelli progettuali, come già accennato nel presente elaborato. Gli sforzi aumentano anche all'interno del canale, per quanto già specificato nel paragrafo relativo alla velocità della corrente al fondo, non superando comunque i 0.2/0.3 N/m². Le variazioni negli sforzi, dovuti alla presenza del canale restano comunque localizzati nell'intorno dell'opera stessa.

4.4.4 Considerazioni conclusive

In conclusione, si mette in evidenza la protezione indotta dalle nuove velme sul bassofondale a nord contro l'erosione dovuta al vento di Scirocco, e sul bassofondale a sud del nuovo canale indotta dai venti di Bora.

Infine, la presenza di nuove velme nel bassofondale del bacino centrale, va a riqualificare quest'area oggi caratterizzata da profondità pressochè costanti: la modificazione indotta dalle opere di progetto potrà attivare, proprio per la nuova diversità fisica dei fondali, lo sviluppo dei dinamismi naturali propri dell'ambiente naturale, con l'insediamento di fauna e flora proprie delle aree a velma, portando ad un arricchimento della biodiversità.

5 MODELLO DI TRANSITO DELLE NAVI

5.1 Inquadramento teorico

Gli effetti idrodinamici dovuti al transito di navi di grandi dimensioni lungo il futuro canale Contorta – Sant'Angelo rivestono fondamentale importanza per quanto riguarda l'impatto della nuova progettazione sull'equilibrio dell'ambito lagunare, in cui l'opera si inserisce.

Il transito di grandi navi all'interno dei canali lagunari è causa di una serie di particolari effetti, di non facile inquadramento teorico, legati non tanto alla generazione di onde corte a partire dallo scafo, tipiche del movimento di piccole imbarcazioni, quanto allo spostamento di grandi masse di fluido, dovuto all'elevato volume di carena.

È innanzitutto necessario precisare la sostanziale differenza che intercorre, in termini di effetti idrodinamici, tra un natante in movimento in acqua profonde, non confinate, ed un natante in transito all'interno di un campo di moto confinato come un canale lagunare.

Il primo, come noto, genera principalmente un sistema di onde corte facilmente percepibili, di ordine superiore al primo, a partire dalla prua e dallo scafo in genere, il cui inviluppo viene chiamato *onda di Kelvin*, le cui caratteristiche dipendono dalla velocità di traslazione del natante e dalla profondità del fondale su cui si sposta.

Per il secondo natante invece assume maggior importanza il sistema di onde causato dallo spostamento della massa di fluido davanti allo scafo ed il conseguente instaurarsi di un particolare campo di velocità, che causa l'accelerazione del fluido ed un forte abbassamento della superficie libera lungo i fianchi dello scafo, a cui segue un notevole moto di richiamo del fluido circostante per compensare la depressione lasciata dietro alla poppa. Questo tipo di perturbazione, che in teoria è generato da ogni natante in movimento, viene definito *scia di Bernoulli* (PIANC, 2003) e assume un ruolo predominante nel caso di moto in canali confinati come quelli lagunari, via via più importante al crescere del rapporto fra la sezione immersa dello scafo e la sezione trasversale del canale attraversato, definito *coefficiente di blocco*.

Riassumendo, i natanti in transito all'interno di un canale lagunare hanno un comportamento assimilabile a quello di uno *stantuffo*, poiché nel loro spostamento impongono una sovrappressione al fluido davanti alla prua, generando così un particolare campo di velocità che ha come conseguenza diretta la diminuzione di pressione lungo i fianchi e dietro la poppa.

Conseguenze di questa variazione di pressione sono:

- l'innalzamento della superficie libera davanti alla nave e l'abbassamento del livello ai lati e dietro di essa, con la conseguente propagazione di onde in elevazione ed in depressione lungo il canale e nei bassifondi adiacenti;
- l'incremento delle velocità e degli sforzi tangenziali al fondo nell'intorno della nave, sotto la chiglia, ed in corrispondenza delle onde lunghe che si staccano dallo scafo.

Si vuole qui verificare e approfondire l'incidenza di questi fenomeni sull'evoluzione morfologica dell'ambiente attraversato. Le onde lunghe in elevazione possono infatti essere tali da sormontare le opere di difesa, o le strutture morfologiche prospicienti, mentre l'incremento delle tensioni tangenziali, legato in particolare alla propagazione delle onde depressive, provoca una maggiore movimentazione dei sedimenti al fondo, lungo le sponde e nei bassifondi adiacenti.

Il fenomeno è stato studiato, su base sperimentale, dal CNR-ISMAR e dai centri di ricerca di diverse Università, con campagne di misurazione in corrispondenza al canale Malamocco – Marghera effettuate a partire dal 2009. Da alcune di queste osservazioni è stato possibile trarre importanti considerazioni per impostare un modello idrodinamico in grado di valutare il complesso insieme di fenomeni finora descritto, riproducendo dapprima i fenomeni osservati nel canale Malamocco – Marghera, per poi simulare il transito dei natanti anche nel canale di futura realizzazione, secondo le ipotesi ed i concetti presentati nel seguente paragrafo.

5.2 Impostazione del modello

La modellazione matematica oggetto di questo paragrafo ha come obiettivo la simulazione del transito di una nave di grandi dimensioni all'interno del futuro canale Contorta – Sant'Angelo, per ottenere una stima degli effetti provocati in termini di perturbazione della superficie libera, di sforzi tangenziali al fondo e di velocità.

Il modello concettuale per descrivere il moto del natante si basa su un'ipotesi semplificativa. La presenza della nave nel campo fluido viene infatti interpretata come una sovrappressione Δp sulla superficie indisturbata, tale da abbassare il pelo libero dell'acqua fino al livello corrispondente al pescaggio della nave. Questo incremento di pressione è pari al carico del natante che viene equilibrato, al galleggiamento, dalla spinta idrostatica. Questo principio è descritto dalle seguenti immagini in Figura 57, in cui si osserva la schematizzazione del natante nel canale, in sezione, ed in Figura 58 in cui è indicata l'impronta di carico della sovrappressione.

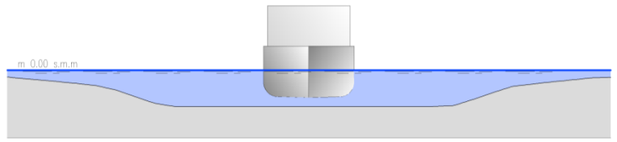


Figura 57

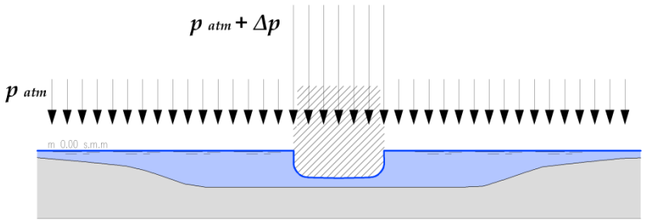


Figura 58

Il movimento della nave viene dunque concettualmente rappresentato dal movimento di una sovrappressione sulla superficie libera del canale, assimilata nel modello ad una perturbazione atmosferica in movimento.

La sovrappressione Δp si può determinare considerando la colonna d'acqua corrispondente alla profondità di pescaggio. Definito Y il pescaggio rispetto al livello medio del mare (0.00 m s.m.m.), si ha dunque:

$$\Delta p = Y \gamma_w$$

con γ_w peso specifico dell'acqua.

Vengono qui di seguito descritte ed analizzate le simulazioni effettuate mediante il modello matematico Delft3D, utilizzando il modulo idrodinamico D-Flow al fine di indagare gli effetti sulle caratteristiche del campo di moto in un dominio di indagine corrispondente all'area circostante il canale in progetto.

5.3 Calibrazione del modello

5.3.1 Misure di riferimento

Al fine di effettuare la calibrazione del modello, si fa riferimento alle misurazioni strumentali pubblicate da CORILA(*Allegato 1 dell'Allegato B alla Deliberazione del Commissario con i poteri del Consiglio Comunale n. 84 del 24/10/2014*), relative al transito di natanti con diverse stazza e velocità nel canale Malamocco – Marghera, effettuate nel marzo-aprile del 2014.

Tali misurazioni si riferiscono alla quota della superficie libera in un transetto del canale, come indicato nella seguente Figura 59, ottenute posizionando gli strumenti nell'area esterna al canale navigabile, nel tratto protetto dalle dighette in pietrame di fronte alla cassa di colmata B.

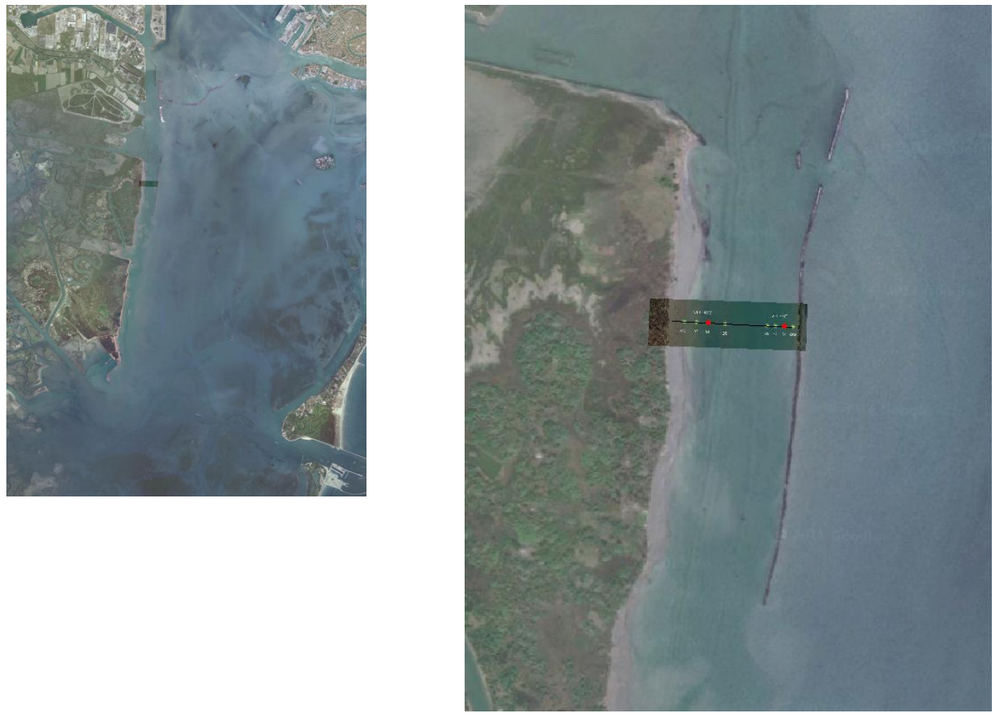


Figura 59: sezione misure CORILA

Geo-referenziando la posizione di tali strumenti, è stato possibile individuare i corrispondenti nodi della griglia computazionale all'interno del modello matematico implementato in Delft3D.

Nel succitato Allegato, è inoltre rappresentata la sezione trasversale di riferimento sopra descritta, da cui è possibile ricavare la profondità del fondale in corrispondenza a ciascun sensore. In tal modo è stato possibile scegliere i nodi della griglia la cui posizione e profondità (secondo la batimetria introdotta nel modello) fossero più corretti.

In particolare, la calibrazione effettuata fa riferimento alle misurazioni registrate il 28/03/2014 per il transito della nave mercantile portarinfuse Pessada, di cui sono riportati di seguito i dati e una foto, tratti dal servizio *Marine Traffic*. La scelta è stata dettata dal fatto che, fra le osservazioni disponibili, la nave Pessada è quella che più si avvicina, per caratteristiche dimensionali, alle navi da crociera oggetto delle analisi nel futuro canale Contorta.

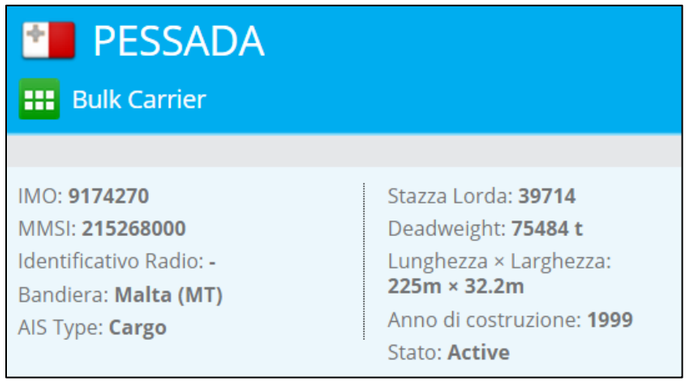


Figura 60

Figura 61

Il pescaggio misurato per questa nave è pari a 7.0 m, con una velocità di 8.6 kn (16 km/h).

Gli andamenti temporali delle quote misurate dai sensori B2 (lato casse di colmata, profondità indisturbata 2.2 m) e W3 (lato dighette, profondità indisturbata 2.8 m) sono riportati in Figura 62 e Figura 63, in cui si è considerata una marea variabile nell'intorno del medio mare, in assenza di diverse indicazioni.

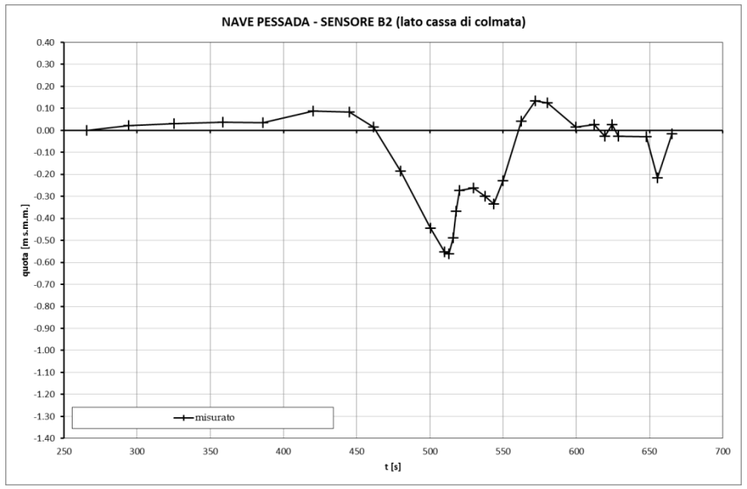


Figura 62: sensore B2

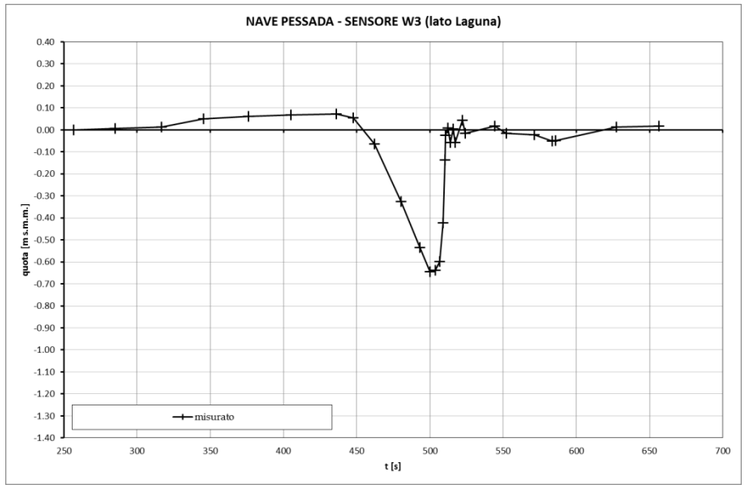


Figura 63: sensore W3

L'andamento di questi grafici presenta un lieve innalzamento del livello, rispetto al livello indisturbato, all'approssimarsi della nave, in entrambi i casi minore di 10 cm, ed una notevole depressione in seguito al transito, che raggiunge la quota minima di 60 cm dal lato delle casse di colmata e di 65 cm circa dal lato delle dighette.

Si osserva, dal lato della cassa di colmata, un probabile effetto di riflessione dell'onda negativa generata dal transito della nave, che si chiude con un innalzamento fino alla quota di circa 0.15 cm s.m.m. Per quanto riguarda invece il lato Laguna la coda della perturbazione è caratterizzata da minori oscillazioni, nell'intorno del livello indisturbato.

5.3.2 Modello di transito dei natanti nel canale Malamocco – Marghera

Ai fini delle simulazioni per la calibrazione del modello, l'ambito di studio è il tratto del canale Malamocco – Marghera adiacente alle casse di colmata A, B e D-E, compreso tra la darsena di San Leonardo e Porto Marghera, per una lunghezza di circa 11 km.

La larghezza del dominio di indagine è pari a 5.4 km, in modo da includere, dal lato ovest, i terreni delle casse di colmata ed i canali di rinaturalizzazione in esse realizzati, e dal lato est una porzione di laguna sufficiente, per osservare la propagazione delle onde sui bassifondi, che in questa zona raggiungono profondità massime di 2.00 m al di sotto del livello medio del mare.

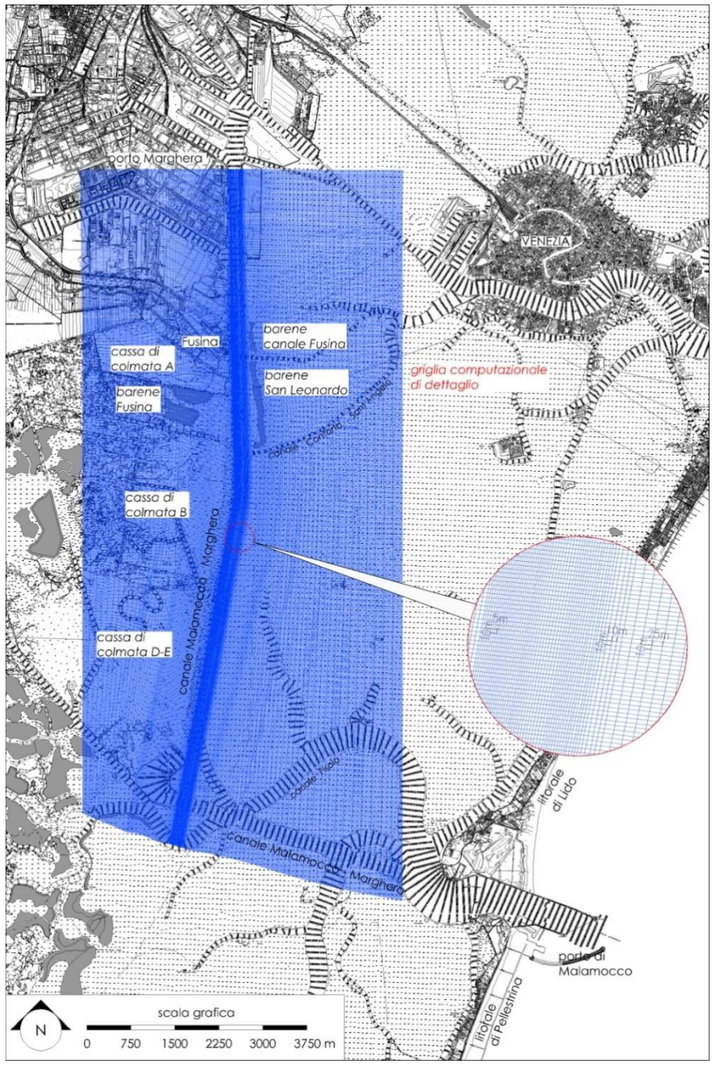


Figura 64: griglia computazionale per il modello del canale Malamocco – Marghera

In direzione nord-sud, viene presa in esame l'intero tratto adiacente alle casse di colmata, da San Leonardo a Porto Marghera, per una lunghezza complessiva di circa 12 km. In questo tratto si possono osservare diverse caratteristiche peculiari del canale Malamocco – Marghera.

La griglia computazionale utilizzata, rappresentata in Figura 64, ha un'estensione totale di circa 64 km² ed è costituita da 178'875 celle. Nella porzione interna della griglia, utilizzata per discretizzare il canale, le celle hanno lunghezza di 10 m nella direzione del canale e una larghezza minima di 5 m. Nelle parti esterne la dimensione delle celle aumenta progressivamente in direzione trasversale, al fine di ottimizzare il numero complessivo di celle.

Il fondo del canale Malamocco – Marghera è stato imposto alla quota di esercizio di -12.00 m s.m.m., profondità ottenibile con la manutenzione ordinaria del canale.

I principali dati necessari per la modellazione del movimento del natante all'interno del canale Malamocco – Marghera, oltre alle caratteristiche geometriche e morfologiche del dominio di studio, sono:

- le dimensioni della nave;
- il suo pescaggio;
- la velocità di spostamento.

Per definire le dimensioni della nave di progetto si è fatto riferimento alla succitata nave mercantile portarinfuse Pessada, caratterizzata seguenti parametri:

Nave tipo Pessada

- lunghezza (fuori tutto): 225 m;
- larghezza: 32 m;
- pescaggio (carico non noto): 7 m,
  corrispondente ad un dislocamento di circa 45'000 t.

Con riferimento ad una sezione tipo del canale Malamocco – Marghera, il coefficiente di blocco relativo alla nave in esame risulta pari a circa 0.18.

La velocità di riferimento delle simulazioni per la calibrazione è quella misurata, pari a 8.6 kn (circa 16 km/h).

Occorre precisare che la velocità di spostamento delle navi lungo il canale Malamocco – Marghera può essere variabile, in funzione di numerose condizioni. Secondo l'ordinanza 175/2009 della Capitaneria di Porto di Venezia (capo II, art. 9), la velocità deve ridursi fino a 6 kn (~11 km/h) in corrispondenza del traverso con il canale Cunetta, nei pressi di Fusina. La maggiore velocità della nave analizzata è da valutarsi comunque possibile, in quanto la sezione di rilevamento si trova circa

700 m a sud della sezione "limite" di Fusina, e qualora le condizioni meteomarine lo richiedano le navi in transito possono avere la necessità di procedere a maggiore velocità.

5.3.3 *Risultati della calibrazione*

Compendio dei risultati

Vengono di seguito riportati i grafici relativi all'andamento, nel tempo, dell'elevazione di superficie calcolata dal modello idrodinamico Delft3D-Flow, posta a confronto con i valori misurati tratti dal succitato studio sperimentale pubblicato da CORILA. Nelle prime immagini che vengono rappresentate, in Figura 65 e Figura 66, sono stati inclusi tutti i risultati ottenuti con le varie prove.

La procedura di calibrazione ha avuto come oggetto non solo i parametri (fisici e numerici) del modello, ma è stato investigato anche l'utilizzo di particolari moduli e funzioni del modello Delft3D e differenti modalità di schematizzazione dello scafo, mediante la costruzione della sovrappressione mobile.

In particolare le analisi hanno fatto riferimento all'introduzione di una soluzione per la schematizzazione dell'effetto dell'elica di propulsione, e la rappresentazione dello "scafo" schematizzato concettualmente come schiacciamento del pelo libero dell'acqua, come detto in precedenza, nei dettagli della prua, della poppa, e del fondo.

