



**Consorzio per la Gestione del Centro
di Coordinamento delle Attività di Ricerca
inerenti il Sistema Lagunare di Venezia**

Palazzo Franchetti S. Marco 2847 30124 Venezia

Tel. +39.041.2402511 Fax +39.041.2402512

Progetto **STUDIO B.6.72 B/7**

**ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL
MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI
DALLA COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE
BOCCE LAGUNARI**

Documento **MATRICE: ECOSISTEMI-FANEROGAME
MACROATTIVITÀ: PRATERIE A FANEROGAME -
MODELLAZIONE MATEMATICA IDRO-
MORFODINAMICA DELLE PRATERIE A
FANEROGAME MARINE**

Versione **1.0**

Emissione **1 Luglio 2012**

Redazione

Ing. Luca Carniello
(ICEA-UNIPD)

Verifica

Prof. Andrea Defina
(ICEA-UNIPD)

Verifica

Prof. Patrizia Torricelli

Approvazione

Ing. Pierpaolo Campostrini

Indice

1. INTRODUZIONE.....	3
2. LA MODELLAZIONE MATEMATICA	4
2.1 Il modello idrodinamico	4
2.2 Schematizzazione del dominio di calcolo	5
3. CAMPAGNA DI MISURE DEL 22 DICEMBRE 2011.....	12
4. ANALISI DEI RISULTATI	14
4.1 Confronto con i dati rilevati nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011.....	14
4.2 Confronto tra le configurazioni precedente e successiva alla costruzione delle opere alle bocche.....	25
5. CONCLUSIONI	41
6. BIBLIOGRAFIA.....	42
APPENDICE	43
Campi di velocità istantanei.....	43
Variazione delle direzioni delle velocità massime.....	56

Alla realizzazione del presente rapporto hanno contribuito:

A. Defina (ICEA - UNIPD)

L. Carniello (ICEA - UNIPD)

L. Stefanon (ICEA - UNIPD)

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro si inserisce nell'ambito delle attività di monitoraggio degli effetti prodotti dalla costruzione delle opere alle bocche lagunari di cui è stato formalmente incaricato il "Consorzio per la gestione del centro di coordinamento delle attività di ricerca inerenti il sistema lagunare di Venezia" (Co.Ri.La.).

Nell'ambito delle attività riguardanti la realizzazione del Piano di Monitoraggio, Co.Ri.La. ha affidato, con incarico di consulenza Prot. 12/IS_CO42, al Dipartimento ICEA dell'Università di Padova la realizzazione di parte dell'attività necessaria al monitoraggio sotto la responsabilità scientifica del prof. Andrea Defina, comprendente la messa a punto di un modello numerico che permetta di analizzare dal punto di vista idro-morfodinamico gli effetti degli interventi legati alla realizzazione delle opere fisse del M.O.S.E..

Lo studio, pertanto, si pone l'obiettivo di confrontare il comportamento idrodinamico della laguna di Venezia nelle sue configurazioni antecedente e successiva alla costruzione alle bocche delle opere di difesa dalle acque alte. Secondo quanto previsto, l'analisi si è concentrata sull'idrodinamica della bocca di Lido, in corrispondenza della quale è stata rilevata, per alcune delle praterie di fanerogame presenti, una riduzione della popolazione di epifiti dagli inizi della costruzione delle opere ad oggi.

Il lavoro comprende la realizzazione di due reticoli di calcolo, rappresentanti la configurazione antecedente alla costruzione delle opere alle bocche e la configurazione attuale della laguna. Il primo di essi è stato quotato utilizzando i rilievi batimetrici eseguiti nel 2003 e per questo, d'ora in avanti, verrà denominato "laguna 2003", mentre il secondo è stato quotato utilizzando i più recenti dati batimetrici disponibili forniti dal committente e per questo verrà denominato "laguna attuale" o "laguna 2012". Questo secondo reticolo rappresenta, di fatto, la configurazione delle bocche di porto con tutte le opere fisse relative al sistema M.O.S.E., ovvero una configurazione caratterizzata dalla modifica dell'assetto dei moli alle bocche, dalla realizzazione delle conche di navigazione e dell'isola artificiale al centro della bocca di Lido, dal riposizionamento in quota dei fondali alle tre bocche e dalla realizzazione degli antemurale posti, in mare, a protezione delle bocche stesse.

Con riferimento agli aspetti idrodinamici, la verifica delle capacità predittive del modello per la configurazione attuale della laguna è realizzata attraverso il confronto con i dati rilevati nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011, condotta lungo il canale S. Nicolò all'altezza del Forte S. Andrea, durante la quale sono stati realizzati principalmente rilievi correntometrici.

Le differenze nei campi di moto idrodinamici per le due configurazioni lagunari (2003 e 2012), infine, sono state analizzate sia in condizioni idrodinamiche controllate dalle sole correnti di marea, sia in condizioni idrodinamiche influenzate dall'effetto combinato della marea e del moto ondoso generato da vento.

2. LA MODELLAZIONE MATEMATICA

2.1 Il modello idrodinamico

La circolazione idrodinamica all'interno dei bacini a marea è, come è noto, efficacemente descritta dalle equazioni delle onde lunghe in acque basse, sulla base delle quali è possibile studiare il comportamento di ambienti il cui campo di moto si sviluppa prevalentemente nel piano orizzontale.

Negli ultimi vent'anni, il Dipartimento ICEA dell'Università di Padova ha sviluppato e messo a punto un modello idrodinamico bidimensionale agli elementi finiti per lo studio dell'idrodinamica lagunare e dei processi a quest'ultima legati, con particolare riferimento a schemi di calcolo che ben si adattano alle caratteristiche della laguna di Venezia. In particolare, il modello proposto risolve le equazioni delle onde lunghe in acque basse opportunamente modificate per essere applicate a domini irregolari, in cui siano eventualmente presenti regioni che, a seconda del livello della marea, risultano alternativamente asciutte o bagnate. La soluzione di tali equazioni è stata affrontata introducendo schemi numerici che sono andati via via perfezionandosi, portando a risultati sempre più accurati.

La strategia alla quale si ispira la modellazione tiene conto della particolare morfologia dei fondali della laguna, dove zone d'acqua bassa particolarmente estese si affiancano a non meno estese superfici di barena, destinate periodicamente ad allagarsi e a prosciugarsi durante l'alternarsi delle maree, e un sistema di potenti canali principali si intreccia con una diffusa, ma non meno importante, rete di piccoli canali.

La necessità di contenere entro tempi scala accettabili la durata delle simulazioni e, quindi, il numero di elementi costituenti la griglia con cui vengono discretizzate le equazioni del moto, mantenendo, al contempo, un'adeguata descrizione dei vari processi fisici ha portato allo sviluppo di adeguati schemi di sottogriglia in grado di descrivere i fenomeni caratterizzati da una lunghezza-scala inferiore alle dimensioni caratteristiche della griglia di calcolo (e.g. D'Alpaos and Defina, 1993, Defina et al., 1994). Il modello di sottogriglia sviluppato per descrivere il fenomeno della transizione asciutto/bagnato consente una rappresentazione dei fondali più aderente alla realtà, poiché assume che all'interno di ciascun elemento di calcolo il fondo sia rappresentato non solo dalla sua quota media (o comunque mediante una superficie piana), ma anche dall'ampiezza delle irregolarità topografiche la cui entità è sintetizzata da un parametro avente un ben definito significato statistico (D'Alpaos and Defina, 1993, 1995).

Tale approccio consente di modificare le equazioni delle onde lunghe in acque basse, risolte dal modello idrodinamico, in modo da poter descrivere, in media, gli effetti idrodinamici che le macroirregolarità della batimetria all'interno di un singolo elemento di calcolo producono sui processi di sommersione ed emersione (Defina et al., 1994; D'Alpaos and Defina, 1995; Defina, 2000; D'Alpaos and Defina, 2007).

La necessità di studiare non solo l'idrodinamica ma anche la conseguente evoluzione morfologica di un bacino a marea ha portato allo sviluppo di uno specifico modello di moto ondoso prodotto dal vento, da accoppiare al modello idrodinamico al fine di riprodurre la generazione e propagazione del moto ondoso nonché l'effetto combinato delle correnti di marea e delle onde da vento che risulta essere di cruciale importanza per descrivere la dinamica dei sedimenti lagunari (Carniello et al., 2005, 2011). Ai due modelli brevemente descritti è stato, infine, accoppiato un ulteriore modulo in grado di descrivere la risospensione, il trasporto e la deposizione dei sedimenti in laguna per effetto combinato delle correnti di marea e delle onde prodotte dal vento (Carniello et al., 2012). Per la descrizione dei sedimenti che costituiscono i fondali lagunari, solitamente caratterizzati dalla contemporanea presenza di sabbia, limo e argilla, il modello

considera una miscela bi-granulare che permette di riprodurre sia il loro eventuale comportamento coesivo sia quello non coesivo. Il modello è altresì in grado di descrivere l'evoluzione del fondo in termini altimetrici e di variazione della composizione granulometrica e, di conseguenza, del grado di coesione del fondale.

Per una descrizione dettagliata delle equazioni utilizzate, delle tecniche numeriche adottate per la loro soluzione e per la taratura del modello si rimanda alla letteratura tecnica (ad esempio: D'Alpaos and Defina, 1995; Defina, 2000; Carniello et al., 2005, 2011, 2012; D'Alpaos and Defina, 2007) nonché alle attività svolte da ICEA-UNIPD (al tempo Dipartimento IMAGE) nell'ambito dell'aggiornamento del Piano Morfologico della Laguna di Venezia (Magistrato alle Acque di Venezia - CORILA (2011)).

2.2 Schematizzazione del dominio di calcolo

Come già accennato nella Premessa, lo studio si pone l'obiettivo di analizzare gli effetti prodotti dalla costruzione delle opere alle bocche sull'idrodinamica della laguna di Venezia. A tale scopo è necessario confrontare il campo di moto idrodinamico antecedente alla realizzazione delle opere anzidette con quello attuale, data l'ormai completa realizzazione delle opere stesse. Tale confronto è stato realizzato basandosi sui risultati del calcolo ottenuti con il modello numerico descritto in precedenza utilizzando due distinti reticoli di calcolo che riproducono, rispettivamente, la configurazione della laguna antecedente alle costruzioni delle opere alle bocche (laguna 2003) e la configurazione attuale della laguna (laguna 2012).

Secondo quanto esplicitamente previsto, l'attività modellistica qui illustrata si è concentrata specificatamente sulla bocca di Lido.

La realizzazione dei reticoli di calcolo utilizzati per le simulazioni ha preso avvio utilizzando come base quelli già sviluppati dal Dipartimento ICEA (ex Dipartimento IMAGE) nell'ambito delle attività relative all'aggiornamento del Piano Morfologico della Laguna di Venezia (Magistrato alle Acque di Venezia - CORILA, 2011).

La schematizzazione della bocca di Lido proposta nei reticoli di calcolo realizzati nell'ambito delle attività relative all'aggiornamento del Piano Morfologico risulta tuttavia non sufficientemente dettagliata per riprodurre adeguatamente alcuni fenomeni idrodinamici locali del campo di moto, come, ad esempio, la formazione di vortici associati a fenomeni di distacco. Per consentire, quindi, un adeguato confronto tra i risultati del calcolo e i dati raccolti nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011 è stato necessario infittire la griglia computazionale in tutta l'area interessata dalla suddetta campagna di misure. In particolare, l'infittimento della mesh in quest'area è stato realizzato utilizzando maglie di circa 10 m di lato, che hanno permesso una rappresentazione molto dettagliata del canale S. Nicolò tra il Forte S. Andrea e le opere alle bocche e delle aree di basso fondale situate nei pressi del Forte stesso. In Figura 1 è illustrato il confronto tra il vecchio reticolo di calcolo e quello più raffinato nell'area oggetto delle misure considerando sia la configurazione della "laguna 2003" sia la configurazione attuale. Dalla Figura 1 emerge chiaramente come l'infittimento del reticolo in corrispondenza della bocca di Lido permetta una migliore rappresentazione geometrica dell'area in esame. Come conseguenza dell'infittimento, i nuovi reticoli di calcolo presentano complessivamente 59705 nodi e 114243 maglie per la laguna 2003 e 62146 nodi e 118613 maglie per la laguna attuale.

In Figura 2 sono illustrati, nel loro complesso, i nuovi reticoli di calcolo della laguna di Venezia. In particolare, in Figura 2a è rappresentata la schematizzazione del dominio di calcolo per la laguna 2003, rappresentativa della configurazione morfologica della laguna antecedente alla costruzione delle opere alle bocche. La Figura 2b descrive, invece, il reticolo di calcolo della laguna nella sua configurazione morfologica attuale, caratterizzata dalla costruzione delle opere accessorie per

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

l'alloggiamento delle paratoie mobili, delle conche di navigazione e degli antemurale (lunate). Come si può osservare in Figura 2, i due reticoli sono stati generati utilizzando un numero di elementi confrontabile tra loro, così da evitare qualsiasi differenza nella produzione dei risultati imputabile a schematizzazioni realizzate con un diverso grado di dettaglio. Si osservi, inoltre, che per ogni configurazione analizzata è stata riprodotta una porzione di mare Adriatico antistante la laguna, così da evitare effetti apprezzabili sui risultati delle simulazioni numeriche causati da un'eccessiva vicinanza della frontiera esterna del dominio di calcolo sulla quale vengono imposte le condizioni al contorno relative ai livelli di marea.

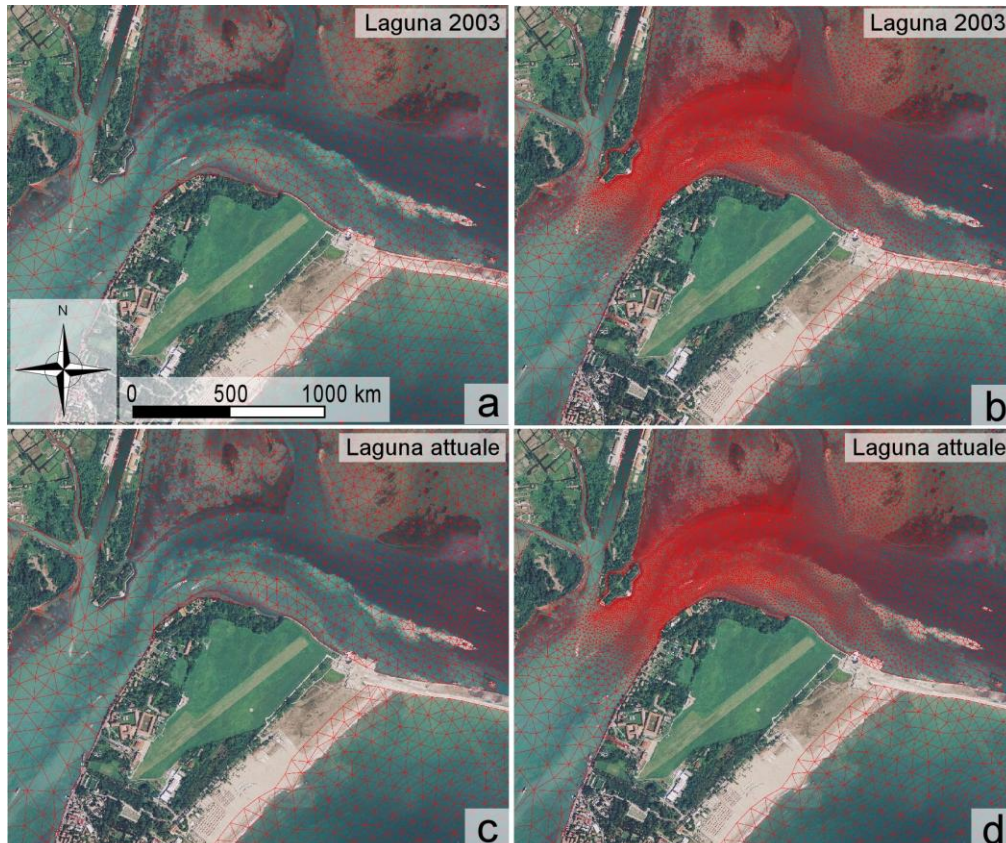


Figura 1 - Confronto tra la schematizzazione più grossolana e quella più raffinata della bocca di Lido prima e dopo la costruzione delle opere alle bocche: (a) schematizzazione grossolana della bocca del 2003 con maglie di 60 m di lato; (b) schematizzazione raffinata della bocca del 2003 con maglie di 10 m; (c) schematizzazione grossolana della configurazione attuale della bocca con maglie di 60 m; (d) schematizzazione raffinata della configurazione attuale della bocca con maglie di 10 m.

La quotatura del reticolo di calcolo della laguna 2003 è stata realizzata utilizzando i rilievi batimetrici condotti tra il 2000 e il 2004 in tutta la laguna di Venezia eseguiti dal Magistrato alle Acque di Venezia (Figura 3a).

La stessa batimetria è stata utilizzata per quotare la laguna attuale (Figura 3b) ad eccezione delle aree interessate dalle opere alle bocche, per le quali sono state utilizzate le quote di progetto. La bocca di Lido, inoltre, è stata quotata utilizzando i più recenti rilievi batimetrici condotti da Co.Ri.La. nell'ambito delle attività relative al Piano di Monitoraggio.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCCHE LAGUNARI

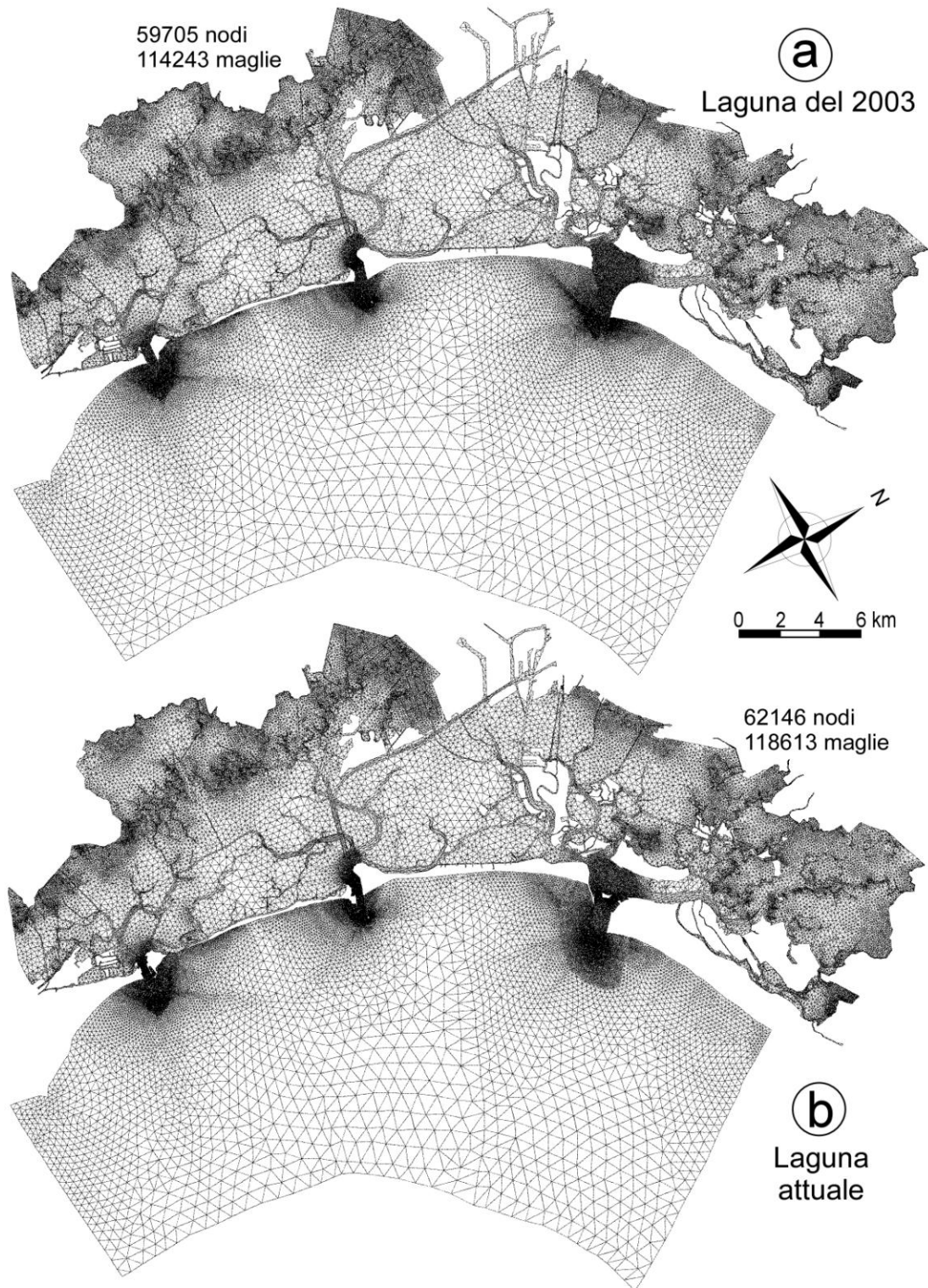


Figura 2 - Reticolo di calcolo rappresentativo della configurazione della laguna di Venezia del 2003 (a) e della configurazione attuale della laguna (b).

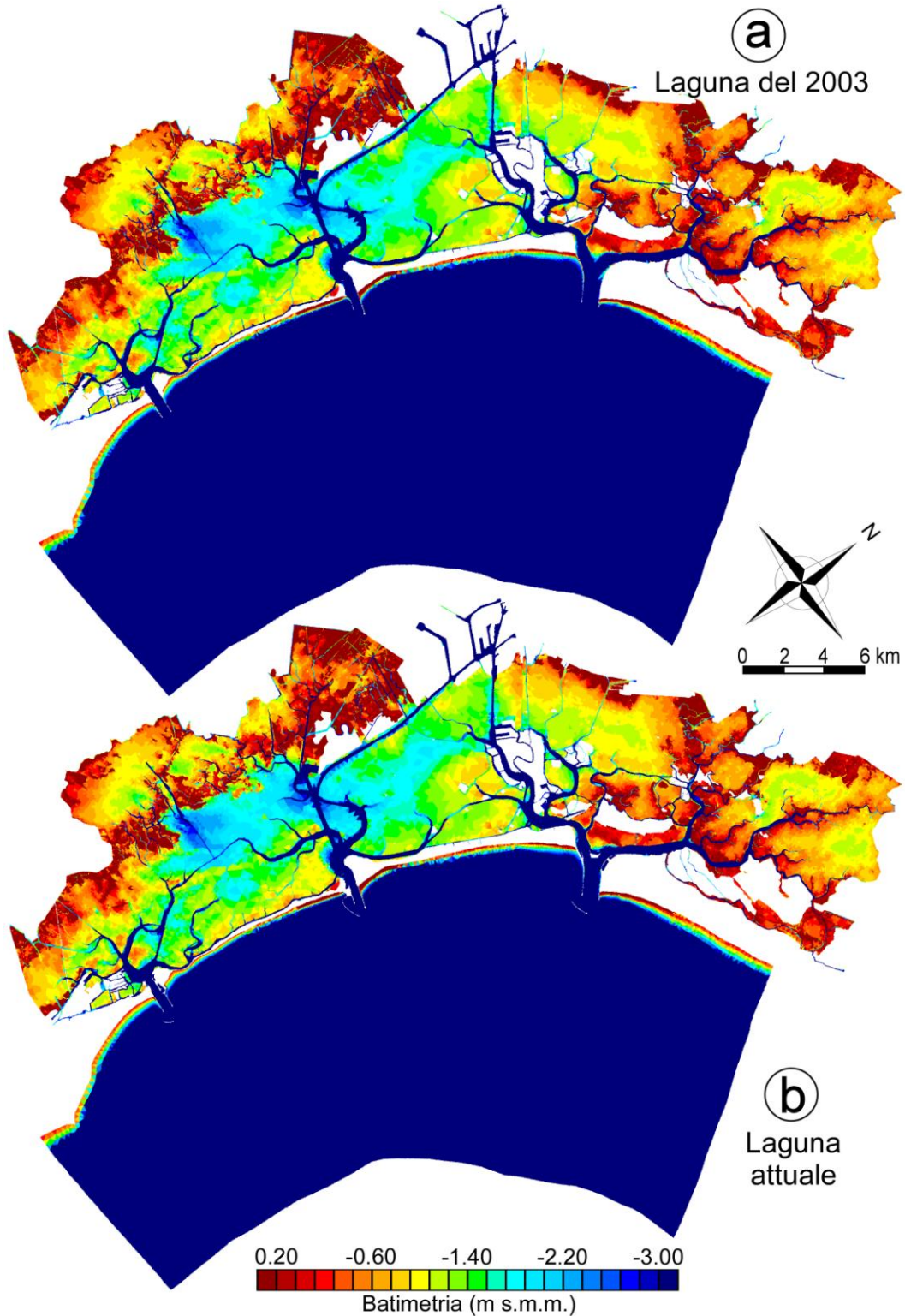


Figura 3 - Rappresentazione a scala di colori delle quote del fondo della configurazione della laguna del 2003 (a) e della sua configurazione attuale (b).

