

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile ed Ambientale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**TESI DI LAUREA**

Carlo Martignon

**IMPATTO DELLA CHIUSURA DELLE BOCHE DI PORTO  
SUI LIVELLI DI MAREA ALL'INTERNO DELLA LAGUNA  
DI VENEZIA IN PRESENZA DI VENTO INTENSO**

Relatore: Ch.mo Prof. Luigi D'Alpaos

Correlatore: Ing. Riccardo Mel

A.A. 2012/2013



# INDICE

INTRODUZIONE .....	1
1 LA MAREA A VENEZIA.....	5
1.1 Premessa .....	5
1.2 La marea astronomica.....	6
1.3 La componente meteorologica.....	9
1.4 Il sistema lagunare.....	11
1.5 Eustatismo e subsidenza .....	14
1.6 La propagazione della marea nella Laguna.....	17
1.7 Lo scambio di flussi idrici tra laguna e mare.....	20
2 L'AQUISIZIONE DEI DATI DI MAREA IN LAGUNA.....	25
2.1 Cenni storici.....	25
2.2 Gli organi preposti alla raccolta dei dati.....	27
2.3 Gli strumenti per la misura del livello del mare .....	28
2.4 Raccolta ed elaborazione dei dati.....	36
2.5 Stazioni meteo-marine utilizzate .....	37
2.6 La frequenza delle alte maree a Venezia e Chioggia.....	51
3 SOPRALZI DIFFERENZIALI DOVUTI AL VENTO.....	55
3.1 La spinta del vento sulla superficie marina.....	55
3.2 Esempi di dislivelli osservati.....	57
4 IL MODELLO: TARATURA E VERIFICA DEL COEFFICIENTE DI ATTRITO DEL VENTO .....	66
4.1 Introduzione al modello.....	66
4.1 Taratura del coefficiente di attrito del vento.....	71
4.2 La validazione del modello .....	84
5 LE NUOVE OPERE DI CHIUSURA DELLE BOCCHE.....	99
5.1 Introduzione .....	99
5.2 Storia del progetto.....	100
5.3 Breve descrizione dell'opera alle bocche .....	101
6 L'EFFETTO DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE DI PORTO SUI SOPRALZI DIFFERENZIALI .....	107
6.1 Modalità di chiusura delle bocche.....	108
6.2 Le simulazioni con bocche chiuse .....	114
6.3 Analisi e commento dei risultati .....	156
6.4 La variazione dei tempi di inizio della chiusura delle bocche.....	167
6.5 Il contributo della riduzione di livello al colmo e delle differenti condizioni al contorno sui dislivelli a bocche aperte.....	173
6.6 Alcuni esempi di superamento del livello di salvaguardia per opera dei sopralzi della superficie lagunare indotti dal vento .....	175
BIBLIOGRAFIA.....	183



## INTRODUZIONE

I livelli di marea che si registrano all'interno della laguna di Venezia sono determinati dalla somma di due effetti, la marea astronomica e il contributo meteorologico. Quest'ultimo è rappresentato soprattutto dall'effetto congiunto della differenza di pressione atmosferica e del vento, il cui attrito nel contatto aria-acqua influenza le quote della superficie liquida lagunare.

Il vento determina gradienti di livello di marea all'interno della laguna veneta distribuiti in relazione alla sua direzione.

Questo fenomeno può provocare, in caso di venti di bora, sopralzi differenziali, rispetto a Punta Salute fino a +40 cm in laguna Sud e -40 cm in laguna Nord.

Nei casi in cui l'effetto del vento si associa a condizioni favorevoli al fenomeno dell'acqua alta, i sopralzi sono il discrimine tra l'allagamento o meno dei centri abitati all'interno della laguna, come Venezia, Chioggia, Murano e Burano, i quali, essendo situati in zone diverse, sono diversamente penalizzati da differenti direzioni del vento.

Con la presente tesi si vuole indagare se la chiusura delle bocche di porto, nei modi e nei tempi previsti dal progetto in via di ultimazione, abbia influenza sull'entità di tali dislivelli, causando un allagamento non previsto di uno o più centri abitati.

Allo scopo si sono condotte delle simulazioni numeriche considerando alcuni eventi storici di "acqua alta" caratterizzati dalla presenza di vento di forte intensità, utilizzando il modello idrodinamico sviluppato dai ricercatori del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova e ipotizzando la chiusura delle bocche di porto.

Si sono in particolare esaminati i dislivelli che nascono tra laguna Nord e laguna Sud, confrontandoli con gli stessi dislivelli calcolati nella situazione attuale ma a bocche aperte.