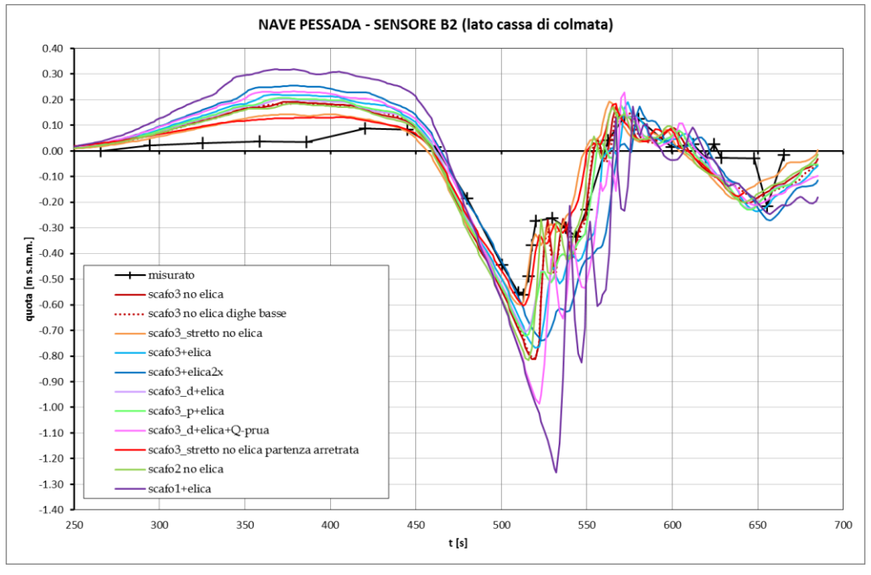


Figura 65: sensore B2

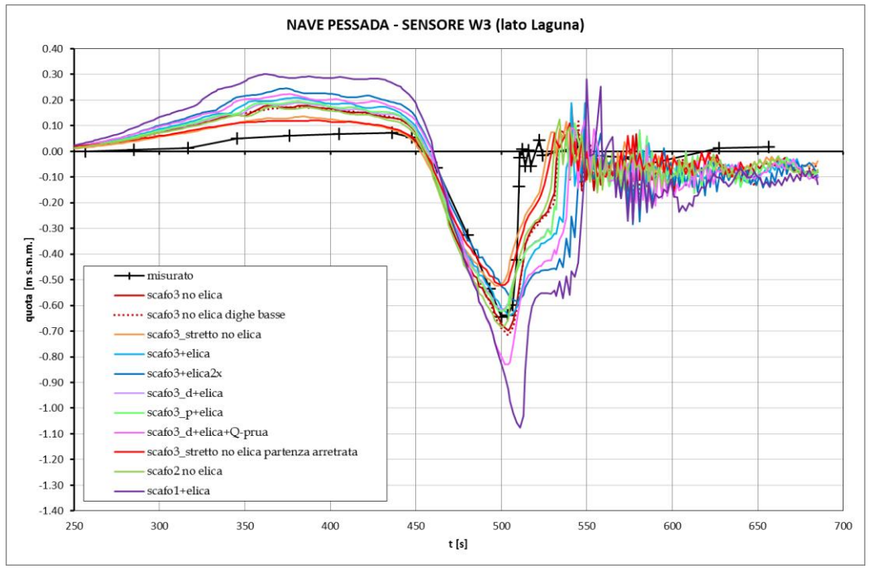


Figura 66: sensore W3

Si premette fin da ora che le differenze fra i risultati ottenuti dal modello e quelli misurati sono dovuti in parte ad una differente rappresentazione dei fondali della sezione di riferimento, che non è stato possibile riprodurre in modo analogo a quelle registrate in occasione delle misurazioni.

Vengono di seguito posti a confronto con i dati misurati i risultati di alcune analisi, ottenuti variando di volta in volta una singola caratteristica del modello.

Caratteristiche dello scafo: scafo1 / scafo3

Nelle seguenti figure si riportano i risultati ottenuti da modelli diversi realizzati con progressiva ottimizzazione della forma della parte immersa della nave (*scafo1, colore viola* e *scafo3, colore azzurro*). Risulta evidente come la schematizzazione definita *scafo3* consenta una migliore riproduzione dei dati misurati. A tale configurazione faranno riferimento, in genere, anche i risultati delle prove in seguito descritte.

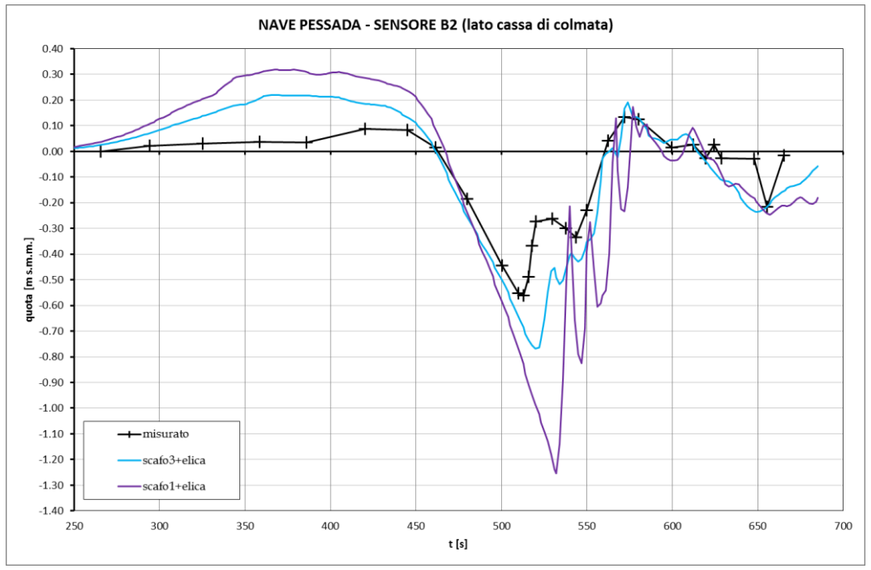


Figura 67: sensore B2

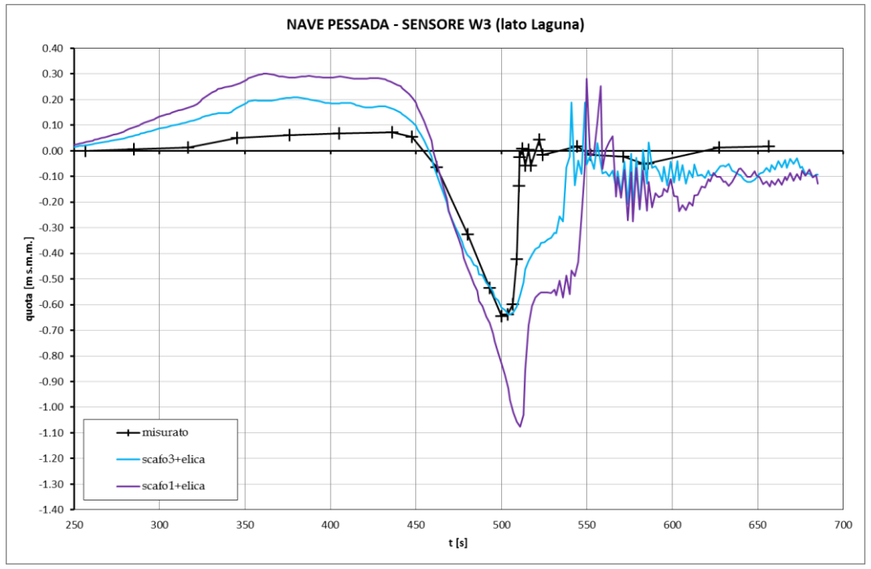


Figura 68: sensore W3

Influenza dell'elica

Confronto fra un modello in cui è rappresentata l'elica come fuoriuscita di una portata con quantità di moto pari a quella necessaria per la spinta della nave (*scafo3+elica, colore azzurro*), un modello in cui tale immissione è raddoppiata (*scafo3+elica2x, colore blu*), ed un modello in cui è assente (*scafo3no elica, colore rosso*). L'assenza dell'elica permette una migliore riproduzione della perturbazione.

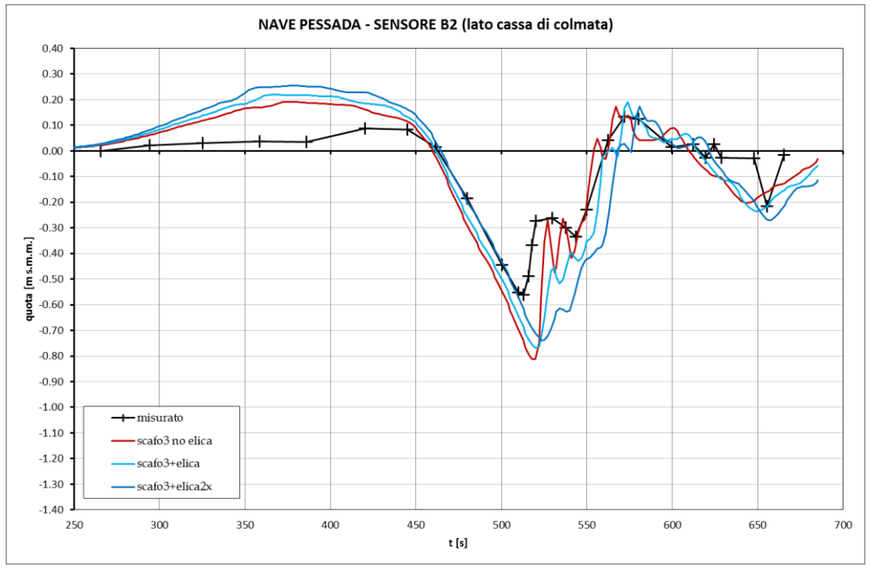


Figura 69: sensore B2

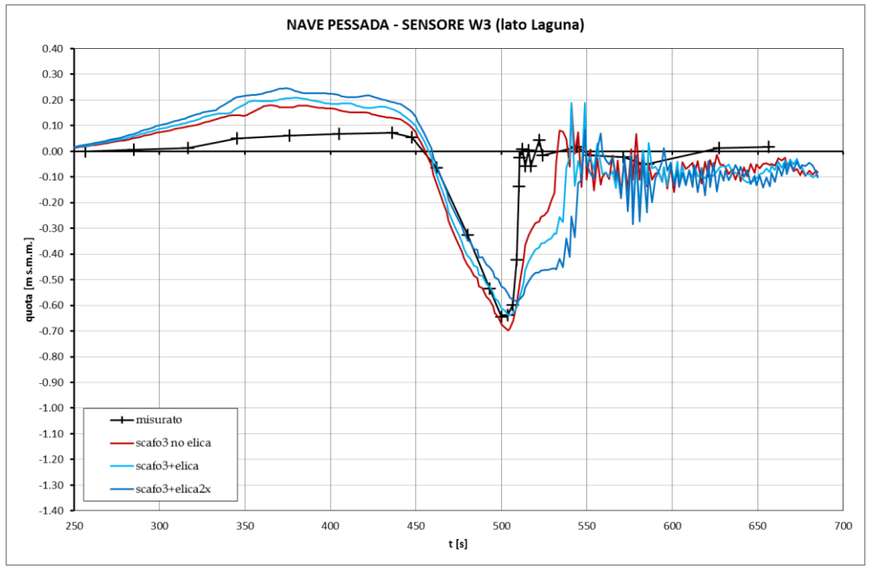


Figura 70: sensore W3

Si noti in particolare che l'assenza del sistema elica diminuisce l'ampiezza dell'onda positiva davanti alla prua, e consente un incremento più rapido dei livelli dopo il passaggio del natante.

Caratteristiche dello scafo: larghezza

Vengono di seguito riportati i risultati ottenuti modificando la larghezza dello scafo immerso riprodotto nel modello. Data la risoluzione della griglia nell'ambito del canale, la minima variazione possibile è di circa 5 m. Si noti come lo scafo con minore ingombro laterale (*scafo3_stretto no elica, colore arancione*) consenta una riproduzione molto accurata nel caso del sensore dal lato della cassa di colmata. In questo caso anche l'entità dell'onda in elevazione che precede il passaggio della nave risulta meglio riprodotta.

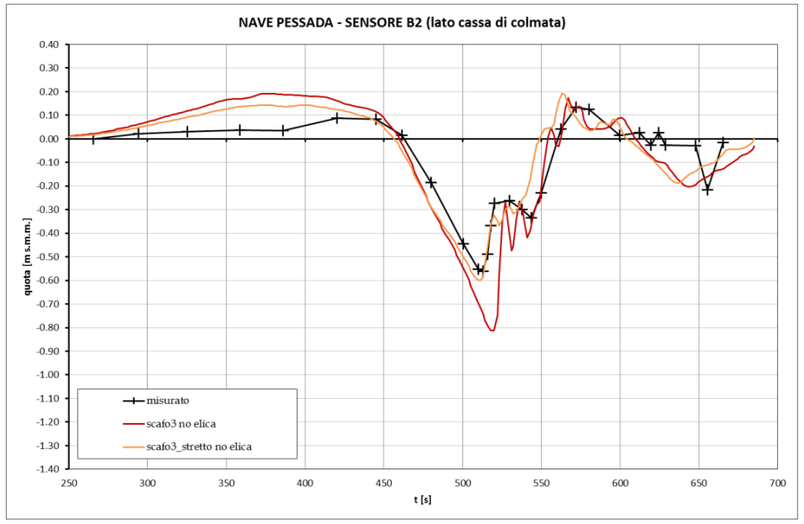


Figura 71: sensore B2

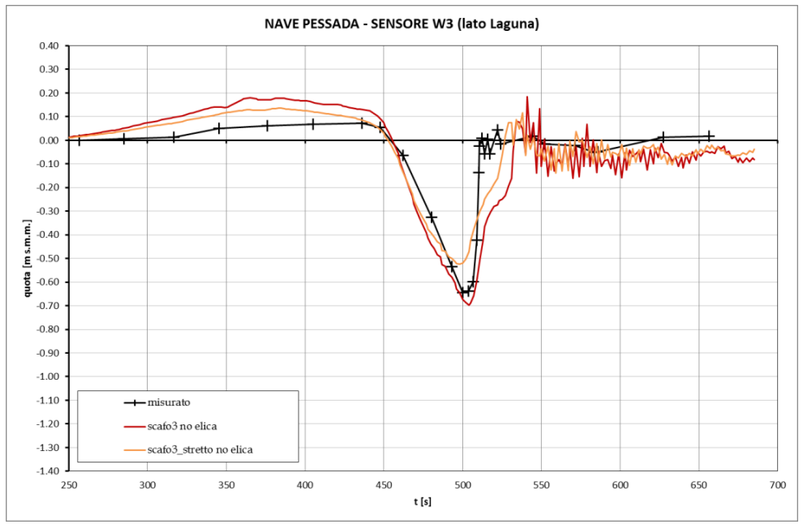


Figura 72: sensore W3

Partenza arretrata di 200 m

Viene analizzato anche il caso in cui la partenza del natante avvenga 200 m più a monte rispetto ai casi presentati in precedenza (*scafo3_stretto no elica partenza arretrata, colore rosso*), al fine di comprendere se l'onda in elevazione davanti alla prua subisca un effetto di "laminazione" durante la sua propagazione. Si dimostra tuttavia una sostanziale invarianza del modello in riferimento a tale fattore.

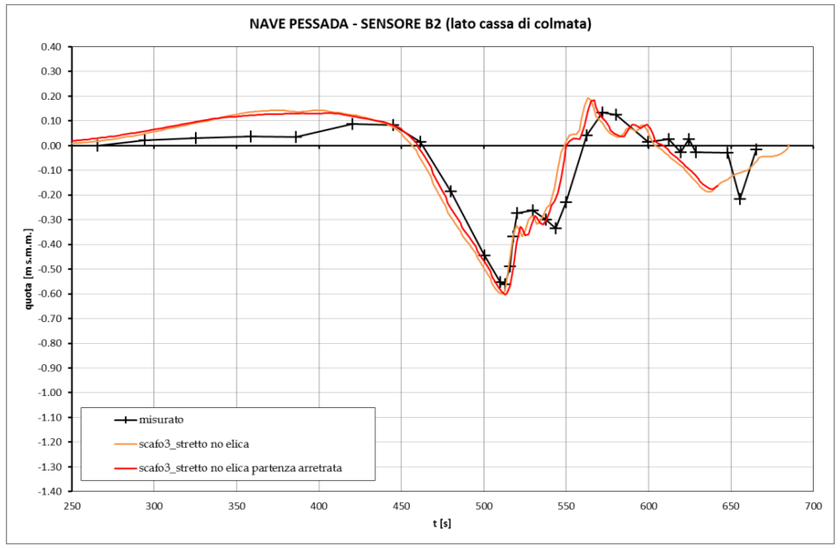


Figura 73: sensore B2

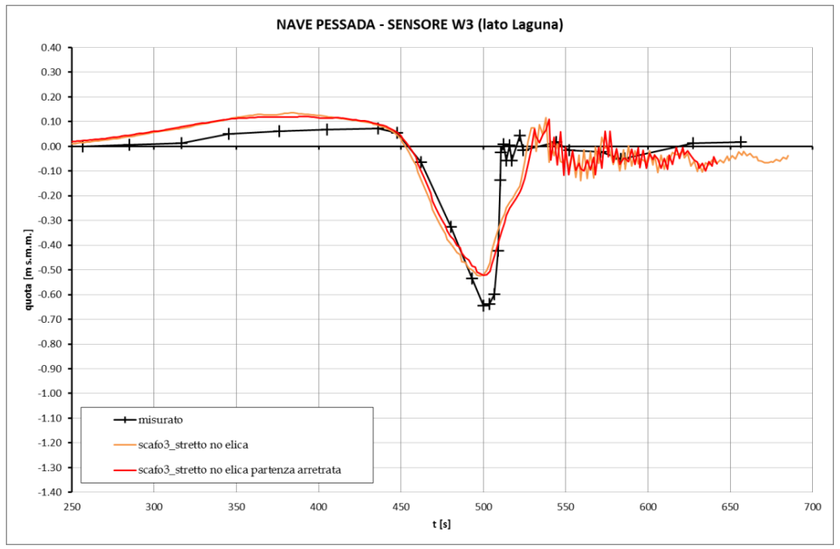


Figura 74: sensore W3

5.3.4 Considerazioni conclusive

Ai fini della calibrazione idrodinamica del modello rappresentativo degli effetti legati alla navigazione di grandi navi nei canali lagunari, sono stati, come sopra descritto, effettuati diversi tentativi, variando i parametri caratteristici della nave presa in considerazione, sia in termini geometrici, che idrodinamici.

È stata così simulata in modo ottimale la depressione realmente indotta dalla navigazione, sia come tempi, che come valore assoluto (scia di Bernoulli).

Rimangono leggermente sovrastimati, gli effetti legati all'innalzamento della superficie libera lagunare che precede il passaggio della nave, potendo però ritenere che ai fini ingegneristici il valore veramente significativo, sia quello legato alla simulazione della depressione.

A tal fine si considerino i contenuti della Figura 75 tratta da *Rapaglia et al.*, 2011, dove sono chiaramente rappresentate le variazioni di torbidità nelle acque lagunari al passaggio di una nave, concentrate nella fase di reflusso verso il canale, a depressione avvenuta.

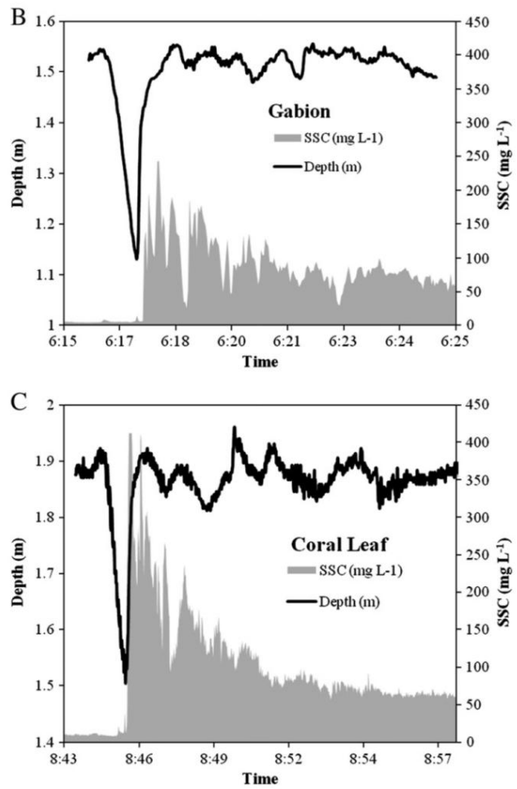


Figura 75: andamento temporale di livelli e concentrazione di solidi sospesi (SSC) dopo il passaggio di 2 navi

5.4 Definizione del dominio di indagine

L'ambito di studio per le simulazioni del modello di transito dei natanti è l'area in cui è previsto l'escavo del nuovo canale Contorta – Sant'Angelo, il cui alveo si sovrappone in più punti a quello del vecchio canale esistente, dall'intersezione con il canale Malamocco – Marghera all'altezza della cassa di colmata B, fino al bacino principale della Stazione Marittima, in corrispondenza all'intersezione dei canali della Giudecca, di Fusina, e Vittorio Emanuele III. Nella seguente Figura 76 è riportata la traccia della cunetta e dell'asse del nuovo canale, insieme al contorno delle nuove strutture morfologiche previste a protezione dei bassifondi adiacenti.

Figura 76: planimetria di progettoe dominio computazionale

L'asse del nuovo canale ha lunghezza di circa 5.5 km, e si raccorda a quello del canale Malamocco – Marghera in corrispondenza alla lieve curva che questo compie davanti alla cassa di colmata B. La cunetta del canale ha larghezza media di 100 m, progressivamente maggiore verso l'intersezione con

il Malamocco – Marghera. Le velme di protezione ai lati del futuro canale sono collocate, secondo progetto, in una fascia di circa 500 m dall'asse.

Se riferito all'intera Laguna di Venezia, il dominio computazionale scelto per il modello in ambiente Delft3D è relativamente limitato, al fine di indagare il campo di moto con elevato grado di dettaglio nell'intorno del natante simulato, per tempi caratteristici prossimi al secondo.

Per la corretta definizione del dominio di indagine è necessario distinguere due ambiti di studio, i quali troveranno corrispondenza nelle griglie computazionali che saranno descritte nei seguenti paragrafi. Un dominio di calcolo interno dovrà infatti discretizzare con elevato dettaglio il nuovo canale nella sua parte di alveo, a profondità -10.50 m s.m.m., poiché è in questa zona che dovrà avvenire lo spostamento del natante. Al fine di garantire la corretta continuità dello spostamento da e verso la bocca di porto di Malamocco, il dominio interno avrà quindi lunghezza maggiore di quella del nuovo canale di Contorta, interessando anche in parte l'esistente canale Malamocco - Marghera.

L'ambito generale di studio deve tuttavia avere maggiori dimensioni, al fine di analizzare la propagazione delle perturbazioni, generate dai natanti, sui bassifondi adiacenti al nuovo canale, e verificare al contempo l'area in cui tali effetti hanno un impatto sensibile. È inoltre indispensabile, ai fini di una corretta modellazione, assicurare che i contorni del modello siano più lontani possibile dalle zone a maggior variabilità idrodinamica.

Viene quindi definito il limite dell'area di indagine (linea blu in Figura 76) in una fascia di 2 km da ciascun lato dell'asse del canale di progetto, per una lunghezza totale, nella direzione del canale stesso, pari a 10 km, di cui 7 km saranno destinati alla griglia computazionale di dettaglio per descrivere lo spostamento delle navi, interessando una superficie complessiva di oltre 40 km².

Vengono così inclusi nel dominio computazionale anche 6 km del canale Malamocco – Marghera, i bordi delle casse di colmata A, B, e D-E, le barene canale Fusina e San Leonardo, le strutture emerse della stazione marittima e parte del canale e dell'isola della Giudecca.

5.5 Griglie computazionali e batimetrie associate

La griglia computazionale utilizzata per il modello del transito dei natanti nel canale di progetto è rappresentata nella Figura 77, tratta dalla Tavola allegata5.1.

Come premesso, questa griglia ha un'estensione totale di circa 40 km², ed è costituita da 600'000 celle, ed è suddivisa in due sottodomini in modo da dover imporre lo spostamento della sovrapressione (che simula il moto del natante) solo sulla griglia computazionale interna di minori dimensioni, relativa alla cunetta del canale Contorta Sant'Angelo.

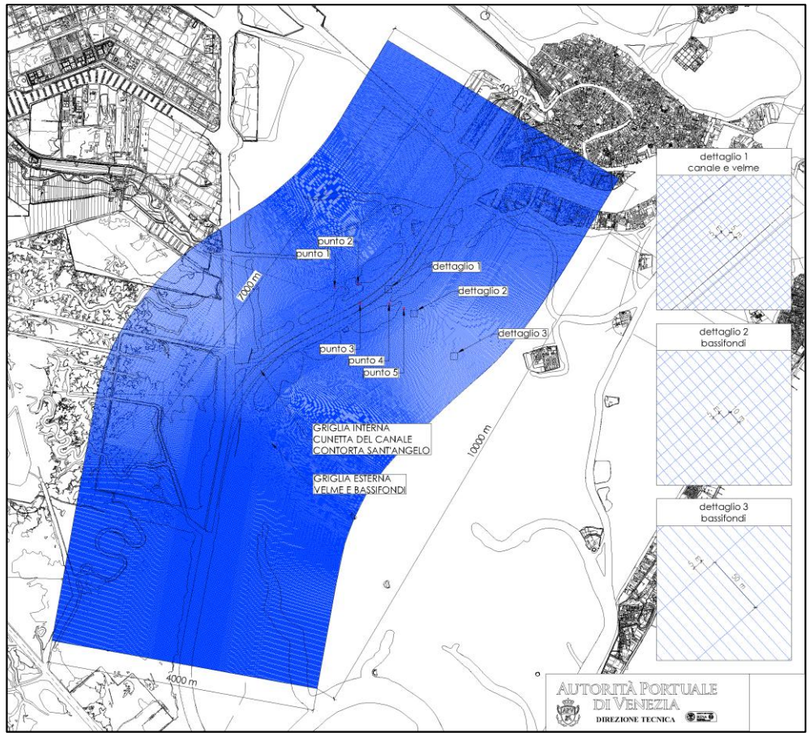


Figura 77: griglie computazionali

La griglia interna ha larghezza di 100 m e lunghezza di 7000 m, ed è costituita da 28'000 celle di forma pressoché quadrata, con dimensioni di 5x5 m.