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCCHE LAGUNARI

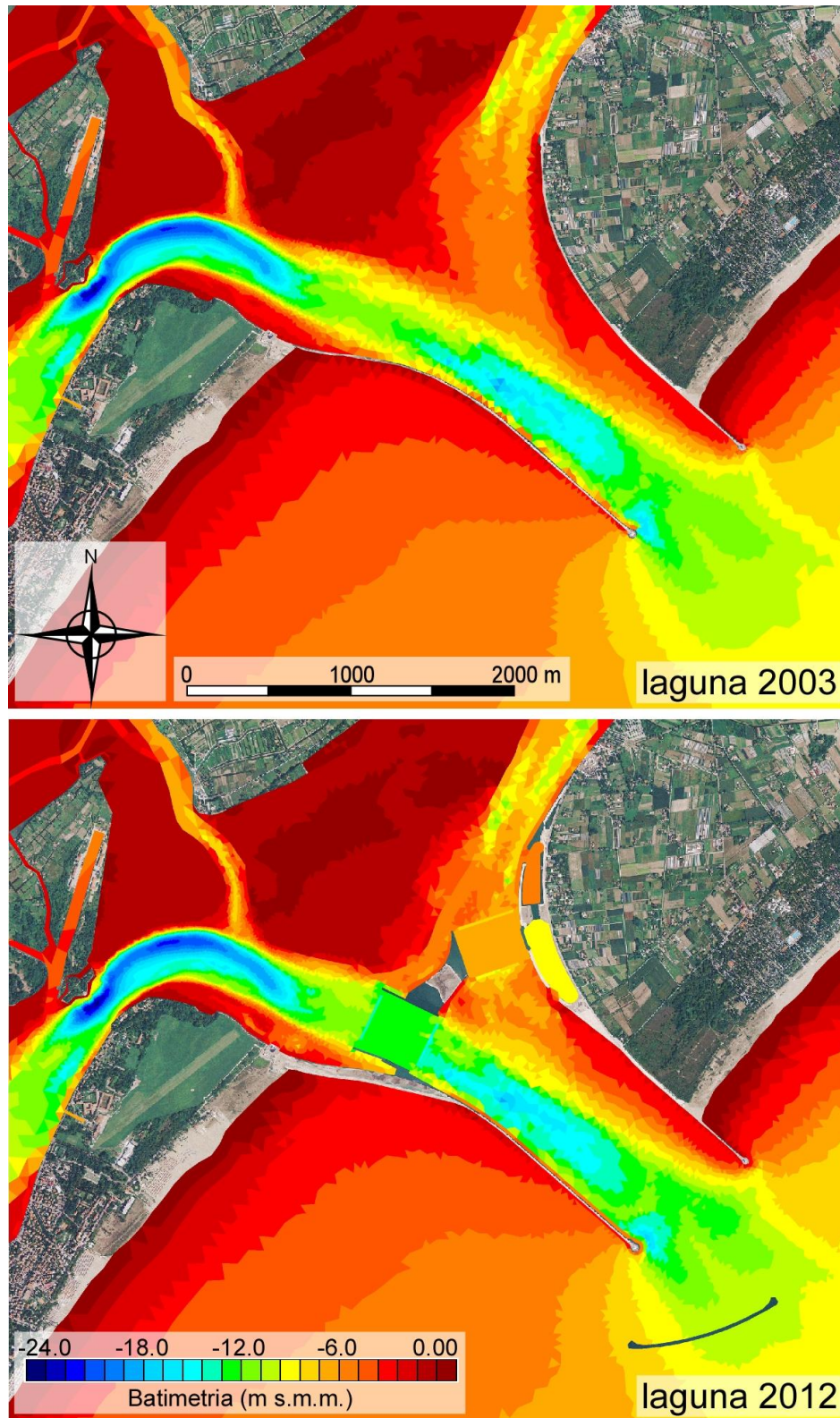


Figura 4 - Confronto tra le caratteristiche morfologiche della bocca di Lido per la configurazione del 2003 e per la sua configurazione attuale.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCCHE LAGUNARI

In Figura 4 è posta a confronto la morfologia della bocca di Lido del 2003 con la sua configurazione morfologica attuale. Come si può osservare in Figura 4, il reticolo più raffinato in corrispondenza della bocca di Lido permette una descrizione migliore delle variazioni batimetriche locali. Si fa notare che la schematizzazione della bocca di Lido rispetto a quella utilizzata nell'ambito dell'aggiornamento del Piano Morfologico è stata aggiornata anche inserendo l'antemurale (lunata) posto in mare Adriatico poco al largo della bocca stessa (Figura 4).

L'assegnazione dei coefficienti di scabrezza secondo Gauckler-Strickler, k_s , è stata realizzata utilizzando un criterio generale che assegna un diverso k_s alle diverse forme morfologiche presenti in laguna, ovvero barene, velme, bassifondi e canali (Tabella 1).

Tale distribuzione dei k_s deriva da recenti operazioni di taratura del modello idrodinamico (Magistrato alle Acque di Venezia - CORILA, 2011, Carniello et al., 2011), eseguite prendendo in considerazione le registrazioni di oltre venti stazioni mareografiche uniformemente distribuite all'interno della laguna fino alle regioni idraulicamente più lontane dalle bocche. Le operazioni di taratura e verifica del modello hanno preso in considerazione sia condizioni di marea normale sia condizioni di "acqua alta", alcune delle quali fortemente influenzate dalla presenza del vento. In Figura 5 è illustrata la distribuzione dei coefficienti di Gauckler-Strickler per i due reticoli di calcolo considerati.

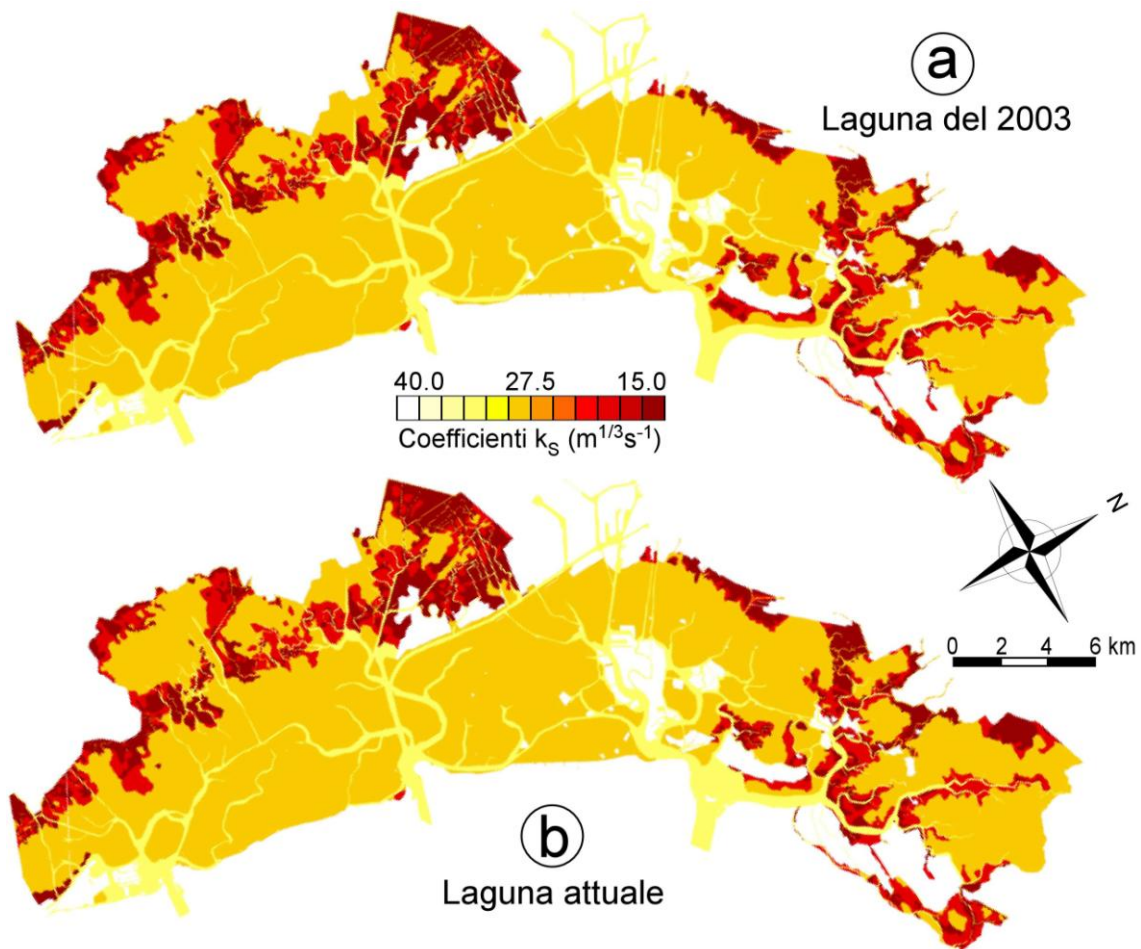


Figura 5 - Distribuzione dei coefficienti di scabrezza secondo Gauckler-Strickler k_s per la configurazione della laguna 2003 (a) e per la sua configurazione attuale (b).

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

Tabella 1 - Assegnazione dei coefficienti di scabrezza secondo Gauckler-Strickler k_S alle diverse forme morfologiche presenti in laguna.

	k_S (m ^{1/3} s ⁻¹)
Barene	15
velme	20
bassifondi	30
canali	35
mare	40

3. CAMPAGNA DI MISURE DEL 22 DICEMBRE 2011

Il 22 dicembre 2011 è stata condotta una campagna di misure lungo il canale S. Nicolò, nell'area compresa tra il Forte S. Andrea e l'isola artificiale. La campagna di misure è stata coordinata dal dott. Luca Zaggia del CNR di Venezia e vi hanno partecipato, oltre agli scriventi, l'ing. Valeria Volpe del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova e i dott. Giuliano Lorenzetti e Giorgia Manfè del CNR di Venezia.

Le condizioni metereologiche durante i rilievi erano piuttosto buone, ovvero caratterizzate da cielo sereno, da una temperatura oscillante tra i 5 e i 7°C e da sostanziale assenza di vento.

I rilievi sono iniziati alle 6 del mattino del 22 dicembre e si sono protratti fino alle 14 della medesima giornata, abbracciando tutta la fase di marea calante (Figura 6).

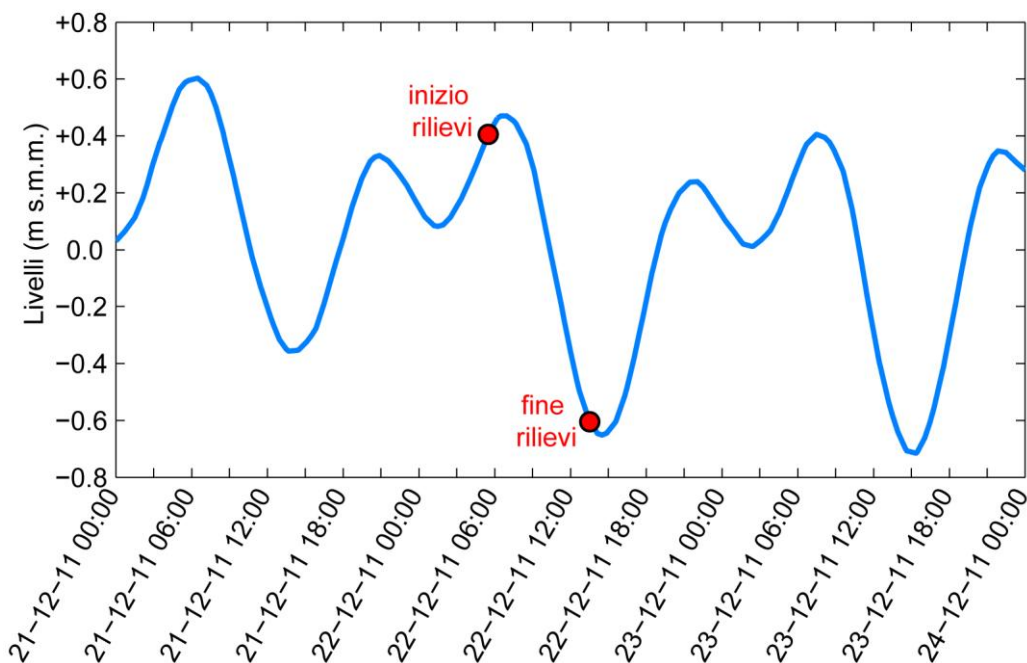


Figura 6 - Andamento dei livelli di marea nei giorni a cavallo della campagna di misure. I livelli sono riferiti al medio mare Genova 1942.

Nel corso della campagna di misure sono stati condotti prevalentemente rilievi correntometrici con due tecniche diverse, una stanziale e l'altra itinerante.

Nel primo caso sono stati installati tre correntometri S4, in grado di registrare in continuo il modulo e la direzione della velocità locale. Gli S4 sono stati installati sul bassofondo adiacente al canale S. Nicolò durante l'alta marea, nelle tre posizioni indicate in Figura 7 che, almeno secondo le intenzioni dovevano essere rappresentative di un diverso grado di copertura delle fanerogame (idealmente: massima copertura, copertura intermedia e assenza di vegetazione), così da poter individuare eventuali effetti dovuti alla vegetazione sull'idrodinamica locale. Si osservi, tuttavia, che la classificazione sul grado di copertura da parte della vegetazione è stata condotta in presenza di acqua e, pertanto non ha potuto essere precisa. A riprova di tale difficoltà il progressivo scoprimento della superficie del bassofondo durante la fase di riflusso ha messo in evidenza come le effettive differenze nel grado di copertura delle fanerogame per i tre siti prescelti non fossero, in

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCCHE LAGUNARI

realtà, così evidenti essendo tutte e tre le stazioni caratterizzate dalla presenza di vegetazione con gradi di copertura solo leggermente diversi.

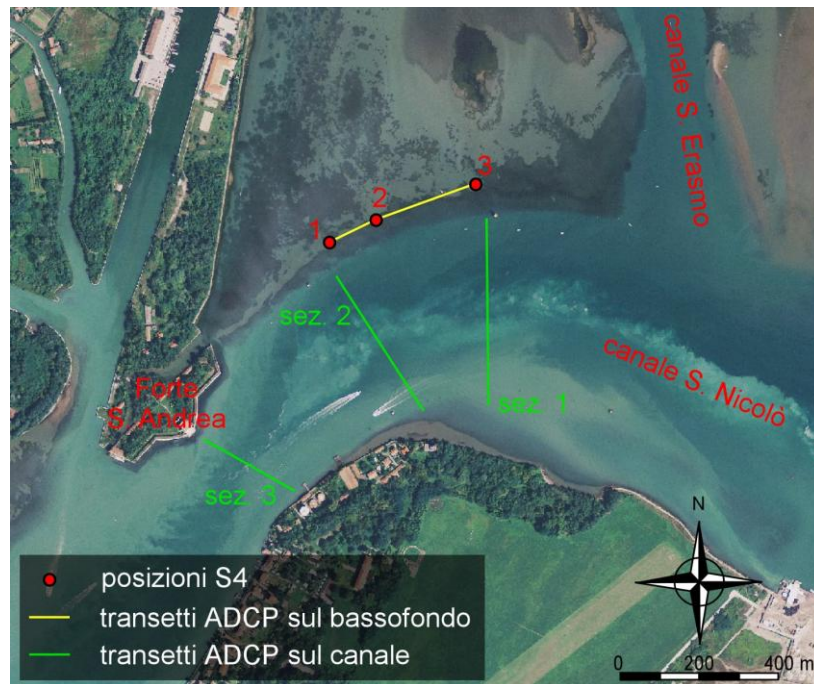


Figura 7 - Riassunto dei rilievi correntometrici condotti nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011.

A tali rilievi sono state associate anche misure ADCP, che permettono di rappresentare la variazione spaziale dell'intensità e della direzione delle correnti sul bassofondo. Le misure ADCP sono state realizzate lungo i trasetti di collegamento tra i punti di posizionamento degli S4 (Figura 7) e sono state ripetute più volte durante tutta la fase di riflusso della marea.

Altri rilievi correntometrici ADCP sono stati condotti lungo alcune sezioni del canale S. Nicolò, anch'esse rappresentate in Figura 7, e ripetute frequentemente nel corso dell'intera fase di riflusso della marea. Tali misure consentono di determinare la distribuzione delle velocità all'interno della sezione stessa e, da questa, la portata fluente.

Nel corso della campagna di misure, inoltre, sono state lanciate alcune droghe in corrispondenza del bassofondo, allo scopo di rilevare, secondo un approccio lagrangiano, il flusso al di sopra del bassofondo stesso. La posizione di tali galleggianti è stata infatti seguita nel tempo ricostruendone la traiettoria per mezzo di un sistema di posizionamento satellitare (GPS).

I dati raccolti nel corso della campagna di misure sono stati utilizzati nell'ambito della presente attività per confrontarli con i risultati numerici forniti dal modello al fine di verificare ulteriormente la capacità del modello stesso di riprodurre in modo attendibile l'idrodinamica lagunare.

4. ANALISI DEI RISULTATI

4.1 Confronto con i dati rilevati nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011.

Prima di utilizzare il modello numerico per valutare le eventuali variazioni introdotte dalla realizzazione delle opere alle bocche e quindi prima di analizzare e confrontare i risultati relativi a simulazioni realizzate utilizzando le due diverse schematizzazioni messe a punto (ovvero la laguna 2003 e la laguna attuale), è stata condotta un'ulteriore verifica della capacità del modello di riprodurre il campo di moto idrodinamico considerando la laguna nella sua configurazione attuale. Tale verifica è stata realizzata confrontando i dati rilevati nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011 con i risultati ottenuti mediante il modello matematico.

Le condizioni meteorologiche piuttosto stabili e il tempo decisamente sereno che hanno caratterizzato il 22 dicembre 2011 hanno permesso di escludere qualsiasi effetto dovuto al vento sulla propagazione della marea. Per questo motivo, le simulazioni sono state condotte imponendo come sole condizioni al contorno i livelli di marea registrati in mare alla Piattaforma CNR nei giorni delle misure (Figura 8). Tali livelli sono stati imposti su tutti i nodi che costituiscono il limite a mare del dominio di calcolo.

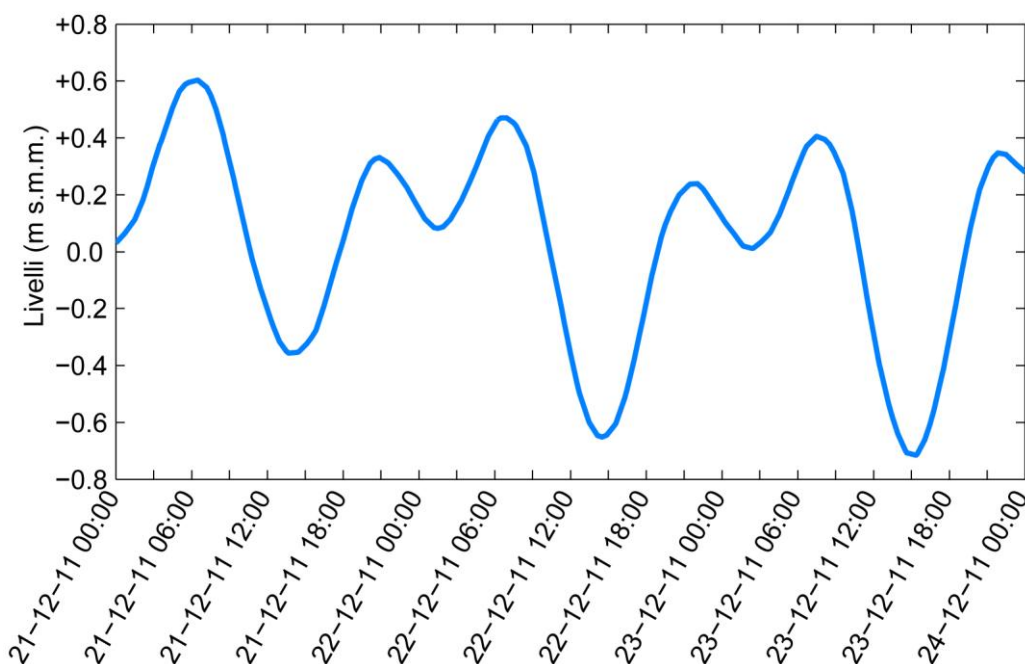


Figura 8 - Andamento dei livelli di marea registrata alla Piattaforma CNR a cavallo dei giorni della campagna di misure di dicembre 2011 e imposta come condizione al contorno al modello idrodinamico. I livelli sono riferiti al *medio mare Genova 1942*.

Allo scopo di confrontare i livelli calcolati con il modello e quelli misurati in laguna nei giorni dei rilievi sono state considerate le registrazioni mareografiche di alcune stazioni gestite dall'I.C.P.S.M. (Istituzione Centro Previsioni e Segnalazioni Maree del Comune di Venezia) all'interno della laguna di Venezia (Figura 9).

Per prima cosa è stata verificata la capacità del modello di riprodurre correttamente la marea in prossimità delle tre bocche di porto (Figura 10). Successivamente, il confronto dei livelli è stato realizzato in corrispondenza di tre stazioni situate nel bacino dominato dalla bocca di Lido e

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCCHE LAGUNARI

collocate a varie distanze dalla bocca stessa, per le quali fossero disponibili le registrazioni mareografiche a cavallo del 22 dicembre 2011 (Figura 9). Tali stazioni sono quelle di Punta della Salute, Burano e Saline nord (Figura 11). Come risulta evidente dalla Figura 10 e dalla Figura 11, il modello riproduce correttamente i livelli sia davanti alle bocche che all'interno del bacino.

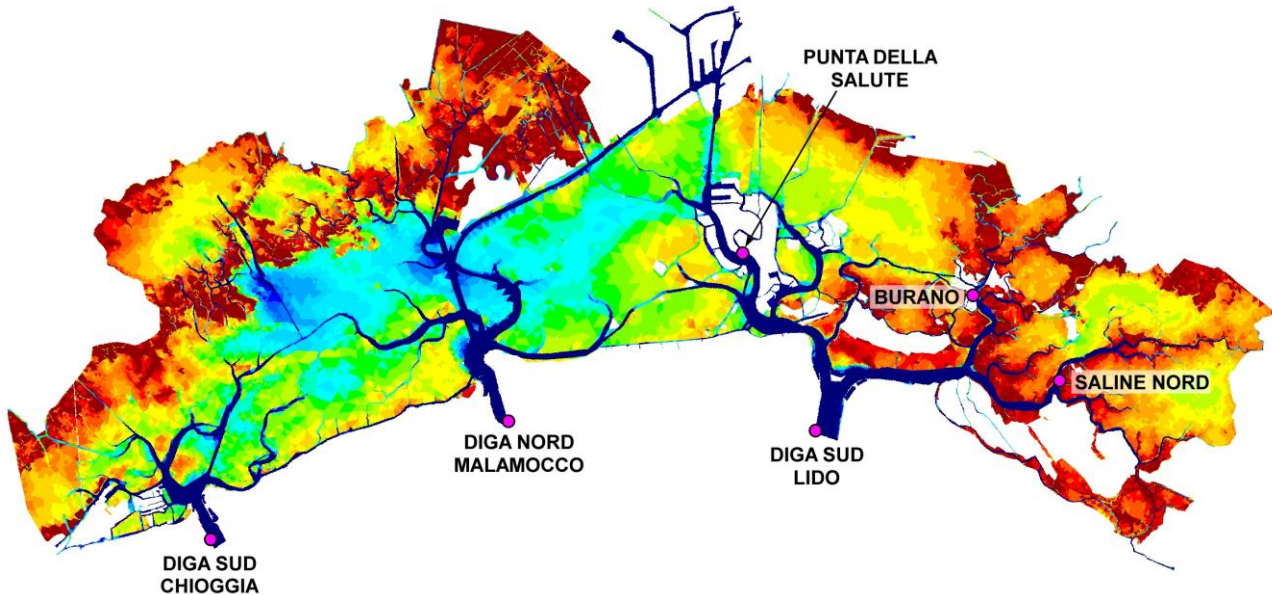


Figura 9 - Posizioni delle stazioni mareografiche in corrispondenza delle quali sono stati realizzati i confronti dei livelli.

Come già descritto al Cap. 3, nel corso della campagna di misure sono stati realizzati dei rilievi correntometrici mediante ADCP lungo tre sezioni del canale S. Nicolò in prossimità del forte S. Andrea (Figura 7), i quali hanno permesso di calcolare la portata fluente attraverso le sezioni in vari istanti della fase di riflusso della marea. In particolare, i rilievi condotti lungo la sezione 1 hanno permesso di ricostruire la portata fluente durante la prima fase di marea calante, mentre le portate nelle altre due sezioni, che sono state rilevate unicamente in un intorno della condizione di massimo riflusso, hanno consentito il confronto delle sole portate massime uscenti.

Nella Figura 12 è illustrato il confronto tra le portate calcolate con il modello e le portate misurate nelle tre sezioni considerate. Ricordando che il confronto sulle portate è sicuramente un test più impegnativo rispetto al confronto sui livelli, osservando i grafici si può notare come l'accordo sia, nel complesso, più che soddisfacente.

Considerando le misure di velocità eseguite mediante i correntometri S4 si può notare come le velocità massime sul bassofondo siano dell'ordine dei 20 cm/s (Figura 13). Le velocità calcolate con il modello matematico mostrano una buona corrispondenza con le velocità rilevate nel corso della prima parte della campagna di misure, ovvero tra le ore 6.00 e le ore 9.00 del 22 dicembre (Figura 13). I picchi di velocità evidenziati dai dati rilevati durante questa fase sono imputabili alle onde generate dal passaggio dei natanti lungo il canale S. Nicolò. Il confronto tra le velocità calcolate con il modello e le velocità rilevate con gli S4 tra le 9.00 e le 12.00 del 22 dicembre risulta, invece, meno soddisfacente (Figura 13). La discrepanza tra i valori calcolati e misurati nella seconda fase dei rilievi è da imputare al progressivo asciugamento del bassofondo osservato durante la campagna di misure e non adeguatamente riprodotto mediante il modello matematico. Si osservi che la progressiva emersione del bassofondo, iniziata intorno alle 9.00-9.30 del 22 dicembre, risulta confermata anche dagli evidenti disturbi nel segnale rilevato dagli strumenti a partire da questi orari (Figura 13).