I risultati ottenuti sono piuttosto interessanti e forniscono un quadro chiaro, sebbene non esaustivo, sul fenomeno dei sopralzi indotti da vento e sulle possibili conseguenze che potrebbero derivare ad alcune delle città lagunari con riferimento alla loro difesa dalle "acque alte."

Il motivo che mi ha spinto ad affrontare questa tesi è stata la curiosità intesa come desiderio di conoscere e approfondire alcuni aspetti e problemi che riguardano l'idraulica lagunare e in particolare la laguna di Venezia. Mi è sembrato giusto che il privilegio di vivere vicino a un ambiente così particolare e unico al mondo si tramutasse nell'impegno di conoscere e indagarne gli aspetti idraulici ai quali sono stati rivolti i miei studi miei studi, nell'ultimo periodo.

Il presente elaborato è strutturato nel seguente modo.

Nel Capitolo 1 si descrive in maniera sintetica il fenomeno della marea nella Laguna di Venezia elencandone le principali cause. Si accenna ai fenomeni dell'eustatismo e della subsidenza, i quali spiegano, in parte, l'aumento della frequenza degli eventi di "acqua alta" negli ultimi decenni.

Il Capitolo 2 è dedicato all'acquisizione dei dati di marea in laguna. Si fanno alcuni cenni storici sul sistema di osservazione e raccolta dati presente in laguna già dal 1871. Si elencano le strumentazioni adottate dai due principali istituti preposti alla raccolta dei dati, ISPRA e Centro Maree e sono brevemente descritte le stazioni meteo-mareografiche prese come riferimento per questo lavoro.

Nel Capitolo 3 si illustrerà il fenomeno dei sopralzi differenziali all'interno della laguna indotti dal vento attraverso l'osservazione di dati di livello registrati presso alcune stazioni mareografiche in occasione di particolari eventi di marea associata a venti sostenuti. Si presentano inoltre delle statistiche sulla frequenza dei dislivelli differenziali in laguna tra coppie di stazioni.

Terminata questa parte introduttiva, si entrerà nella fase più operativa del lavoro di tesi. Il Capitolo 4 illustrerà le fasi del processo di taratura del modello idrodinamico utilizzato per simulare il comportamento della marea all'interno della laguna.

Poiché l'obiettivo è quello di esaminare l'andamento dei livelli di marea nella situazione di bocche di porto chiuse, nel Capitolo 5 si descriveranno brevemente le nuove opere alle bocche progettate per intercludere la laguna rispetto al mare per fronteggiare il fenomeno delle "acque alte".

Il Capitolo 6, infine, rappresenta la parte più originale e il fulcro del lavoro di tesi. Saranno esposti il procedimento adottato e i risultati delle simulazioni di eventi storici condotte, attraverso il modello idrodinamico, ipotizzando la chiusura delle bocche di

porto. Si metteranno a confronto i livelli di marea raggiunti in differenti stazioni all'interno della laguna con la situazione con bocche di porto aperte. Verranno infine messi in luce gli effetti dei dislivelli differenziali sul possibile allagamento non previsto di alcuni centri urbani e alcuni risultati discordanti da quanto emerge da documenti ufficiali riguardanti tale fenomeno.



# 1 LA MAREA A VENEZIA

## 1.1 Premessa

I livelli di marea osservati nella laguna di Venezia sono dati dalla somma di due componenti: la marea astronomica, correlata al moto dei corpi celesti, principalmente Luna e Sole, e il contributo meteorologico dovuto allo stato dell'atmosfera ( in inglese “*storm surge*”, ondata di bufera. Il contributo meteorologico ( di “rialzo marino” quando innalza il livello e analogamente di “ribasso” quando lo deprime) può assumere un ruolo rilevante negli eventi di marea e ha inoltre lo svantaggio, rispetto alla marea astronomica, di essere prevedibile con maggiore difficoltà e in tempi più ristretti.

È bene sottolineare che questi due contributi (astronomico e meteorologico) sono indipendenti, pertanto è possibile applicare il principio di sovrapposizione degli effetti.

Gli eventi di marea che superano con il loro livello al colmo gli 80 cm sullo zero mareografico di Punta della Salute vengono denominati convenzionalmente eventi di “acqua alta”; a questa quota sorgono problemi di trasporto e di viabilità pedonale nei punti altimetricamente più depressi della città (Piazza San Marco). Sempre convenzionalmente si classificano come “acque alte eccezionali” le maree il cui colmo supera il livello di 140 cm rispetto allo stesso zero mareografico. Gli eventi di marea con livello massimo compreso tra i due limiti indicati, che sono i più frequenti, sono invece catalogati come “acque medio-alte”.