Nella griglia esterna variano esclusivamente le dimensioni trasversali delle celle, che aumentano verso il margine del dominio fino a circa 50 m.

Le batimetrie associate alle griglie computazionali sono state tratte dal rilievo effettuato nel 2002 dall'ex Magistrato alle Acque di Venezia, aggiornato grazie al nuovo rilievo del 2014 commissionato dall'Autorità Portuale di Venezia, in modo da garantire la definizione delle effettive quote dei fondali nell'area di indagine e nell'area del canale Malamocco – Marghera.

Il risultato di tale elaborazione è rappresentato nella Tavola5.2, di cui un particolare è riprodotto in Figura 78.

Si rammenta che il modello di transito dei natanti nel nuovo canale di progetto non prende in considerazione la configurazione attuale dell'ambito di indagine, poiché le attuali dimensioni del canale Contorta Sant'Angelo non sono tali da permettere il passaggio di navi di grandi dimensioni.

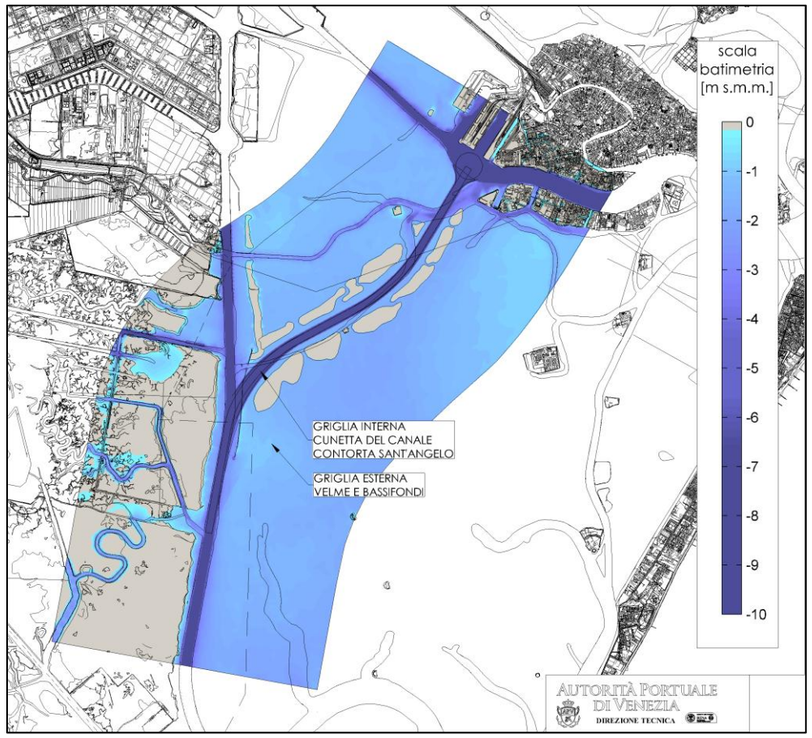


Figura 78: batimetrie

Si presenta quindi in quest'ambito la sola batimetria relativa alla configurazione *di progetto*, in cui il nuovo canale ha quota di fondo pari a -10.50 m s.m.m., con larghezza minima di cunetta pari a 100 m, e pendenza delle sponde di 1 su 3. La risoluzione della griglia di 5 m permette un'adeguata rappresentazione delle strutture morfologiche di protezione, delle strutture di conterminazione e dei varchi fra le diverse velme. In questa configurazione, i bassifondi compresi fra le velme e le sponde del nuovo canale hanno profondità variabile da -1 a -2 m s.m.m., a seconda dei fondali originali. Le strutture di protezione ai lati del canale hanno quote di sommità, a fine assestamento, pari a -0.10 m s.m.m.

Il modello fa riferimento inoltre ad un'ulteriore configurazione, definita *di equilibrio*, cui si prevede che il canale possa tendere asintoticamente in seguito all'erosione dei bassifondi adiacenti alla cunetta per effetto del transito dei natanti. Tale configurazione è ottenuta quindi abbassando i bassifondi a quote variabili da -3 m s.m.m. in sommità alle sponde, a -2.50 m .s.m.m. al piede delle strutture morfologiche di protezione. Questa scelta deriva dall'osservazione dell'evoluzione storica delle sponde e dei bassifondi adiacenti al canale Malamocco – Marghera, interessato da più di 40 anni da un intenso traffico navale di mezzi mercantili in genere, caratterizzati da dimensioni non di molto inferiori a quelle delle navi da crociera che dovranno transitare nel nuovo canale Contorta.

5.6 Elementi del modello

I principali dati necessari per la modellazione del movimento del natante all'interno del canale Contorta Sant'Angelo, oltre alle caratteristiche geometriche e morfologiche del dominio di studio, sono:

- le dimensioni della nave;
- il suo pescaggio;
- la velocità di spostamento.

Le dimensioni scelte per la nave di progetto sono le seguenti:

- lunghezza (fuori tutto): 340 m;
- larghezza: 45 m;
- pescaggio (a pieno carico): 8.70 m;
  corrispondente ad un dislocamento di circa 120'000 tonnellate.

Osservando le statistiche relative alle toccate medie negli anni 2011-2012, si può dedurre che le caratteristiche dimensionali prese in considerazione nel modello sono indicative di una delle maggiori navi che possa entrare in Laguna, dal momento che, per stazza, supera il 95% delle imbarcazioni totali entrate e l'88% circa di quelle superiori a 40'000 t.

Stazza	Media toccate 2011-2012
<40 mila t	582
Da 40 a 80 mila t	149
Da 80 a 90 mila t	16
Da 90a 100 mila t	100
Da 100 a 110 mila t	26
Da 110 a 120 mila t	56
Da 120 a 130 mila t	28
>130 mila t	23
TOTALE	**978**
TOTALE > 40.000	**396**

Tabella 5: media delle toccate negli anni 2011-2012

Ulteriore condizione al contorno fondamentale, in ambito lagunare, è l'imposizione del livello di marea nell'intervallo temporale in cui avviene il transito del natante. Nella presente trattazione viene ipotizzato che il livello dello specchio liquido rimanga costante durante ogni singola prova, in quanto il tempo totale di simulazione è ridotto rispetto al periodo della marea (in ogni caso minore di 30 minuti). In particolare, al fine di fornire un insieme completo di scenari possibili, si fa riferimento a 3 livelli di marea:

- 0.00 m s.m.m., corrispondenti a circa 0.24 m s.z.P.S., indicativo del livello medio del mare;
- 0.50 m s.m.m., corrispondenti a circa 0.74 m s.z.P.S., indicativo di condizioni di alta marea ("acqua alta");
- -0.50 m s.m.m., corrispondenti a circa -0.26 m s.z.P.S., indicativo di condizioni di marea minima, in cui sono minimi i tiranti in Laguna.

Gli elementi del modello sono riassunti all'interno della Tavola 5.3, riportata in Figura 79, in cui sono definiti tutti i casi di studio simulati e presentati nei successivi gruppi di tavole. Per evidenza, si riporta di seguito la tabella dei casi analizzati.

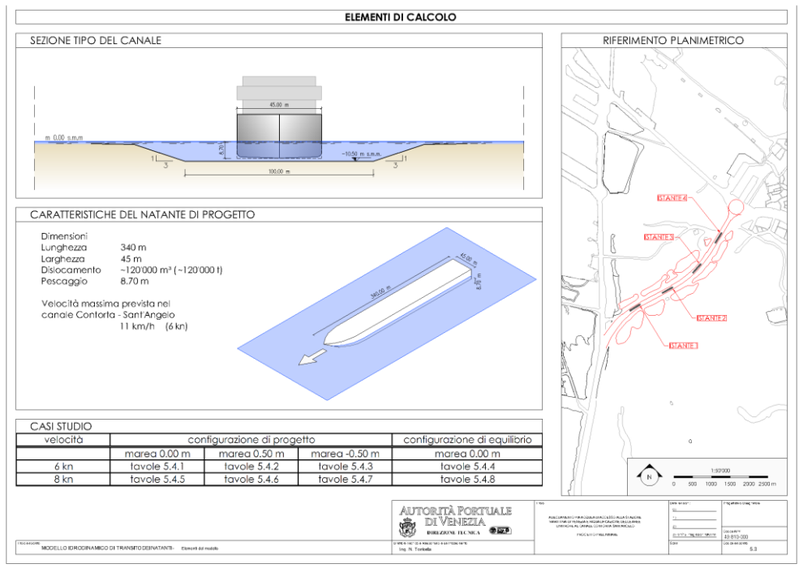


Figura 79: elementi del modello

velocità	configurazione di progetto			configurazione di equilibrio
	marea 0.00 m	marea 0.50 m	marea -0.50 m	marea 0.00 m
6 kn	tavole 5.4.1	tavole 5.4.2	tavole 5.4.3	tavole 5.4.4
8 kn	tavole 5.4.5	tavole 5.4.6	tavole 5.4.7	tavole 5.4.8

Tabella 6

Per ciascun caso, è stato simulato lo spostamento del natante per un percorso totale di 5000 m, partendo dal canale Malamocco – Marghera, fino al bacino di evoluzione antistante la stazione marittima.

5.6.1 Sulla velocità dei natanti

Per la definizione delle velocità del natante da simulare nel modello è necessario fare riferimento a quanto prescritto dalla succitata ordinanza 175/2009 della Capitaneria di Porto di Venezia ("*Regolamento per il servizio marittimo e la sicurezza della navigazione nel Porto di Venezia*"), e nella precedente ordinanza 93/2007 dell'ex Magistrato alle Acque di Venezia, in cui sono definite le velocità limite nell'attuale canale Contorta Sant'Angelo e nel tratto di canale Malamocco – Marghera che costituisce, di fatto, il tronco iniziale della nuova via di accesso alla stazione marittima. Per quanto riguarda l'esistente canale di Contorta, l'art. 15 dell'ordinanza 93/2007 dell'ex MAV indica come velocità massima consentita, per tutte le unità in navigazione, 11 km/h (corrispondente a 6 kn). Come riportato in precedenza, la stessa velocità di 6 kn è quella imposta come limite nel canale Malamocco – Marghera allo sbocco del canale Cunetta, nei pressi di Fusina, circa 500 m più a nord dell'intersezione del nuovo canale di progetto.

La velocità massima di progetto per i natanti nel nuovo canale Contorta Sant'Angelo è quindi posta pari a 6 kn (circa 11 km/h). In via cautelativa tuttavia si sceglie di effettuare simulazioni anche per velocità del natante pari a 8 kn (~15 km/h), giustificate nei canali lagunari qualora le condizioni meteomarine rendano difficoltose le manovre o il mantenimento della rotta.

5.6.2 Sui versi di percorrenza del nuovo canale

Si premette che in questa fase di analisi, in relazione ai tempi concessi per le elaborazioni, sono state effettuate simulazioni per il solo transito in ingresso alla stazione marittima. I processi idrodinamici legati al transito in verso opposto, che potranno essere oggetto di futuri approfondimenti, sono da considerarsi di uguale natura a quelli di seguito descritti, sebbene con una evidente evoluzione temporale diversa, per una differente propagazione delle perturbazioni, tuttavia con un inviluppo spazio temporale certamente confrontabile.

Si evidenzia inoltre che la prevista regolamentazione degli accessi al nuovo canale prevedranno il transito a sensi alternati, e non sarà quindi possibile l'incrocio fra navi con verso di percorrenza opposto.

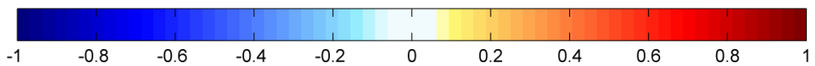
5.7 Analisi dei risultati

Vengono di seguito presentati ed analizzati i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate mediante il modello Delft3D precedentemente descritto. Tali risultati sono rappresentati negli elaborati grafici allegati, secondo lo schema indicato in Tabella 6 e nella Tavola5.3; in particolare nelle Tavole da 5.4.1a 5.4.4sono riportati i risultati del modello per la nave con velocità 6 kn, mentre nelle Tavole da 5.5.1a 5.5.4quelli per la nave a velocità 8 kn.

Data la natura degli effetti osservati, distribuiti nello spazio e nel tempo della simulazione, è stata preferita per la presentazione la forma grafica delle mappe a colori, con le quali si evidenzia la variabilità delle singole grandezze analizzate all'interno del dominio computazionale. La successione temporale dei risultati è dunque ottenuta accostando, in ciascuna tavola, le mappe per 4 diversi istanti di calcolo, in 4 differenti posizioni del natante lungo il suo percorso nel nuovo canale, distanziate reciprocamente di 1000 m (corrispondenti a intervalli di 4' per la nave a 6 kn e 5'24'' per la nave a 8 kn).

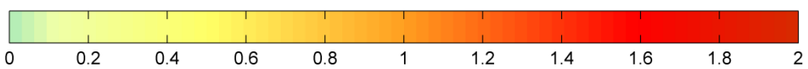
Le grandezze considerate e rappresentate nelle suddette tavole sono di seguito definite.

- L'elevazione di superficie h [m s.m.m.], riferita al livello medio dello specchio acqueo, legata alle perturbazioni generate dal transito del natante. Nelle tavole vengono indicate con una scala cromatica a base di blu gli abbassamenti della superficie, e con tonalità di rosso le sopraelevazioni, rispetto al livello medio della Laguna nel caso in questione indicato in colore azzurro chiaro.

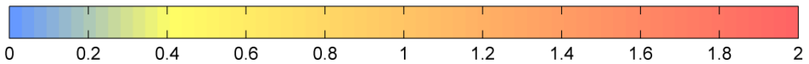


  Per le tavole relative alle condizioni di marea a 0.50 o -0.50 m s.m.m. tale scala cromatica viene adattata in modo da essere centrata per i corrispondenti valori medi, in modo da rappresentare graficamente in ogni caso le variazioni della superficie libera riferita al livello medio.

- Gli sforzi tangenziali al fondo τ[N/m²], causati dalle perturbazioni e dalla presenza stessa del natante. Sono indicati negli elaborati grafici con scala cromatica variabile dal colore verde chiaro al colore rosso, fino ad un massimo di 2 N/m².



- Il campo di velocità v [m/s] instaurato nel canale e nei bassifondi adiacenti. Il modulo di tale velocità è indicato nelle tavole con scala cromatica variabile dal colore azzurro al colore rosa, con fondo scala a 2 m/s.



Per ciascun caso analizzato vengono poi presentati alcuni grafici relativi all'andamento temporale delle suddette grandezze in 5 particolari punti di osservazione, indicati nella planimetria in Tavola5.1, e di seguito riportati in Figura 80.

In particolare sono stati scelti, in una sezione intermedia del nuovo canale di progetto, due punti di osservazione sui bassifondi a tergo delle velme di protezione, (punti 1 e 5), due punti nei varchi fra le velme stesse (punti 2 e 4) ed un punto all'interno della cunetta del canale (punto 3), al fine di fornire una completa rappresentazione degli effetti in tutte le parti che costituiscono l'opera.

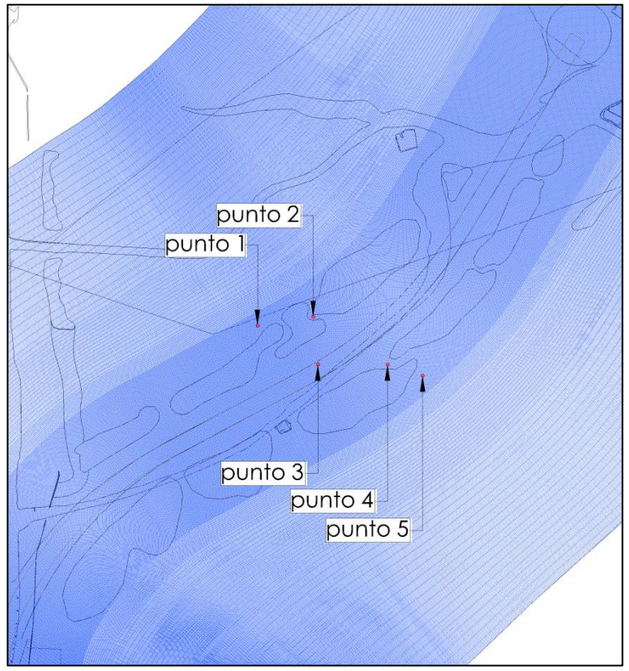


Figura 80: punti di osservazione

5.7.1 Velocità di 6 nodi

Vengono dapprima presentati i risultati per il caso del natante a velocità pari a 6 nodi, definita come massima velocità di progetto per i natanti in esame. Come premesso, sono riportati i risultati per le configurazioni di progetto, per tre differenti livelli di marea, e per la prospettata configurazione di equilibrio, a titolo di confronto, per la sola marea a medio mare.

Configurazione di progetto, marea 0.00 m s.m.m.

La prima Tavola5.4.1.1, riprodotta in Figura 81, rappresenta i risultati ottenuti, per le condizioni sopra definite, in termini di variazione dell'elevazione di superficie, rispetto al livello medio di 0.00 m s.m.m. Come si può osservare, le variazioni di livello in questo caso hanno, in generale, entità molto ridotta: si noti infatti come la maggior parte del dominio risulti imperturbata, nella scala di rappresentazione scelta, durante tutta la simulazione. Si riscontra l'abbassamento della superficie libera ai lati del natante, con entità variabile da -0.20 a -0.30 m s.m.m. limitato, in modo quasi totale, allo spazio protetto all'interno delle velme di protezione. Si osservi che la perturbazione ha una minima trasmissione solo attraverso i varchi fra le velme (vd. istante 2). Risulta poco visibile in questo caso la sopraelevazione dovuta all'onda positiva davanti alla prua del natante, di ampiezza quindi minore a 10 cm.

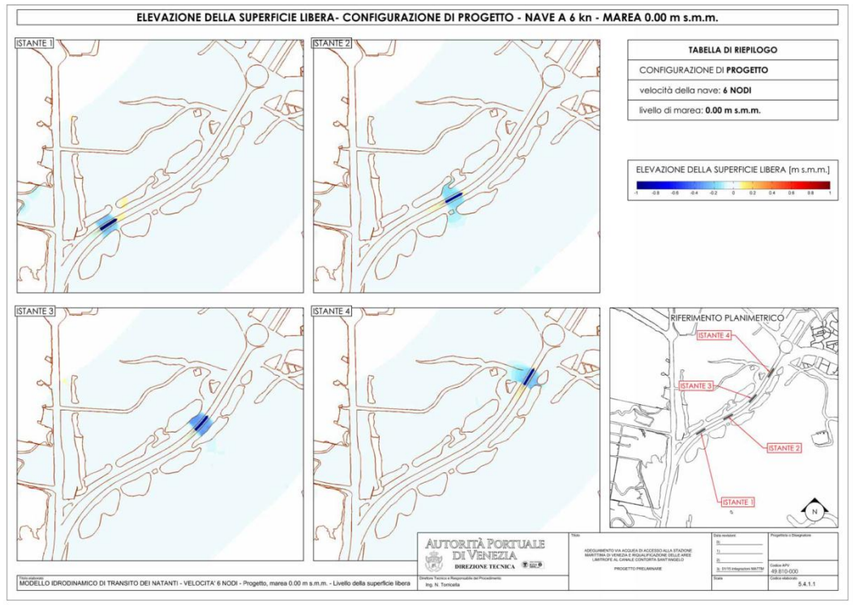


Figura 81: velocità 6 nodi - progetto - marea 0.00 m - elevazione di superficie

Gli sforzi tangenziali al fondo calcolati dal modello sono caratterizzati da una maggiore variabilità spazio-temporale. Si osservano infatti nella Tavola 5.4.1.2, riprodotta in Figura 82, sforzi non nulli non solo nell'intorno del natante, in particolare nell'ambito dell'alveo del canale, dove in colore rosso sono indicati valori prossimi o superiori a 1 N/m², ma anche sopra le velme o sui bordi di tali strutture, dove gli sforzi si sviluppano a causa dell'incremento delle velocità in un ridotto tirante idrico. Il colore giallo chiaro caratteristico di questi sforzi indica tuttavia valori di circa 0.20÷0.40 N/m², minori del valore di soglia per la movimentazione dei sedimenti dei fondali lagunari, definito in genere nell'intorno di 0.70 N/m² (*Amos et al.*, 2004).

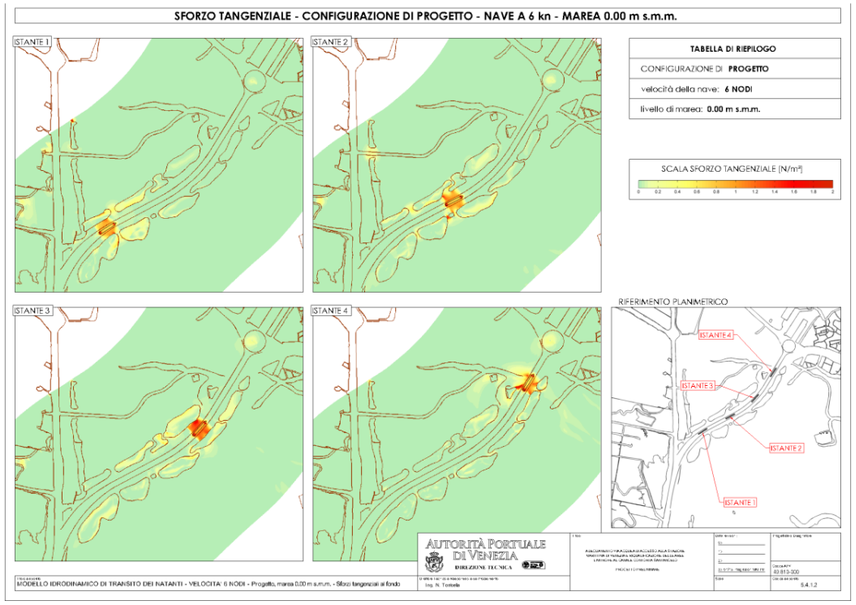


Figura 82: velocità 6 nodi - progetto - marea 0.00 m - sforzi al fondo

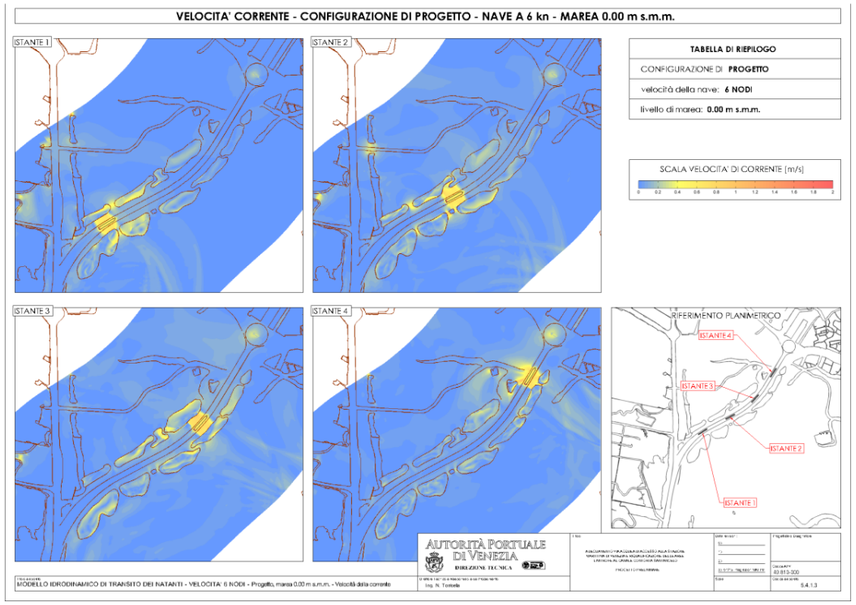


Figura 83: velocità 6 nodi - progetto - marea 0.00 m – velocità

L'andamento delle velocità indotte nel campo di moto dal transito del natante è rappresentato nella Tavola 5.4.1.3, riprodotta in Figura 83. Ben visibili, a base di giallo si sfondo azzurro, le velocità che presentano valori assoluti minori di 0.50 m/s.