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

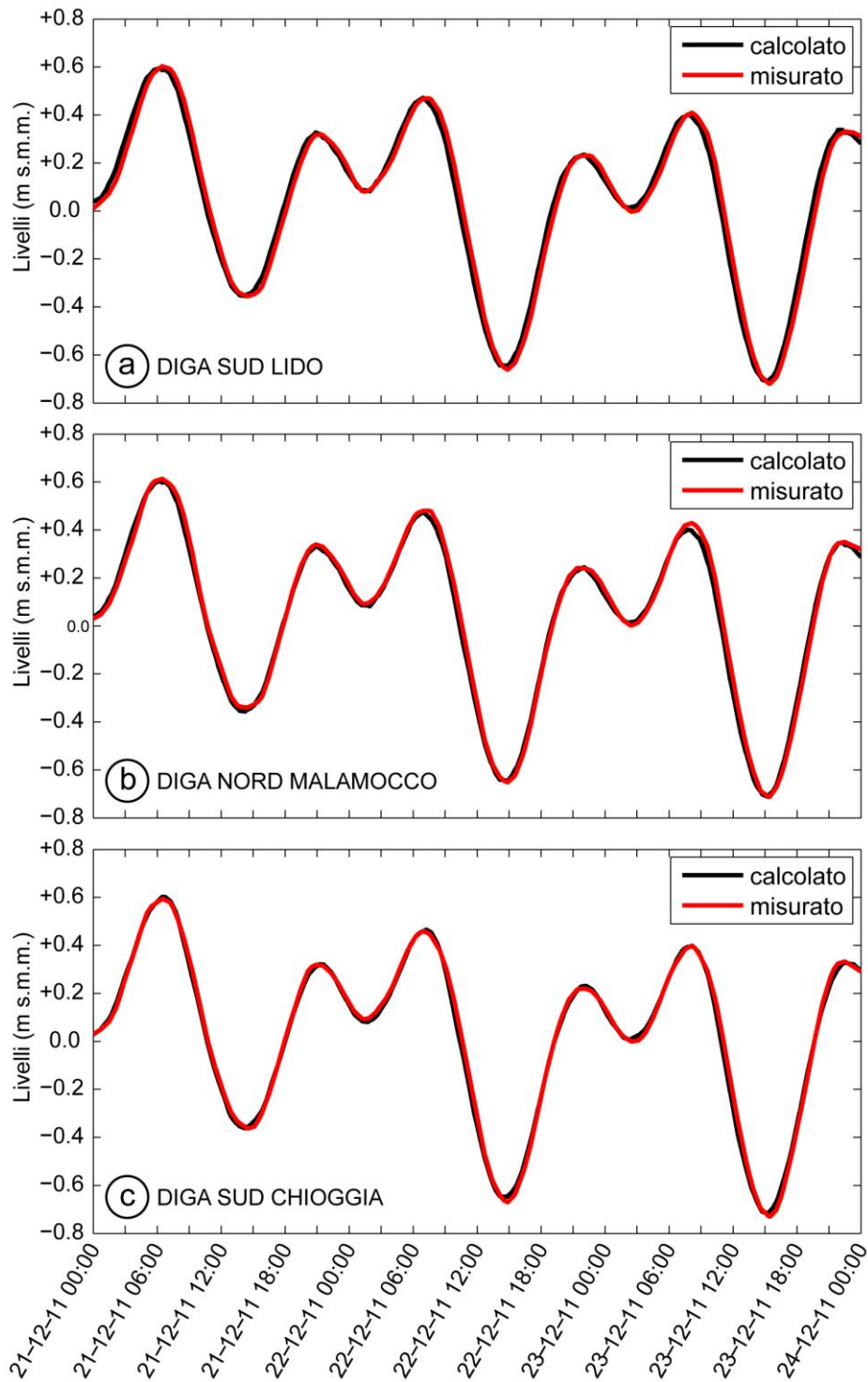


Figura 10 - Confronto tra i livelli di marea registrati alle stazioni mareografiche collocate (a) sulla diga sud della bocca di Lido, (b) sulla diga nord della bocca di Malamocco e (c) sulla diga sud della bocca di Chioggia a cavallo dei giorni della campagna di misure di dicembre 2011. I livelli sono riferiti al *medio mare Genova 1942*.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

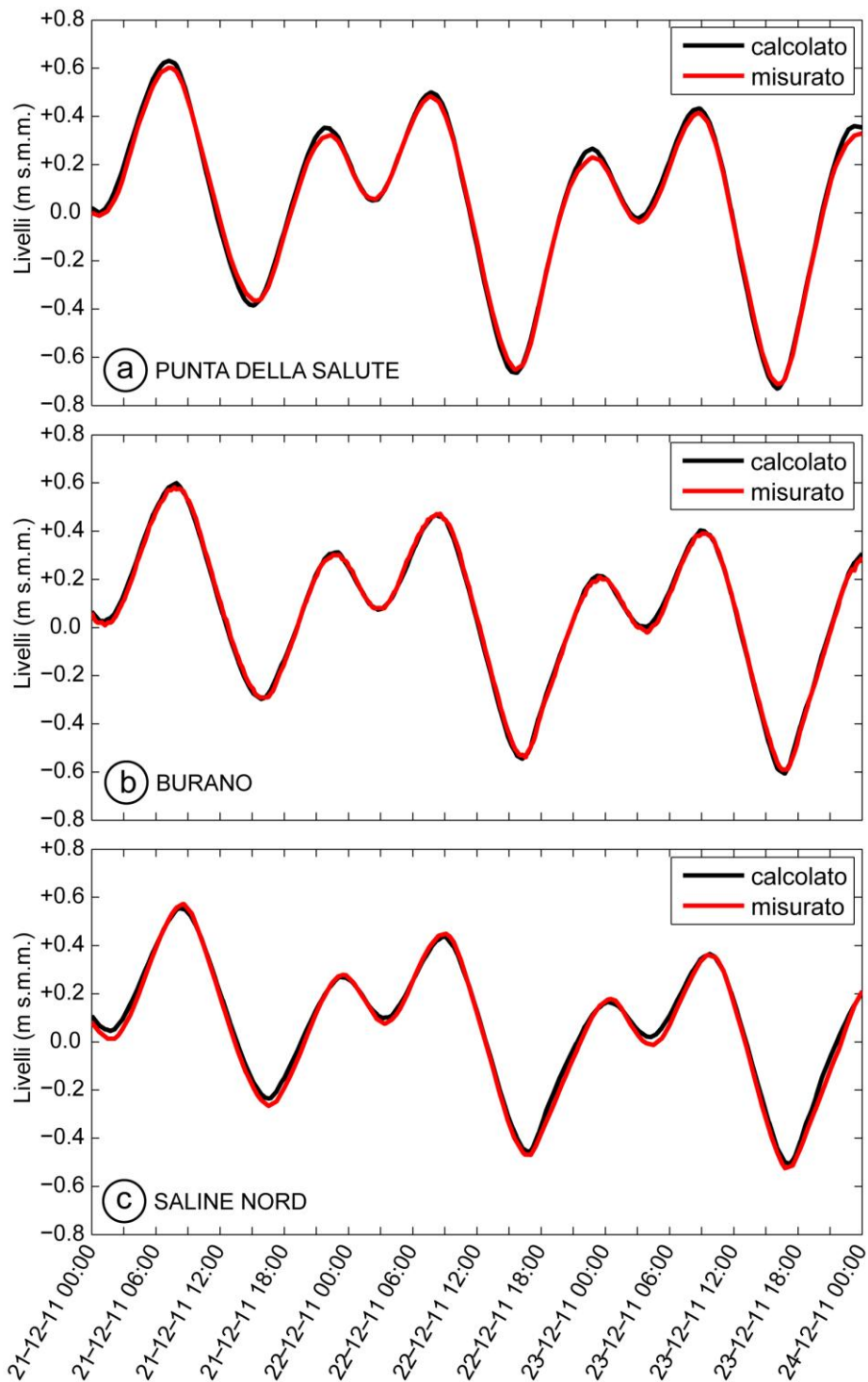


Figura 11 - Confronto tra i livelli di marea registrati alle stazioni mareografiche di (a) Punta della Salute, (b) Burano e (c) Saline nord a cavallo dei giorni della campagna di misure di dicembre 2011. I livelli sono riferiti al medio mare Genova 1942.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

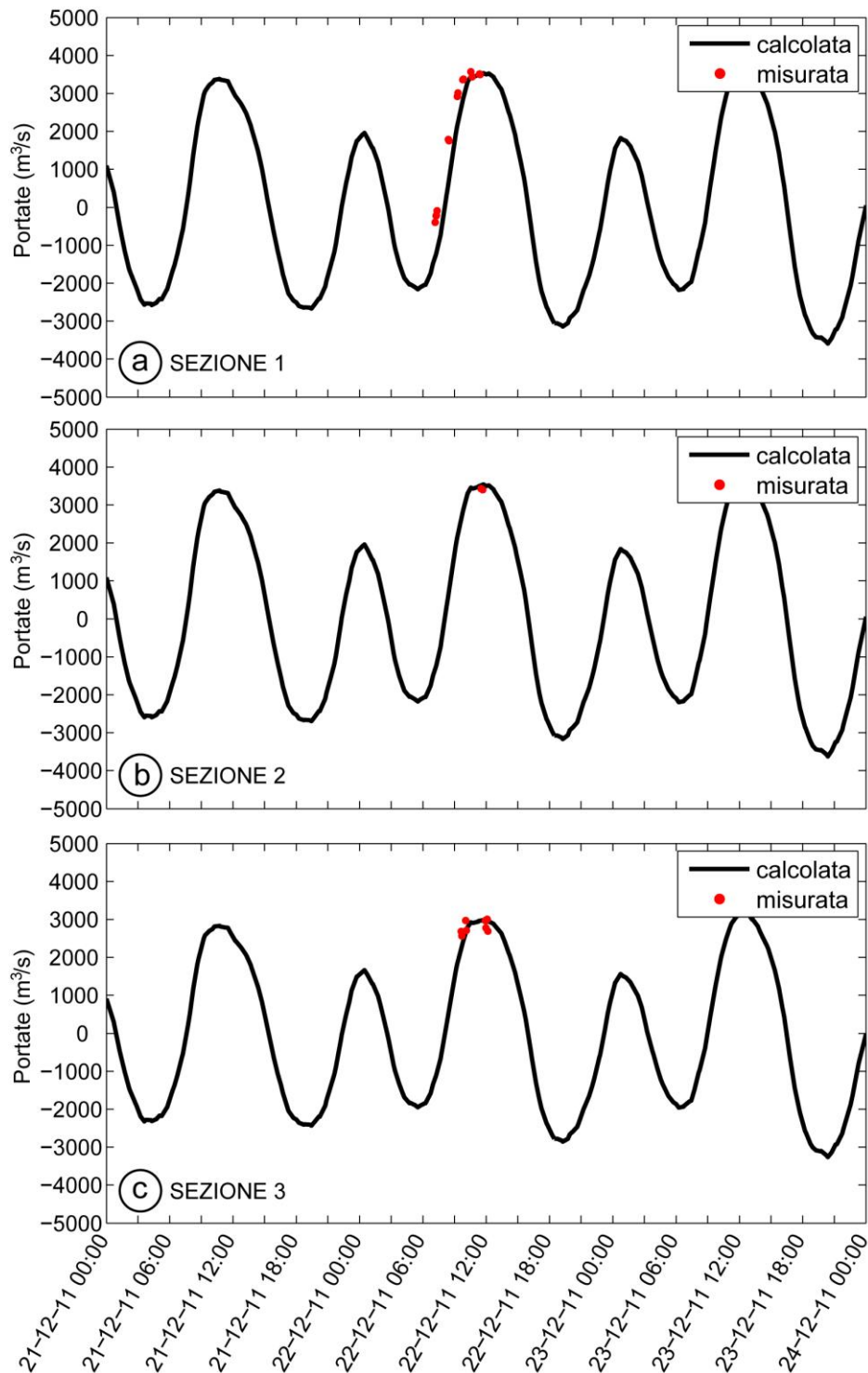


Figura 12 - Confronto tra le portate misurate nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011 e le portate calcolate con il modello in corrispondenza della (a) sezione 1, della (b) sezione 2 e della (c) sezione 3 indicate in Figura 7. Le portate positive sono da intendersi come uscenti dalla bocca, mentre quelle negative sono da intendersi come entranti attraverso la bocca.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

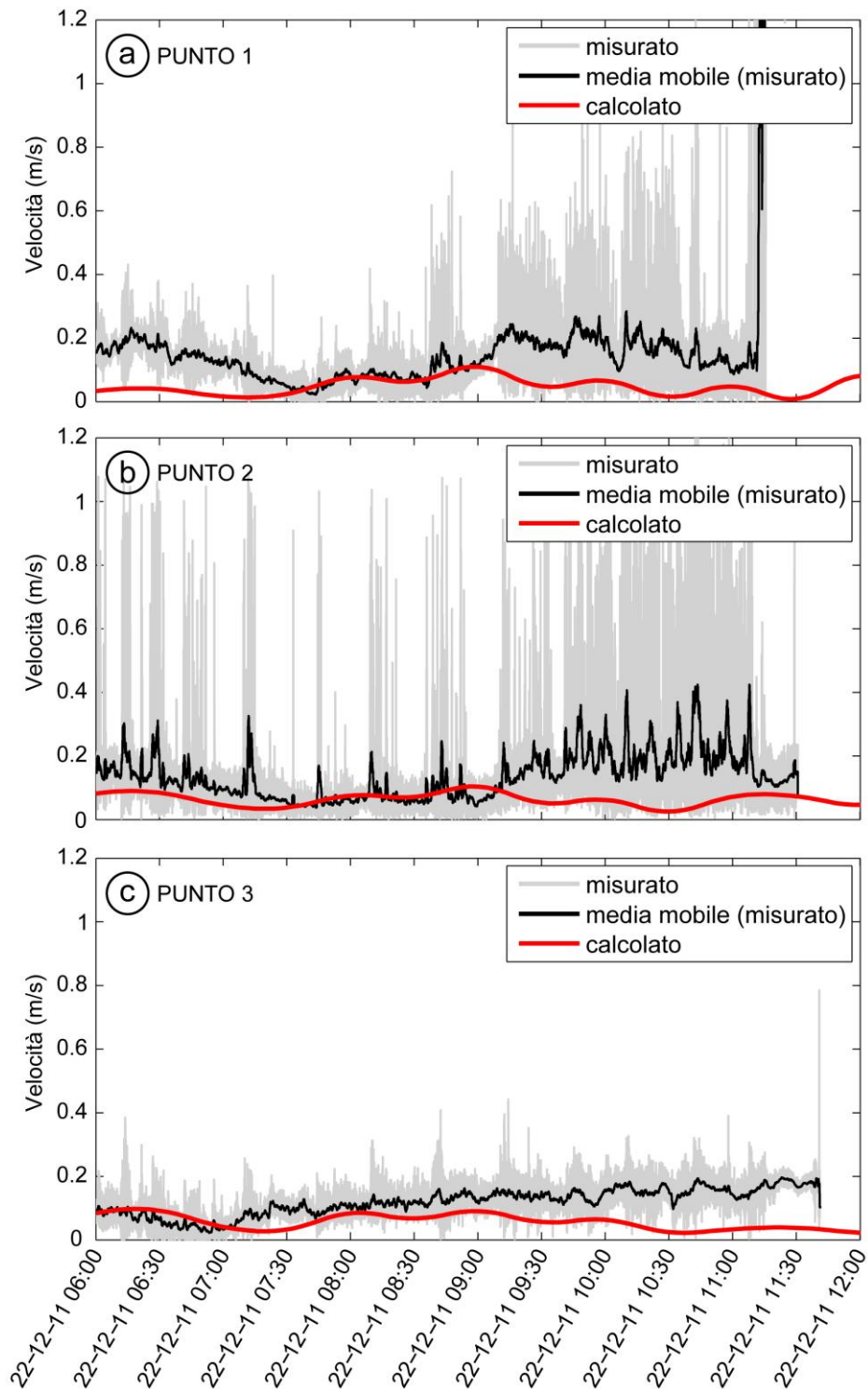


Figura 13 - Confronto tra le velocità misurate con i correntometri S4 nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011 e le velocità calcolate con il modello in corrispondenza del (a) punto 1, del (b) punto 2 e del (c) punto 3 indicati in Figura 7.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCCHE LAGUNARI

Avendo già dimostrato sia in questa sede che in diversi lavori precedenti la capacità del modello di riprodurre correttamente i livelli in vari punti della laguna, la mancata emersione del bassofondo può ragionevolmente essere imputabile alla non corretta quotatura del reticolo di calcolo in corrispondenza del bassofondo sul quale sono state condotte le misure. In particolare, la batimetria utilizzata per quotare tale bassofondo appartiene al sopracitato rilievo del 2003 e risulta molto meno fitta rispetto a quella, più recente, utilizzata per quotare i canali di bocca (Figura 14). La precisione ufficialmente attribuita alla tecnica di rilievo utilizzata per le aree di bassofondo nella realizzazione della batimetria del 2003 è compresa in un range di ± 5 cm (Consorzio Venezia Nuova - Technital, 2004, Carniello et al., 2009). Tale incertezza, generalmente accettabile per quanto riguarda le misure altimetriche, può produrre differenze non trascurabili nella fase iniziale di emersione e sommersione di tali aree. In particolare, l'impressione che si è avuta ricordando quanto osservato durante la campagna di misura è che il bassofondo in esame si asciugasse con circa un'ora di anticipo rispetto a quanto suggerito dal modello. Tale discrepanza, che si traduce evidentemente anche sui risultati espressi in termini di velocità, è decisamente compatibile con un errore dell'ordine della decina di centimetri nella quotatura del reticolo.

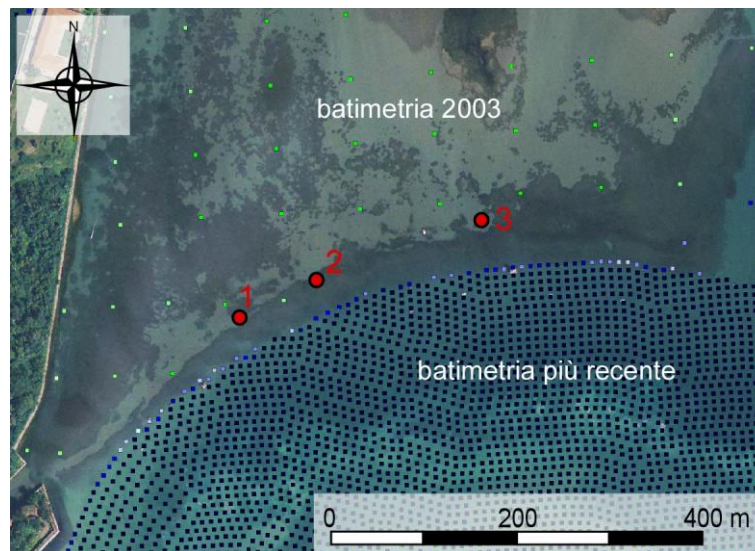


Figura 14 - Confronto tra il grado di infittimento della batimetria più recente fornita dal Co.Ri.La. per quotare la bocca di Lido e quello della batimetria del 2003 utilizzata per quotare il bassofondo sul quale sono stati condotti i rilievi correntometrici. In rosso sono indicate le posizioni dei correntometri S4 installati sul bassofondo.

Il confronto con le velocità rilevate sul bassofondo mediante ADCP (Figura 7) risulta, invece, estremamente complesso dal punto di vista operativo, essendo tale misura funzione sia dello spazio che del tempo, e non contribuirebbe comunque a fornire informazioni più complete di quelle già esposte sulla capacità del modello matematico di riprodurre correttamente il campo di moto idrodinamico. Si è pertanto deciso di non analizzare nel dettaglio tali risultati, limitandosi a sottolineare che l'osservazione dei dati sperimentali stessi, anche per quanto messo in luce in precedenza relativamente alle modeste ed estremamente gradualmente variazioni di densità della vegetazione lungo il transetto analizzato (Figura 7), non sembra evidenziare particolari effetti sull'idrodinamica locale legati ad un'eventuale diversa tipologia e/o grado di copertura della vegetazione.

Passando a considerare le misure ottenute con le droghe, nelle Figg. 15-18 sono poste a confronto le traiettorie delle droghe stesse, monitorate nel corso della campagna di misure, e il campo di

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCCHE LAGUNARI

moto idrodinamico calcolato con il modello negli stessi orari. Essendo le traiettorie percorse in tempi piuttosto contenuti (cioè qualche minuto, ad eccezione dell'ultimo caso analizzato) il confronto tra le traiettorie e i campi di moto è da ritenersi significativo. Come si può osservare dalle immagini, i campi di moto ricostruiti con il modello sono in grado di descrivere decisamente bene i percorsi seguiti dalle droghe. Particolarmente significativo risulta essere il confronto tra il campo cinematico e la traiettoria percorsa dall'ultima droga (Figura 18). Tale traiettoria risulta essere decisamente tormentata e solo la sovrapposizione con il campo di moto calcolato con il modello ne spiega il motivo, legato alla formazione di un vortice generato dalla singolarità idrodinamica indotta dalla presenza del Forte di S. Andrea.

Alla luce anche dei risultati esposti si può concludere che il modello matematico è in grado di riprodurre correttamente e in modo sufficientemente dettagliato il campo di moto idrodinamico in laguna e soprattutto in corrispondenza della bocca di Lido.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

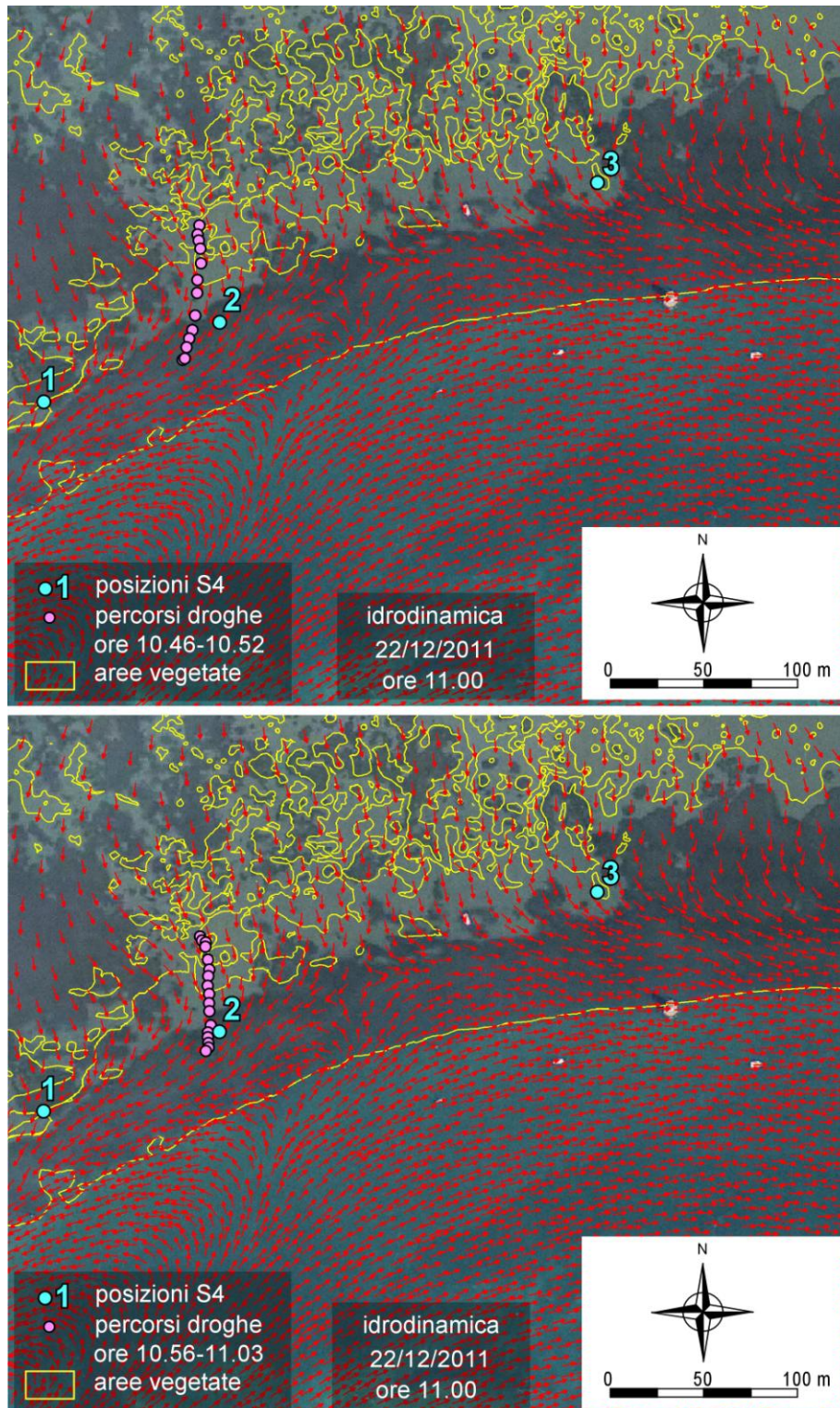


Figura 15 - Confronto tra i percorsi seguiti dalle droghe lagrangiane nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011 e il campo di moto idrodinamico calcolato con il modello numerico (freccie rosse) negli stessi orari.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

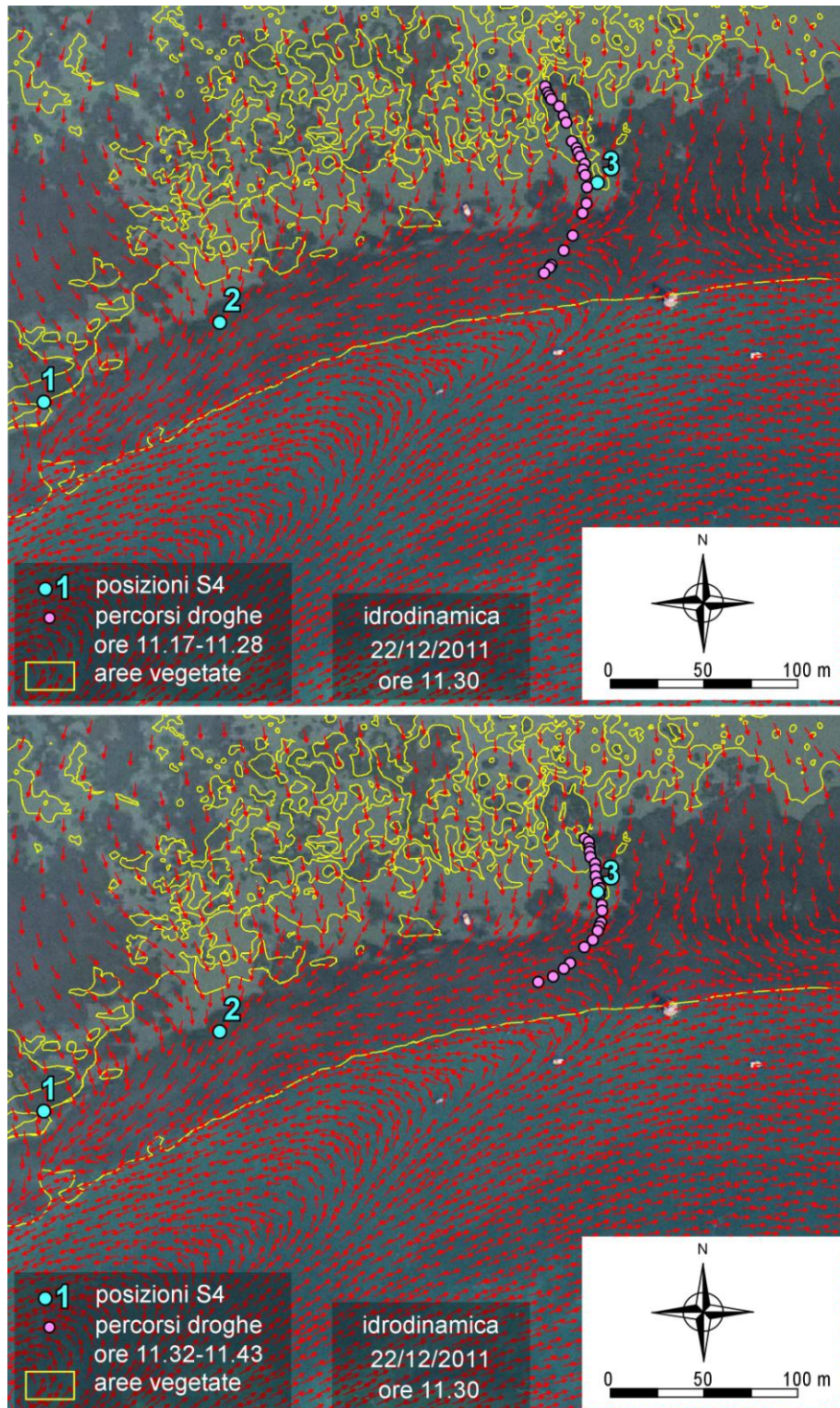


Figura 16 - Confronto tra i percorsi seguiti dalle droghe lagrangiane nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011 e il campo di moto idrodinamico calcolato con il modello numerico (freccie rosse) negli stessi orari.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCCHE LAGUNARI