All'aumento della frequenza degli eventi di acqua alta a Venezia nel corso degli ultimi decenni, hanno contribuito fenomeni quali l'eustatismo (innalzamento del livello del mare) e la subsidenza del suolo.

La subsidenza può essere determinata da naturali processi di consolidamento di terreni argillosi o limosi (subsidenza naturale), ma anche da processi di compattazione degli stessi livelli per depressurizzazione delle falde, a causa di un eccessivo sfruttamento delle loro acque da parte dell'uomo (subsidenza di origine antropica). È quanto si è verificato a Venezia nel secolo appena trascorso quando, soprattutto per le necessità dello sviluppo industriale di Porto Marghera, si è fatto uso massiccio e indiscriminato di acque sotterranee, attingendo portate copiose dalle falde in pressione.

Prima di analizzare in maniera più dettagliata i fenomeni che determinano le onde di marea è bene fare alcune precisazioni sui livelli di riferimento.

Il primo piano di riferimento adottato a Venezia fu il Comune Marino calcolato per l'anno 1825, definito come il livello medio delle alte maree, coincidente con la "linea del verde" formata dalle alghe presenti sui muri degli edifici e sulle fondamenta che fiancheggiano i canali. Anticamente nella città di Venezia, ritenendosi erroneamente invariabile questo livello, il comune marino veniva individuato con un tratto orizzontale sovrastato da una C. Lo zero fu allora fissato a 1.50 m al di sotto del Comune Marino, al fine di non dover trattare valori numerici negativi.

Oggi le registrazioni del livello di marea in laguna e le previsioni per la città di Venezia fanno riferimento allo Zero Mareografico di Punta della Salute (ZMPS), pari al livello medio del mare di Venezia nel 1897, calcolato mediando 25 anni di osservazioni, dal 1885 al 1909, ed assegnando il valore di riferimento all'anno centrale. Rispetto alla rete altimetrica dello stato italiano, riferita al livello medio del mare registrato dal mareografo di Genova nel 1942 (mediando i dati registrati dal 1937 al 1946), lo ZMPS risulta più basso di circa 23.5 cm a causa di fenomeni di subsidenza ed eustatismo.

La convenzione dello zero mareografico consente, al presentarsi anche a distanza di molti decenni di due fenomeni mareali del medesimo livello (ad esempio 110 cm) di verificare come essi approssimativamente determinino l'allagamento delle stesse calli e della stessa area complessiva nei centri abitati, a meno che in essi non siano stati attuati lavori di rialzo della pavimentazione, numerosi nell'ultimo decennio e altrettanti in programmazione nei prossimi anni.

## **1.2 La marea astronomica**

Le maree sono state definite come «movimenti periodici della superficie del mare, che sono direttamente correlati in ampiezza e fase ad alcune forze geofisiche» (Pugh, 1987). La forza dominante è il campo gravitazionale alla superficie terrestre, generato dal sistema terra-sole-luna. Altre forze sono legate ai fenomeni meteorologici (tipicamente irregolari nel tempo, come le oscillazioni nella pressione atmosferica) come pure a piccoli movimenti della superficie solida del pianeta (maree terrestri) che producono piccole variazioni del livello marino.

A Venezia la marea astronomica descrive una curva di tipo prevalentemente semidiurno, con due massimi e due minimi nelle 24 ore. Durante le fasi di luna nuova e di luna piena gli effetti del Sole e della Luna si sommano, determinando le massime oscillazioni di marea (sizigie). Nei periodi di primo e ultimo quarto, invece, la marea è meno ampia e meno regolare (quadratura) e possono esservi giorni con un solo minimo e un solo massimo.

Un metodo usato frequentemente per la previsione della marea astronomica in una certa località, è l'analisi per componenti armoniche.

Questa si basa sull'assunzione che  $y(t)$ , l'altezza di marea al tempo  $t$ , possa essere rappresentata dalla somma dei valori assunti in quell'istante da alcune curve sinusoidali:

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t - \varphi_n)$$

dove  $A_n$  è l'ampiezza,  $\omega_n$  la pulsazione o velocità angolare,  $\varphi_n$  il ritardo di fase della componente  $n$ .

$A_0$  è il livello medio di riferimento osservato ( per Venezia, nel periodo 1999-2008  $A_0=26$  cm) .