Si riconoscono in particolare le aree di accelerazione del fluido ai lati del natante, corrispondenti alle depressioni di *Bernoulli* viste in precedenza, i fronti delle perturbazioni in elevazione generati dallo spostamento della nave, ed i fenomeni localizzati di incremento delle velocità che si verificano ai margini delle velme di protezione. Le velocità raggiungono valore massimo di circa 0.70 m/sin prossimità del natante, in particolare nella zona delle sponde del canale, dove avviene la riduzione dei tiranti idrici.

Viene infine proposto nella Tavola5.4.1.4, riprodotta in Figura 84, il compendio dei risultati ottenuti nella forma di grafici di andamento nel tempo delle grandezze sopra descritte, per i 5 punti di osservazione definiti.

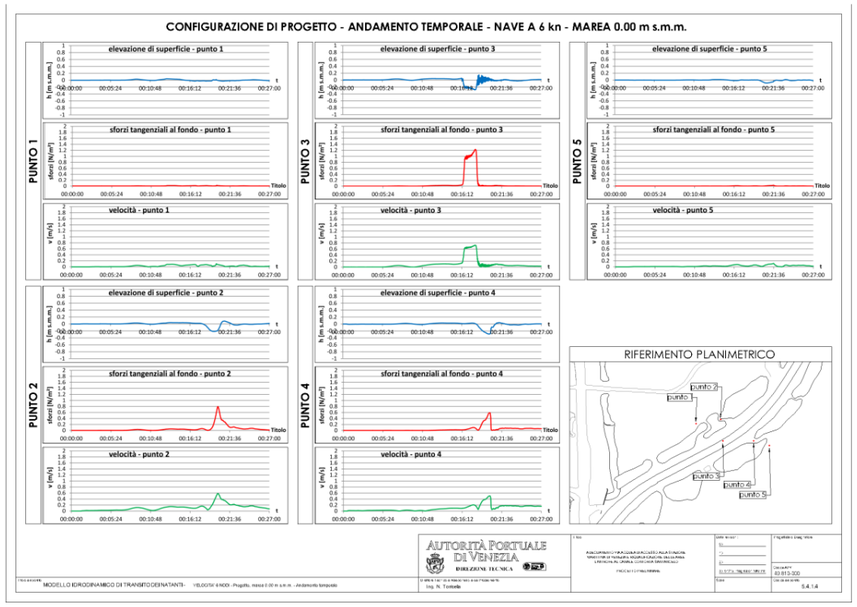


Figura 84:velocità 6 nodi - progetto - marea 0.00 m – grafici di sintesi

Da notare in particolare come nei due punti a tergo delle velme di protezione (punti 1 e 5) le caratteristiche abbiano minime variazioni nel tempo, mentre sono sensibili le variazioni di livello (in blu), sforzi (in rosso) e velocità (in verde) per i punti all'interno dell'alveo del nuovo canale (punto 3) e nei varchi fra le velme (punti 2 e 4).

Configurazione di progetto, marea 0.50 m s.m.m.

La prima variazione proposta consiste nella simulazione del transito del natante a 6 nodi in corrispondenza ad un livello medio di marea pari a 0.50 m s.m.m. (circa 0.74 m s.z.P.S.). In tale situazione, per l'incremento dei tiranti idrici nel campo di moto, si riscontra una sostanziale riduzione delle perturbazioni, sia in termini di oscillazione della superficie libera, che di sforzi al fondo, che di velocità. Va considerato infatti che il tirante idrico sopra la sommità delle velme di protezione è in questo caso di 60 cm, e su tale tirante le perturbazioni della superficie libera, in sopraelevazione ma anche in depressione, risentono meno del fondale e subiscono quindi minore dissipazione, come osservabile nella Tavola5.4.2.1.

Si riporta in Figura 85 la Tavola allegata5.4.2.2, in cui sono rappresentati gli sforzi tangenziali al fondo. Se confrontata con la Tavola 5.4.1.2sopra riportata, si nota la sostanziale minore entità degli sforzi, per assenza delle aree in colore rosso nell'intorno del natante. Si notano invece delle diverse caratteristiche in relazione all'attraversamento delle velme: in particolare si osserva l'incremento degli sforzi tangenziali in corrispondenza ai bordi esterni delle velme o nei varchi fra le varie strutture, poiché in queste condizioni una maggiore dissipazione è concentrata nelle zone sopra le velme e retrostanti alle stesse.

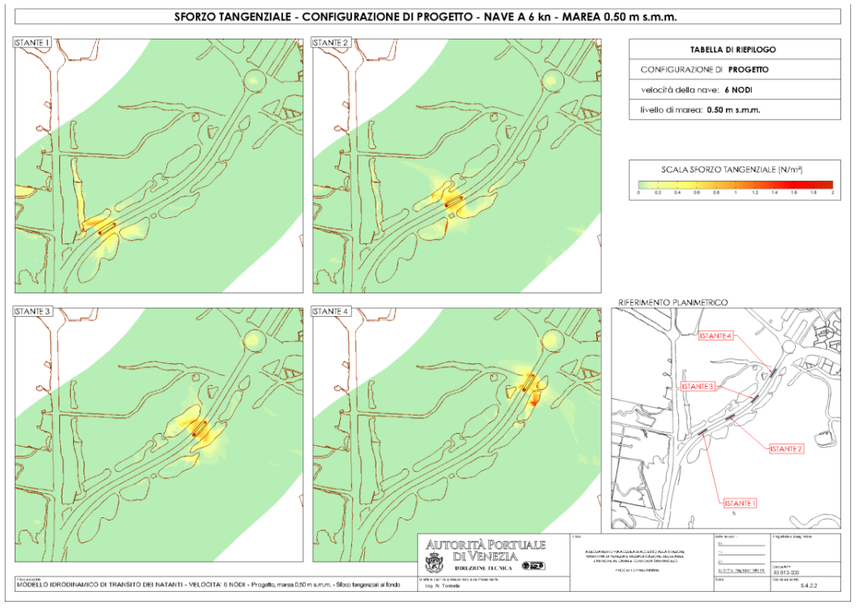


Figura 85: velocità 6 nodi - progetto - marea 0.50 m - sforzi al fondo

Si osservino a tale proposito i grafici riportati nella Tavola5.4.2.4, riprodotta in Figura 86, in particolare per quanto riguarda gli andamenti temporali delle grandezze rappresentate nei punti a

tergo delle velme (punti 2 e 4). I valori calcolati risultano maggiori di quelli visti in precedenza, sebbene di entità ancora trascurabile. I grafici relativi agli altri punti di osservazione riportano invece, come previsto, valori massimi minori di quelli calcolati per la simulazione a medio mare.

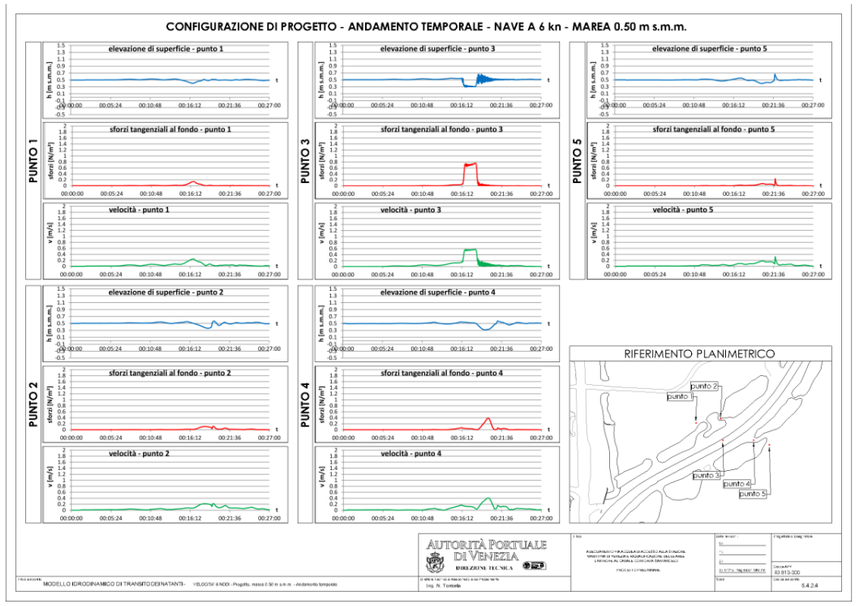


Figura 86: velocità 6 nodi - progetto - marea 0.50 m –grafici di sintesi

Configurazione di progetto, marea -0.50 m s.m.m.

Di peculiare importanza risultano gli effetti idrodinamici calcolati in corrispondenza ad una bassa marea, poiché il minore tirante idrico nel campo di moto in cui avviene il transito implica una massimizzazione del coefficiente di blocco caratteristico del natante e degli sforzi tangenziali al fondo. In questo caso il livello medio è posto pari a -0.50 m s.m.m. (circa -0.26 m s.z.P.S.), quota alla quale la sommità delle velme di progetto risultano emerse. Effettivamente in questo caso l'area delle velme non è interessata dal moto fluido, come si osserva ad esempio nella Tavola allegata5.4.3.1, riprodotta in Figura 87, relativa alle elevazioni di superficie. Nella stessa tavola si possono riscontrare maggiori entità sia delle depressioni ai lati dello scafo, che raggiungono quote di -0.80 m s.m.m., sia dell'onda in elevazione che precede il natante, la quale ha comunque ampiezza molto ridotta, con una elevazione di circa 10 cm sul livello medio.

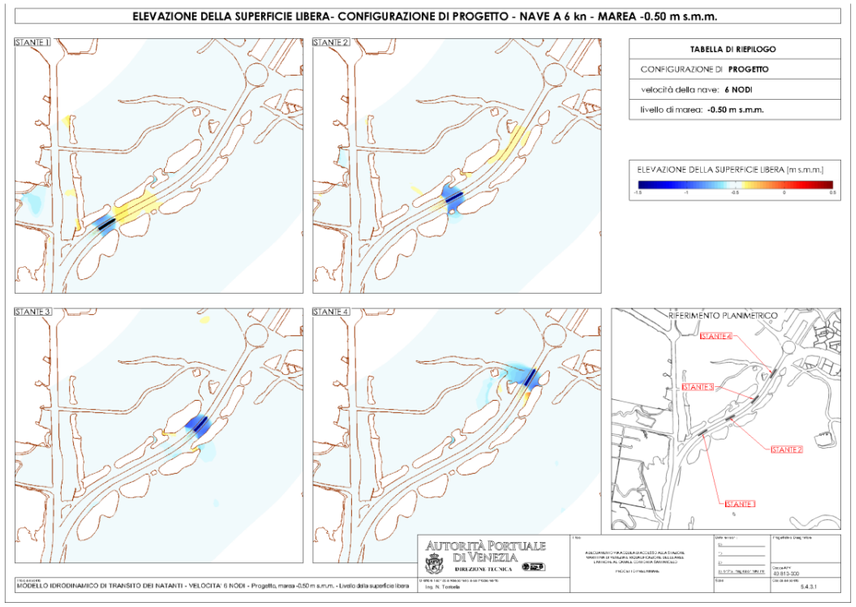


Figura 87: velocità 6 nodi - progetto - marea -0.50 m - elevazione di superficie

In questo caso, come previsto gli sforzi tangenziali al fondo raggiungono valori più elevati, come è possibile osservare nella Tavola allegata 5.4.3.2riprodotta nella seguente Figura 88, e nei grafici raccolti nella Tavola5.4.3.4.

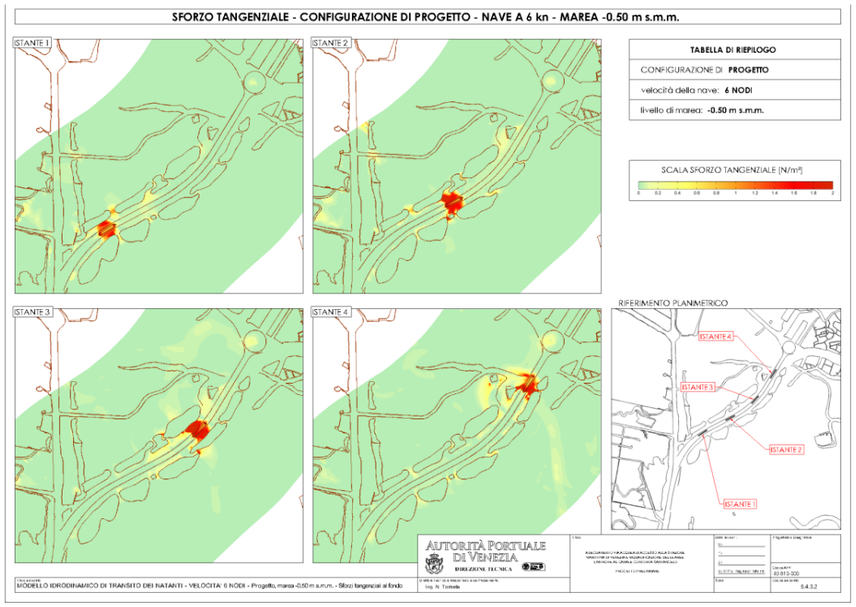


Figura 88: velocità 6 nodi - progetto - marea -0.50 m - sforzi al fondo

Risulta evidente un'area di maggiore estensione di colore rosso che segue il natante nel suo spostamento, corrispondente a sforzi di entità superiore a 1 N/m².

Confronto fra diversi livelli di marea

Al fine di valutare la variazione degli effetti legati al transito della nave di progetto per i tre differenti livelli di marea sopra descritti, si propone nelle Tavole allegate 5.6.1.1 e 5.6.1.2 il confronto diretto fra i grafici relativi all'andamento temporale di livelli, sforzi al fondo e velocità per i tre casi finora analizzati. In Figura 89 è riportata la prima di queste Tavole, in cui i grafici sono relativi al punto di osservazione 3, interno alla cunetta del nuovo canale Contorta. Risulta evidente come , in condizioni di bassa marea, tutti le grandezze idrodinamiche abbiano maggiore entità:

- l'escursione di livello raggiunge un ampiezza di circa 48 cm, contro 38 cm nel caso di alta marea);
- gli sforzi tangenziali al fondo sfiorano i 2 N/m², contro circa 0.7 N/m² nel caso di alta marea);
- le velocità raggiungono il massimo valore assoluto di circa 0.9 m/s, contro meno di 0.6 m/s nel caso di alta marea.

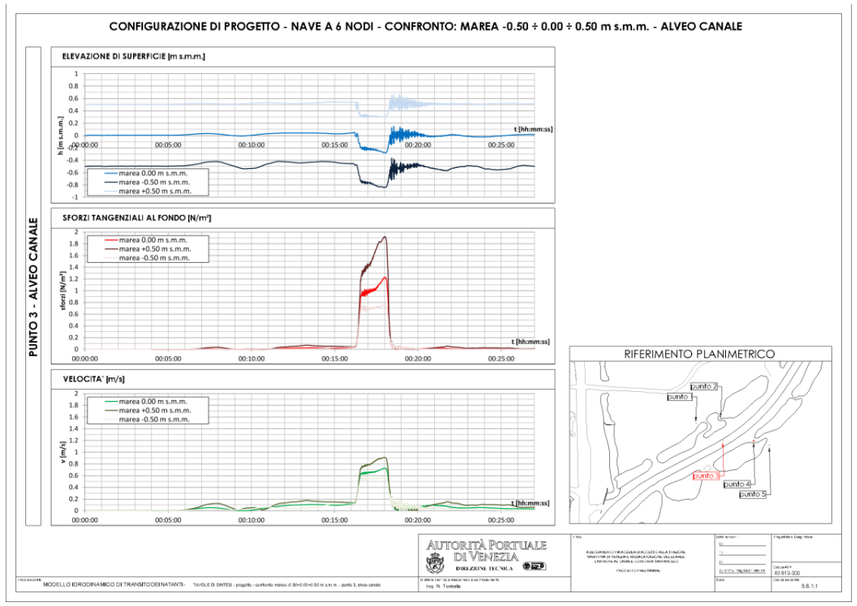


Figura 89: velocità 6 nodi - progetto –grafici di sintesi – confronto fra maree

Analoghi commenti possono essere posti sulla base dei risultati contenuti nella successiva Tavola 5.6.1.2, relativa agli effetti osservati all'interno di un varco fra le velme in fregio del nuovo canale.

Configurazione di equilibrio, marea 0.00 m s.m.m.

Per la prospettata configurazione di equilibrio, definita come condizione a cui il nuovo canale deve tendere a causa dell'erosione provocata dal traffico stesso delle navi, le simulazioni sono state effettuate solo nelle condizioni di marea a medio mare, al fine di operare un confronto diretto con l'analoga situazione per lo stato di progetto.

I risultati, rappresentati nelle Tavole allegate da 5.4.4.1a 5.4.4.4, presentano caratteristiche simili a quelli già osservati per la configurazione di progetto, ma appaiono evidenti le differenze legato alla minore entità delle depressioni, degli sforzi al fondo e delle velocità.

Si faccia ad esempio riferimento alla Tavola 5.4.4.2 relativa agli sforzi tangenziali al fondo, riprodotta nella seguente Figura 90, in cui risultano evidenti i minori valori in corrispondenza ai lati dello scafo immerso, dove gli sforzi superano raramente il valore-soglia di 0.70 N/m².

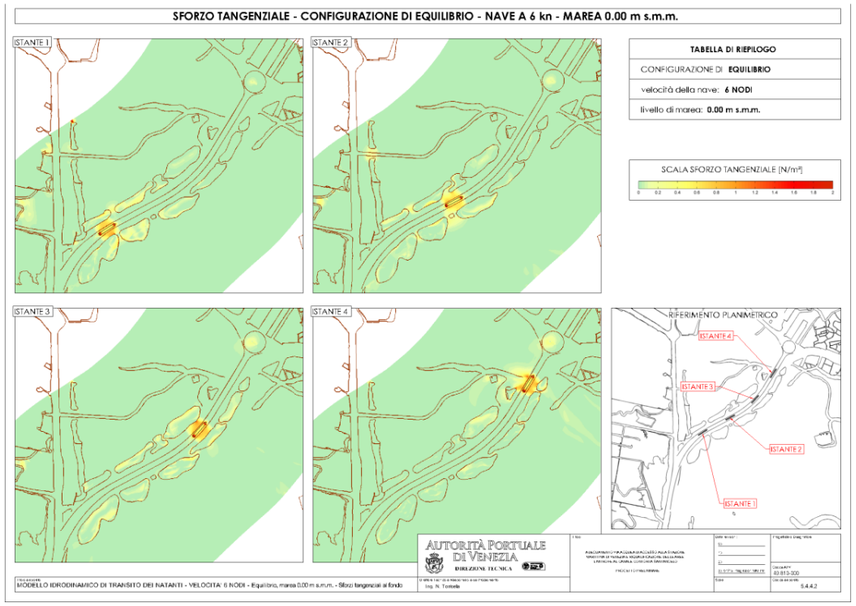


Figura 90: velocità 6 nodi - equilibrio - marea 0.00 m - sforzi al fondo

Anche dal compendio dei grafici riportato nella Tavola 5.4.4.4, riprodotta in Figura 91, si possono trarre analoghe conclusioni, rilevando per tutti i punti di osservazione valori sensibilmente minori delle tre variabili calcolate.

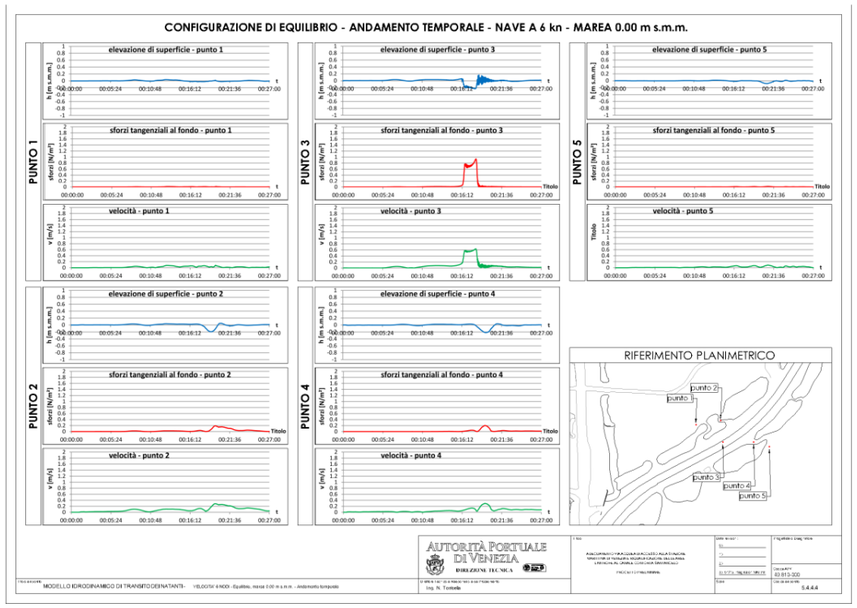


Figura 91: velocità 6 nodi - equilibrio - marea 0.00 m –grafici di sintesi

5.7.2 *Velocità di 8 nodi*

L'analisi presentata nel precedente paragrafo è stata ripetuta per una maggiore velocità di spostamento della nave, posta pari a 8 nodi (circa 15 km/h), al fine di valutarne gli effetti come espressamente indicato nelle richieste di integrazione.

Le considerazioni a commento delle simulazioni effettuate hanno natura del tutto analoga a quelle poste per la velocità di 6 nodi, in particolare per quanto riguarda il confronto fra i risultati ottenuti per le tre diverse condizioni di marea, ma si premette sin d'ora come tali risultati indichino una sostanziale incompatibilità del traffico navale a questa velocità con la stabilità necessaria al canale, alle velme di protezione ed ai bassifondi adiacenti. Si rileva che oggi la velocità massima consentita nel canale è di 6 nodi.

A titolo esemplificativo si osservino i risultati contenuti nella Tavola 5.5.1.1, riprodotta in Figura 92 relativa alle elevazioni di superficie nel caso di marea a medio mare per la configurazione di progetto. Le onde di depressione ai lati dello scafo, che assumono la caratteristica forma a V rovesciata a causa della maggiore velocità di traslazione, risultano di maggiore ampiezza, con approfondimenti massimi di circa -0.80 m sul livello medio. Si osserva in generale anche un aumento dell'onda in elevazione davanti alla nave, con valori massimi di circa 15 cm, anche se si rammenta quanto dichiarato in premessa riguardo alla difficoltà del modello nella corretta simulazione di tale fenomeno fisico.