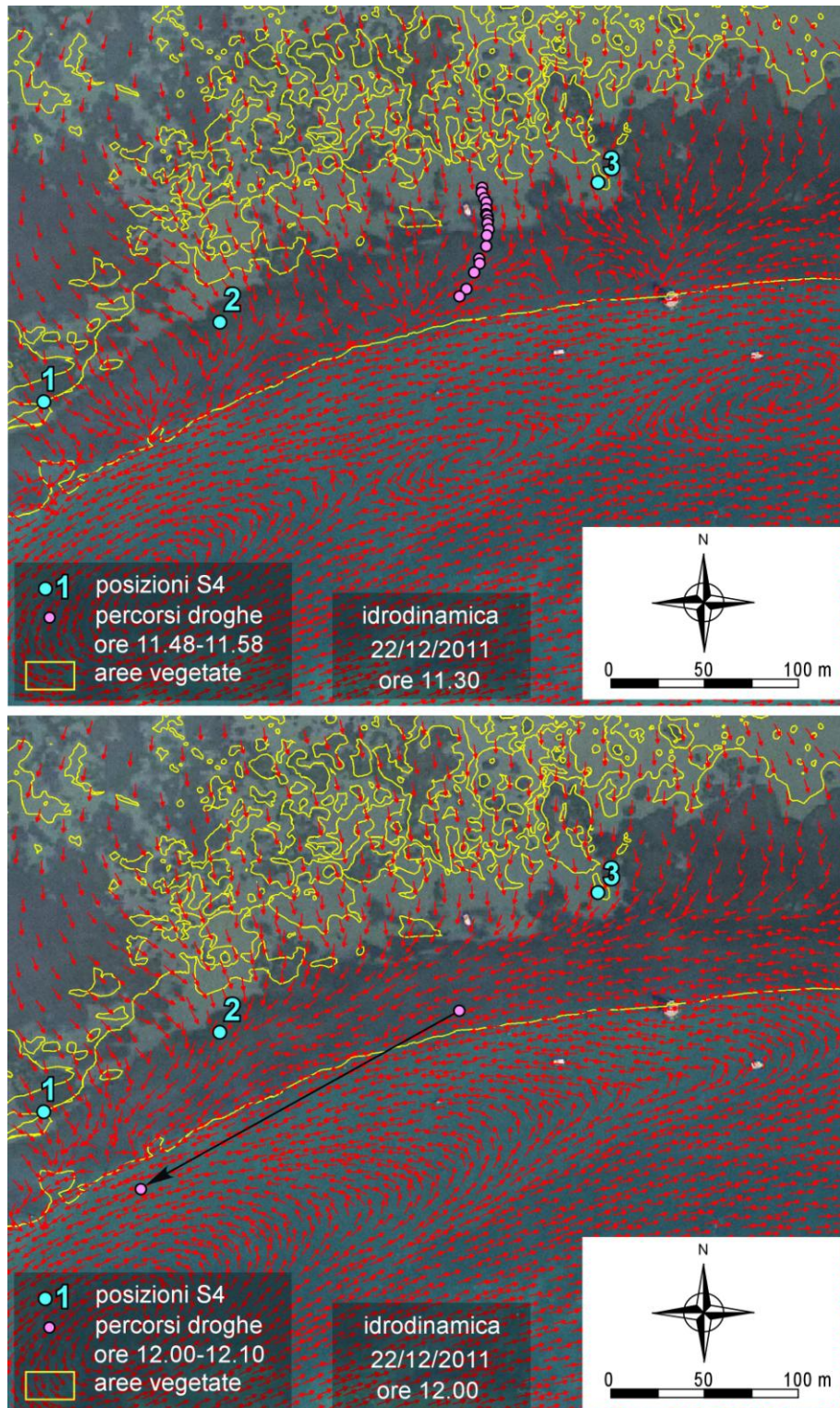


Figura 17 - Confronto tra i percorsi seguiti dalle droghe lagrangiane nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011 e il campo di moto idrodinamico calcolato con il modello numerico (freccie rosse) negli stessi orari.

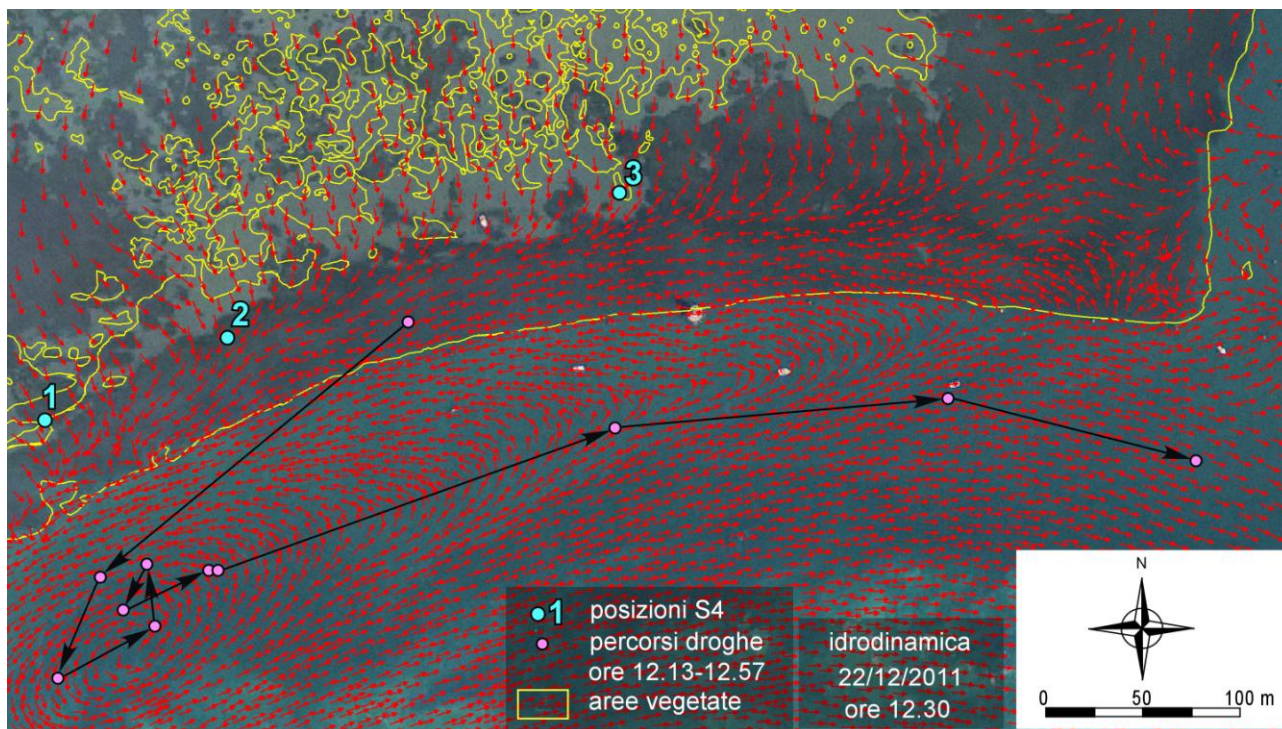


Figura 18 - Confronto tra i percorsi seguiti dalle droghe lagrangiane nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011 e il campo di moto idrodinamico calcolato con il modello numerico (freccette rosse) negli stessi orari.

4.2 Confronto tra le configurazioni precedente e successiva alla costruzione delle opere alle bocche.

Il confronto tra il campo di moto idrodinamico rappresentativo della configurazione precedente alla costruzione delle opere (laguna 2003) e quello rappresentativo della configurazione attuale è stato realizzato imponendo come condizione al contorno al modello lungo la frontiera esterna di entrambi i reticoli di calcolo la marea registrata in mare alla piattaforma CNR tra il 21 e il 23 dicembre 2011 (Figura 8).

In un primo momento è stato analizzato il comportamento idrodinamico della laguna prodotto dalle sole correnti di marea e, quindi, in assenza di vento.

In Figura 19 e in Figura 20 sono illustrati i confronti tra i livelli calcolati per le due diverse configurazioni della laguna nelle posizioni indicate in Figura 9. L'analisi dei grafici non evidenzia differenze di rilievo tra la configurazione del 2003 e quella del 2012 né in prossimità delle bocche né nei punti più interni del bacino dominato dalla bocca di Lido.

Qualche differenza emerge, invece, dal confronto delle portate fluenti attraverso le tre bocche di porto nelle due configurazioni analizzate (Figura 21). In particolare, per la laguna nella sua configurazione attuale si osserva un incremento della portata massima in uscita dalla bocca di Lido di circa $220 \text{ m}^3/\text{s}$ rispetto a quella della laguna 2003, mentre la portata massima entrante resta sostanzialmente invariata.

Il comportamento della bocca di Lido risulta in controtendenza rispetto alle altre due bocche, le cui portate tendono a ridursi di circa $800 \text{ m}^3/\text{s}$ e $230 \text{ m}^3/\text{s}$ nelle fasi rispettivamente di massimo riflusso e massimo flusso alla bocca di Malamocco e di circa $130 \text{ m}^3/\text{s}$ in condizioni di massimo flusso alla bocca di Chioggia (Figura 21). La costruzione delle opere alle bocche di Chioggia e Malamocco, infatti, ha favorito un immediato restringimento delle sezioni su fondali equivalenti a

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

quelli del 2003, comportando, nel breve periodo, una riduzione della portata scambiata attraverso le due bocche.

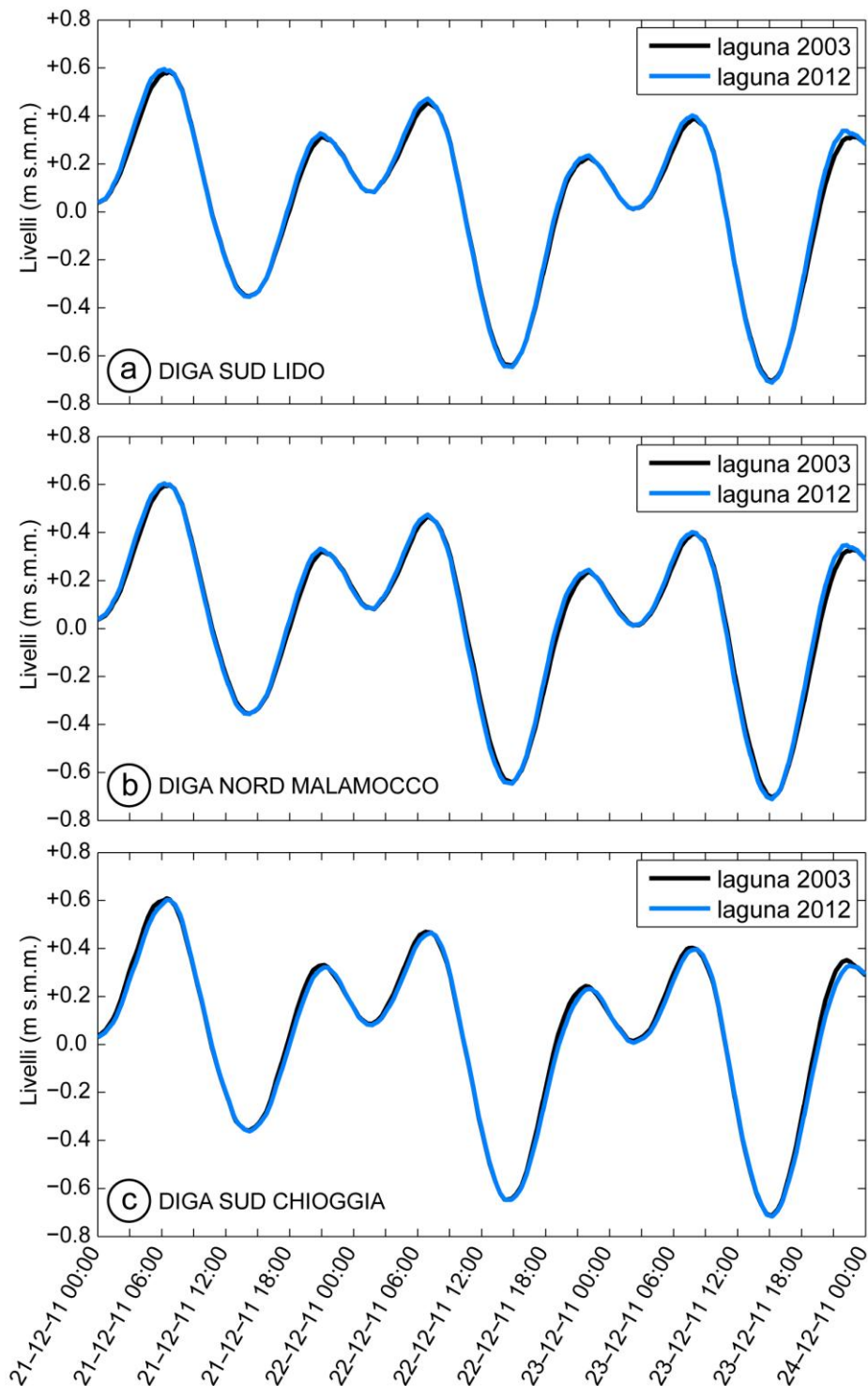


Figura 19 - Confronto tra i livelli calcolati con il modello alla (a) bocca di Lido, alla (b) bocca di Malamocco e alla (c) bocca di Chioggia per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere alle bocche. I livelli sono riferiti al *medio mare Genova 1942*.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

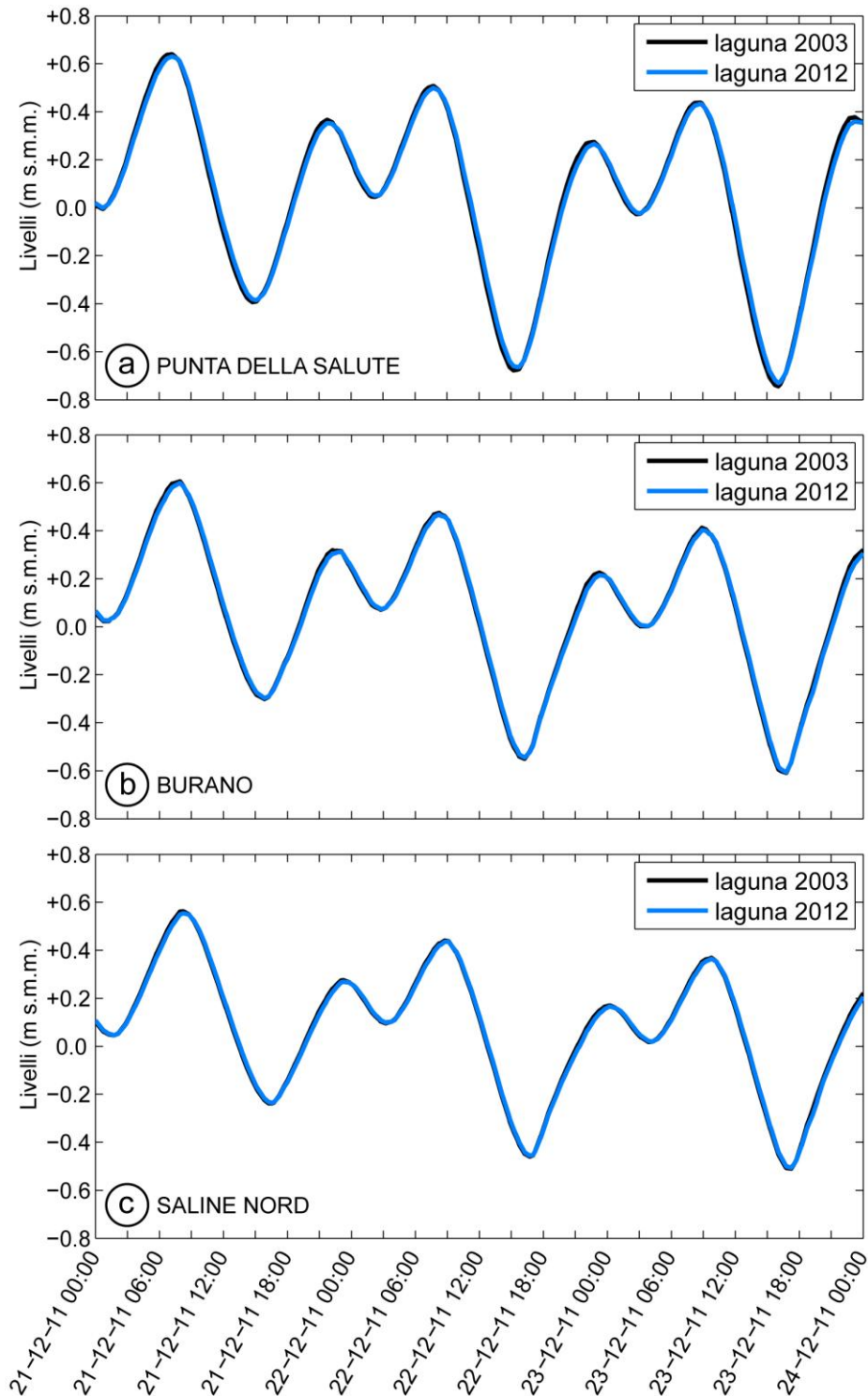


Figura 20 - Confronto tra i livelli calcolati con il modello a (a) Punta della Salute, (b) Burano e (c) Saline nord per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere alle bocche. I livelli sono riferiti al *medio mare Genova 1942*.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

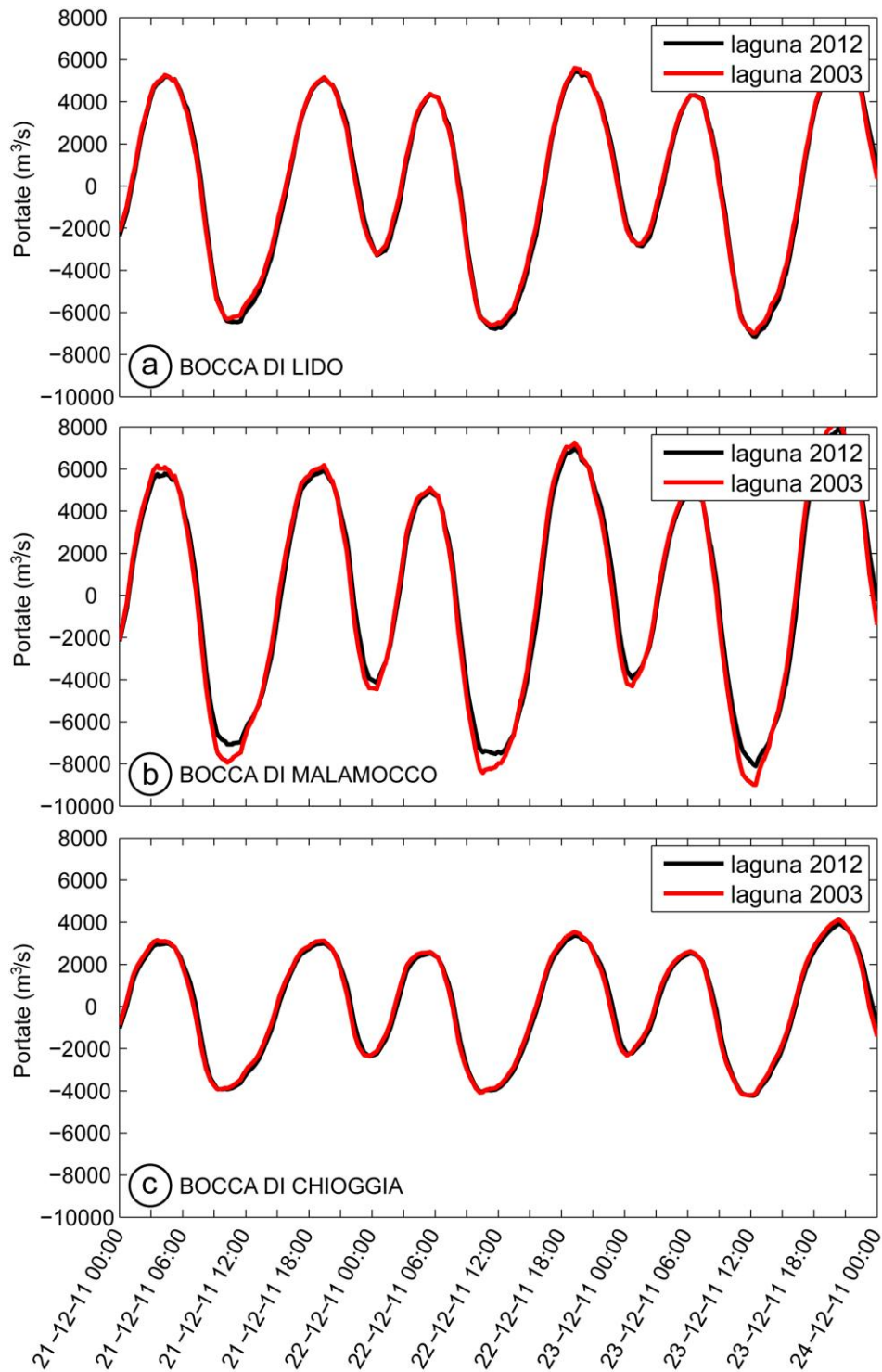


Figura 21 - Confronto tra le portate calcolate con il modello alle tre bocche per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte. Le portate positive sono entranti, mentre quelle negative sono uscenti.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

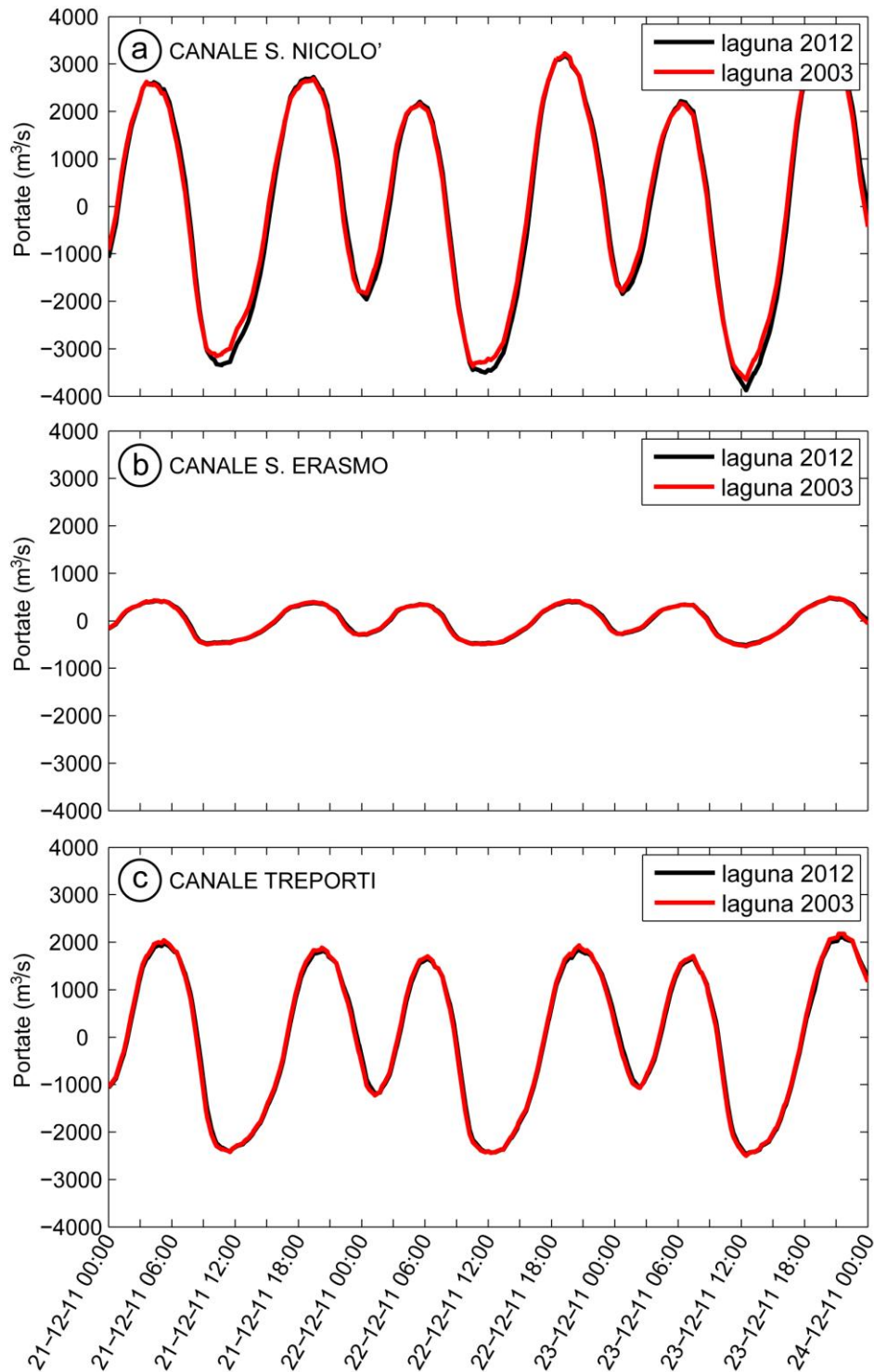


Figura 22 - Confronto tra le portate calcolate con il modello lungo i canali (a) S. Nicolò, (b) S. Erasmo e (c) Treporti per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte. Le portate positive sono entranti, mentre quelle negative sono uscenti.

L'incremento della portata massima in uscita evidenziato alla bocca di Lido si concentra principalmente lungo il canale S. Nicolò (Figura 22), dove la costruzione delle opere ha favorito una maggior canalizzazione del flusso durante la fase di marea uscente. Tale considerazione è inoltre confermata dall'incremento generalizzato delle velocità massime lungo i canali principali che si dipartono dalla bocca di Lido (Figura 23). I confronti tra i campi di velocità istantanei caratteristici delle condizioni di massimo flusso e riflusso alla bocca di Lido sono riportati in Appendice.

Nelle Figure 24-26 sono illustrate le differenze tra gli involuppi dei campi di velocità durante un intero ciclo di marea (Figura 24) e nelle fasi rispettivamente di massimo flusso (Figura 25) e di massimo riflusso (Figura 26) alla bocca di Lido per le configurazioni della laguna del 2003 e del 2012.

Le Figure 25 e 26 evidenziano come le variazioni di velocità raggiungano valori dell'ordine della decina di cm/s solo nei canali principali e sui bordi delle aree di bassofondo mentre all'interno dei bassofondi stessi sono nel complesso relativamente modeste. Un incremento delle velocità rispetto alla laguna del 2003 si nota, in particolare, lungo il margine meridionale della prateria situata in prossimità del forte S. Andrea. L'incremento si attesta, nella fascia caratterizzata dalle variazioni più sensibili, su valori mediamente intorno ai 50 cm/s. Si osservi, tuttavia, che tale incremento può raggiungere localmente il valore massimo di 80 cm/s. Tale incremento risulta più accentuato durante la fase di marea uscente dalla bocca rispetto alla fase di marea entrante. In tutto il resto della prateria e, in particolare, lungo il margine orientale che segue il canale di S. Erasmo non si osservano variazioni rilevanti delle velocità.