Nel caso dell'Adriatico sono sufficienti sette componenti armoniche per il calcolo pratico della marea astronomica: quattro semidiurne (M2, S2, N2, K2) e tre diurne (K1, O1, P1). Una ulteriore componente diurna (S1), con ampiezza di poco superiore al centimetro, può essere inclusa per Venezia. L'indice 1 o 2 indica la periodicità (diurna o semidiurna) di ciascuna componente. Utilizzando un maggior numero di componenti armoniche si ottengono variazioni nel livello calcolato, che sono trascurabili rispetto agli errori di misura dei dati di livello (circa 1 cm).

Le frequenze angolari  $\omega_n$ , calcolate attraverso la teoria a partire dai periodi dei moti celesti, sono assunte come costanti note. L'ampiezza  $A_n$  e la fase  $\varphi_n$  di ciascuna componente in una particolare località, dette costanti armoniche, possono essere calcolate analizzando, ad esempio col metodo dei minimi quadrati, estese serie storiche di dati di livello del mare.

Bisogna notare che la fase, essendo un ritardo rispetto ad un istante fissato, può essere calcolata secondo diverse convenzioni: essa è indicata con  $\kappa$  quando rappresenta il ritardo (in termini angolari) del massimo di marea rispetto al passaggio della luna, o dell'astro di riferimento, sul meridiano della località considerata. Questo ritardo sarebbe nullo se le acque potessero portarsi all'istante in equilibrio con le forze che le sollecitano. In letteratura la fase viene a volte indicata con il simbolo  $g$  e rappresenta il ritardo del massimo di marea rispetto al passaggio della luna sul meridiano di Greenwich.

Nell'eseguire praticamente il calcolo viene invece utilizzata una convenzione più comoda: i valori di fase rappresentano ritardi rispetto ad uno zero temporale fissato (ad esempio inizio dell'anno 2013). La tabella che segue fornisce i valori del ritardo di fase  $\varphi$  legati all'anno 2013, in modo che  $t$  sia espresso in ore e  $t=1$  corrisponda alle ore 1 del 1 gennaio 2013 (ora italiana),  $t=2$  alle ore 2, ...  $t=8760$  alle ore 24 del 31 dicembre 2013.

I valori riportati tengono conto anche della leggera variazione di  $A$  e  $\varphi$ , che si verifica anno per anno attorno ai valori medi, secondo leggi ben precise, ma che costringe all'uso di tabelle. Se si esegue il calcolo anche per anni diversi dal 2013, ma abbastanza vicini, o se si tollerano errori al 5%, questi valori sono comunque soddisfacenti.

<b>Costanti armoniche di marea per il 2013</b>								
	<b>M2</b>	<b>S2</b>	<b>N2</b>	<b>K2</b>	<b>K1</b>	<b>O1</b>	<b>P1</b>	<b>S1</b>
<b>Ampiezza A (cm)</b>	25.5	14.5	4.2	3.5	16.4	4.5	5.8	1.5
<b>Fase <math>\phi</math> (gradi)</b>	42°	323°	295°	102°	72°	188°	96°	267°
<b>Velocità angolare <math>\omega</math> (gradi/ora)</b>	28.9841	30.0000	28.4397	30.0821	15.0411	13.9430	14.9589	15.0000

### 1.3 La componente meteorologica

La regolarità della marea astronomica è alterata, in modo a volte notevole, dai fattori meteorologici e tra essi soprattutto il vento e la pressione.

**Il vento.** Nel caso del mare Adriatico, bacino lungo e stretto, chiuso nel lato superiore e aperto in quello inferiore, un forte vento che soffia da sudest (scirocco), lungo l'asse longitudinale, produce un accumulo d'acqua verso l'estremità chiusa.

Il fenomeno viene favorito dalla lunga zona d'azione disponibile per il vento denominata "fetch" ed è ulteriormente amplificato a causa dei bassi fondali della parte settentrionale dell'Adriatico dove non si raggiungono i 50 metri.

Il sovrizzo dovuto al vento può superare anche il metro e provocare da solo fenomeni di inondazione.