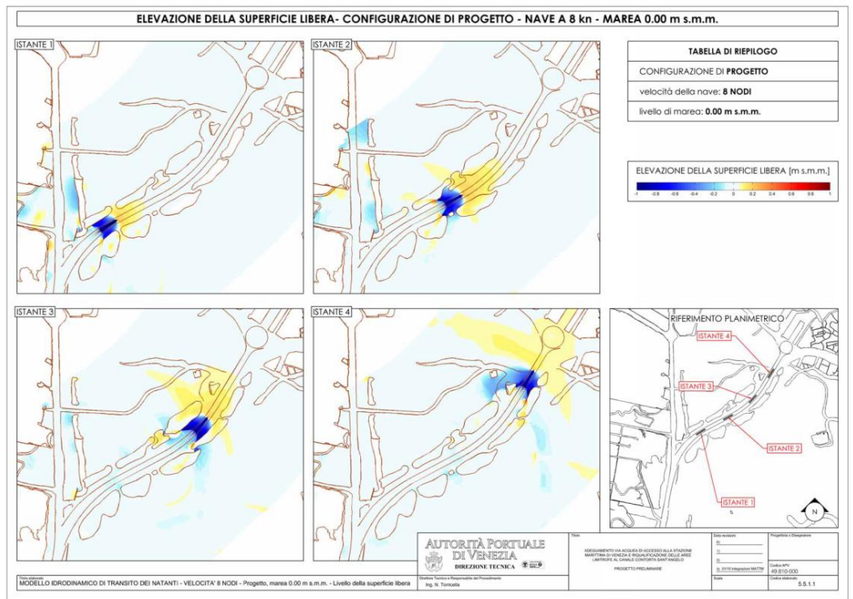


Figura 92: velocità 8 nodi - progetto - marea 0.00 m - elevazione di superficie

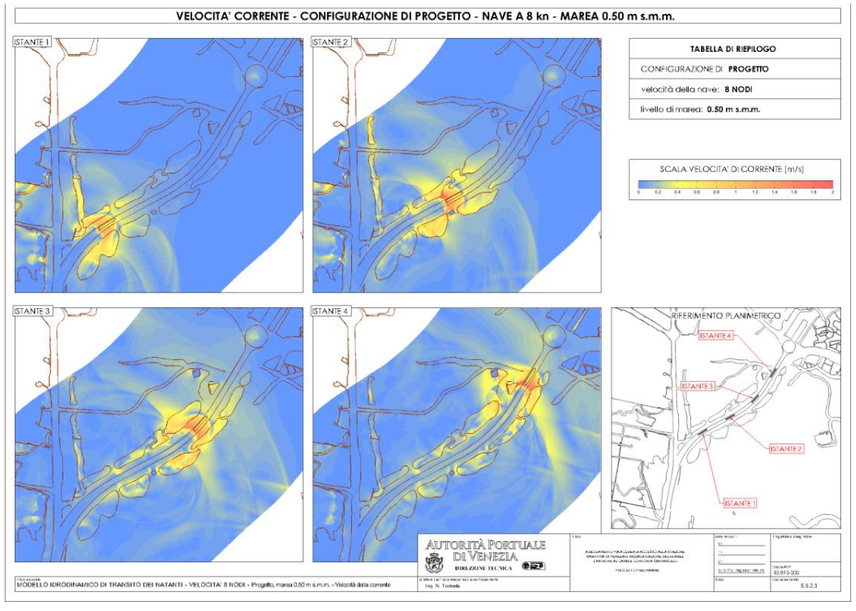


Figura 93: velocità 8 nodi - progetto - marea 0.50 m –velocità

In relazione alla simulazione in caso di alta marea (0.50 m s.m.m.), risulta interessante osservare il notevole incremento delle velocità indotte nel campo di moto dalla nave a 8 nodi, come indicato nella Tavola 5.5.2.3 riprodotta in Figura 93.

In questo caso, in particolare, il maggiore tirante idrico sopra le velme di protezione consente la parziale trasmissione delle onde, positive e negative, nello spazio acqueo antistante, che risulta particolarmente perturbato, con velocità tuttavia limitate a valori massimi di circa 0.5 m/s.

In questo caso anche gli sforzi, come noto proporzionali al quadrato delle velocità, risultano elevati, con valori superiori a 1 N/m² anche sopra le velme di protezione, particolarmente interessate dalle perturbazioni. A tal proposito si osservino i risultati rappresentati nella Tavola allegata 5.4.2.2, riprodotta in Figura 94, in cui è evidente la maggiore estensione delle aree in colore rosso rappresentative di sforzi al fondo oltre al valore di soglia di 0.70 N/m².

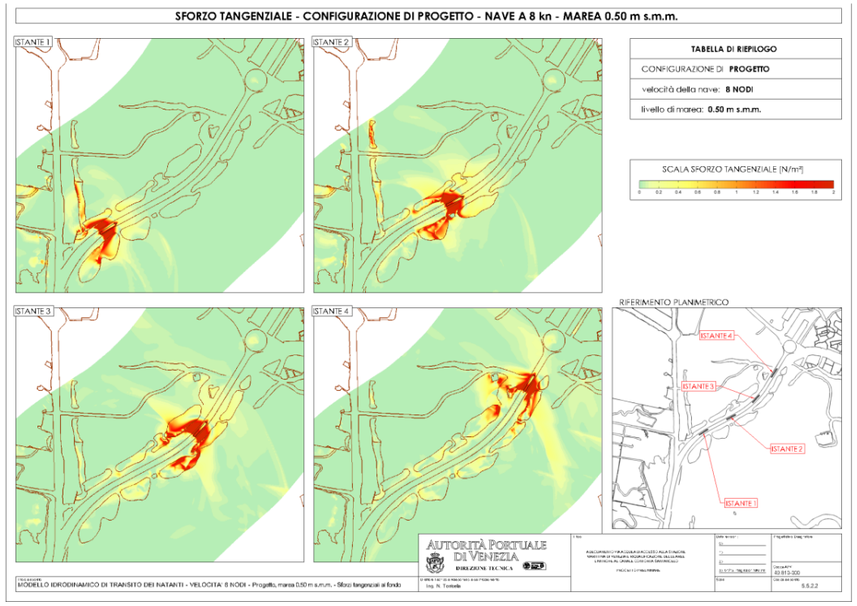


Figura 94: velocità 8 nodi - progetto - marea 0.50 m –sforzi al fondo

Nel caso di marea minima fra le tre considerate (-0.50 m s.m.m.) tutte le grandezze analizzate hanno maggiore variabilità rispetto ai casi precedenti, secondo i principi già definiti per la velocità di 6 nodi. Al fine di operare un confronto con quanto visto finora, si riporta in Figura 95 la Tavola 5.4.3.2, relativa agli sforzi tangenziali al fondo indotti dal passaggio della nave. Si osservi in particolare che, nonostante i valori di tali sforzi siano maggiori in modulo, l'area interessata dai potenziali processi erosivi è in questo caso limitata al solo spazio fra le velme ed ai ghebi fra esse, perché il livello medio della superficie lagunare si trova sotto la quota sommitale di tali strutture.

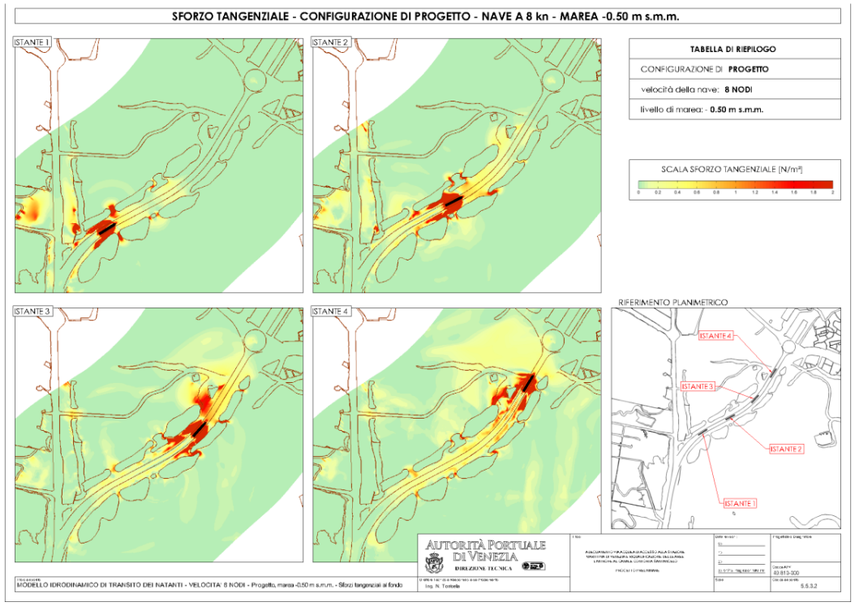


Figura 95: velocità 8 nodi - progetto - marea -0.50 m –sforzi al fondo

A questa velocità il concetto stesso di "configurazione di equilibrio" appare meno significativo, in quanto gli sforzi finora osservati non appaiono coerenti con la necessità di stabilità del canale e delle velme adiacenti durante il passaggio delle grandi navi.

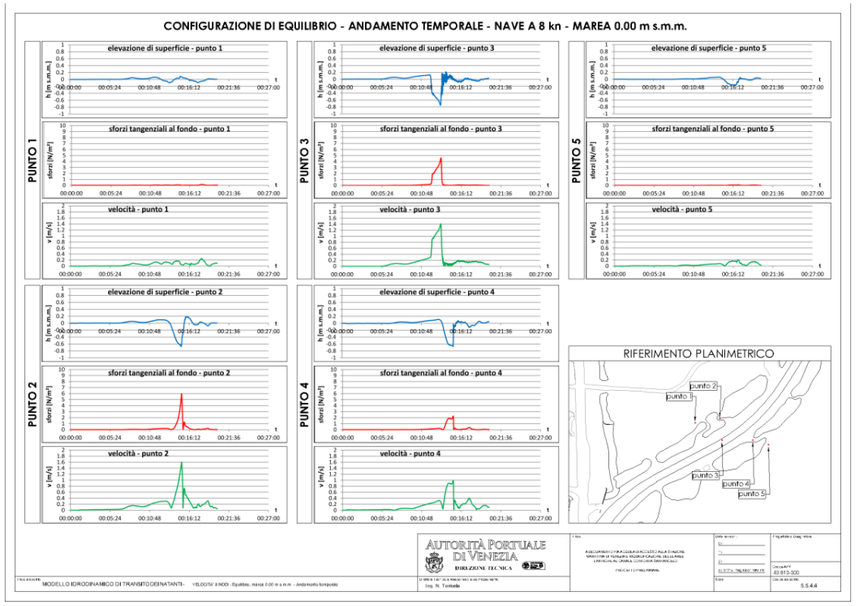


Figura 96: velocità 8 nodi - equilibrio - marea 0.00 m –grafici di sintesi

A conclusione della modellazione del fenomeno è tuttavia comunque effettuata anche la simulazione in queste condizioni, anche in questo caso con riferimento alla marea a medio mare. Il compendio dei risultati ottenuti è riportato nella seguente Figura 96, in cui è riprodotta la Tavola allegata 5.4.4.4. Si ritiene comunque importante sottolineare come a tergo delle velme (punti 1 e 5) i valori delle grandezze calcolate siano in ogni caso al di sotto dei valori di soglia.

Confronto fra velocità di 6 e 8 nodi

In ultima analisi vengono presentati i confronti ottenuti per le due diverse velocità della nave, di 6 e 8 nodi, nella configurazione di equilibrio dei fondali. In Figura 97 è rappresentata la Tavola 5.6.2.1, in cui i grafici si riferiscono al punto di osservazione 3 nell'alveo del nuovo canale.

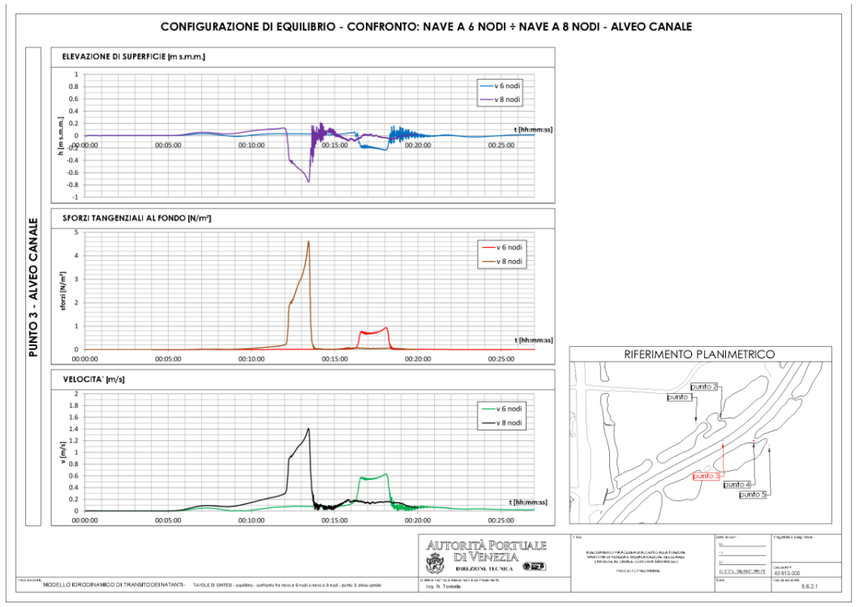


Figura 97: equilibrio–grafici di sintesi – confronto fra velocità della nave

Appare evidente la differenza fra gli andamenti temporali dei livelli, degli sforzi tangenziali al fondo e delle velocità: i risultati per la nave a 8 nodi, che appaiono anticipati nel tempo proprio a causa della maggiore velocità, raggiungono in ogni caso valori massimi maggiori rispetto a quelli ottenuti per la nave a 6 nodi. In particolare si osserva, per la nave a 8 nodi:

- una quota minima, per abbassamento della superficie libera, dell'ordine di -0.75 m s.m.m., contro -0.25 m s.m.m. rilevata per la nave a 6 nodi;
- uno sforzo al fondo massimo di oltre 4 N/m², contro quello minore di 1 N/m² calcolato per la nave a 6 nodi;
- una velocità massima della corrente indotta di 1.4 m/s, quasi doppia di quella relativa alla nave a 6 nodi, di circa 0.6 m/s.

Analoghe considerazioni possono essere fatte per quanto riguarda i risultati osservati per il punto 4 all'interno di un varco fra le velme, rappresentati nella Tavola allegata 5.6.2.2.

5.8 Analisi morfologica

Si è più volte riferito in precedenza sulla prevedibile evoluzione della sezione del canale Contorta, fino a una "configurazione di equilibrio", desunta sulla base dell'analisi dei rilievi storici a disposizione per il canale Malamocco – Marghera.

Oggetto del presente paragrafo è una stima delle prevedibili sollecitazioni, e conseguentemente dei tempi, necessari affinché il canale evolva come sopra indicato.

Nel presente paragrafo verranno quindi stimate le caratteristiche di stabilità e durabilità dei bassifondali adiacenti, sulla base delle conoscenze acquisite, dei dati a disposizione e dell'evoluzione storica del canale Malamocco – Marghera registrata e discussa nel capitolo 2, che di fatto costituisce un modello in scala 1:1 degli effetti di lungo periodo legati alla navigazione in un canale lagunare.

Come già scritto in altre parti del presente elaborato, non è ipotizzabile che il canale Contorta sia soggetto a un traffico di navi da crociera superiore, in termini di intensità, a quello cui è stato oggetto l'attuale canale industriale. Per tale ragione, l'osservazione del comportamento delle aree di bordo del canale Malamocco – Marghera può essere assunta a riferimento, per fornire una previsione della possibile evoluzione dei bassifondi in fregio della nuova via navigabile.

Dal confronto dei rilievi storici a disposizione, si può osservare come i fondali a ridosso del canale navigabile esistente abbiano profondità compresa fra -2.50 e -3.00 m s.m.m., con una pendenza orientata verso la relativa cunetta.

Pur demandando al successivo paragrafo 6 per maggiori approfondimenti al riguardo, di seguito nella successiva Figura 98 è contenuto il confronto fra quattro rilievi di epoche diverse di una sezione posta a metà circa del canale Malamocco – Marghera: il tratto rosso (il rilievo del 2014) indica chiaramente come i fondali a ridosso del canale si siano assestati fra i suindicati valori.

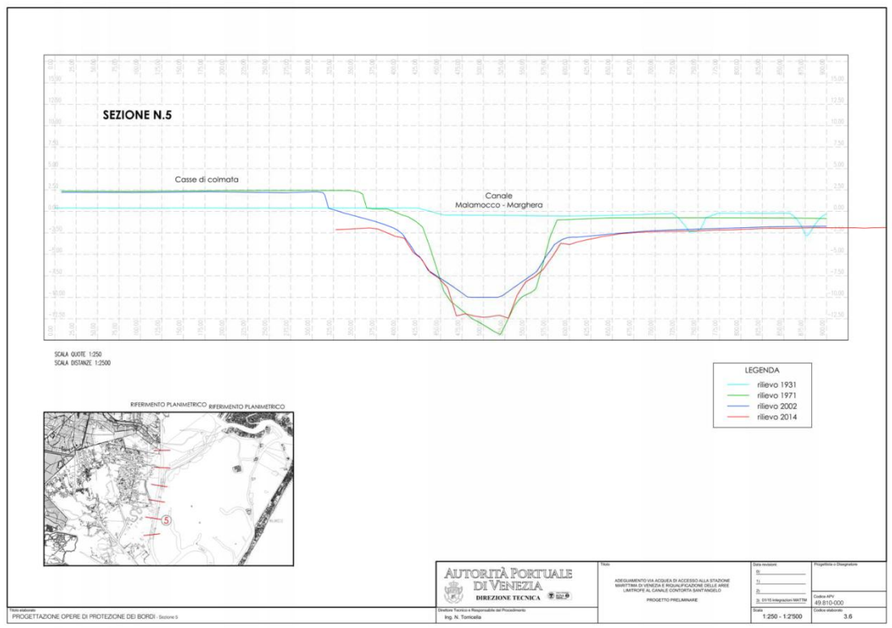


Figura 98

Sulla base di tale osservazione, si è assunto che i fondali compresi fra le nuove velme e l'alveo del Contorta non possano non tendere a tali valori, con il minimo in corrispondenza della scarpata della cunetta centrale, essendo analoghe, pur se meno frequenti, le sollecitazioni idrodinamiche imposte dal passaggio delle navi.

Si potrà quindi fornire una stima del quantitativo di materiale che verrà eroso, da sottoporre a dragaggio manutentivo: circa 700'000 m³, come indicato nella Tavola 5.7. Di seguito sarà anche fornita una stima dei relativi tempi.

È stato quindi calcolato, per via analitica, la stima del numero di passaggi responsabili dell'erosione di bassifondali, di cui sopra, fino al raggiungimento della succitata configurazione di equilibrio.

I dati di contorno dai quali partire fanno riferimento a :

- gli sforzi tangenziali massimi derivanti dal modello di transito delle navi;
- le caratteristiche geotecniche del fondale esistente, derivanti dalla *Mappa attuale della granulometria dei sedimenti (0-20 cm) nei bassifondi della Laguna di Venezia,* (MAV-CVN-Thetis 2002), già descritta nel paragrafo 4.1 relativo agli elementi del modello idrodinamico generale;
- i risultati delle campagne di indagini geotecniche, effettuate per conto dell'Autorità Portuale di Venezia.

Il metodo che si intende proporre consiste in un bilancio di forze elementari su superfici di scorrimento unitarie. In particolare si considera:

- come forza agente lo sforzo tangenziale al fondo;
- come forza resistente quella generata dal peso proprio del materiale immerso costituente il fondale, sia in assenza che in presenza di una qualche coesione del terreno di fondazione.

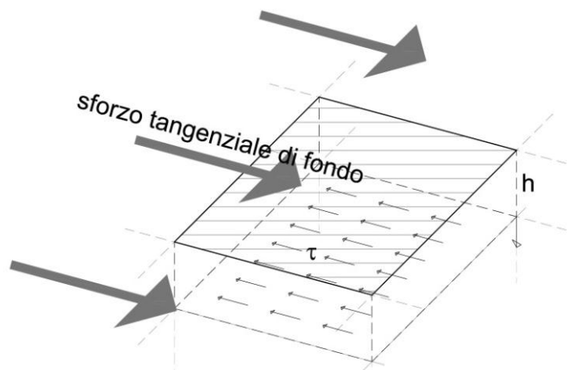


Figura 99

L'equilibrio allo scorrimento si basa sulle seguenti formulazioni geotecniche, eguagliando gli sforzi di taglio unitari:

- τ^* sforzo di taglio trasmesso alla superficie del fondale;
- $\sigma'_v = \gamma' \cdot h$ tensione effettiva geostatica;
- $\tau'_h = c + \sigma'_v \cdot \tan(\varphi)$ tensione tangenziale di scorrimento tra superfici di contatto all'interno del terreno;
- $\tau^* = \tau'_h$ equivalenza degli sforzi di taglio.

Dall'equivalenza delle succitate forze elementari si definisce uno spessore indicativo della superficie movimentabile dagli sforzi tangenziali trasmessi, in occasione del passaggio delle navi.

Per quanto riguarda le caratteristiche geotecniche del fondale, si fa riferimento ai seguenti parametri principali:

- peso di volume 1800 ÷1850 kg/m³
- angolo di attrito 22° ÷23°
- coesione 0 ÷ 1 N/m²

In particolare si sottolineano alcune ipotesi:

- indipendenza della movimentazione dello strato superficiale di fondale dal tempo di sottoposizione allo sforzo tangenziale;
- indipendenza dell'erosione dalla successiva deposizione del materiale movimentato.

dati di progetto		parametri geotecnici				conclusioni	
velocità [nodi]	sforzi [N/m²]	γ [kg/m³]	γ' [kg/m³]	ϕ°	c_u [N/m²]	spessore [cm]	stima dei passaggi alla configurazione di equilibrio 1,25m
8	6,7	1800	800	22	0,0	0,207	**600**
8	6,7	1850	850	22	0,0	0,195	**650**
8	6,7	1850	850	23	0,0	0,186	**700**
8	6,7	1850	850	23	0,5	0,172	**750**
8	6,7	1850	850	23	1,0	0,158	**800**
6	1,3	1800	800	22	0,0	0,040	**3100**
6	1,3	1850	850	22	0,0	0,038	**3300**
6	1,3	1850	850	23	0,0	0,036	**3500**
6	1,3	1850	850	23	0,5	0,022	**5600**
6	1,3	1850	850	23	1,0	0,008	**15000**

Tabella 7

La precedente Tabella 7 valuta i potenziali spessori di fondali mobilitati dal passaggio di una nave, con le due velocità di crociera analizzate e in funzione di un range di valori delle caratteristiche geotecniche di riferimento.

Da ricordare come la trattazione proposta intenda fornire una stima della possibile erosione della porzione laterale del canale di progetto, evidenziando nell'ultima colonna il numero di possibili passaggi, alle varie velocità, prima di arrivare ad una configurazione di equilibrio.

Al riguardo possono essere poste le seguenti considerazioni a commento:

- scartata la possibilità di una velocità di crociera a 8 nodi, i risultati ottenuti per la velocità inferiore indicano chiaramente come, in ogni caso, debbano essere attesi migliaia di passaggi affinché la configurazione attuale evolva in quella di equilibrio; un processo quindi di lenta erosione, che prevedibilmente necessiterà di dragaggi manutentivi contenuti;
- grande influenza riveste in tale valutazione il valore della coesione, parametro questo di difficile stima per i relativi bassi valori da tenere in considerazione in questa analisi;
- considerando 800 passaggi/anno in ogni caso il tempo di evoluzione è da stimarsi dell'ordine di almeno 7÷10 anni.

5.8.1 Sulla risospensione di sedimenti

A margine dell'analisi morfologica sopra descritta, è stata valutata mediante modello la possibile risospensione di sedimenti provocata dal transito della nave di progetto. A titolo indicativo vengono riportati in questo paragrafo alcuni risultati ricavati alla fine della simulazione del transito a velocità di 6 nodi.

In particolare sono di seguito riportati i grafici relativi all'elevazione di superficie e il corrispondente trasporto solido in sospensione, per un punto interno alla cunetta del canale (Figura 100) e per un punto nel bassofondo fra canale e velme (Figura 101).