In corrispondenza della porzione occidentale della prateria di fanerogame situata a ridosso dell'isola artificiale si osserva un incremento generalizzato delle velocità dell'ordine dei 10 cm/s, in particolare lungo il margine più vicino all'isola artificiale. Il lato a ridosso del canale S. Nicolò, tuttavia, sperimenta un incremento apprezzabile delle velocità solo durante la fase di riflusso della marea. Nella fase di marea entrante, inoltre, ampie porzioni dell'area orientale della prateria subiscono una riduzione delle velocità compresa tra i 4 e i 10 cm/s, mentre nella fase di marea uscente buona parte di queste aree è interessata da velocità che rimangono pressoché invariate rispetto alla laguna del 2003 e solo una piccola parte di esse è interessata da velocità minori.

In diverse zone della bocca di Lido, inoltre, si osservano variazioni nella direzione delle velocità massime. In Figura 27 sono illustrate le aree della bocca in prossimità delle praterie di fanerogame in cui questo fenomeno risulta particolarmente evidente. La Figura 28 e la Figura 29 mostrano un paio di esempi di confronto delle direzioni delle velocità massime tra la laguna del 2003 e quella del 2012; la serie completa dei confronti realizzati per tutte le aree indicate in Figura 27 è stata inserita in Appendice.

In accordo con quanto osservato per i campi di velocità, si evidenzia un incremento degli sforzi tangenziali massimi al fondo lungo i canali principali S. Nicolò e Treporti, nonché lungo il margine meridionale della prateria adiacente al forte S. Andrea e lungo il margine più vicino all'isola artificiale per la prateria situata in prossimità dell'opera stessa (Figura 30).

In un secondo momento sono state indagate le differenze riscontrabili nei fenomeni di risospensione dei sedimenti generati dall'effetto combinato di correnti e moto ondoso per le due configurazioni lagunari considerate. A tale scopo è stato considerato un evento meteorologico sintetico, caratterizzato da un'oscillazione dei livelli di marea equivalente a quella del 21-23 dicembre 2011 e da un vento di bora (45°N) di intensità costante (15 m/s) per tutta la durata della simulazione.

I risultati delle simulazioni sono illustrati nelle Figure 31-33, in cui sono poste a confronto le concentrazioni massime di sedimenti in sospensione per la configurazione del 2003 e per la configurazione attuale della laguna.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

La Figura 31 non evidenzia differenze apprezzabili nella concentrazione massima di sedimenti in sospensione per la bocca di Lido nel suo complesso. Da un'analisi più puntuale del fenomeno non emerge alcuna differenza in prossimità della prateria di fanerogame situata a ridosso del forte S. Andrea (Figura 32). Si osserva, invece, una riduzione globale della concentrazione massima sulla prateria situata in prossimità dell'isola artificiale (Figura 33), a causa della maggior protezione fornita dall'isola stessa. Le differenze riscontrate risultano, tuttavia, di piccola entità (circa 5-10 mg/l).

È opportuno sottolineare che, sebbene i valori della concentrazione in sospensione ottenuti con il modello siano in linea con i valori effettivamente misurati all'interno della laguna durante eventi meteorologici confrontabili con quello analizzato, i risultati sono da analizzare in relativo, ovvero al solo scopo di mettere in luce variazioni indotte dalla costruzione delle opere alle bocche di porto. Analisi più dettagliate necessiterebbero di misure specifiche di torbidità distribuite nell'area in esame nonché campionamenti che permettano di ricostruire la composizione granulometrica del fondale. E' infine da sottolineare che le indagini non hanno considerato, per i limiti del modello utilizzato determinati dalla complessità del fenomeno, i processi di risospensione innescati dal moto ondoso che si insinua all'interno della bocca provenendo dalla costa.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

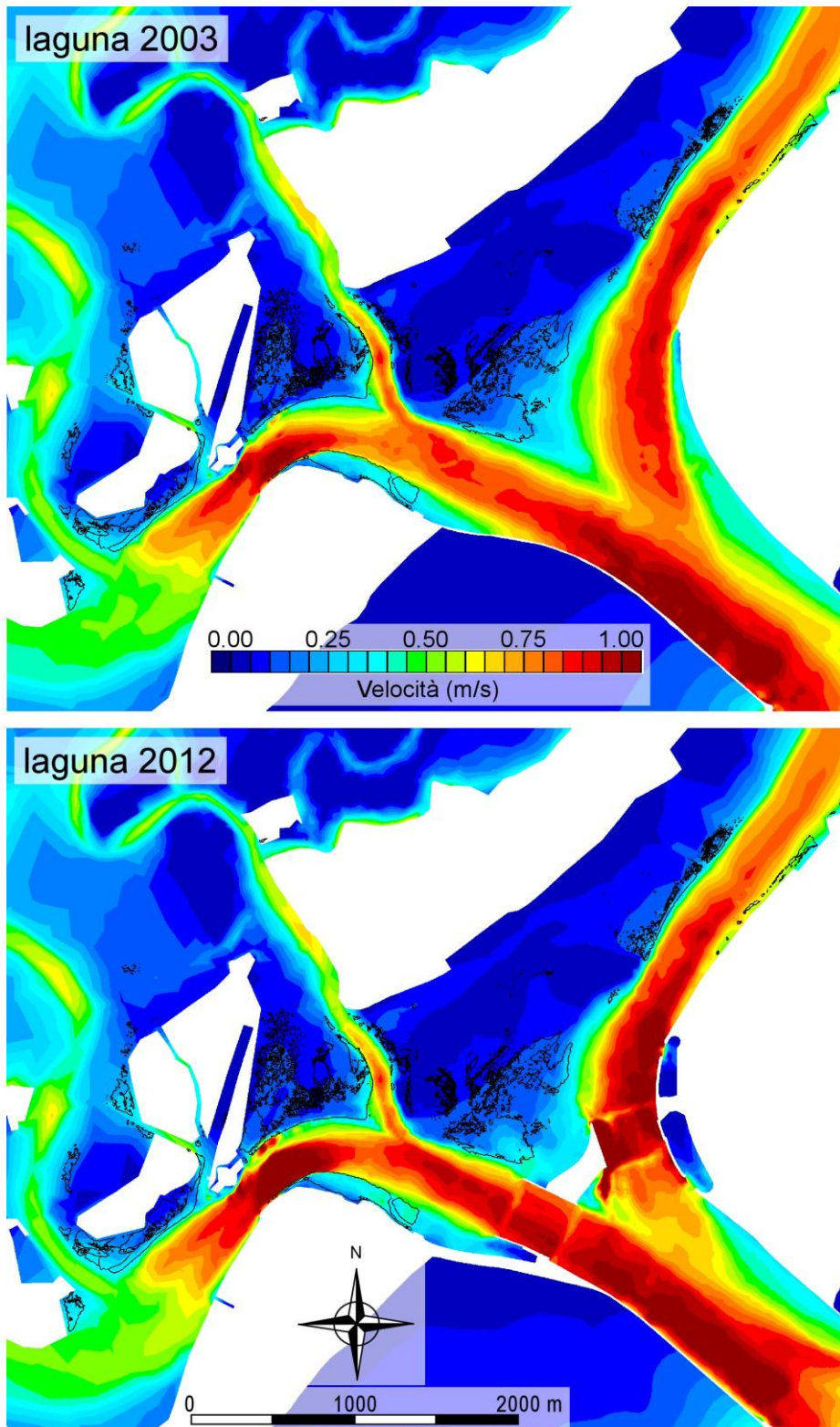


Figura 23 - Confronto tra gli inviluppi delle velocità massime alla bocca di Lido calcolate con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

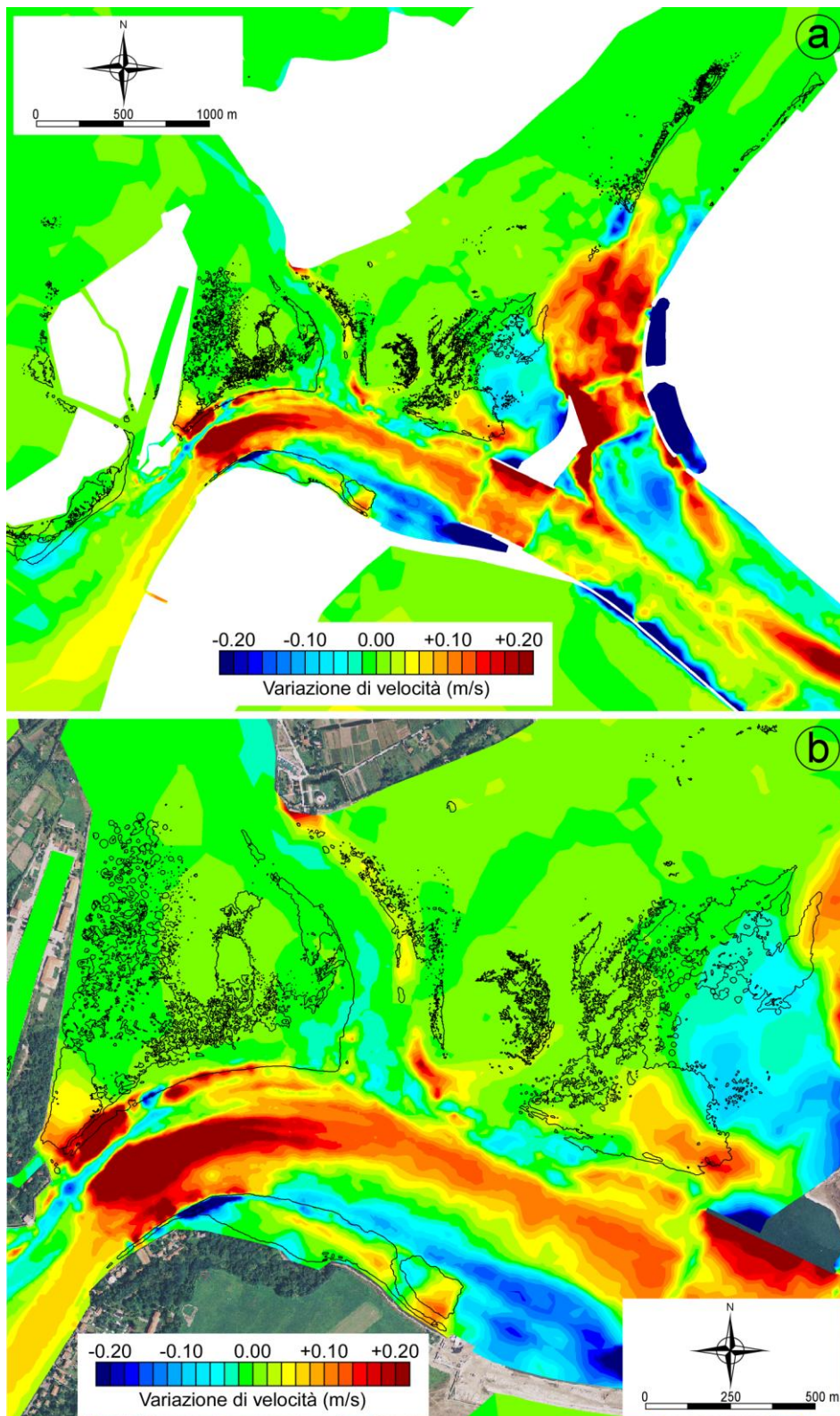


Figura 24 - Variazione delle velocità massime nel corso di un intero ciclo di marea alla (a) bocca di Lido e in particolare (b) lungo le praterie di fanerogame collocate in prossimità del forte S. Andrea e dell'isola artificiale calcolate con il modello per le configurazioni precedente e successiva alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

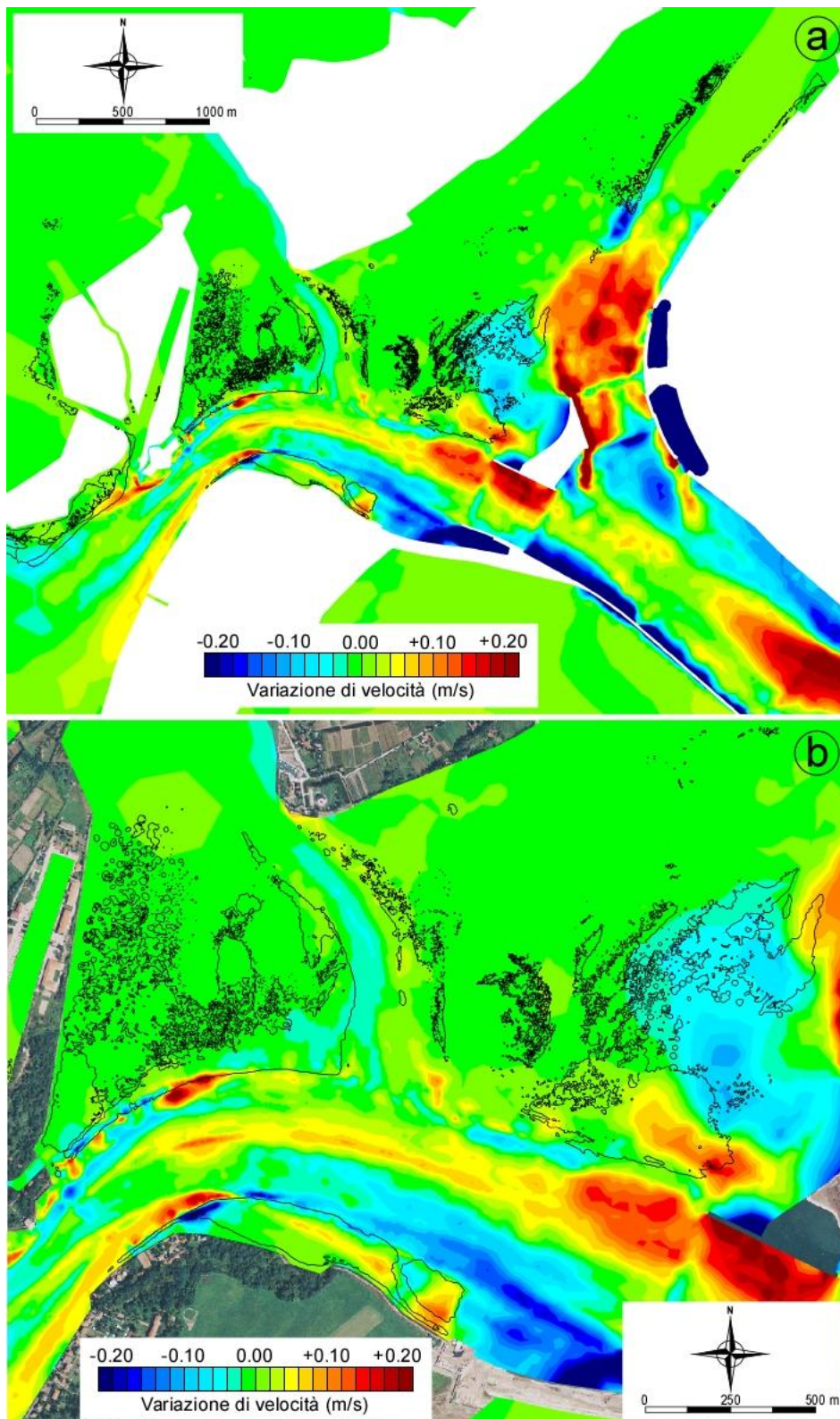


Figura 25 - Variazione delle velocità massime in fase di flusso alla (a) bocca di Lido e in particolare (b) lungo le praterie di fanerogame collocate in prossimità del forte S. Andrea e dell'isola artificiale calcolate con il modello per le configurazioni precedente e successiva alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCCHE LAGUNARI

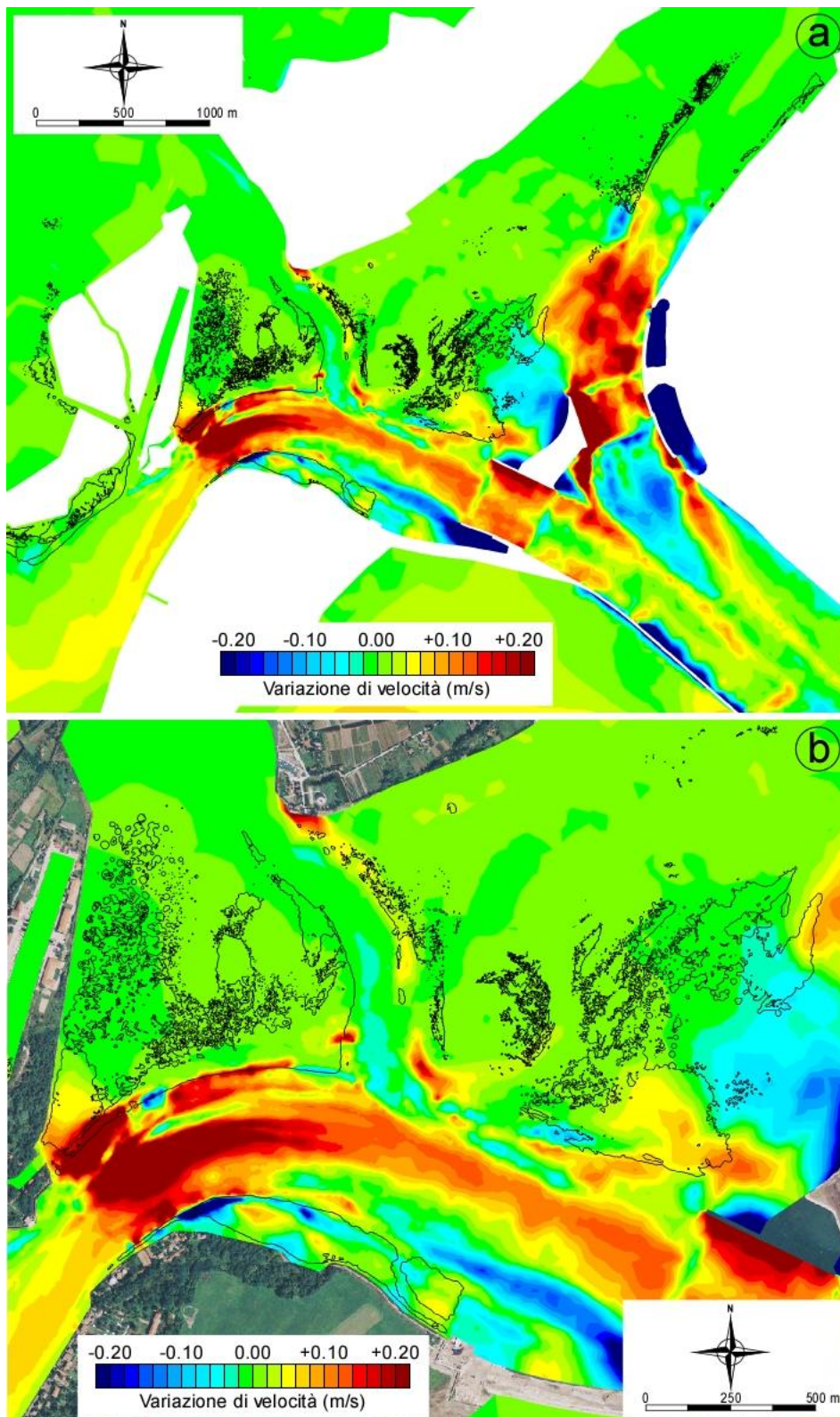


Figura 26 - Variazione delle velocità massime in fase di riflusso alla (a) bocca di Lido e in particolare (b) lungo le praterie di fanerogame collocate in prossimità del forte S. Andrea e dell'isola artificiale calcolate con il modello per le configurazioni prece dente e successiva alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI



Figura 27 - Aree della bocca di Lido caratterizzate da evidenti cambiamenti di direzione delle velocità massime in prossimità della vegetazione.

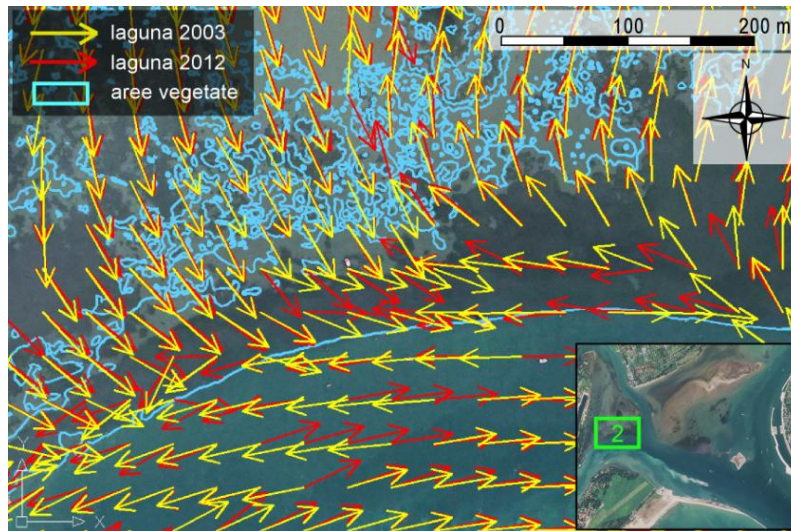


Figura 28 - Esempio di confronto tra le direzioni delle velocità massime calcolate con il modello per la laguna del 2003 e per la laguna attuale in prossimità della vegetazione.

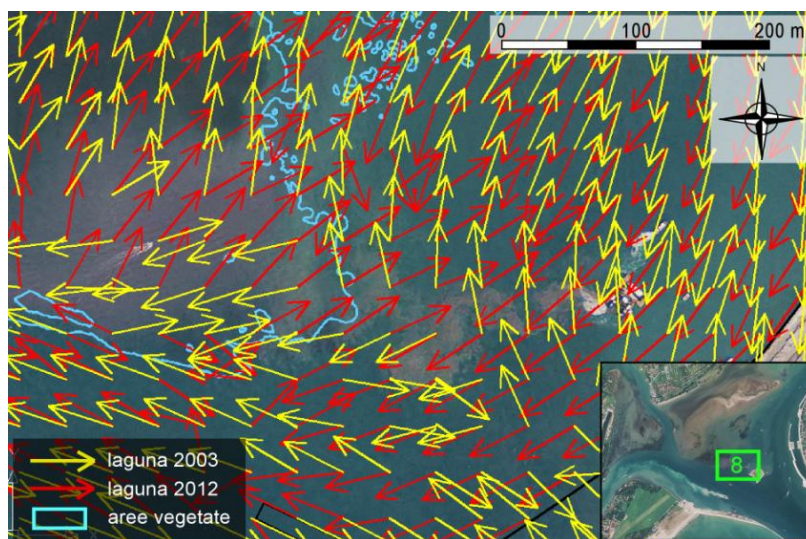


Figura 29 - Esempio di confronto tra le direzioni delle velocità massime calcolate con il modello per la laguna del 2003 e per la laguna attuale in prossimità della vegetazione.