Occorre precisare che l'onda di marea astronomica nel Mediterraneo si muove da Est a Ovest e risale nell'Adriatico propagandosi come un raggio rotante in senso antiorario attorno ad un punto anfidromico, situato circa a metà della distanza Ancona-Zara. Nel momento in cui la marea entra nel canale d'Otranto essa percorre il mare Adriatico in senso antiorario con una celerità di propagazione di circa 130 km/h. Essa risale dapprima la costa balcanica della Dalmazia in direzione sud-nord, lambisce l'Istria e prosegue verso Trieste e Grado. Successivamente ruota in senso est-ovest verso Lignano, Venezia e Chioggia, per percorrere infine la costa italiana verso Ancora, Vieste e Brindisi e riunirsi ad Otranto, dopo 12 ore e 24 minuti, con la successiva onda di marea proveniente dallo Ionio per ricominciare il ciclo (Polli, 1961a). Per questo motivo quindi anche la bora, vento che spira da nordest, tende ad accumulare acqua verso la laguna.

La bora può avere intensità spesso superiore allo scirocco e inoltre ha frequenza molto maggiore, tuttavia il suo effetto sulla marea è limitato a causa del fetch ridotto e dell'angolo tra la direzione di provenienza del vento e le bocche di porto.

Chioggia, per la sua posizione all'estremo Sud-Ovest della laguna, quindi sopra-vento, è la più penalizzata da tale vento, che, come vedremo più dettagliatamente in seguito, provoca sovrizzi di marea anche di 20-30 cm rispetto a Venezia e anche 60 cm rispetto alla laguna Nord.

Quando alla bora sull'alto Adriatico si associa lo scirocco sul basso e medio Adriatico, si verifica la cosiddetta "scontratura", cioè la convergenza di correnti marine provocate dall'attrito sul mare di venti da nordest e sudest. Si tratta del fenomeno della "bora scura", noto fin dai tempi antichi, ha fatto registrare numerosi eventi di marea eccezionale tra cui il secondo (+166 cm il 22 dicembre 1979) e il terzo massimo storico (+158 cm il primo febbraio 1986). Quando invece il fenomeno si presenta in situazioni di alta pressione si definisce di "bora chiara" e il suo contributo sulla marea è poco rilevante.

**La pressione.** Le variazioni di pressione atmosferica oltre a produrre campi di vento sono causa diretta delle variazioni di livello del mare. Il concetto è assai semplice: dove l'atmosfera preme di meno (basse pressioni locali), lì il mare tenderà a sollevarsi (effetto del barometro invertito), quindi un'area di bassa pressione sul Nord Adriatico e una di alta al Sud provocano un effetto di spostamento della massa d'acqua nella direzione della pressione atmosferica minore.

La variazione è di circa 1 cm per ogni millibar di variazione di pressione, si può arrivare cioè fino a 30 cm al passaggio di una perturbazione.

Gradiente barico elevato e vento di scirocco sono dunque i fattori di maggior influsso per la marea a Venezia. Pertanto, lo scenario meteorologico a larga scala che provoca le inondazioni è caratterizzato dalla presenza di una depressione marcata sull'Italia centro settentrionale e sui mari prospicienti. In questa posizione il minimo barico determina l'insorgere di forti venti meridionali che si incanalano lungo l'asse longitudinale dell'Adriatico stretti tra le catene montuose appenninica e dinarica e assieme all'effetto dovuto alla diminuzione della pressione provocano rialzi marini notevoli. Le condizioni appena descritte si manifestano soprattutto in autunno-inverno, per il passaggio di perturbazioni atlantiche che entrano nel Mediterraneo e scavano quei minimi depressionari su Tirreno, Mar Ligure e Alto Adriatico che abbiamo nominato sopra. È in questo periodo infatti che a Venezia si hanno i casi di "acqua alta" più frequenti e sostenuti.

Osservazioni hanno dimostrato che la bassa pressione non è sufficiente a determinare un evento di acqua alta se non è accompagnato da venti di scirocco. Ad esempio, il giorno

in cui si raggiunse a Venezia un minimo di pressione record di 968 hPa accompagnato però da forte vento di Libeccio, il contributo meteorologico si è mantenuto al di sotto dei 60 cm, valore contenuto, raggiungibile con un molto più ridotto scarto barico e modesto vento di scirocco.

**Le sesse.** Un fenomeno particolare che si realizza all'interno dell'Adriatico è quello delle onde di sessa. Le sesse sono delle oscillazioni libere caratteristiche dei bacini chiusi (quale l'Adriatico) che rappresentano la risposta del mare ad un forte impulso dovuto ad una bufera.