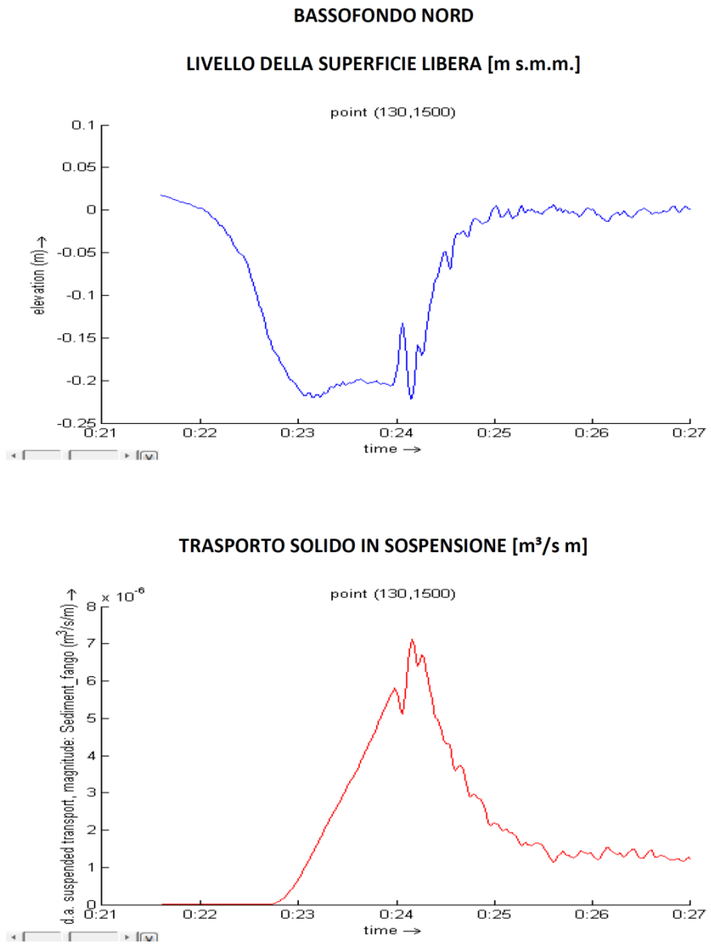
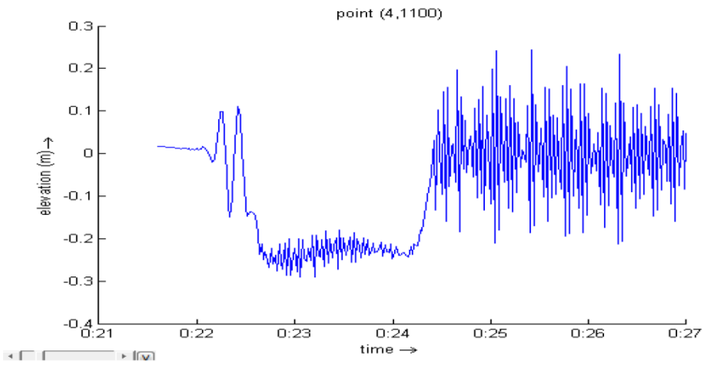


Figura 100

Da notare, in tali grafici, la verifica di come la movimentazione dei sedimenti sia effettivamente conseguenza del passaggio delle depressione ai lati della nave, piuttosto che dell'onda in elevazione che si propaga davanti alla prua.

INTERNO ALVEO

LIVELLO DELLA SUPERFICIE LIBERA [m s.m.m.]



TRASPORTO SOLIDO IN SOSPENSIONE [m³/s m]

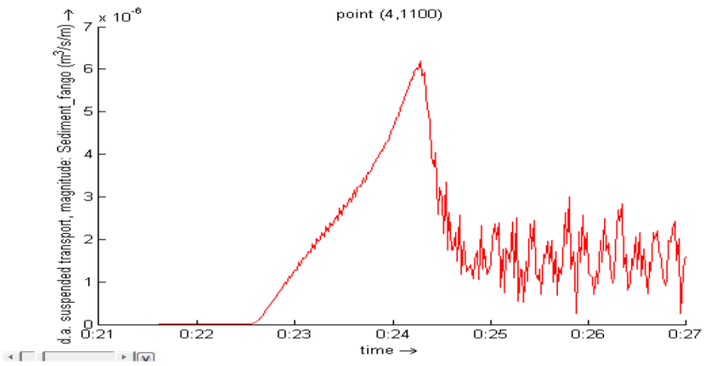


Figura 101

In analogia con quanto riportato nel paragrafo 4.4.1, viene rappresentato in Figura 102 il risultato relativo alla fine della simulazione, indicativo dell'area, in colore blu, in cui la concentrazione di solidi in sospensione è superiore a 40 mg/l. Si può osservare che tale area è limitata allo spazio occupato dalle opere di progetto, non espandendosi oltre al marginamento esterno delle nuove velme.

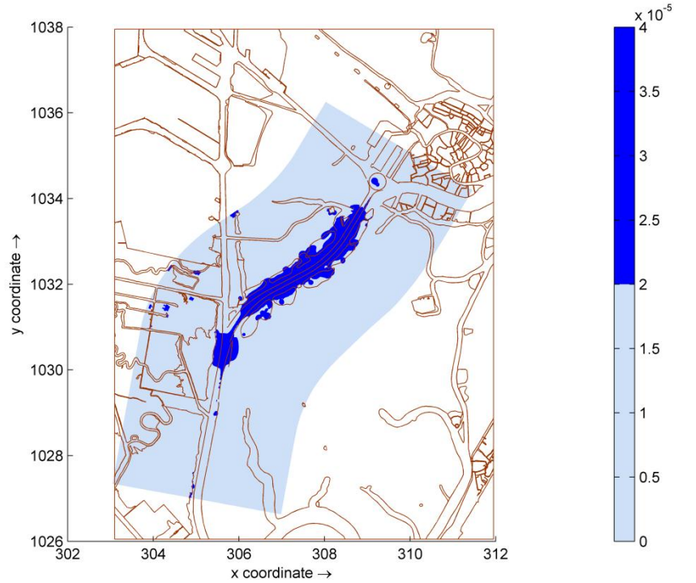


Figura 102: concentrazione di solidi sospesi

6 PROGETTAZIONE OPERE DI PROTEZIONE DEI BORDI

All'interno del presente capitolo vengono poste alcune considerazioni di dettaglio, in merito alla progettazione di adeguate opere di protezione ai bordi delle velme, in fregio al nuovo canale Contorta S. Angelo.

Il progetto prevede infatti una serie di strutture morfologiche, in grado di garantire la dissipazione localizzata dell'energia provocata dal transito delle navi lungo i bordi del Contorta, impedendo la progressiva erosione dei bassifondali adiacenti al canale di accesso alla Stazione Marittima di Venezia.

Il ripristino e la ricostruzione di velme e barene ha un'importanza fondamentale nel riequilibrio ambientale della Laguna, poiché queste strutture morfologiche:

- favoriscono il ricambio idrico;
- moderano l'azione del moto ondoso;
- limitano la dispersione in Laguna e la perdita in mare dei sedimenti;
- concorrono a un complessivo riequilibrio dell'ecosistema.

Ovviamente, gli ambiti oggetto d'intervento dovranno essere oggetto delle consuete verifiche archeologiche (anche sul campo), in modo da valutare l'incidenza di possibili preesistenze, che potrebbero condizionare lo sviluppo dei lavori.

Con le nuove strutture morfologiche in progetto, ci si è prefissi di garantire, grazie al conferimento dei materiali provenienti dagli escavi manutentivi dei canali portuali per materiali di tipo A e B (come descritto in altra parte del presente elaborato):

- la protezione bassifondi adiacenti all'area di progetto;
- i vari (e per certi versi consueti) obiettivi ambientali, legati alla creazione di nuovi habitat, in grado di consentire la presenza di adeguate condizioni di biodiversità sulle relative superfici.

La progettazione delle protezioni dei bordi deve garantire che le opere siano capaci di resistere alla prevedibile evoluzione morfologica del canale, in seguito al futuro transito dei natanti.

Si è ritenuto, in questa sede, di seguire un approccio ingegneristico - sperimentale, ponendo come base l'evoluzione del canale Malamocco-Marghera, come osservabile sulla base dei diversi rilievi storici a disposizione. Questo tipo di approccio è infatti assolutamente cautelativo da un punto di vista ingegneristico, attesa la circostanza di come non sia nemmeno ipotizzabile che il traffico crocieristico, cui sarà soggetto il nuovo canale Contorta, sia superiore a quello che ha caratterizzato il canale industriale.

Lungo il suddetto canale sono state pertanto esaminate nel dettaglio sei sezioni, la cui rappresentazione è stato riprodotta nella Tavola 3.1, di seguito riportata in Figura 103, dove è contenuta una planimetria di inquadramento del canale. In ciascuna sezione è presentata la corrispondente configurazione del canale secondo i rilievi, descritti nella parte dell'analisi storica (capitolo0), relativi agli anni: 1931, 1971, 2002 e 2014.

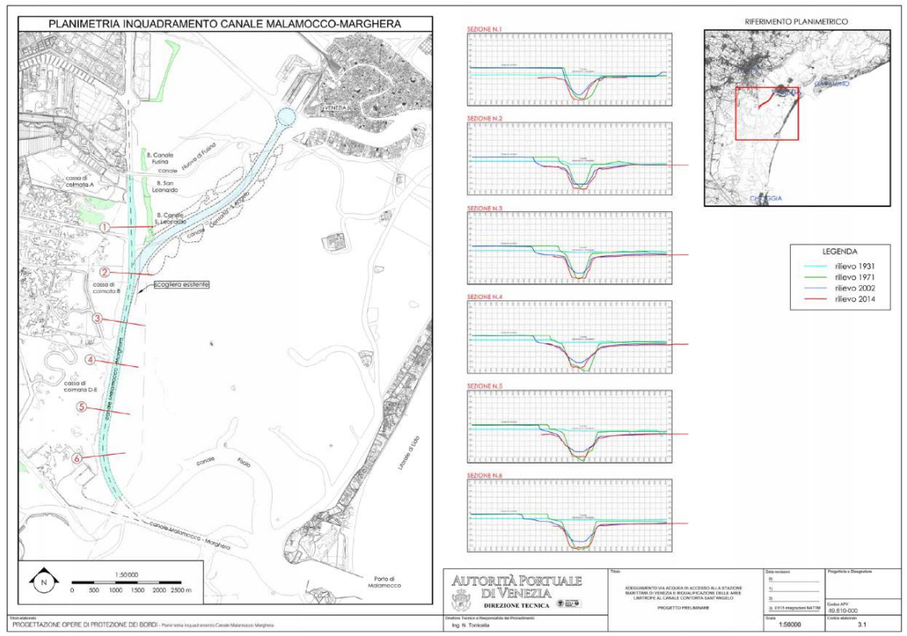


Figura 103: Planimetria di inquadramento delle sei sezioni considerate

Va ricordato come il canale Malamocco - Marghera sia stato scavato a cavallo degli anni 1967-1968, fatto che spiega l'andamento pressoché costante dei rilievi del 1931.

Nelle Tavole allegate 3.2÷3.7 vengono delineati gli andamenti dei risultati nelle sei sezioni esaminate, per ciascuna delle quali si possono riscontrare dei caratteri comuni:

- i rilievi con valori mediamente più profondi sono quelli del 1971 e del 2014, nell'intervallo di distanze 45.00 ÷ 55.00 m;
- in tutte le sezioni si può osservare come i fondali, nelle aree di bordo del canale, si siano erosi fino alla quota di circa -2.50 m s.m.m.;
- i valori del 1971 sono mediamente superiori a quelli del 2002. Infatti, nel 1971 è messo in evidenza come le scarpate siano più ripide e il canale maggiormente profondo. Ovviamente, l'erosione dei fondali è legata al transito delle navi;

- nei rilievi del 2014 le sezioni sono più larghe e più profonde, a causa dei continui dragaggi manutentivi.

A titolo di esempio, nella seguente Figura 104 è rappresentata la Tavola 3.3, caratterizzata dal profilo della sezione n. 3.

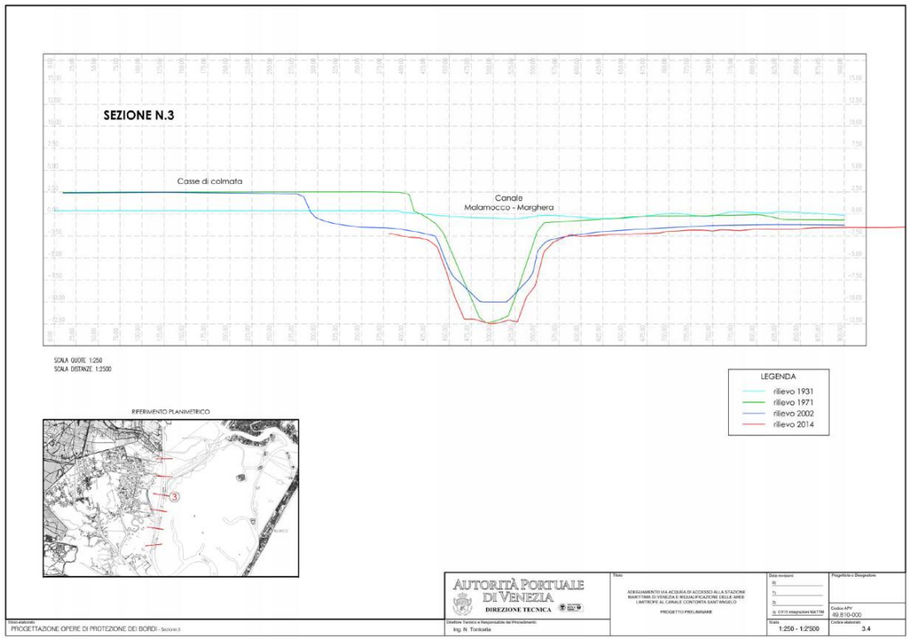


Figura 104: Andamento dei rilievi nella sezione n. 3

Le Tavole 3.8 e 3.9 contengono un riquadro generale delle sei sezioni, dove sono messe a confronto coppie di rilievi, rispettivamente:

- nella Tavola 3.8 in Figura 105, vengono sovrapposti i risultati del 1931 a quelli del 1971;
- nella Tavola 3.9 in Figura 106, vengono invece paragonati i dati del 1971 a quelli del 2014.

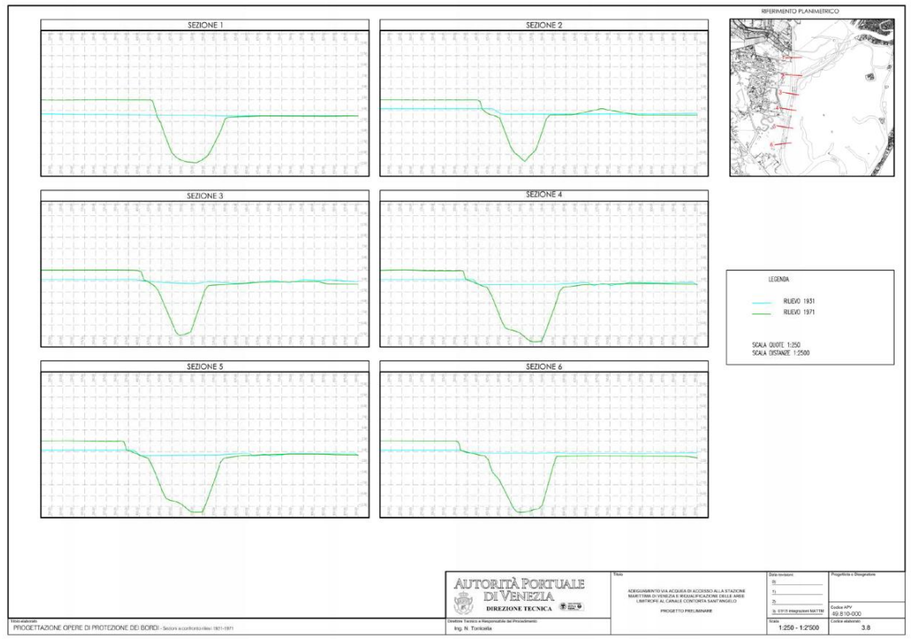


Figura 105: Sezioni a confronto rilievi 1931-1971

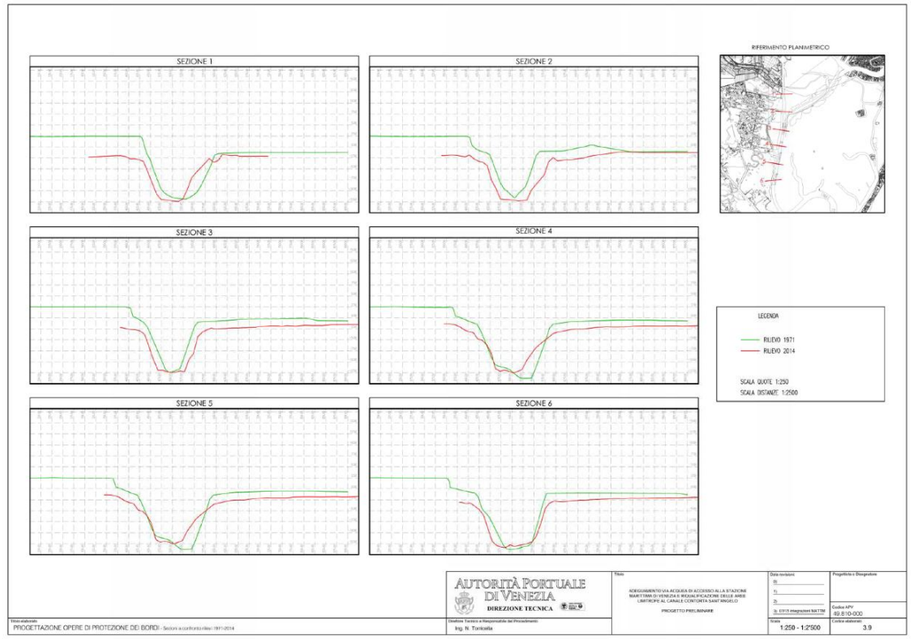


Figura 106: Sezioni a confronto rilievi 1971-2014

Nella Tavola 3.10 (riportato nelle seguente Figura 107) è rappresentata la planimetria della modifica delle conterminazioni del progetto preliminare sulla base delle precedenti evoluzioni, avendo abbassato a -2.50 m s.m.m. la precedente quota d'imposta, come desunto dalle quote dei bassifondi adiacenti il canale Malamocco-Marghera.

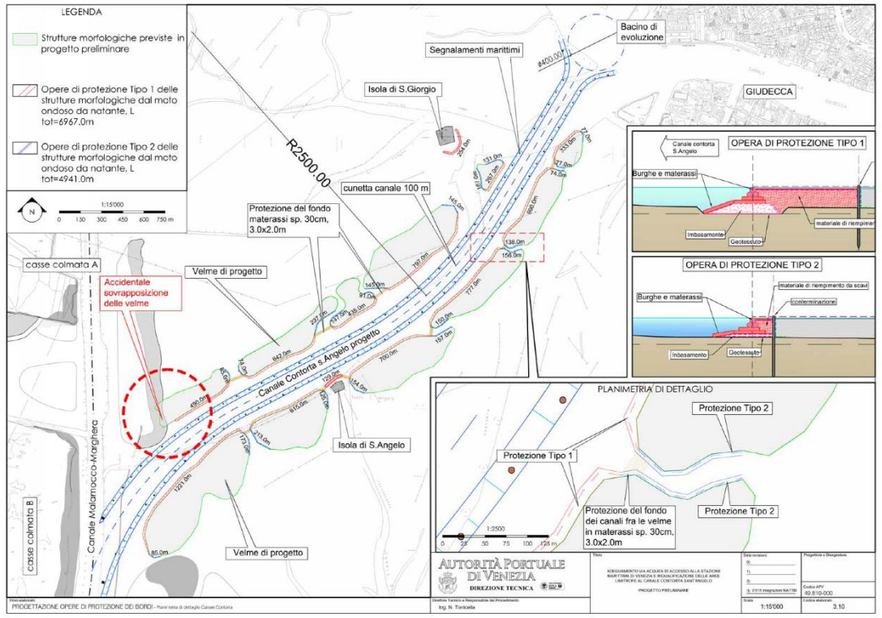


Figura 107: Planimetria di modifica della conterminazioni

Nella parte inferiore della successiva Tavola 3.11 (cfr. Figura 108) è riportata la sezione trasversale del fondale (da sponda a sponda), una sezione di protezione del tipo 1 prevista per i bordi fronte canale Contorta, con rappresentazione tratta dal lato del canale stesso. Nella parte superiore, invece, viene mostrato il dettaglio di tale opera di protezione

Infine, nella Tavola 3.12 (riportata in Figura 109) si può individuare la corrispondente opera di protezione tipo 2, con il particolare della sezione del rinforzo in corrispondenza ai ghebi di separazione, avendo verificato, tramite la modellistica idrodinamica effettuata, come sia da aspettarsi un significativo aumento della corrente in suddetti varchi.

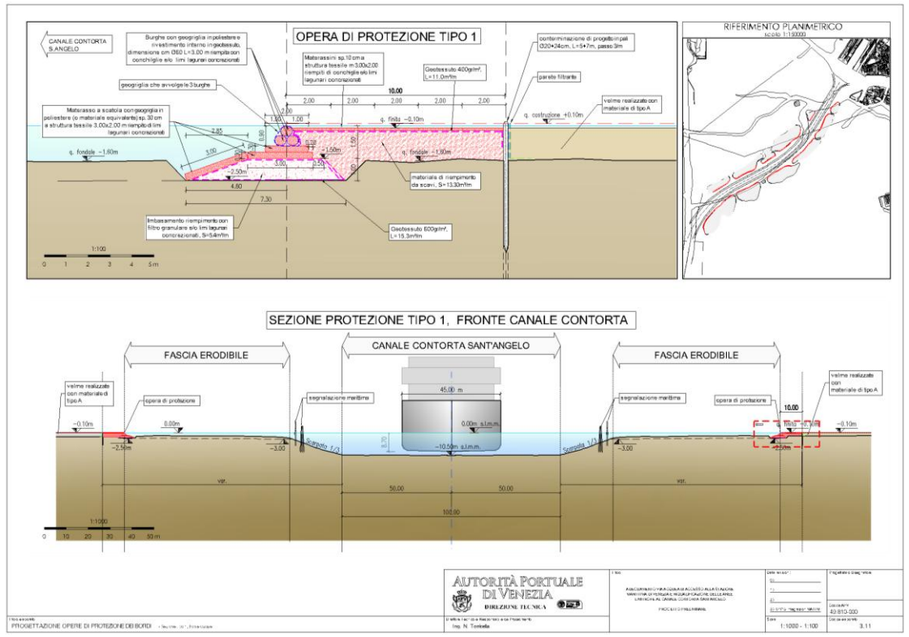


Figura 108: Dettaglio sezione protezione e opera di protezione tipo 1

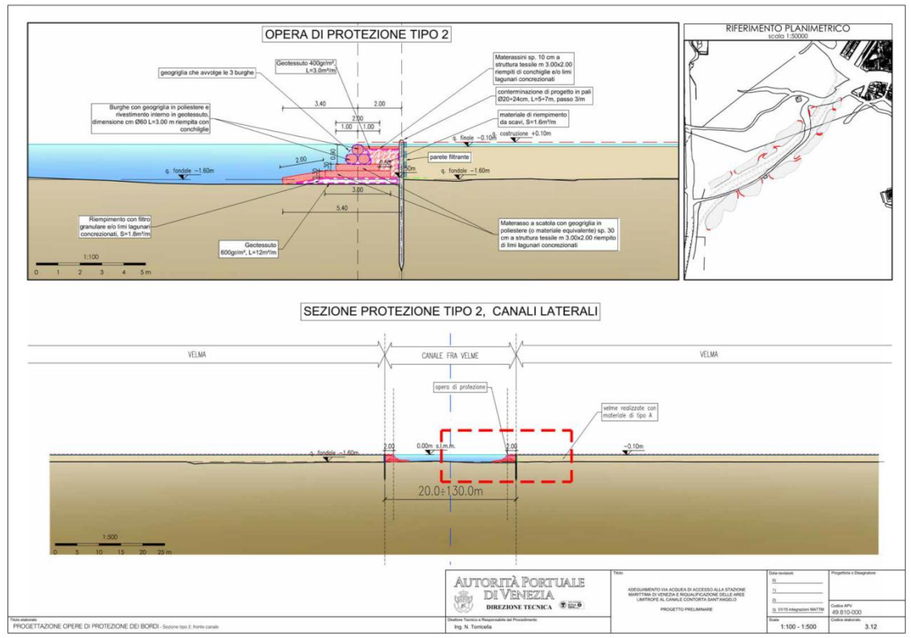


Figura 109: Dettaglio sezione protezione e opera di protezione tipo 2

Per quanto riguarda le conterminazioni che costituiscono le opere di protezione dei bordi delle velme, si prevede di utilizzare le tipologie di uso corrente per questo tipo di interventi, accoppiando

l'uso di palificate a burghe e materassi in poliestere. Quest'ultimi saranno riempiti essenzialmente di limi concrezionati e/o conchiglie, con sezioni tipologiche variabili in funzione della profondità dei fondali.