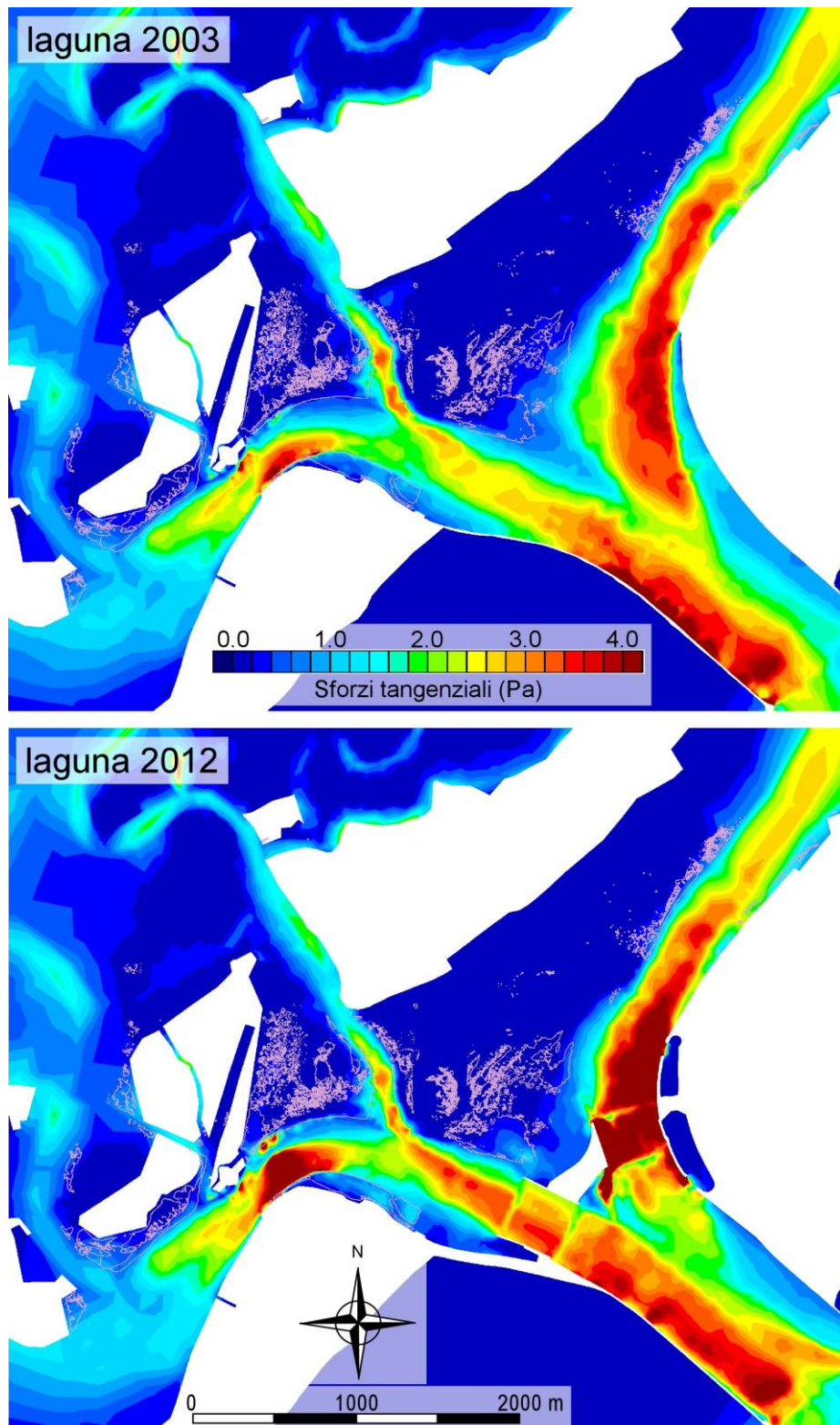


Figura 30 - Confronto tra gli involuipi degli sforzi tangenziali massimi alla bocca di Lido calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

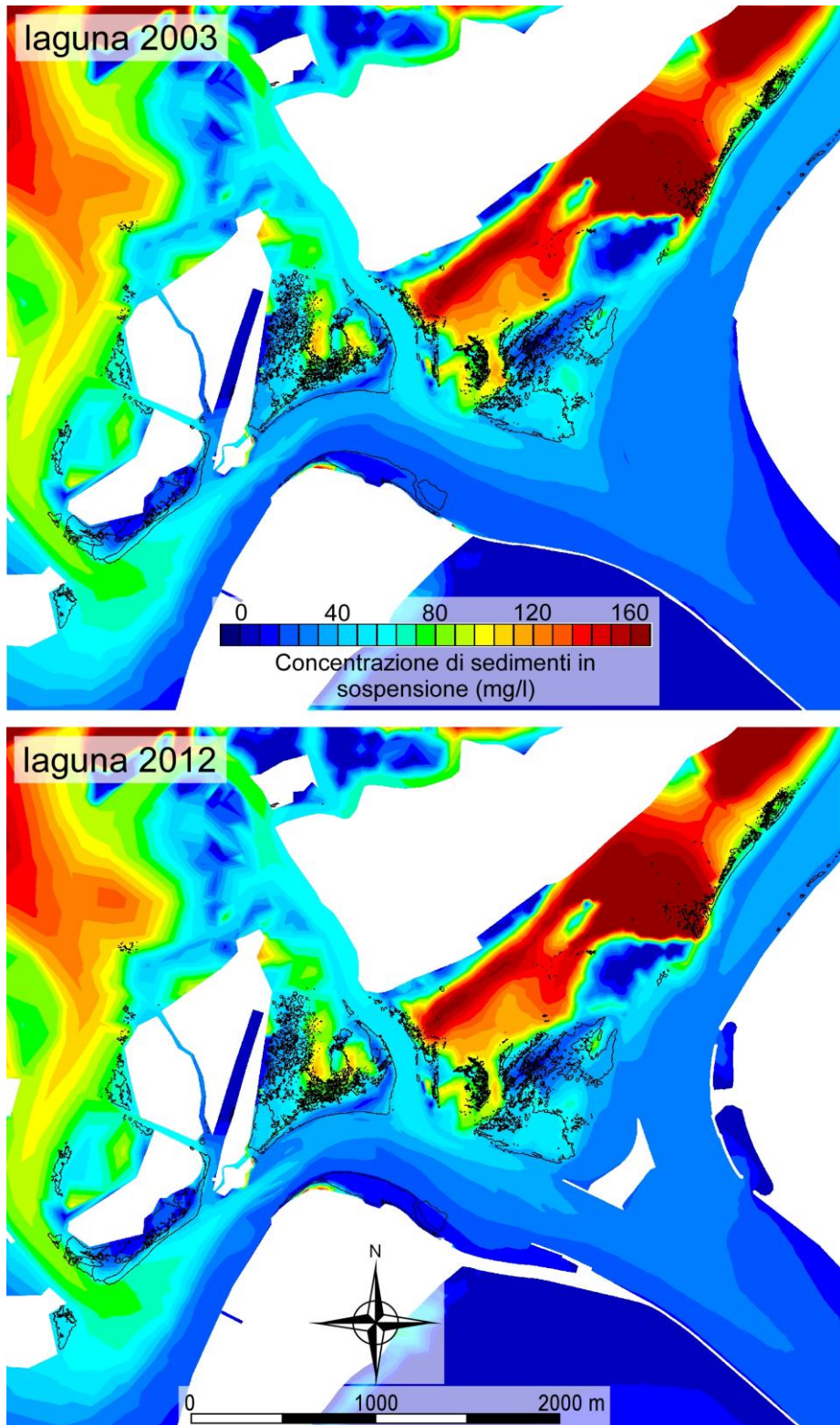


Figura 31 - Confronto tra gli involucri delle concentrazioni massime di sedimenti in sospensione alla bocca di Lido indotte dall'effetto combinato di correnti e moto ondoso per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

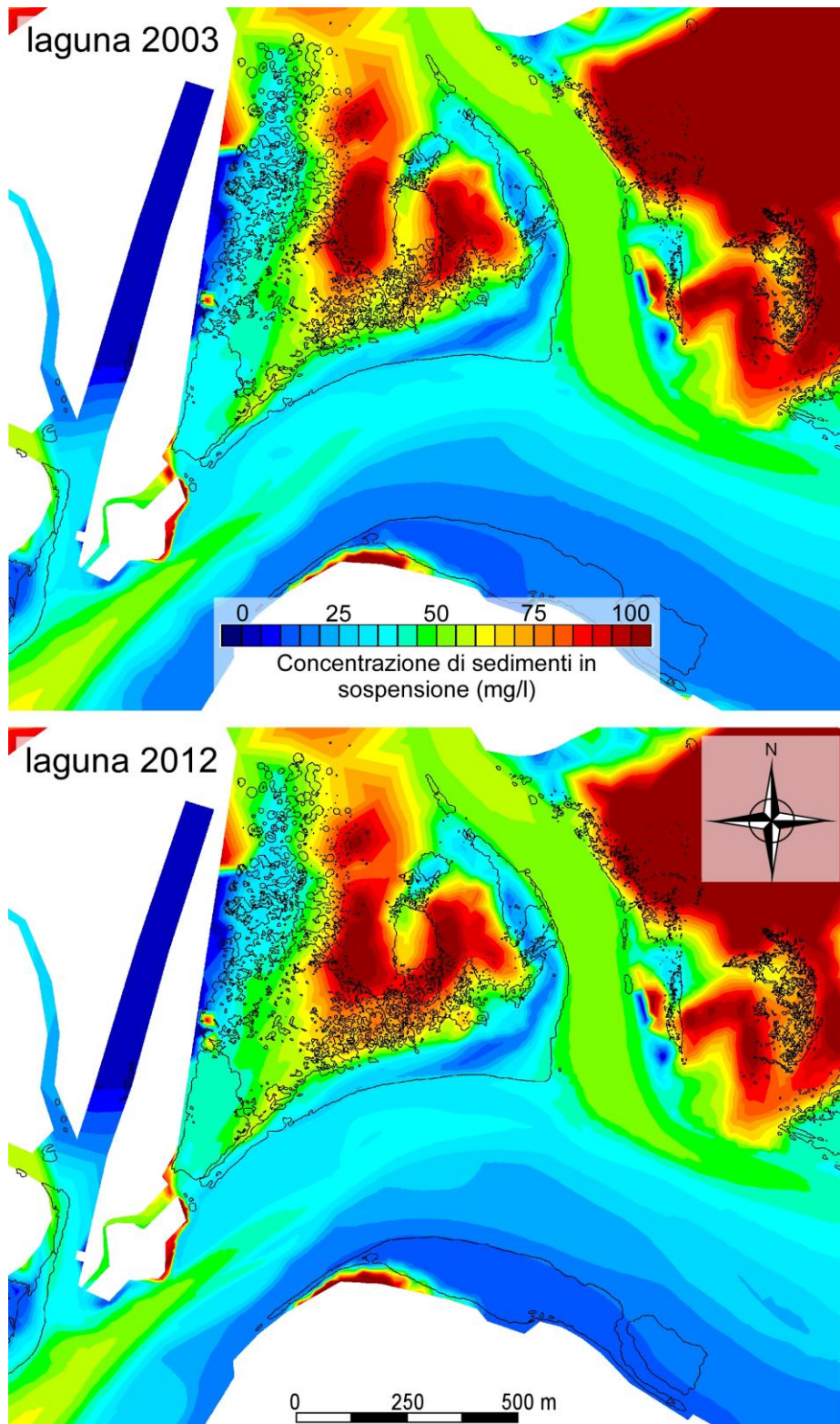


Figura 32 - Confronto tra gli involuipi delle concentrazioni massime di sedimenti in sospensione alla bocca di Lido indotte dall'effetto combinato di correnti e moto ondoso per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte. Particolare del canale S. Nicolò in prossimità del forte S. Andrea.

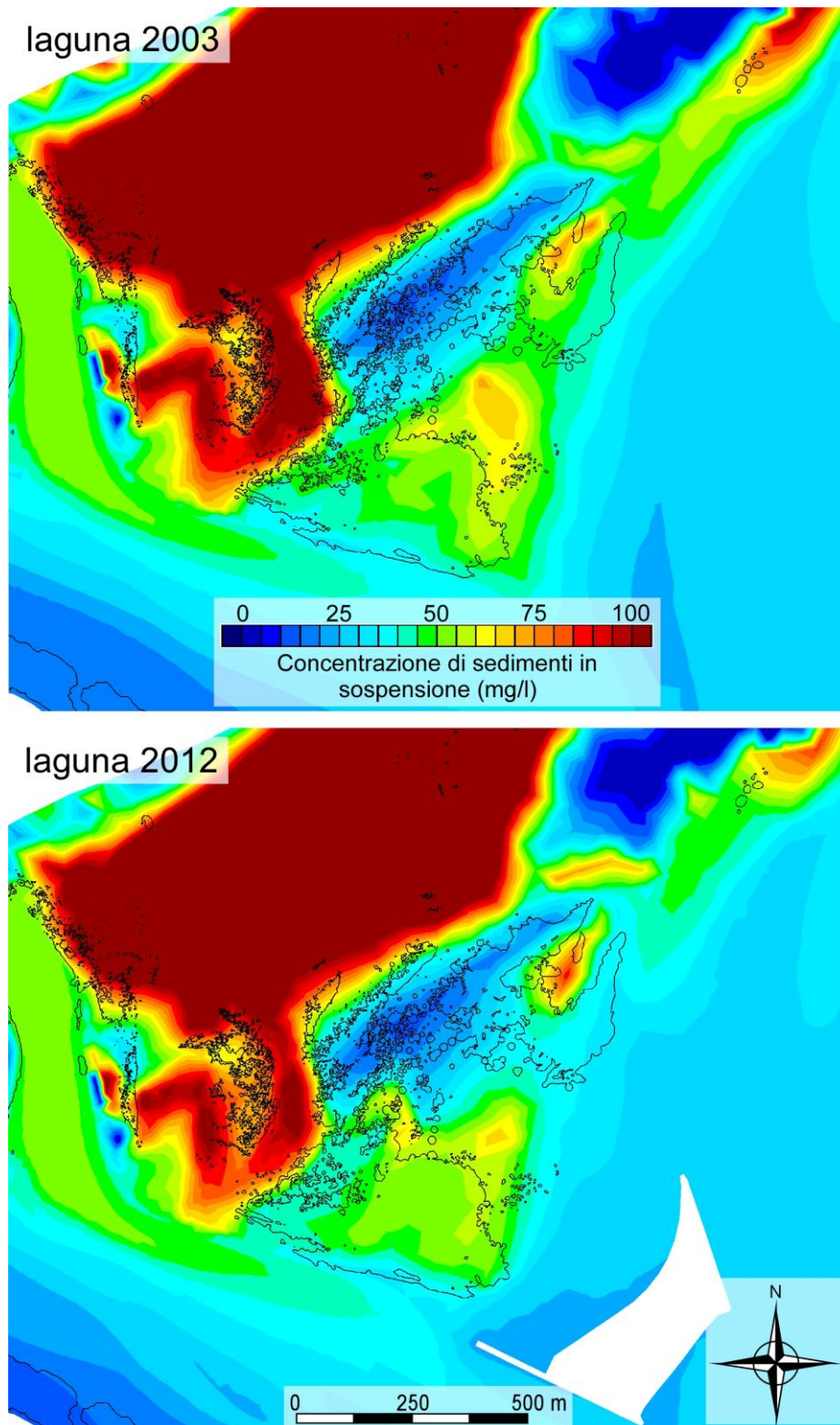


Figura 33 - Confronto tra gli involuipi delle concentrazioni massime di sedimenti in sospensione alla bocca di Lido indotte dall'effetto combinato di correnti e moto ondoso per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte. Particolare della vegetazione situata in prossimità dell'isola artificiale.

5. CONCLUSIONI

Mediante l'impiego del modello idrodinamico bidimensionale agli elementi finiti sviluppato dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova è stato realizzato un confronto tra il comportamento idrodinamico delle configurazioni precedente (2003) e successiva (2012) alla costruzione delle opere alle bocche della laguna di Venezia.

Per prima cosa è stata condotta una verifica sulla capacità del modello di riprodurre correttamente il campo di moto idrodinamico per la configurazione attuale della laguna attraverso il confronto con i dati rilevati nel corso della campagna di misure del 22 dicembre 2011. Ad eccezione di alcune discrepanze sull'entità delle velocità misurate rispetto a quelle calcolate con il modello in corrispondenza del bassofondo, riconducibili, in buona sostanza, alle incertezze legate alla batimetria utilizzata per quotare il reticolo di calcolo nell'area in esame, i confronti relativi alle portate lungo il canale S. Nicolò, all'oscillazione dei livelli in punti diversi del bacino di Lido e al campo di moto sul bassofondo ricostruito mediante le droghe risultano molto soddisfacenti. In definitiva, alla luce dei risultati ottenuti, si può concludere che il modello è in grado di riprodurre correttamente il campo di moto idrodinamico nella configurazione attuale.

E' stato realizzato, quindi, il confronto tra il comportamento idrodinamico della laguna nella sua configurazione attuale rispetto a quello della laguna del 2003.

Un primo confronto tra le due diverse configurazioni lagunari è stato realizzato riproducendo il campo di moto idrodinamico dei giorni 21-23 dicembre 2011 caratterizzato da quasi totale assenza di vento. I risultati della modellazione matematica non evidenziano differenze apprezzabili dei livelli all'interno del bacino dominato dalla bocca di Lido. Si osserva, invece, un incremento delle portate uscenti dalla bocca lungo il canale S. Nicolò e un incremento generalizzato delle velocità in fase di riflusso lungo il canale.

Tale incremento, in alcuni punti superiore ai 20cm/s, arriva a lambire le praterie lungo i margini dei bassofondi che si affacciano sul canale S. Nicolò.

La prateria situata dietro l'isola artificiale sperimenta un aumento generalizzato delle velocità, osservabile sia in fase di riflusso che in fase di flusso, su tutta la porzione più vicina al canale S. Nicolò, con picchi di intensità che si localizzano sul margine più vicino all'isola. La porzione di prateria più vicina al canale Treporti, invece, risulta più protetta rispetto al 2003. Su di essa, infatti, la velocità riduce la propria intensità durante la fase di flusso, per poi mantenersi pressoché invariata durante la fase di riflusso della marea.

Analogamente a quanto rilevato per i campi di velocità, si osserva un incremento degli sforzi tangenziali al fondo lungo i margini delle praterie delimitanti il canale S. Nicolò.

In un secondo momento sono stati considerati i fenomeni di risospensione dei sedimenti generati dall'effetto combinato di correnti e moto ondoso. A tale scopo è stata condotta una simulazione caratterizzata da un vento di bora costante di intensità pari a 15 m/s.

Dal confronto delle concentrazioni massime di sedimenti in sospensione non emergono differenze sostanziali, fatta eccezione per la prateria collocata dietro l'isola artificiale che, risultando protetta dall'isola stessa, esibisce una riduzione generalizzata dei fenomeni di risospensione dei sedimenti rispetto al 2003.

6. BIBLIOGRAFIA

- Carniello, L., Defina, A., Fagherazzi, S. and L. D'Alpaos. A combined wind wave-tidal model for the Venice lagoon, Italy. *Journal of Geophysical Research*, 110, 2005. doi:10.1029/2004JF000232.
- Carniello, L., Defina, A. and L. D'Alpaos. Morphological evolution of the Venice lagoon: Evidence from the past and trend for the future. *J. Geophys. Res.*, 114(F04002), 2009. doi:10.1029/2008JF001157.
- Carniello, L., D'Alpaos, A. and A. Defina. Modeling wind waves and tidal flows in shallow microtidal basins. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011. doi:10.1016/j.ecss.2011.01.001.
- Carniello, L., A. Defina and L. D'Alpaos. Modeling sand-mud transport induced by tidal currents and wind waves in shallow microtidal basins: Application to the Venice Lagoon (Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012. doi:10.1016/j.ecss.2012.03.016
- D'Alpaos, L. and A. Defina. Venice lagoon hydrodynamics simulation by coupling 2D and 1D finite element models. In *Proceedings of the 8th Conference on Finite Elements in Fluids. New Trends and Applications*, pages 917-926, Barcelona, 20-24 September 1993.
- D'Alpaos, L. and A. Defina. Modellazione matematica del comportamento idrodinamico delle zone di barena solcate da una rete di canali minori. Istituto Veneto di SS.LL.AA., 1995.
- D'Alpaos, L. and A. Defina. Mathematical modelling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon. *Computers and Geosciences*, 33(4):476-496, 2007. ISSN: 0098-3004, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2006.07.009>.
- Defina, A.. Two dimensional shallow flow equations for partially dry areas. *Water Resource Research*, 36(11):3251-3264, 2000.
- Defina, A., D'Alpaos, L. and B. Matticchio. A new set of equations for very shallow water and partially dry areas suitable to 2d numerical models. In *Proceedings of the Specialty Conference on "Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas"*, edited by P. Molinaro and L. Natale, pages 72-81, Milan, 29 June-1 July 1994.
- Magistrato alle Acque di Venezia - CORILA. Aggiornamento del piano morfologico della laguna di Venezia. Rapporto finale. Prodotto dal concessionario Consorzio Venezia Nuova. Technical report, 2011.
- Consorzio Venezia Nuova-Technital. Studio C.2.10/III: Attività di aggiornamento del piano degli interventi per il recupero morfologico in applicazione della delibera del Consiglio dei Ministri del 15.03.01, Studi di base, linee guida e proposte di intervento del piano morfologico: Parte A-Analisi del Sistema. Technical report, Magistrato alle Acque di Venezia, 2004.

APPENDICE

Campi di velocità istantanei.

Nel seguito sono posti a confronto i campi istantanei di velocità alla bocca di Lido nelle condizioni di massimo flusso e riflusso per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere alle bocche per la difesa dalle acque alte. I campi di velocità qui illustrati sono riferiti alla simulazione idrodinamica condotta in assenza di vento e imponendo in mare, lungo la frontiera esterna della griglia computazionale, l'oscillazione dei livelli di marea del 21-23 dicembre 2011 (Figura 8).

I confronti sono stati realizzati in corrispondenza degli istanti di massimo flusso e riflusso sia per la fase di più ampia escursione della marea, sia per la fase di escursione minore.

Per ogni confronto, inoltre, sono stati inseriti i particolari dei campi di velocità relativi alle due praterie di fanerogame principali della bocca di Lido, situate l'una lungo il canale S. Nicolò a ridosso del forte S. Andrea e l'altra in prossimità dell'isola artificiale.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

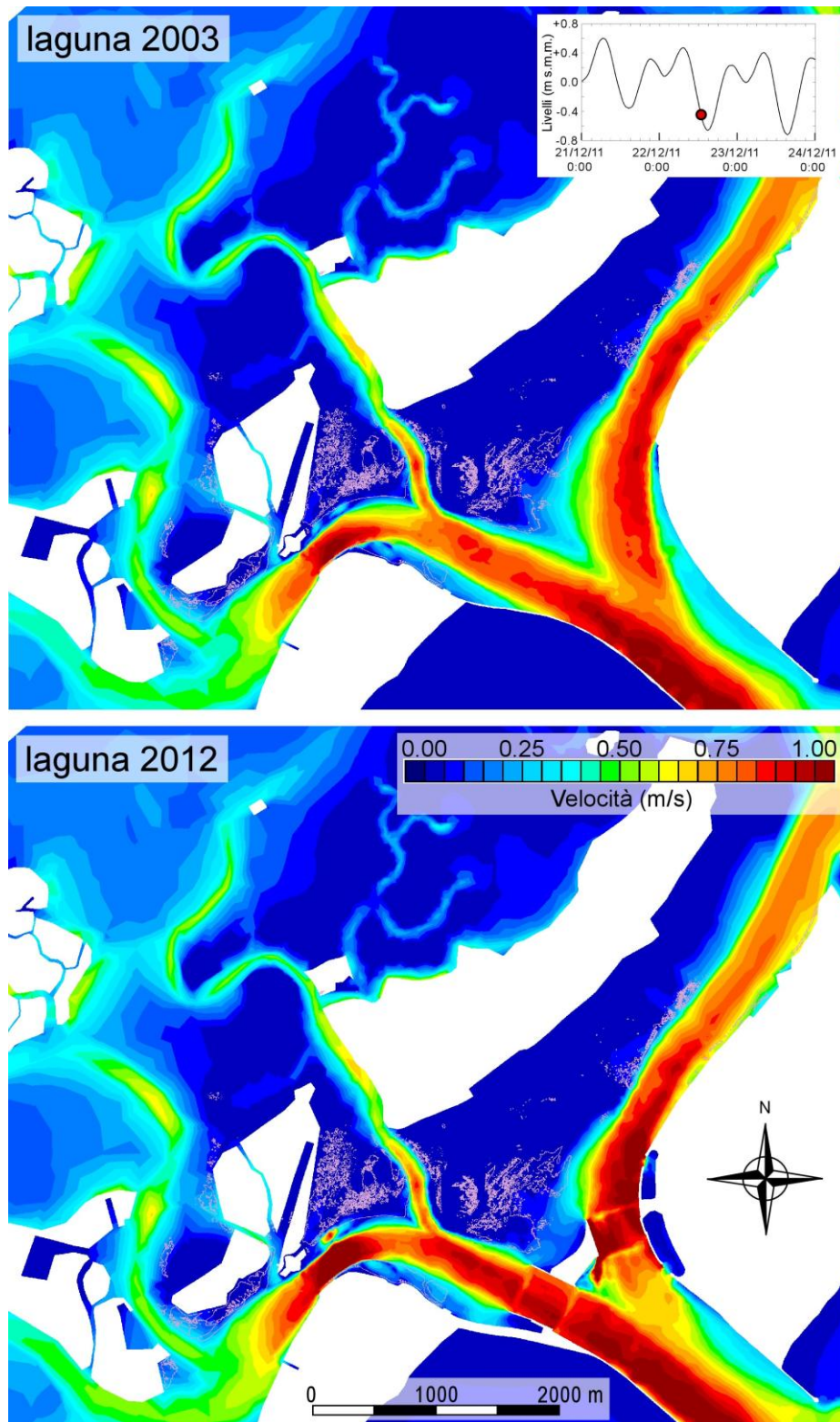


Figura 34 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo riflusso alla bocca di Lido calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

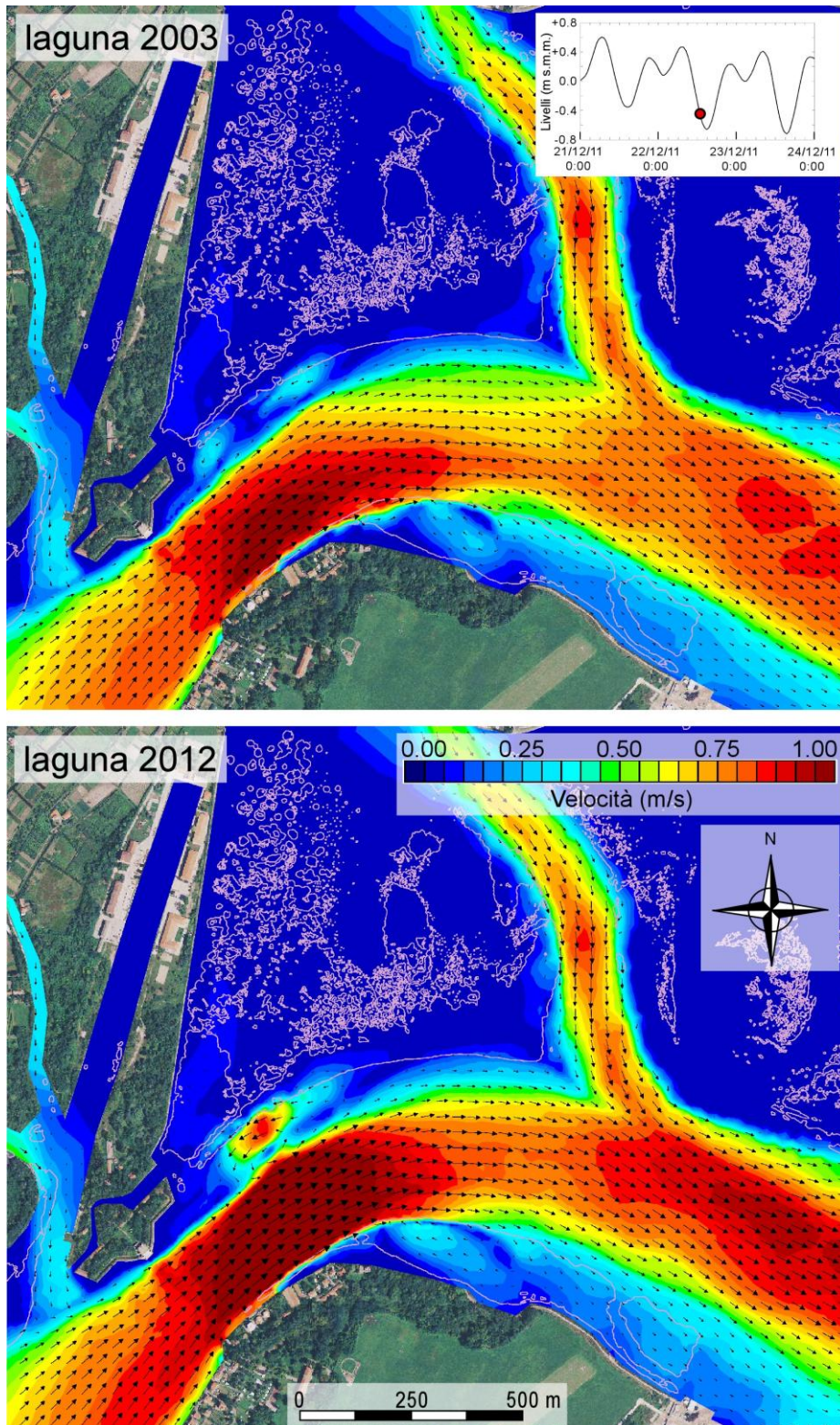


Figura 35 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo riflusso lungo il canale S. Nicolò in prossimità del forte S. Andrea calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