In pratica il passaggio di una perturbazione e il suo rapido esaurirsi agisce sulla marea con una sorta di stimolo impulsivo, lo "storm surge", in seguito al quale l'Adriatico, a causa della forma del bacino, si comporta come una cavità risonante: al cessare dell'impulso la massa d'acqua per tornare ad una situazione di equilibrio compie una serie di oscillazioni longitudinali e trasversali, le "sesse" appunto, la cui ampiezza si smorza nel tempo. L'oscillazione fondamentale, longitudinale, ha un periodo di 22 ore circa. Di quest'ultima componente bisogna tener conto nella previsione di marea: accade infatti abbastanza spesso che nei giorni successivi ad uno "storm surge", grazie allo sfasamento di quasi 2 ore tra la periodicità della marea astronomica (circa 24 ore) e la sessa (circa 22 ore), l'oscillazione possa trovarsi in fase con il massimo di marea astronomica e provocare acqua alta, in alcuni casi con massimi del livello superiori a quello verificatosi durante la mareggiata. Ci sono poi delle sesse secondarie, la più importante delle quali ha un periodo di circa 11 ore, causate dall'insorgenza di venti di bora e da una loro rapida attenuazione.

#### **1.4 Il sistema lagunare**

Ho svolto finora una breve panoramica sulla marea e sui vari fattori (vento, pressione, sesse...) da tenere in considerazione in sede di previsione dell'onda in posizioni diverse all'interno della laguna. È utile a questo punto capire come si configura l'ambiente lagunare entro cui si sviluppa l'onda di marea, e evidenziare in breve le peculiarità che lo rendono un ambiente unico ed estremamente interessante dal punto di vista paesaggistico e idraulico.

Il sistema lagunare può essere suddiviso in tre sottosistemi, la cui interconnessione ed interdipendenza determinano l'esistenza e la natura della laguna stessa.

- Il primo, comprende il **Bacino scolante in laguna**, cioè la rete idraulica superficiale di tutti i sottobacini idrografici che consegnano, naturalmente o artificialmente, le loro acque in laguna e la rete dei grandi fiumi contermini alla laguna stessa, sfocianti in mare, ma in comunicazione con essa durante gli eventi estremi.
- Il secondo, comprende i sottili **cordoni litoranei discontinui** che impediscono alla laguna di trasformarsi in un golfo chiuso, la parte a mare delle bocche di porto, il paraggio marino che si estende almeno dalla foce del fiume Piave, a Nord, alla foce del fiume Adige, a Sud, dominato dalla piattaforma meteorologica del CNR. Questo sottosistema è determinante ai fini sia della formazione e della distribuzione delle acque alte, sia della generazione del moto ondoso nel momento in cui trasmette e filtra il comportamento idrodinamico di tutto l'Adriatico all'interno della laguna.
- Il terzo, comprende il **bacino e le acque lagunari**, contenute all'interno di quel perimetro, già strutturalmente definito tra il 1600 ed il 1800, detto conterminazione lagunare, nonché la parte lagunare delle bocche di porto.

I tre sistemi interagiscono in modo complesso e non lineare.

Infatti un evento di acqua alta non solo innalzerà rapidamente i livelli idrici lagunari attraverso le bocche, quindi da mare, ma influenzerà anche i livelli idrici fluviali, nei grandi fiumi e nel Bacino scolante, modificandone l'afflusso in laguna e quindi influenzando i livelli idrici lagunari anche da terra.

Analogo effetto potrà essere causato dal realizzarsi di uno scenario eustatico, cioè di crescita del medio mare nell'Adriatico settentrionale.

Le bocche di porto sono l'elemento morfologico e strutturale che pongono in comunicazione l'ambiente lagunare con l'ambiente marino, salmastro.

La conterminazione lagunare, gli scoli e le foci in laguna sono gli elementi morfologici e strutturali che pongono in comunicazione l'ambiente della terraferma con l'ambiente lagunare, delle acque dolci.

La laguna è, quindi, un ambiente di transizione e per essere tale deve essere salvaguardato ed accompagnato nel suo perenne e precario equilibrio tra due mondi diversissimi e lontani.

**Il bacino lagunare.** Sofferamoci quindi sul terzo sottosistema che abbiamo elencato sopra.

La Laguna di Venezia è divisa in tre sottobacini, Lido, Malamocco e Chioggia, e si estende tra il corso terminale del Brenta a sud (foce di Brondolo) ed il tratto finale del Sile a nord (foce di Piave Vecchia), con una lunghezza di circa 50 km ed una larghezza compresa tra 11 e 12 km, racchiudendo una superficie di 550 kmq, dei quali:

- 420 kmq circa sono occupati dagli specchi d'acqua e dalle barene<sup>1</sup>;
- 90 kmq dalle valli da pesca<sup>2</sup>;
- 40 kmq dalle terre emerse.