Qualche considerazione va posta anche per quanto attiene la sequenza delle fasi realizzative previste delle nuove velme. Pur demandando ai successivi sviluppi progettuali i necessari approfondimenti, sin d'ora si vuole evidenziare come dapprima si dovrà dare corso alla realizzazione dell'imbasamento, con la struttura di burghe e materassi, per poi procedere quindi a:

- l'infissione delle palificate,
- il riempimento a grappo fra pali e burghe.

I conferimenti dovranno essere avviati al termine della realizzazione delle conterminazioni, avendo modo di porre la necessaria gestione delle acque di refluimento, per evitare spanciamenti delle stesse

6.1 Dimensionamento delle opere di protezione

Normativa

Spinte e verifiche secondo : - D.M. 11/03/1988 - D.M. 16/01/1996

Geometria muro e fondazione

Vengono di seguito rappresentate le immagini relative alla sezione tipologica di intervento e alla schematizzazione di calcolo evidenziata successivamente in rosso.

È stato schematizzato il filtro granulare di imbasamento ed il riempimento delle burghe con limi concrezionati, con le stesse caratteristiche geotecniche, considerando le più scadenti fra loro.

Da evidenziare nella sezione di calcolo la relativa differenza di livello dell'acqua fra monte e valle pari a 90 cm.

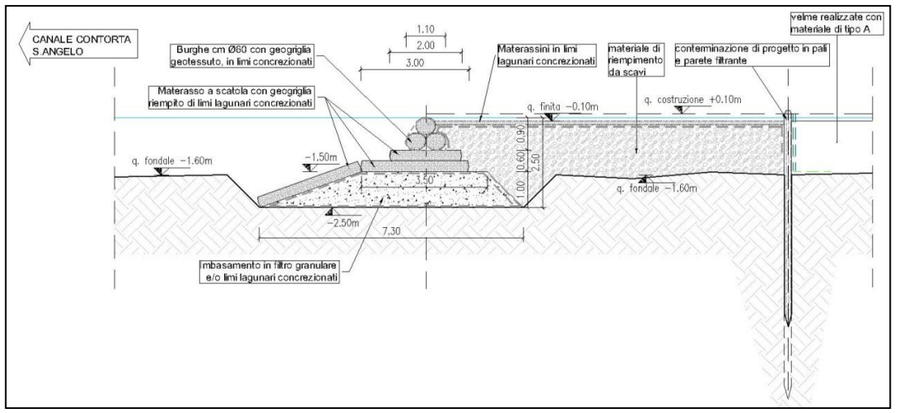


Figura 110

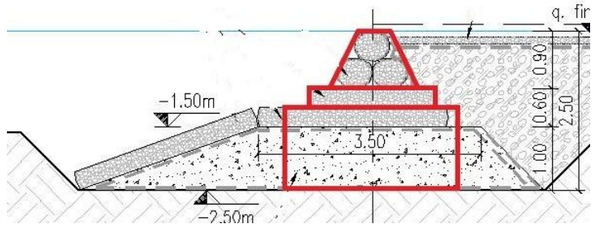


Figura 111

Descrizione dei gradoni

Simbologia adottata

Nr. numero d'ordine del gradone (a partire dall'alto)

Bs base superiore del gradone espressa in [m]

Bi base inferiore del gradone espressa in [m]

Hg altezza del gradone espressa in [m]

α_e inclinazione esterna del gradone espressa in [°]

α_i inclinazione interna del gradone espressa in [°]

Nr.	**Bs**	**Bi**	**Hg**	α_e	α_i
1	0,60	1,05	0,90	14,00	14,00
2	2,00	2,00	0,30	0,00	0,00
3	3,00	3,00	0,30	0,00	0,00

Altezza del paramento 1,50 [m]

Fondazione

Lunghezza mensola fondazione di valle	0,00 [m]
Lunghezza mensola fondazione di monte	0,00 [m]
Lunghezza totale fondazione	3,00 [m]
Inclinazione piano di posa della fondazione	0,00 [°]
Spessore fondazione	1,00 [m]
Materiali utilizzati per la struttura	
Peso specifico	1850,0 [kg/mc]
Tensione ammissibile a compressione σ_c	30,0 [kg/cmq]
Angolo di attrito interno ϕ_p	30,00 [°]

Geometria profilo terreno a monte del muro

Simbologia adottata e sistema di riferimento

(Sistema di riferimento con origine in testa al muro, ascissa X positiva verso monte, ordinata Y positiva verso l'alto)

N numero ordine del punto

X ascissa del punto espressa in [m]

Y ordinata del punto espressa in [m]

A inclinazione del tratto espressa in [°]

N	X	Y	A
1	5,00	0,00	0,00

Terreno a valle del muro

Inclinazione terreno a valle del muro rispetto all'orizzontale 0,00 [°]

Altezza del rinterro rispetto all'attacco fondaz.valle-paramento 0,00 [m]

Falda

Quota della falda a monte del muro rispetto al piano di posa della fondazione 2,50 [m]

Quota della falda a valle del muro rispetto al piano di posa della fondazione 1,60 [m]

Descrizione terreni

Simbologia adottata

Nr. Indice del terreno

Descrizione Descrizione terreno

γ Peso di volume del terreno espresso in [kg/mc]

γ_s Peso di volume saturo del terreno espresso in [kg/mc]

ϕ Angolo d'attrito interno espresso in [°]

δ Angolo d'attrito terra-muro espresso in [°]

c Coesione espressa in [kg/cmq]

c_a Adesione terra-muro espressa in [kg/cmq]

Descrizione	γ	γ_s	ϕ	δ	c	c_a
riporto	1800	1800	20.00	20.00	0,000	0,000
fondale	1800	1800	22.00	22.00	0,050	0,050

Stratigrafia

Simbologia adottata

N Indice dello strato

H Spessore dello strato espresso in [m]

a Inclinazione espressa in [°]

Kw Costante di Winkler orizzontale espressa in Kg/cm²/cm

Ks Coefficiente di spinta

Terreno Terreno dello strato

Nr.	H	a	Kw	Ks	Terreno
1	1,60	0,00	0,00	0,00	riporto
2	1,50	0,00	1,53	0,00	fondale

Descrizione combinazioni di carico

Simbologia adottata

C Coefficiente totale di partecipazione della condizione

Combinazione n° 1 - Tensioni ammissibili

	C
Peso proprio	1.00
Spinta terreno	1.00

Impostazioni di analisi

Calcolo della portanza metodo di Meyerhof

Impostazioni avanzate

Influenza del terreno sulla fondazione di valle nelle verifiche e nel calcolo delle sollecitazioni

Influenza della falda a valle sia come peso sia come spinta da valle

Diagramma correttivo per eccentricità negativa con aliquota di parzializzazione pari a 0.00

Quadro riassuntivo coefficienti di sicurezza calcolati

Simbologia adottata

C Identificativo della combinazione

Tipo Tipo combinazione

Sisma Combinazione sismica

CS_{SCO} Coeff. di sicurezza allo scorrimento

CS_{RIB} Coeff. di sicurezza al ribaltamento

CS_{QLIM} Coeff. di sicurezza a carico limite

CS_{STAB} Coeff. di sicurezza a stabilità globale

C	Tipo	Sisma	cs_{sco}	cs_{rib}	cs_{qlim}	cs_{stab}
1	TAMM - [1]	--	2,14	2,01	4,02	2,47

Analisi della spinta e verifiche

Sistema di riferimento adottato per le coordinate :

Origine in testa al muro (spigolo di monte)

Ascisse X (espresse in [m]) positive verso monte

Ordinate Y (espresse in [m]) positive verso l'alto

Le forze orizzontali sono considerate positive se agenti da monte verso valle

Le forze verticali sono considerate positive se agenti dall'alto verso il basso

Calcolo riferito ad 1 metro di muro

Tipo di analisi

Calcolo della spinta	metodo di Culmann
Calcolo del carico limite	metodo di Meyerhof
Calcolo della stabilità globale	metodo di Bishop
Calcolo della spinta in condizioni di	Spinta attiva

Sisma

Coefficiente di intensità sismica (percento)	7.00
Forma diagramma incremento sismico	Triangolare con vertice in basso
Partecipazione spinta passiva (percento)	50,0
Lunghezza del muro	10,00 [m]
Peso muro	9697,62 [kg]
Baricentro del muro	X=-0,30 Y=-1,57

Superficie di spinta

Punto inferiore superficie di spinta	X = 1,20		Y = -2,50	
Punto superiore superficie di spinta	X = 1,20		Y = 0,00	
Altezza della superficie di spinta	2,50	[m]		
Inclinazione superficie di spinta(rispetto alla verticale)	0,00	[°]		

COMBINAZIONE n° 1

Valore della spinta statica	498,69	[kg]		
Componente orizzontale della spinta statica	467,86	[kg]		
Componente verticale della spinta statica	172,61	[kg]		
Punto d'applicazione della spinta	X = 1,20	[m]	Y = -1,22	[m]
Inclinaz. della spinta rispetto alla normale alla superficie	20,25	[°]		
Inclinazione linea di rottura in condizioni statiche	52,46	[°]		
Spinta falda	3125,00	[kg]		
Punto d'applicazione della spinta della falda	X = 1,20	[m]	Y = -1,67	[m]
Sottospinta falda	4800,00	[kg]		
Spinta falda da valle	1280,00	[kg]		
Peso terrapieno gravante sulla fondazione a monte	2032,24	[kg]		
Baricentro terrapieno gravante sulla fondazione a monte	X = 0,69	[m]	Y = -0,52	[m]

Risultanti

Risultante dei carichi applicati in dir. orizzontale	2312,86	[kg]
Risultante dei carichi applicati in dir. verticale	7462,47	[kg]
Resistenza passiva a valle del muro	-439,60	[kg]
Momento ribaltante rispetto allo spigolo a valle	10403,79	[kgm]
Momento stabilizzante rispetto allo spigolo a valle	20958,25	[kgm]
Sforzo normale sul piano di posa della fondazione	7462,47	[kg]
Sforzo tangenziale sul piano di posa della fondazione	2312,86	[kg]
Eccentricità rispetto al baricentro della fondazione	0,09	[m]
Lunghezza fondazione reagente	3,00	[m]
Risultante in fondazione	7812,66	[kg]
Inclinazione della risultante (rispetto alla normale)	17,22	[°]
Momento rispetto al baricentro della fondazione	639,23	[kgm]
Carico ultimo della fondazione	29988,03	[kg]

Tensioni sul terreno

Lunghezza fondazione reagente	3,00	[m]
Tensione terreno allo spigolo di valle	0,2914	[kg/cmq]
Tensione terreno allo spigolo di monte	0,2061	[kg/cmq]

Fattori per il calcolo della capacità portante

Coeff. capacità portante	N_c = 16.88	N_q = 7.82	N_γ = 4.07
Fattori forma	s_c = 1,00	s_q = 1,00	s_γ = 1,00
Fattori inclinazione	i_c = 0,65	i_q = 0,65	i_γ = 0,05
Fattori profondità	d_c = 1,10	d_q = 1,05	d_γ = 1,05

I coefficienti N' tengono conto dei fattori di forma, profondità, inclinazione carico, inclinazione piano di posa, inclinazione pendio.

N'_c = 12.13	N'_q = 5.37	N'_γ = 0.20

COEFFICIENTI DI SICUREZZA

Coefficiente di sicurezza a ribaltamento	2.01
Coefficiente di sicurezza a scorrimento	2.14
Coefficiente di sicurezza a carico ultimo	4.02
Coefficiente di sicurezza a stabilità globale	2.47

Stabilità globale muro + terreno

Combinazione n° 1

Le ascisse X sono considerate positive verso monte

Le ordinate Y sono considerate positive verso l'alto

Origine in testa al muro (spigolo contro terra)

W peso della striscia espresso in [kg]

α angolo fra la base della striscia e l'orizzontale espresso in [°] (positivo antiorario)

ϕ angolo d'attrito del terreno lungo la base della striscia

c coesione del terreno lungo la base della striscia espressa in [kg/cmq]

b larghezza della striscia espressa in [m]

u pressione neutra lungo la base della striscia espressa in [kg/cmq]

Metodo di Bishop

Numero di cerchi analizzati 36

Numero di strisce 25

Cerchio critico

Coordinate del centro X[m]= -1,16 Y[m]= 2,08

Raggio del cerchio R[m]= 5,15

Ascissa a valle del cerchio Xi[m]= -4,87

Ascissa a monte del cerchio Xs[m]= 3,56

Larghezza della striscia dx[m]= 0,34

Coefficiente di sicurezza C= 2.47

Le strisce sono numerate da monte verso valle

Caratteristiche delle strisce

Striscia	**W**	**α(°)**	**Wsinα**	**b/cosα**	**ϕ**	**c**	**u**
1	189,80	61.64	167,03	0,71	20.00	0,00	0,03
2	526,12	55.04	431,19	0,59	20.00	0,00	0,09
3	790,08	48.91	595,45	0,51	20.00	0,00	0,13
4	1004,62	43.46	691,08	0,46	21.34	0,03	0,17
5	1183,12	38.48	736,18	0,43	22.00	0,05	0,19
6	1333,17	33.82	742,05	0,41	22.00	0,05	0,22
7	1459,53	29.41	716,64	0,39	22.00	0,05	0,24
8	1587,17	25.18	675,22	0,37	22.00	0,05	0,26
9	1677,59	21.09	603,69	0,36	22.00	0,05	0,27
10	1751,24	17.12	515,38	0,35	22.00	0,05	0,28
11	1818,27	13.22	415,91	0,35	22.00	0,05	0,29
12	2099,08	9.39	342,54	0,34	22.00	0,05	0,21
13	1944,21	5.60	189,82	0,34	22.00	0,05	0,21
14	1577,73	1.84	50,62	0,34	22.00	0,05	0,22
15	1468,70	-1.92	-49,15	0,34	22.00	0,05	0,22
16	1356,43	-5.68	-134,30	0,34	22.00	0,05	0,21
17	1145,31	-9.47	-188,48	0,34	22.00	0,05	0,21
18	1104,00	-13.30	-254,05	0,35	22.00	0,05	0,20
19	1048,07	-17.20	-309,89	0,35	22.00	0,05	0,19
20	976,69	-21.18	-352,81	0,36	22.00	0,05	0,18
21	888,66	-25.26	-379,29	0,37	22.00	0,05	0,17
22	782,37	-29.50	-385,23	0,39	22.00	0,05	0,15
23	655,55	-33.92	-365,79	0,41	22.00	0,05	0,13
24	504,96	-38.58	-314,90	0,43	22.00	0,05	0,10
25	231,80	-43.57	-159,77	0,47	22.00	0,05	0,07

ΣW_i= 29104,27 [kg]

$\Sigma W_i \sin\alpha_i$= 3979,16 [kg]

$\Sigma W_i \tan\phi_i$= 11685,17 [kg]

$\Sigma \tan\alpha_i \tan\phi_i$= 1.59

Sollecitazioni nel muro e verifica delle sezioni

Combinazione n° 1

L'ordinata Y(espressa in [m]) è considerata positiva verso il basso con origine in testa al muro

Le verifiche sono effettuate assumendo una base della sezione B=100 cm

H altezza della sezione espressa in [cm]

N sforzo normale [kg]

M momento flettente [kgm]

T taglio [kg]

e eccentricità dello sforzo rispetto al baricentro [cm]

σ_p tensione di compressione massima nel pietrame in [kg/cmq]

Ms momento stabilizzante [kgm]

Mr momento ribaltante [kgm]

Cs coeff. di sicurezza allo scorrimento

Cr coeff. di sicurezza al ribaltamento

Nr.	Y	H	N	M	T	e	σ_p	Ms	Mr	Cs	Cr
1	0,00	60,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00
2	0,07	63,74	86	0	4	0,11	0,01	28	0	12,94	290,09
3	0,15	67,48	177	1	15	0,43	0,03	61	1	6,66	80,18
4	0,22	71,22	273	3	34	0,95	0,04	101	3	4,57	39,18
5	0,30	74,96	375	6	61	1,64	0,06	148	6	3,53	24,11
6	0,38	78,70	481	12	96	2,49	0,07	201	12	2,90	16,81
7	0,45	82,44	593	21	138	3,49	0,09	262	21	2,48	12,67
8	0,53	86,18	710	33	188	4,63	0,11	331	33	2,18	10,06
9	0,60	89,92	832	49	245	5,89	0,13	407	49	1,96	8,30
10	0,67	93,66	959	70	310	7,28	0,15	492	70	1,78	7,05
11	0,75	97,40	1092	96	383	8,77	0,17	586	96	1,65	6,12
12	0,82	101,14	1230	127	464	10,37	0,20	689	127	1,53	5,40
13	0,90	104,88	1373	166	552	12,06	0,22	802	166	1,44	4,84
14	0,90	200,00	2325	-508	535	21,87	0,04	3055	160	2,51	19,04
15	0,97	200,00	2602	-465	625	17,87	0,06	3344	204	2,40	16,39
16	1,05	200,00	2880	-415	717	14,40	0,08	3633	255	2,32	14,26
17	1,13	200,00	3157	-357	811	11,32	0,10	3924	313	2,25	12,52
18	1,20	200,00	3435	-293	906	8,53	0,13	4218	380	2,19	11,09
19	1,20	300,00	4515	-1643	906	36,39	0,04	8947	380	2,88	23,52
20	1,27	300,00	4931	-1571	1003	31,87	0,06	9595	456	2,84	21,03
21	1,35	300,00	5347	-1493	1102	27,91	0,08	10247	542	2,80	18,92
22	1,43	300,00	5764	-1406	1203	24,40	0,10	10902	637	2,77	17,11

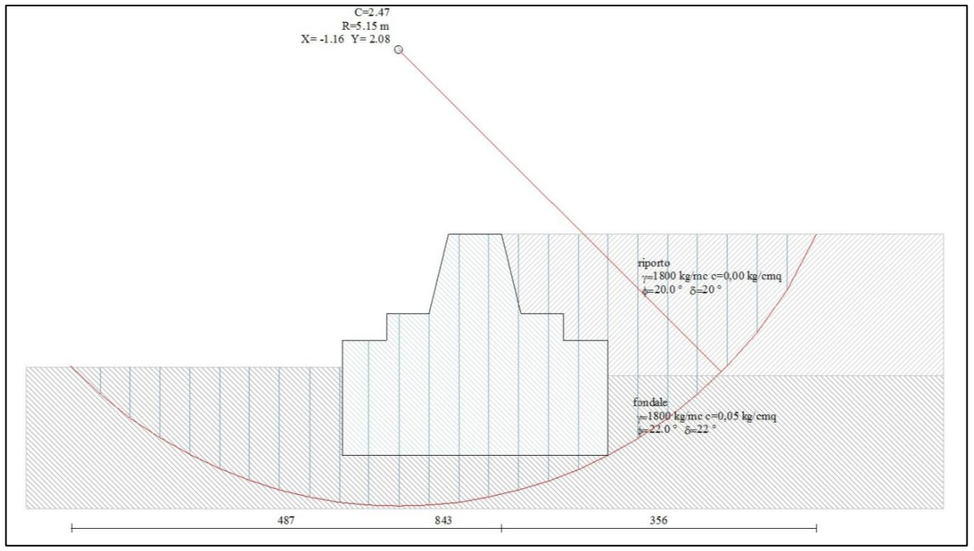


Figura 112

6.2 Considerazioni conclusive sulle verifiche effettuate

A conclusione della precedente trattazione analitica, si dimostra che hanno avuto esito positivo:

- la verifica a ribaltamento;
- la verifica a scorrimento sul piano di posa;
- la verifica di stabilità a carico limite;
- la verifica di stabilità globale;
- le verifiche, nelle varie sezioni della struttura, a ribaltamento, a scorrimento e a schiacciamento;

potendo così garantire la stabilità dell'opera in progetto, con riferimento alle sollecitazioni dovute agli effetti provocati dal transito di navi nel nuovo canale, a cui essa viene sottoposta.

7 INDIVIDUAZIONE DEI SITI DI CONFERIMENTO

Fra i vari aspetti che devono essere approfonditi nel presente elaborato, riveste importanza anche la definizione dei siti di conferimento dei materiali di risulta degli scavi del realizzando canale. Si tratta di un quantitativo di 6 milioni di metri cubi, due dei quali circa potranno essere collocati nelle realizzande strutture morfologiche in fregio al canale.

Senza entrare nel merito della relativa caratterizzazione, in uno con la valutata possibilità di superare i limiti imposti dai vigenti Criteri di Sicurezza Ambientale del 1993, oggetto del presente paragrafo è la descrizione delle attuali potenzialità di conferimento delle varie strutture morfologiche, cui è stato dato corso dal Magistrato alle Acque negli ultimi dieci anni circa, nell'ambito del Piano Morfologico della Laguna.

Quanto sopra al fine di evidenziare come la attuale capacità ricettiva per fanghi tipo A, nelle barene già approvate (ma non realizzate) e in quelle per cui è necessario un completamento, sia ampiamente superiore al quantitativo da conferire, sulla base del progetto qui proposto alla Superiore Approvazione.

Diverse sono le condizioni da porre per quanto attiene i fanghi di tipo B, demandando però ad altre sezioni degli elaborati progettuali tali valutazioni.

Le tavole relative all'individuazione di opportuni siti di conferimento sono così suddivise:

- la Tavola 2.1 contiene una corografia di inquadramento territoriale con l'indicazione delle diverse tipologie di fanghi da conferire (A o B);
- la Tavola 2.2 riporta una planimetria dei percorsi di navigazione ai suddetti siti di conferimento;
- le Tavole 2.3.1÷2.3.12 descrivono le caratteristiche delle configurazioni relative alle varie strutture morfologiche per fanghi di Tipo A;
- le Tavole 2.4.1÷2.4.3, parallelamente, trattano il medesimo argomento in merito ai fanghi di Tipo B.

Come suaccennato, la Tavola n. 2.1 (cfr. Figura 113) contiene il compendio delle strutture morfologiche per Fanghi di Tipo A e di Tipo B, evidenziati da una diversa colorazione per fornire un maggior dettaglio. Una apposita legenda delinea le tipologie di riempimenti adottate, per questo elaborato così come per tutti i seguenti.

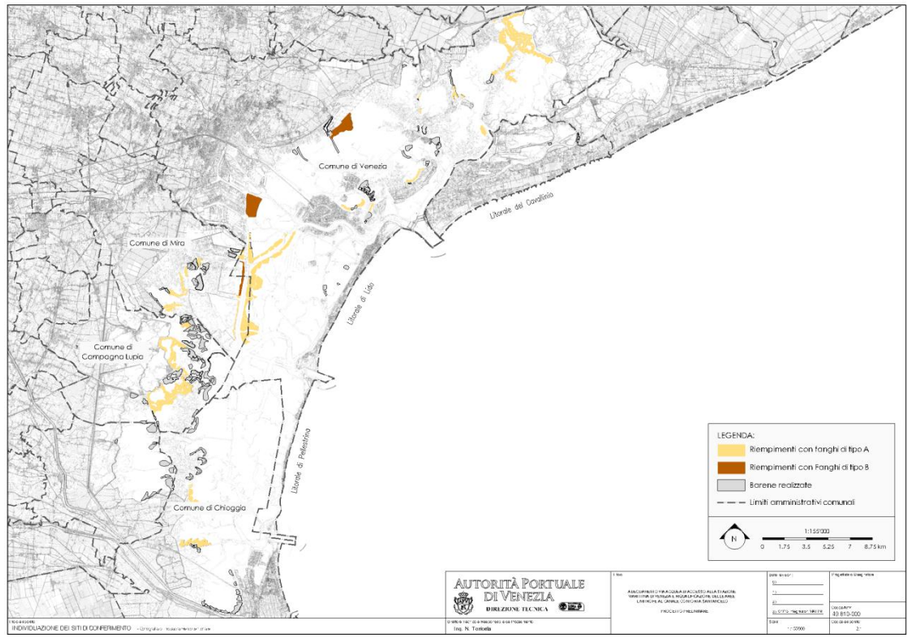


Figura 113: Corografia di inquadramento territoriale

Nella tavola successiva, riportata nella Figura 114, è stata riprodotta una planimetria dei percorsi di navigazione ai siti di conferimento con una suddivisione in base alla relativa ubicazione. Sono individuati, in aggiunta ai limiti amministrativi comunali, i seguenti elementi:

a) strutture morfologiche:
   - a.1) di progetto;
   - a.2) Laguna Nord;
   - a.3) Laguna centrale;
   - a.4) Laguna Sud;

b) percorsi di navigazione:
   - b.1) per trasporto fanghi in Laguna Nord;
   - b.2) per trasporto fanghi in Laguna centrale;
   - b.3) per trasporto fanghi in Laguna Sud.