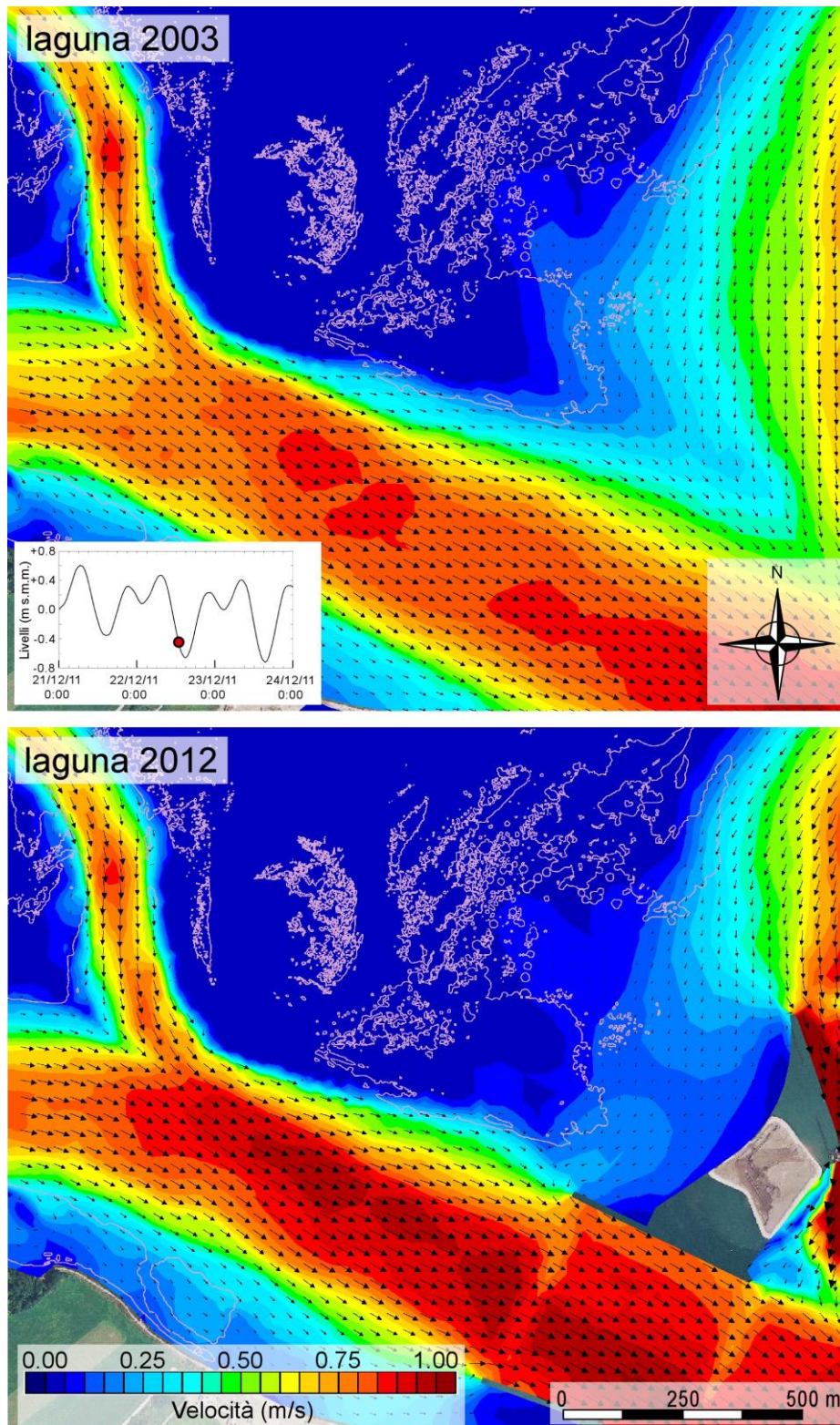


Figura 36 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo riflusso in prossimità dell'isola artificiale calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

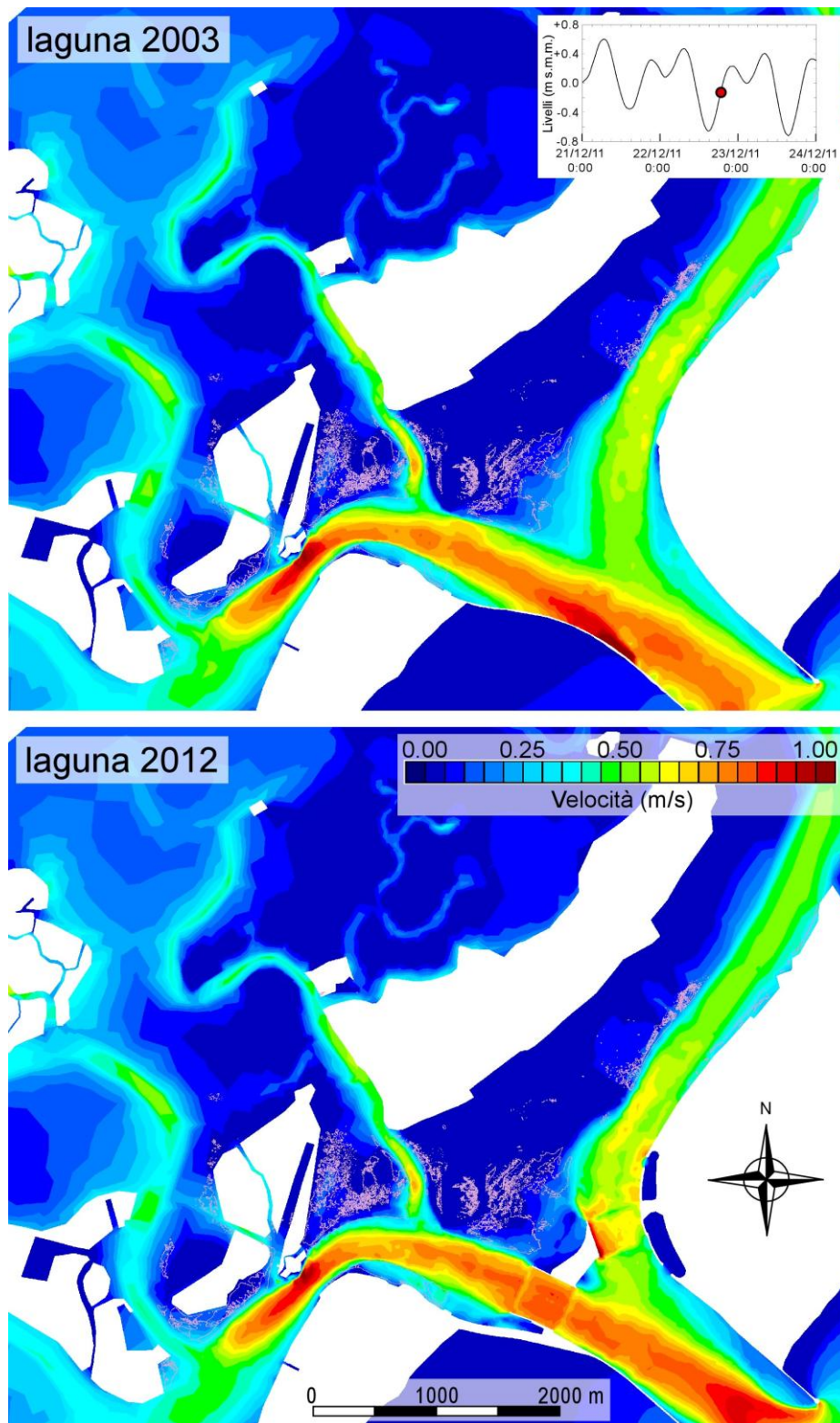


Figura 37 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo flusso alla bocca di Lido calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

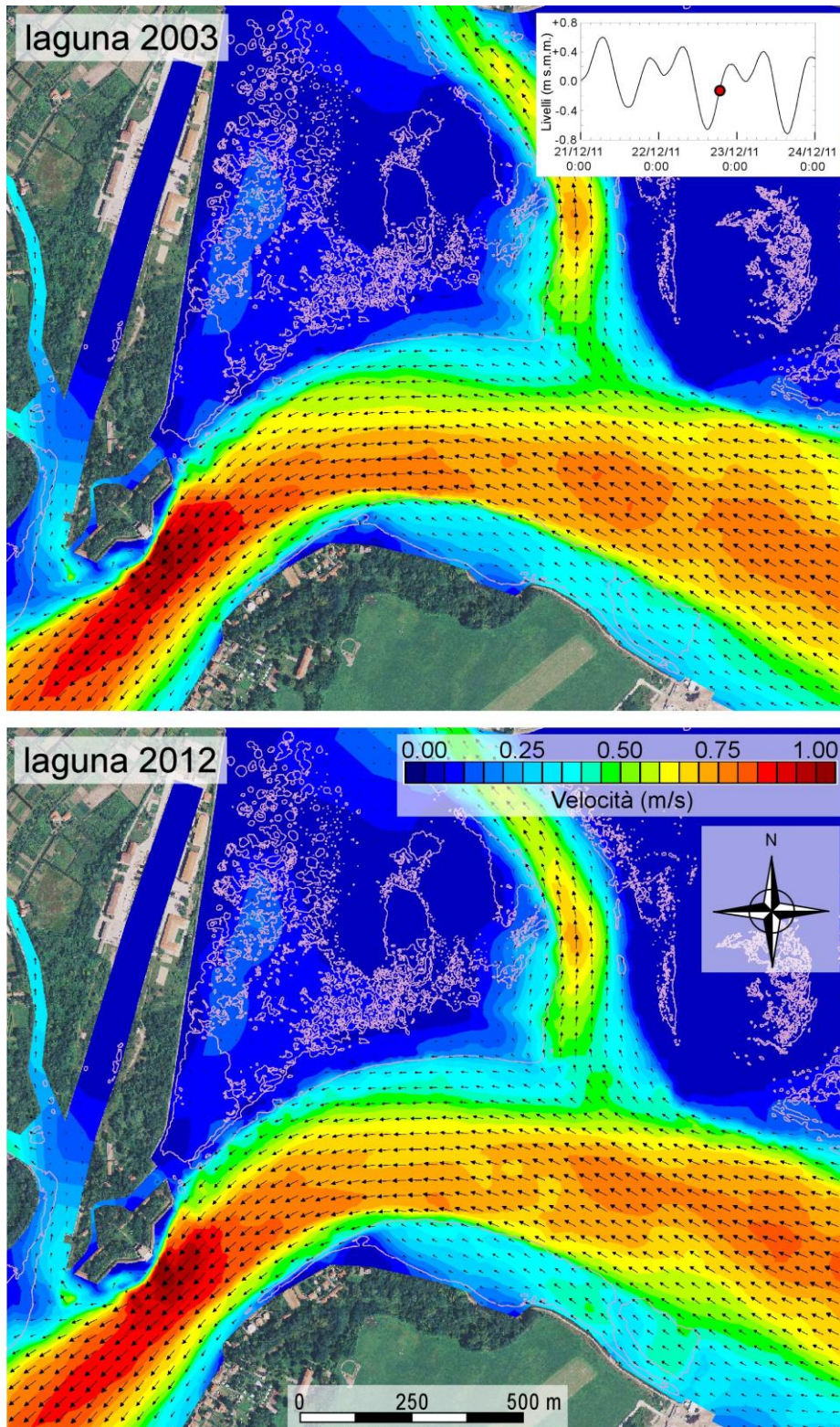


Figura 38 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo flusso lungo il canale S. Nicolò in prossimità del forte S. Andrea calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

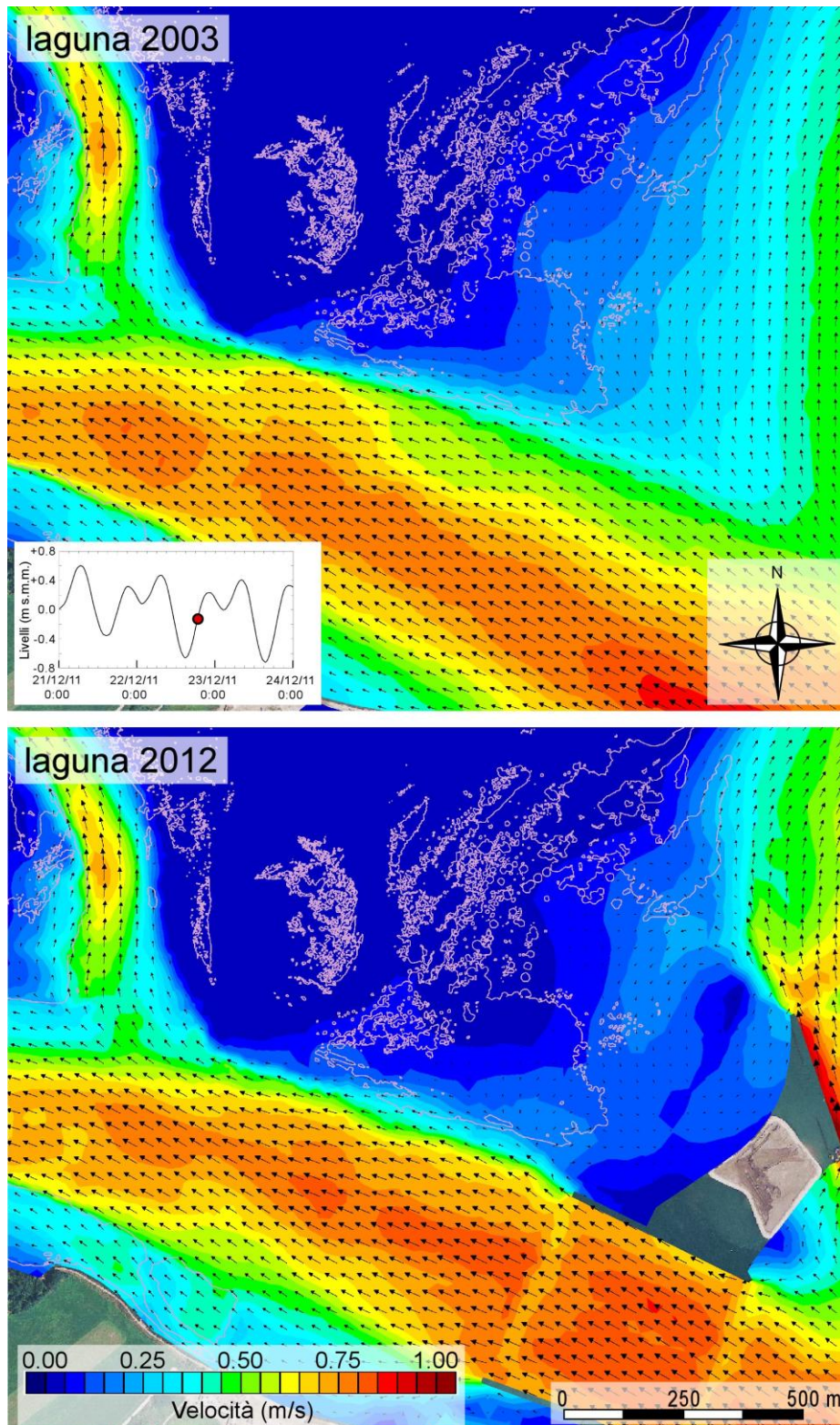


Figura 39 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo flusso in prossimità dell'isola artificiale calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

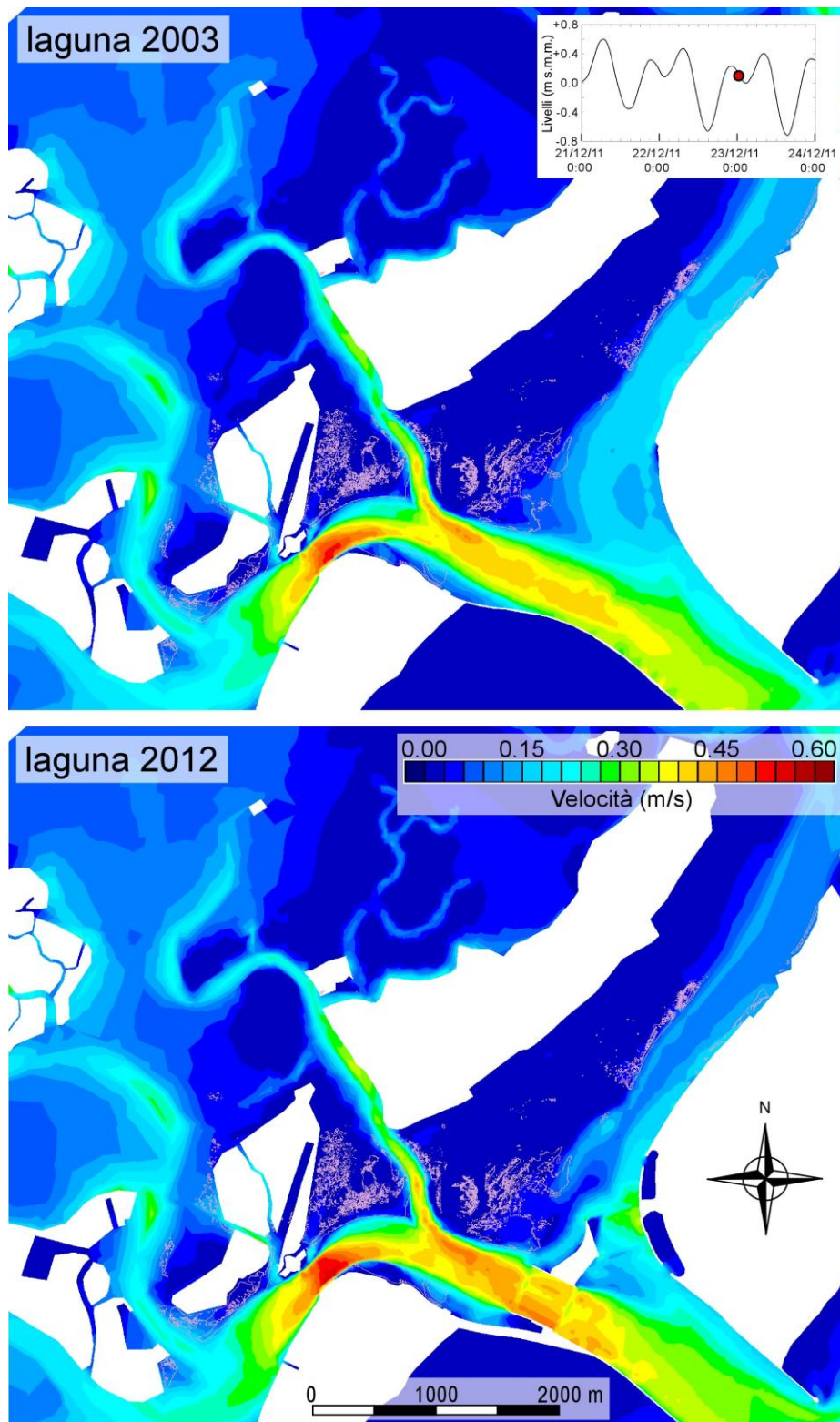


Figura 40 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo riflusso alla bocca di Lido calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

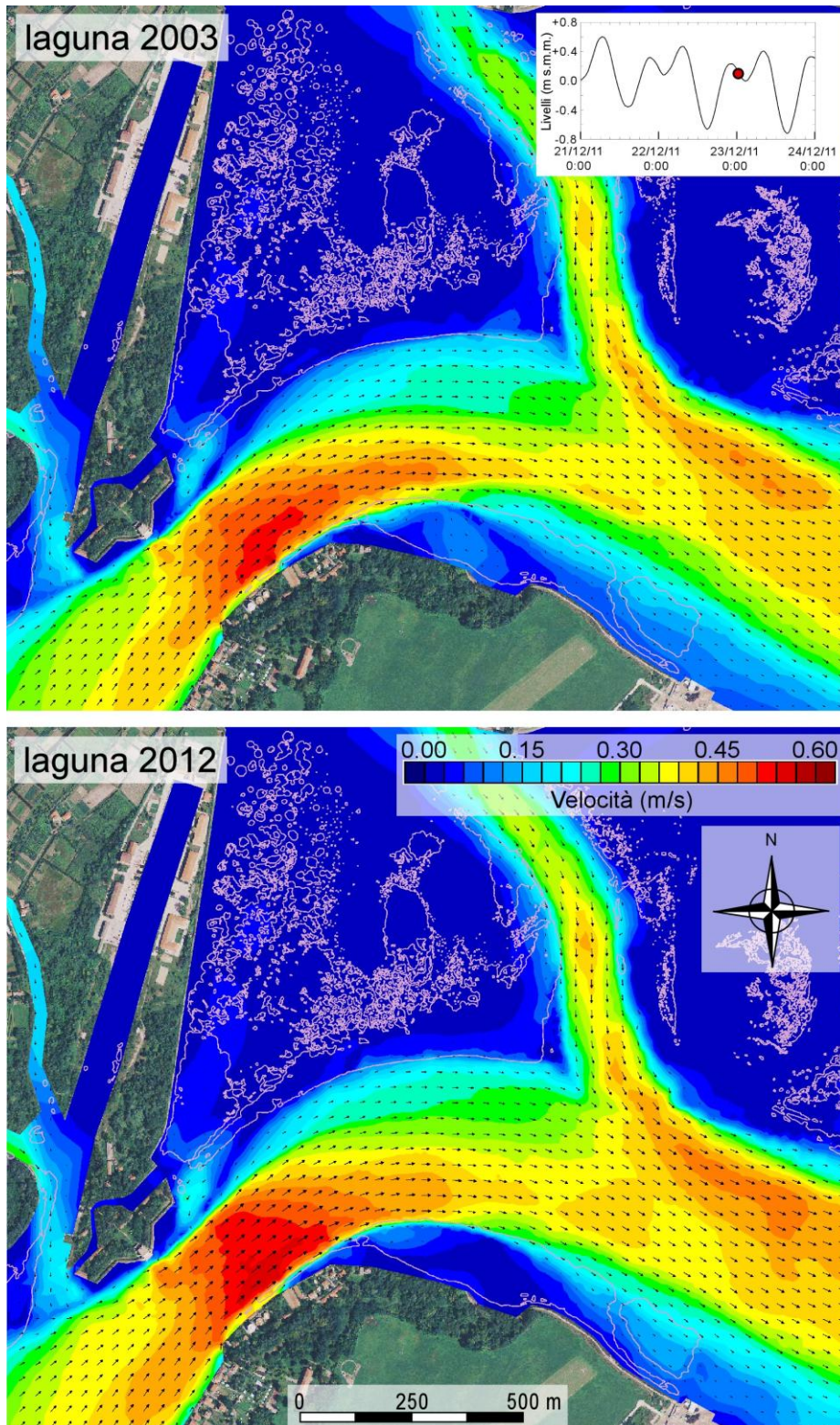


Figura 41 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo riflusso lungo il canale S. Nicolò in prossimità del forte S. Andrea calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

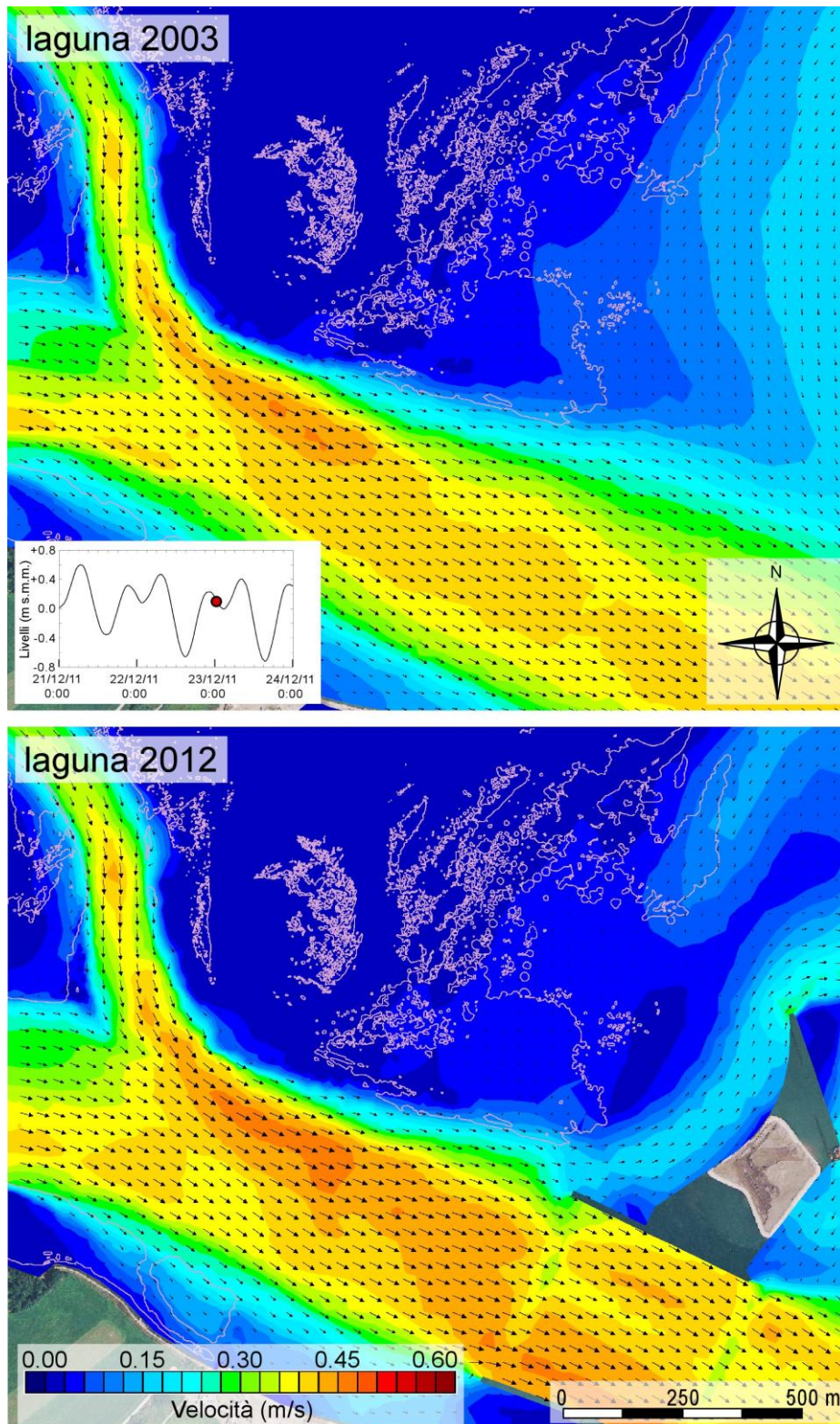


Figura 42 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo riflusso in prossimità dell'isola artificiale calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