Nel bacino lagunare si distinguono una fitta rete di canali principali e meandriformi, i ghebi, che si addentrano nelle barene, e terminano nei chiari, specchi d'acqua piovani o salmastri racchiusi nelle barene. Ai lati dei canali si estendono i bassifondi, vaste aree poco profonde comprendenti le velme<sup>3</sup>, che in particolari condizioni di bassa marea sono emerse.

La distribuzione attuale delle superfici risulta pari a: 6,4% di isole, 1,6% di argini, 11,9% di canali e 80,1% di velme e barene.

Abbiamo a disposizione mappe storiche che riportano i valori di profondità della laguna misurati negli anni 1810 (realizzata da Denaix), 1901, 1930, 1970, 1990 e 2003 provenienti da diverse fonti.

Il rilievo del 2003 è il più recente disponibile che copre tutta la laguna ed è stato realizzato dal Magistrato alle Acque mentre l'elaborazione è stata curata dal CNR-ISMAR.

---

<sup>1</sup> Le "barene" sono le aree di terreno tipiche della laguna veneta la cui quota superiore, generalmente di 20-40 cm, al livello del mare le rende sommergibili soltanto durante le fasi di alta marea pronunciata.

<sup>2</sup> Zone umide a regime idraulico artificialmente controllato, separate dalla laguna propriamente detta da argini impermeabili e quindi non sottoposte al regime delle maree.

<sup>3</sup> Vengono indicate più comunemente come *paludi*

La conoscenza dei rilievi e il loro reciproco confronto è in grado di evidenziare le importanti variazioni morfologiche che sono intervenute nella laguna nel corso degli ultimi due secoli, ma soprattutto permettono di analizzare, mediante una accurata modellazione matematica delle rispettive configurazioni, come si sia andato modificando nel tempo il comportamento idraulico della laguna e in quale misura gli interventi attuati dall'uomo, sovrapponendosi ai fenomeni naturali da sempre in atto nell'area veneziana, abbiano singolarmente e nel loro complesso inciso sui processi morfodinamici lagunari.

Dal confronto tra i rilievi batimetrici si riscontra una drastica riduzione delle superfici occupate dalle barene che passano dai 182 kmq della carta del Denax (1810) ai 104 kmq del 1930 ai 64 kmq del 1970 per finire con i 48 kmq rilevati nel 2003.

Emergono inoltre l'appiattimento e l'approfondimento generalizzato dei canali, intensi fenomeni erosivi e scambi tra mare e laguna di gran lunga superiori a quelli del passato.

In generale questi cambiamenti hanno permesso una più "agevole" propagazione dell'onda di marea all'interno della laguna soggetta sempre meno a processi di tipo dissipativo in favore dei fenomeni inerziali.

Le informazioni e i dati riguardanti la morfologia lagunare sono molto importanti per la realizzazione dei modelli matematici e vanno costantemente aggiornati alla luce dei cambiamenti che si realizzano.

Noi utilizzeremo uno di questi modelli per il quale è necessario calibrare alcuni coefficienti d'attrito, arealmente distribuiti: il coefficiente d'attrito del vento, cioè tra vento e superficie idrica lagunare, assunto proporzionale alla velocità del vento e il coefficiente d'attrito di fondo, cioè tra le correnti ed i fondali lagunari, calcolato attraverso il coefficiente di Strickler,  $K_s$ , posto in dipendenza della profondità e della scabrezza equivalente.

Di questo si parlerà più approfonditamente in seguito nell'ambito della descrizione del modello.

## **1.5 Eustatismo e subsidenza**

Nella breve descrizione che ho fatto finora ho cercato di elencare gli aspetti principali che riguardano il fenomeno della marea a Venezia, a partire dai fattori naturali da cui è generata per passare poi a una breve descrizione della morfologia dell'ambiente lagunare

entro cui l'onda di marea si insinua e si propaga cambiando la propria forma e ampiezza. Queste conoscenze tuttavia non bastano a spiegare il fenomeno delle "acque alte" nella laguna e l'aumento significativo negli ultimi decenni della loro frequenza.

L'intensificarsi degli eventi con livelli idrici superiori a quote tali da provocare disagi alla città è attribuibile in modo determinante alla perdita di franco altimetrico, sia per eustatismo che per subsidenza.

**La subsidenza naturale.** La subsidenza naturale del suolo di Venezia e del fondale della sua laguna, dovuta prevalentemente al consolidamento dei sedimenti fini di recente deposito, presenta un andamento nel tempo decrescente.