L'elaborato seguente, corrispondente alla Tavola 2.3.1 (cfr. Figura 115), pone delle distinzioni in merito al differente livello di avanzamento dell'iter progettuale delle varie strutture morfologiche.

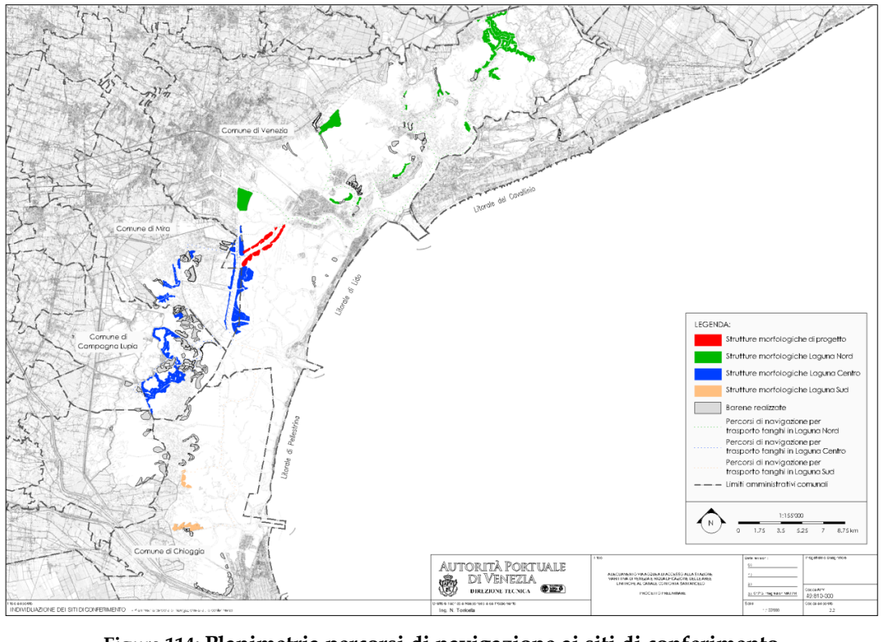


Figura 114: Planimetria percorsi di navigazione ai siti di conferimento

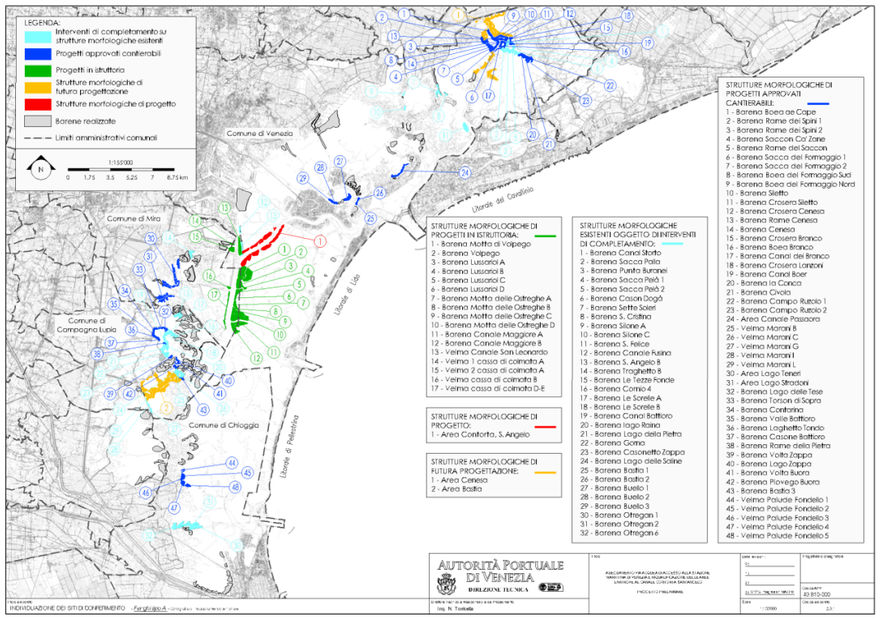


Figura 115: Corografia di inquadramento territoriale Fanghi di Tipo A

Sono definiti:

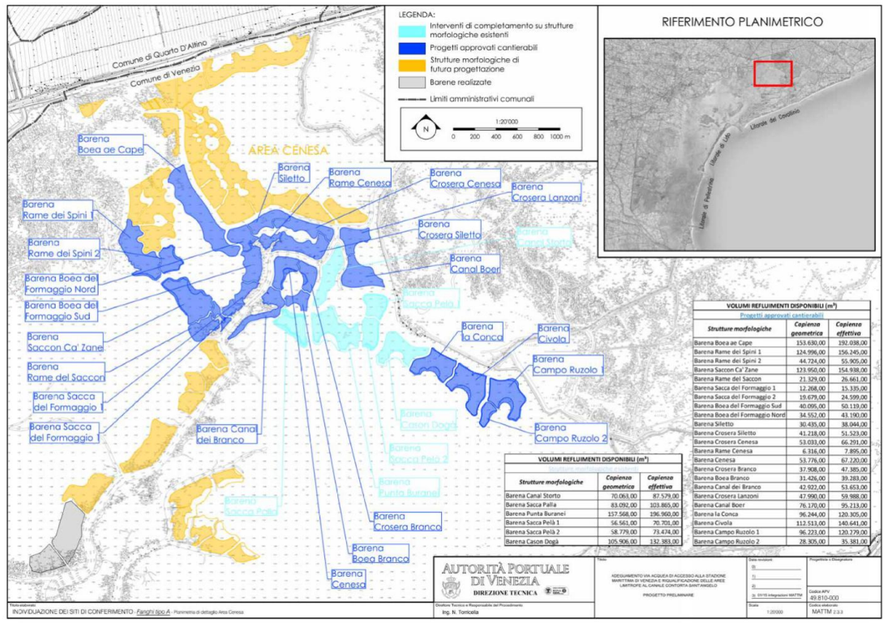
- interventi di completamento su strutture morfologiche esistenti;
- progetti approvati cantierabili;
- progetti in istruttoria;
- futura progettazione;
- progetto (Contorta Sant'Angelo).

Nella successiva Tavola 2.3.2 si trova il dettaglio della Laguna Nord: particolare evidenza viene riposta alle velme Marani (lungo il canale delle Fondamente Nove) e le barene Cenesa (situate in Laguna Nord). In tale elaborato vengono identificati i seguenti elementi:

- gli interventi di completamento su strutture morfologiche esistenti;
- i progetti approvati cantierabili;
- le strutture morfologiche di futura approvazione;
- le barene realizzate;
- i limiti amministrativi comunali.

La Tavola 2.3.3, riprodotta nella seguente Figura 116, riporta invece il dettaglio delle barene Cenesa, dove per ciascuna delle suddette viene messa in evidenza la capacità ricettiva. Nella stessa è presente una tabella dei volumi di refluimento disponibili, in sintesi:

- 665'000 m³ nelle strutture morfologiche esistenti;
- 1'662'000 m³ per i progetti approvati cantierabili.



VOLUMI REFLUIMENTI DISPONIBILI (m³)
Progetti approvati cantierabili

Strutture morfologiche	Capienza geometrica	Capienza effettiva
Barena Boea ae Cape	310.630,00	192.038,00
Barena Rame dei Spini 1	124.996,00	156.245,00
Barena Rame dei Spini 2	44.724,00	55.905,00
Barena Saccon Ca' Zane	125.950,00	154.938,00
Barena Rame del Saccon	21.529,00	26.661,00
Barena Sacca del Formaggio 1	12.268,00	15.335,00
Barena Sacca del Formaggio 2	19.679,00	24.599,00
Barena Boea del Formaggio Sud	40.095,00	50.119,00
Barena Boea del Formaggio Nord	34.952,00	43.190,00
Barena Siletto	30.439,00	38.049,00
Barena Crosera Siletto	41.218,00	51.523,00
Barena Crosera Cenesa	53.033,00	66.293,00
Barena Rame Cenesa	6.316,00	7.895,00
Barena Cenesa	53.776,00	67.220,00
Barena Crosera Branco	37.908,00	47.385,00
Barena Boea Branco	31.426,00	39.283,00
Barena Canal del Branco	42.922,00	53.653,00
Barena Crosera Lanzoni	47.990,00	59.988,00
Barena Canal Boer	76.170,00	95.213,00
Barena la Conca	96.244,00	120.305,00
Barena Civola	112.513,00	140.641,00
Barena Campo Ruzolo 1	96.223,00	120.279,00
Barena Campo Ruzolo 2	28.305,00	35.381,00

VOLUMI REFLUIMENTI DISPONIBILI (m³)

Strutture morfologiche	Capienza geometrica	Capienza effettiva
Barena Canal Storto	70.061,00	87.579,00
Barena Sacca Paila	83.092,00	103.865,00
Barena Punta Buranei	157.568,00	196.960,00
Barena Sacca Peiò 1	56.561,00	70.705,00
Barena Sacca Peiò 2	58.779,00	73.474,00
Barena Casoni Dogà	105.906,00	132.383,00

Figura 116: Planimetria di dettaglio Area Isola santa Cristina

Nella successiva Tavola 2.3.4, si trova l'individuazione dei siti delle strutture morfologiche esistenti per le quali è da prevedersi il completamento: si tratta di una planimetria di dettaglio dell'area adiacente all'isola di santa Cristina, per le quali sono disponibili 33'800 m³.

La Tavola 2.3.5 contiene una planimetria di dettaglio dell'Area Marani con la tabella indicante i volumi di refluimento disponibili per i progetti approvati cantierabili, pari a circa 582'000 m³.

La Tavola2.3.6 contiene una planimetria generale della Laguna centrale, mentre la coppia di Tavole 2.3.7÷2.3.8 (cfr. Figura 117) inquadra il dettaglio delle strutture morfologiche previste nel progetto di ricalibratura del canale Malamocco - Marghera, progetto questo ancora in fase di istruttoria e non cantierabile quindi allo stato attuale delle cose. Si ritiene auspicabile che l'iter progettuale di tale opera riprenda quanto prima, al fine di garantire la protezione dei bassifondi della Laguna centrale, in uno con la riduzione del costante fenomeno di interramento del canale Malamocco – Marghera.

In particolare nella Tavola 2.3.8, di dettaglio dell'area di Fusina, sono indicate anche alcune strutture morfologiche esistenti, oltre a quelle del citato progetto, in uno con una tabella indicante i rispettivi volumi di refluimenti disponibili. In sintesi, i volumi di refluimento disponibili nelle strutture esistenti sono pari a circa 25'000 m³.

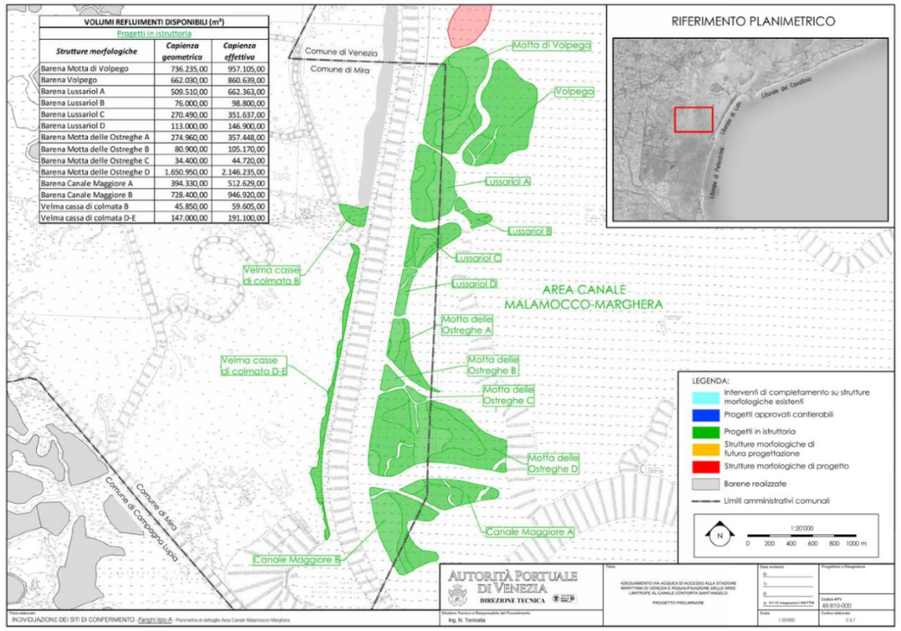


Figura 117: Planimetria di dettaglio Area canale Malamocco –Marghera

Nelle Tavole successive sono rappresentate due planimetrie di dettaglio della Laguna centrale:

- la 2.3.9 inquadra l'Area Lago Teneri e Area Lago Stradoni, dove si riscontra la presenza di progetti approvati cantierabili e di strutture morfologiche esistenti, in cui sono disponibili rispettivamente circa 935'000 m³ e 8000 m³;
- la 2.3.10, qui riprodotta in Figura 118, è relativa invece all'Area Bastia-Battioro, dove si individuano le due precedenti tipologie di strutture, unitamente ad alcune strutture morfologiche di futura progettazione, per un volume disponibile totale di 1'631'000 m³ nelle strutture esistenti, e 687'000 m³ nelle aree cantierabili.

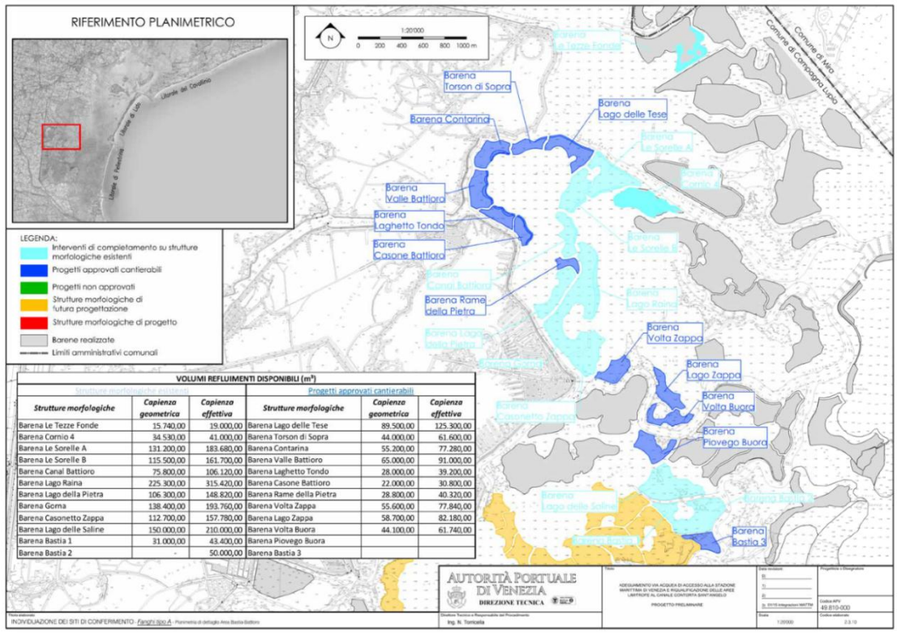


Figura 118: Planimetria di dettaglio Area Bastia-Battioro

La Tavola 2.3.11 contiene una planimetria di dettaglio dell'area del canale Buello, in prossimità dell'isola di Millecampi, dove insistono alcune barene che dovranno essere soggette a interventi di completamento, per un volume disponibile totale di circa 139'000 m³.

La Tavola 2.3.12 è l'ultima riservata ai Fanghi di Tipo A: contiene una planimetria generale della Laguna meridionale con indicazione de:

- le barene Otregan da sottoporre a interventi di completamento, per un volume disponibile di 50'100 m³;
- le velme approvate Palude Fondello, in cui è disponibile un volume di 249'000 m³;
- le barene dell'area Val di Brenta.

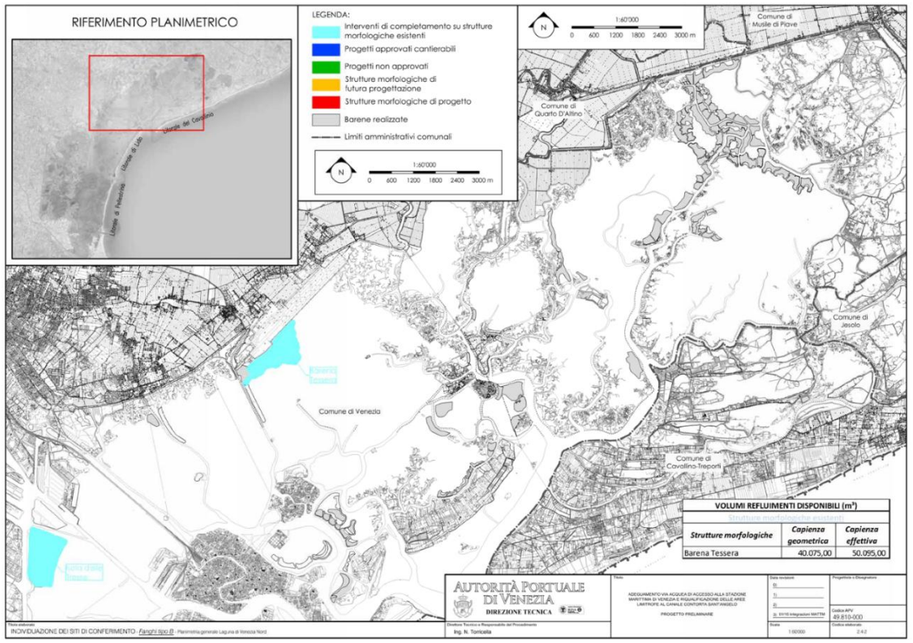


Figura 119: Planimetria generale Laguna Nord di Venezia

Le tre Tavole 2.4.1, 2.4.2 e 2.4.3 sono dedicate alla disposizione dei Fanghi di Tipo B, suddivise secondo la disposizione seguente:

- nella 2.4.1 è riportata una corografia di inquadramento territoriale. Si riscontra la presenza di strutture morfologiche, sia di progetti di istruttoria, che esistenti da sottoporre a interventi di completamento;
- la 2.4.2 in Figura 119 contiene una planimetria generale della Laguna settentrionale, dove si rilevano unicamente dati di volumi di refluimento per la barena di Tessera, pari a circa 50'100 m³;
- infine, nella 2.4.3 si trova una planimetria generale della Laguna centrale, dove è possibile constatare la presenza di progetti non approvati relativi alle casse di Colmata A e B, oltre all'isola delle Tresse.

7.1 Stima dei quantitativi conferibili

Sulla base degli elementi messi a disposizione dal PIOP-CVN, è stato possibile fornire una quantificazione di dettaglio dei siti di conferimento per i fanghi di tipo A, così come definiti dai citati Criteri di Sicurezza Ambientale.

Anche senza considerare i quantitativi prevedibili per i progetti ancora in istruttoria, risulta evidente come la capienza ottenibile con la realizzazione delle strutture morfologiche già approvate e il completamento di quelle esistenti sia ampiamente superiore ai fabbisogni di progetto, anche considerando solamente quelle che ricadono nei comuni di Venezia e Campagna Lupia.

Più articolata, come noto e descritto in ampia parte nel presente progetto, è la questione relativa al conferimento dei fanghi di tipo B, sia per le eccessive limitazioni che impongono le attuali norme, che per i relativi grandi quantitativi variamente già presenti nel sedime lagunare.

Nella successiva Tabella 8è quindi fornita la stima delle capienze disponibili, suddivisa per le diverse tipologie di strutture morfologiche, da cui risulta un quantitativo pari a oltre 17 milioni di m³, demandando alla lettura delle seguenti tavole per quanto riguarda i dettagli relativi alle singole aree e barene.

Volumi totali tipologia progetti		
Strutture morfologiche	***Capienza geometrica***	***Capienza effettiva***
Somma Volumi strutture morfologiche esistenti	1'897'586.00	2'602'045.00
Somma Volumi progetti approvati cantierabili	2'485'192.00	3'180'131.00
Somma Volumi progetti in istruttoria	6'768'095.00	8'798'523.00
Somma Volumi strutture morfologiche di progetto	1'962'283.00	2'550'968.00
Volumi refluimenti totali	13'113'156.00	17'131'667.00

Tabella 8

8 CONCLUSIONI

Per rispondere alle osservazioni della Commissione VIA Nazionale, è stato redatto anche il presente studio, che si compone di due distinte sezioni:

- una prima, contenente un approfondimento della modellistica idrodinamica e morfologica predisposta a suo tempo, oltre a un'analisi storica dell'evoluzione dei fondali lagunari nell'ambito di interesse;
- la seconda, contenente alcuni approfondimenti di carattere ingegneristico relativi al progetto preliminare già presentato, consistenti essenzialmente nell'adeguamento delle conterminazioni, lungo le realizzande strutture morfologiche, e una più dettagliata analisi dei possibili siti di conferimento dei materiali di risulta degli scavi.

Per quanto attiene la sezione ingegneristica i risultati principali ottenuti possono essere riassunti nei seguenti punti.

- Appare necessario che le conterminazioni delle velme in fregio al canale Contorta siano impostate con una quota più profonda degli attuali fondali, posta a -2,50 m s.m.m., al fine di prevenire possibili fenomeni erosivi. Tale quota è stata desunta sulla base dell'evoluzione storica registrata dei fondali adiacenti al canale Malamocco –Marghera.
- Per i fanghi tipo A, se si considerano oltre a quelle esistenti, anche le strutture morfologiche già approvate non realizzate, la capacità ricettiva per i fanghi di risulta degli scavi è ampiamente superiore alle necessità. Per i fanghi tipo B, pur rimandando ad altre parti delle presenti integrazioni per maggiori approfondimenti, le attuali possibilità di conferimento sono decisamente più ridotte.

Per quanto attiene la modellistica, attraverso l'utilizzo del software tridimensionale Delft3D, si è dato corso alle seguenti fasi di lavoro.

- Dapprima si è proceduto a una calibrazione del modello idrodinamico, utilizzando sia i dati disponibili registrati ai mareografi presenti in Laguna, che le misurazioni del moto ondoso generato dalle navi in transito lungo il canale Malamocco - Marghera. I risultati ottenuti appaiono più che idonei da un punto di vista ingegneristico.
- Sono stati indagate svariate combinazioni di venti e maree, anche sulla base di eventi reali, avendo osservato come, a seguito della realizzazione delle opere qui proposte, solamente nell'intorno del canale si possono osservare modifiche apprezzabili del regime idrodinamico lagunare. Sia a nord che a sud, oltre che nella porzione critica di Laguna compresa fra il canale Vittorio Emanuele III e il ponte della Libertà, i differenziali dei vari parametri indagati appaiono pressoché nulli.
- I risultati della previsione di evoluzione morfologica della Laguna nell'intorno del canale appaiono in linea con la relativa evoluzione storica degli ultimi decenni. La presenza del canale e delle relative velme sembra poter localmente attenuare l'erosione dei bassifondali adiacenti.
- È opportuno che un piano di monitoraggio segua l'evoluzione della superficie delle velme, al fine di prevedere eventuali interventi correttivi, qualora la relativa quota sommitale venisse erosa in modo apprezzabile, venendo quindi meno la relativa funzione di smorzamento del moto ondoso incidente.
- Sono state indagate due distinte velocità per la nave di progetto in diverse condizioni di marea, avendo individuato, per il valore di 6 nodi, una potenziale configurazione di equilibrio del canale.
- Qualche criticità è stata individuata per la attuale larghezza dei ghebi di separazione fra le varie velme, essendo quindi necessario su tale aspetto uno specifico approfondimento nei successivi sviluppi progettuali.
- Sia a nord che a sud del canale, aldilà delle nuove velme contermini, le sollecitazioni indotte dal traffico delle navi nel canale Contorta Sant'Angelo appaiono trascurabili.