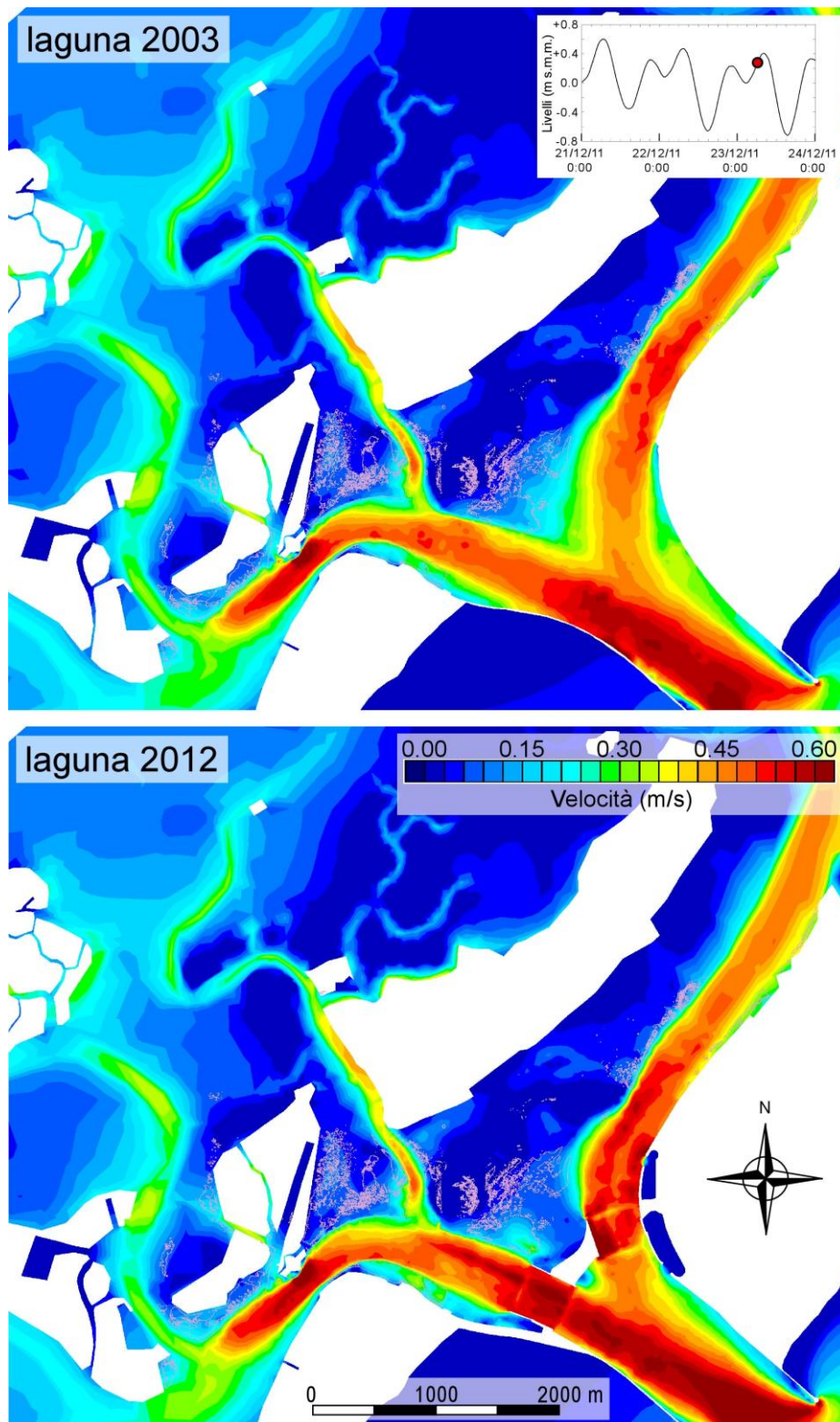


Figura 43 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo flusso alla bocca di Lido calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

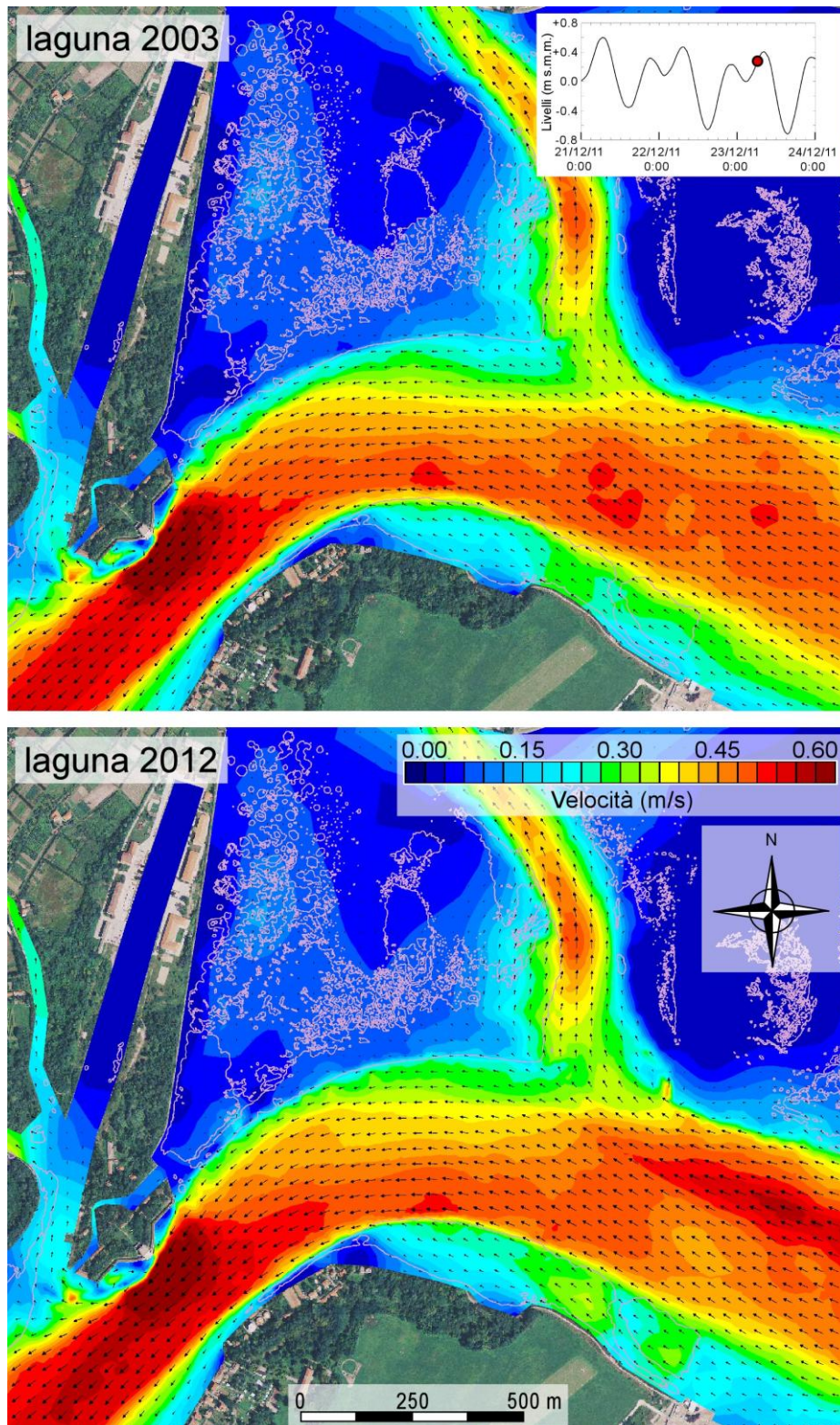


Figura 44 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo flusso lungo il canale S. Nicolò in prossimità del forte S. Andrea calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCCHE LAGUNARI

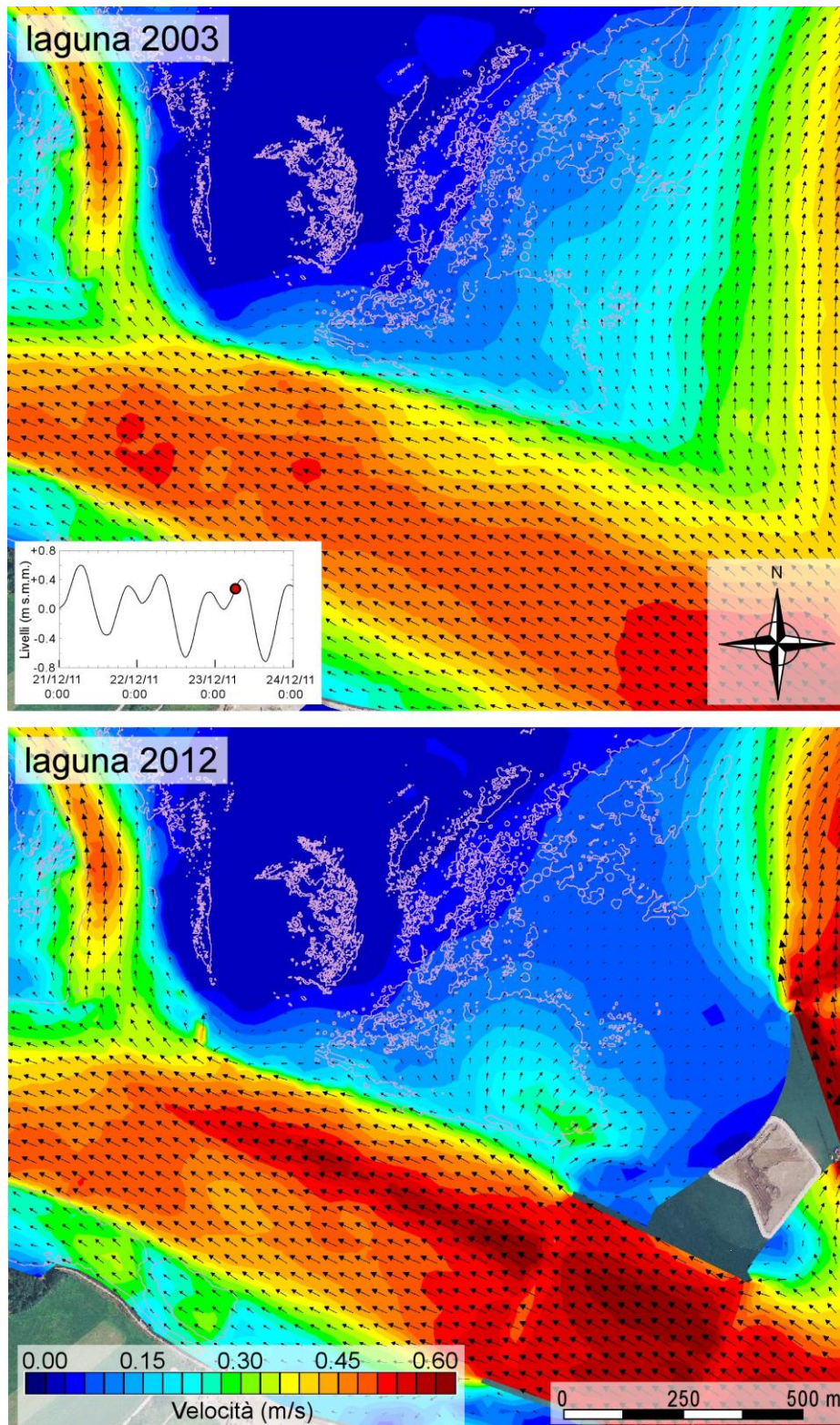


Figura 45 - Confronto tra i campi delle velocità in condizioni di massimo flusso in prossimità dell'isola artificiale calcolati con il modello per le configurazioni precedente (laguna 2003) e successiva (laguna 2012) alla costruzione delle opere di difesa dalle acque alte.

Variatione delle direzioni delle velocità massime.

Questa appendice contiene i confronti relativi alla direzione delle velocità massime nell'arco di un ciclo di marea per la configurazione del 2003 e per la configurazione attuale (laguna 2012).

I campi di velocità di seguito illustrati sono rappresentativi di un campo di moto idrodinamico ottenuto imponendo come condizione al contorno al modello la marea del 21-23 dicembre 2011 (Figura 8) e nell'ipotesi di assenza di vento.

Le figure mostrano le aree prossime alle praterie di fanerogame in cui si osservano le variazioni più consistenti nelle direzioni delle velocità massime. Il quadro di unione di tali aree è riportato in Figura 27, mentre in ogni figura è presente un riquadro in cui si evidenzia la posizione dell'ingrandimento cui la figura stessa fa riferimento. In giallo sono indicate le direzioni delle velocità massime per la configurazione della laguna del 2003, mentre in rosso sono indicate le direzioni delle velocità massime per la configurazione attuale della laguna.

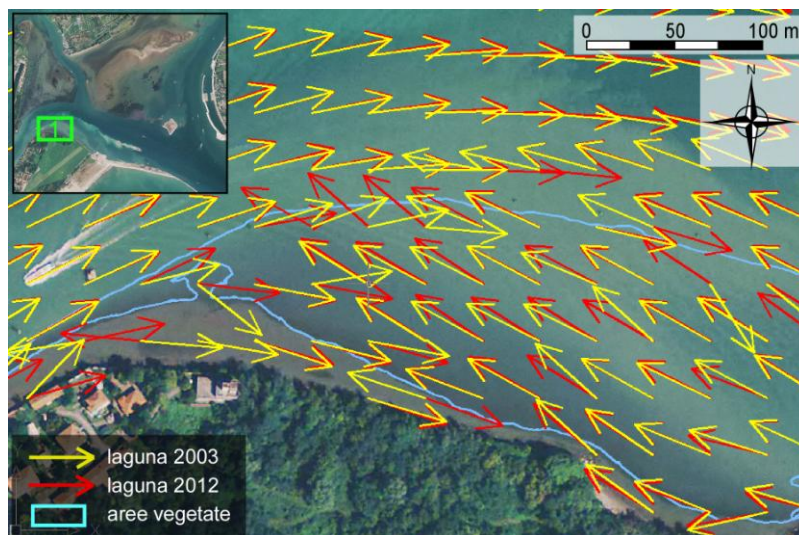


Figura 46 - Aree della bocca di Lido caratterizzate da evidenti cambiamenti di direzione delle velocità massime in prossimità della vegetazione.

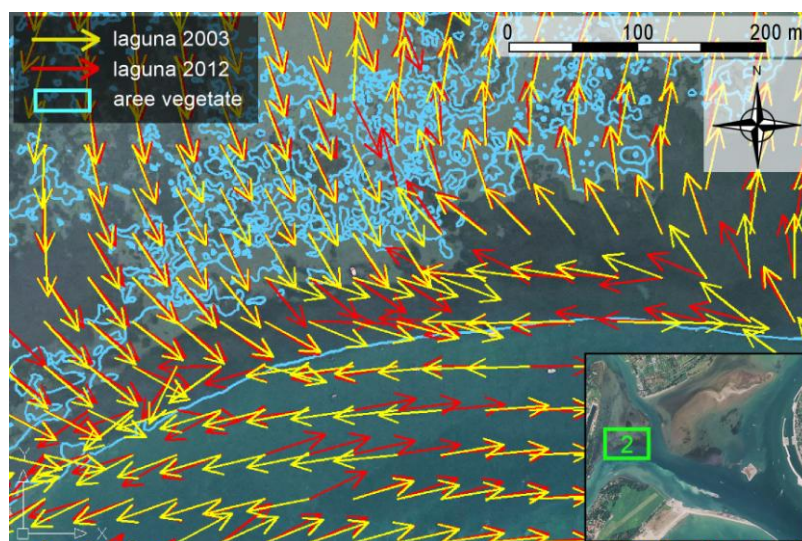


Figura 47 - Aree della bocca di Lido caratterizzate da evidenti cambiamenti di direzione delle velocità massime in prossimità della vegetazione.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

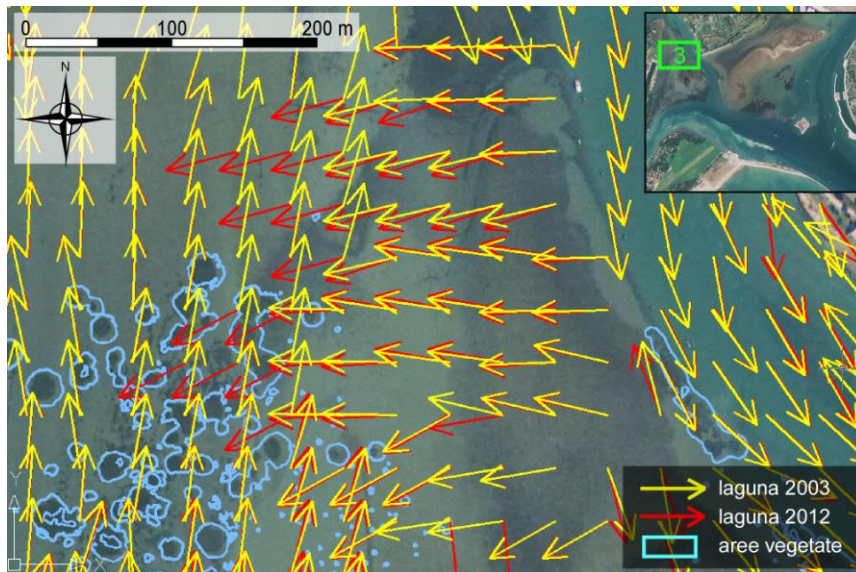


Figura 48 - Aree della bocca di Lido caratterizzate da evidenti cambiamenti di direzione delle velocità massime in prossimità della vegetazione.

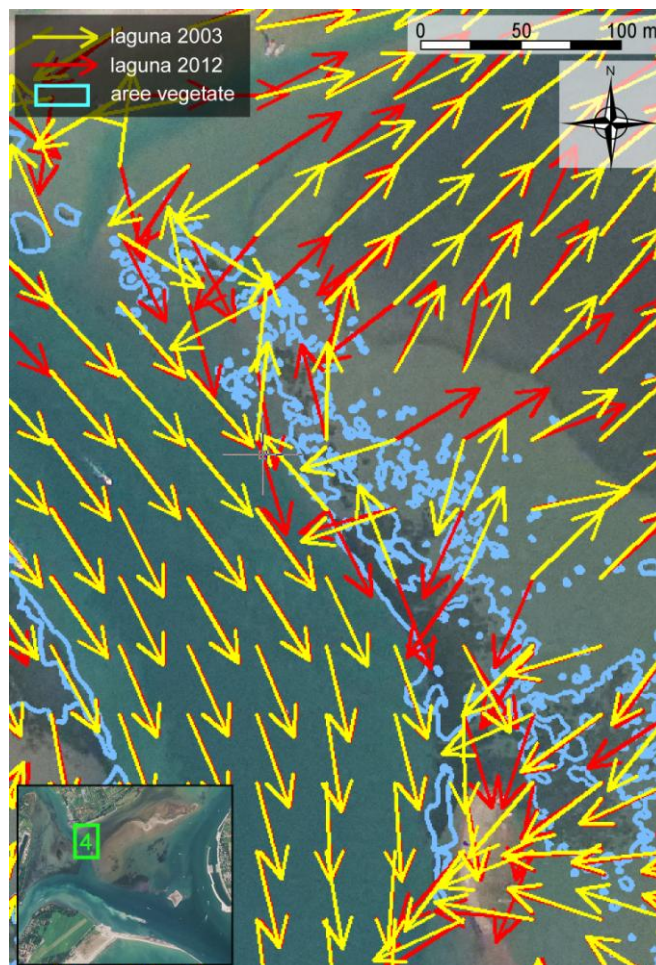


Figura 49 - Aree della bocca di Lido caratterizzate da evidenti cambiamenti di direzione delle velocità massime in prossimità della vegetazione.

CORILA
ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLA
COSTRUZIONE DELLE OPERE ALLE BOCHE LAGUNARI

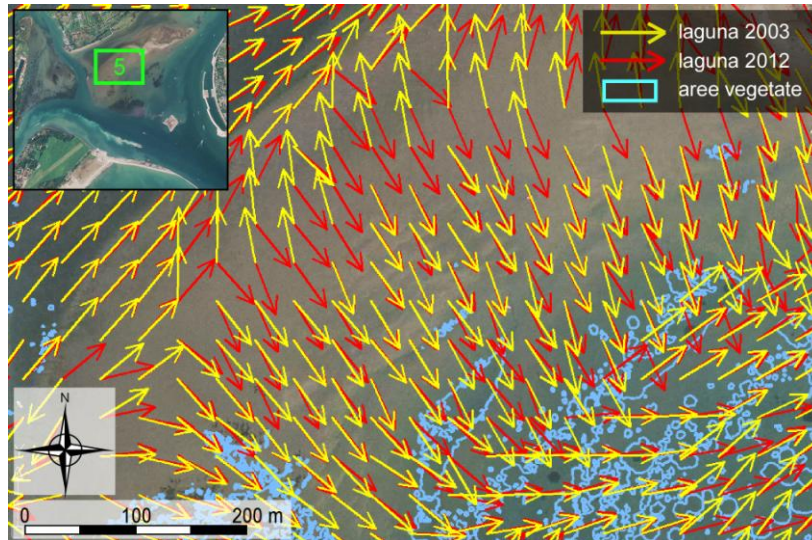


Figura 50 - Aree della bocca di Lido caratterizzate da evidenti cambiamenti di direzione delle velocità massime in prossimità della vegetazione.

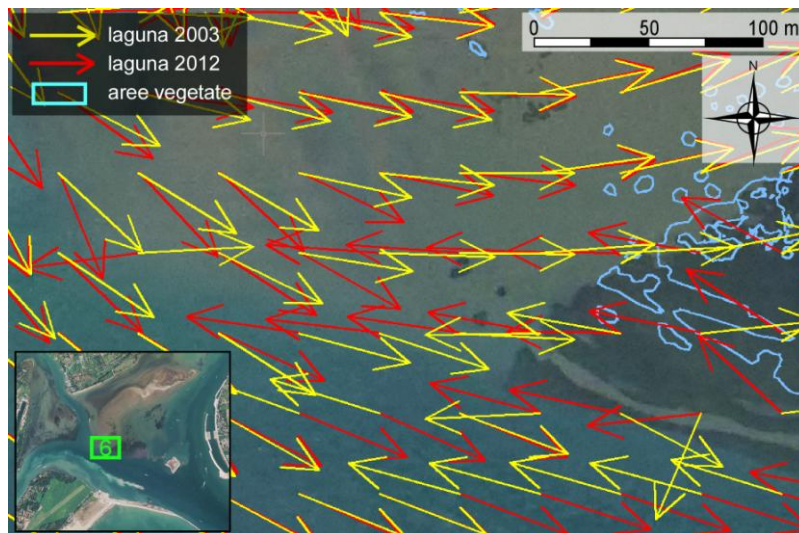


Figura 51 - Aree della bocca di Lido caratterizzate da evidenti cambiamenti di direzione delle velocità massime in prossimità della vegetazione.

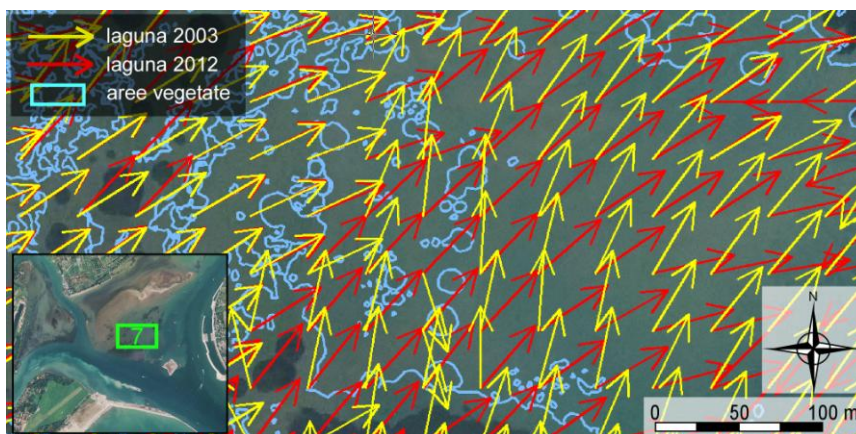


Figura 52 - Aree della bocca di Lido caratterizzate da evidenti cambiamenti di direzione delle velocità massime in prossimità della vegetazione.

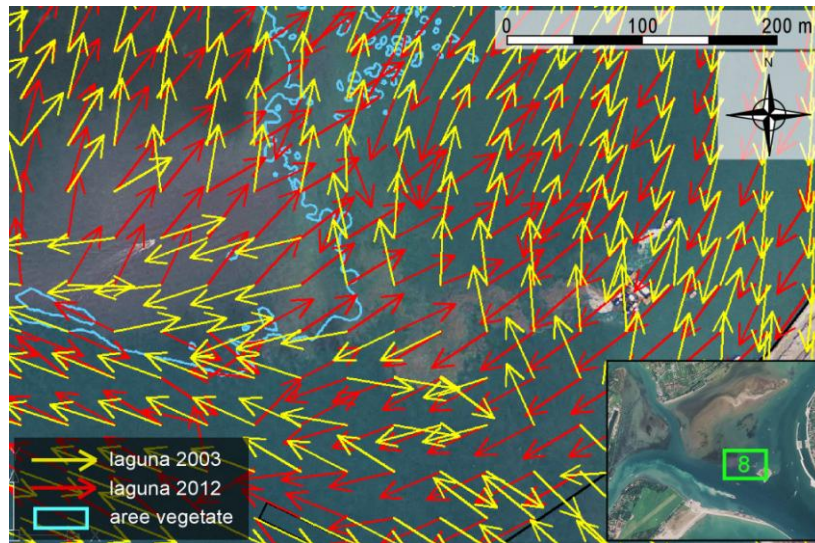


Figura 53 - Aree della bocca di Lido caratterizzate da evidenti cambiamenti di direzione delle velocità massime in prossimità della vegetazione.

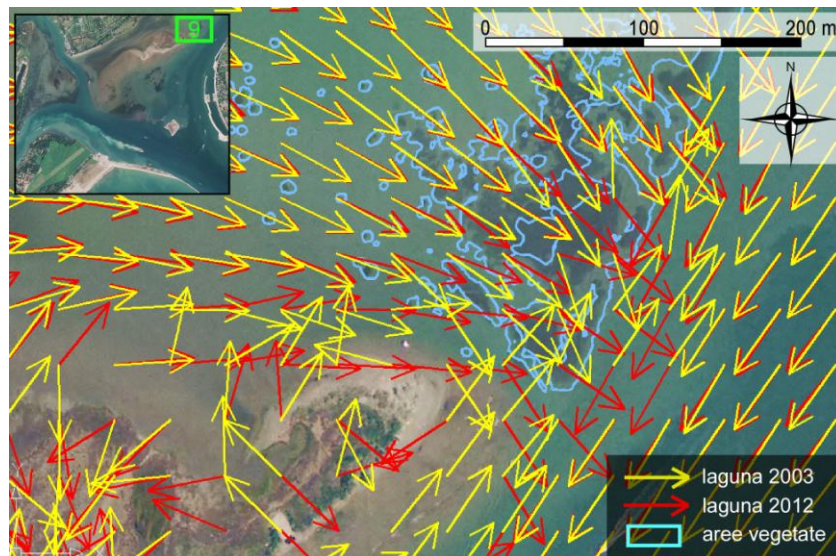


Figura 54 - Aree della bocca di Lido caratterizzate da evidenti cambiamenti di direzione delle velocità massime in prossimità della vegetazione.