Stimata attorno al valore medio di 1,3 mm/anno per tutta l'epoca storica, è stata misurata agli inizi di questo secolo su un più limitato valore di 0,37 mm/anno (rilevazione 1900-1930), con un'evidente riduzione, interpretata come una naturale, lenta, attenuazione del fenomeno.

Per il prossimo secolo il probabile valore di subsidenza media è stato stimato cautelativamente attorno a 3 cm (0,3 mm/anno), se non meno.

Va peraltro segnalato che attorno a tale valore medio si potranno riscontrare sensibili differenze, in particolare tra i valori delle zone tuttora esposte a dinamiche più intense, quali le bocche di porto, per una relativa arretratezza nel processo di consolidamento, e zone ove le dinamiche saranno più modeste se non addirittura in via di definitivo esaurimento, come le zone più storiche del Centro Storico di Venezia, dal substrato più compattato per il sovraccarico insediativo storico, come già si riscontra con evidenza.

**La subsidenza di origine antropica.** Il vasto cono di depressione del livello piezometrico medio, generato dagli emungimenti d'acqua sotterranea per uso industriale a Porto Marghera soprattutto negli anni '50 e '60 (fino a 500 l/s dai primi sei acquiferi fino a -320 m), ha determinato negli stessi anni anche a Venezia un'ulteriore subsidenza, di induzione antropica, quantificata in circa 12 cm (1973).

Interrotti gli emungimenti agli inizi degli anni '70, la rapida ripressurizzazione delle falde ha determinato un 'recupero elastico' ('rebound') limitato, ma significativo, di circa 2 cm medi (già rilevato agli inizi degli anni '80).

La misura complessiva finale della subsidenza di induzione antropica per emungimenti industriali, innescata nei primi decenni di questo secolo e ormai esaurita, è quantificata nel complesso in 10,4 cm .

**Eustatismo.** Nell'attuale secolo, la componente eustatica media rilevata a Trieste (ritenuta altimetricamente stabile) è quantificata in 1,13 mm/anno (periodo 1896-1993), ovvero circa di 11 cm nel secolo.

In tale periodo l'andamento non è stato regolare.

La crescita del livello del mare risulta pressoché interamente concentrata nei primi 60-70 anni (con una media stimabile attorno 1,6 mm/anno). Gli anni successivi vedono una stasi pressoché totale del fenomeno, ovvero una fase di 'quiescenza' con valori di stabilità, rilevata a Trieste nel periodo 1971-1993; tale stabilità è riconosciuta nelle rilevazioni e ricerche già dei primi anni '80, anche per Rovigno e Buccari.

Tali medie secolari di eustatismo regionale sono ritenute di entità analoga all'andamento dell'eustatismo di questo secolo rilevato in diverse altre località del Mar Mediterraneo.

Quanto agli andamenti recenti del fenomeno a scala più globale sono solo da poco tempo disponibili alcune misurazioni attendibili, ottenute con le tecnologie satellitari e le modalità di elaborazione più recenti. Rispetto alle precedenti rilevazioni su base mareografica (oscillanti tra 0,5 e 3 mm/anno) e su base geodetica spaziale (da 2 a 3 mm/anno), le più recenti valutazioni satellitari stimano l'eustatismo globale in  $0,91 \pm 0,39$  mm).

Le relazioni tra andamento di eustatismo regionale e l'eustatismo globale sono ancora da esplorare.

**Andamento complessivo del medio marino di Venezia.** Sommando quindi gli effetti di subsidenza e eustatismo si ha la perdita complessiva del franco altimetrico di Venezia.

Secondo le più recenti misurazioni, il livello medio del mare, attualmente, è circa 26 cm (media degli ultimi dieci anni) più alto di quello del 1897.

Per quanto riguarda gli scenari futuri le opinioni in ambito scientifico sono contrastanti. È chiaro che le preoccupanti previsioni sull'innalzamento del livello medio

del mare nei prossimi cento anni ha riflessi concreti sulla funzionalità delle opere che si stanno realizzando per la difesa dalle “acque alte” e sulla loro frequenza di attivazione.

Le stime dell’International Panel on Climate Change (IPCC) indicano, infatti, incrementi compresi in un intervallo che varia tra i 9 cm ( 0.9 mm/anno), nella più ottimistica delle ipotesi, e gli 88 cm ( 8.8 mm/anno), nella più severa delle previsioni (IPCC 2001).

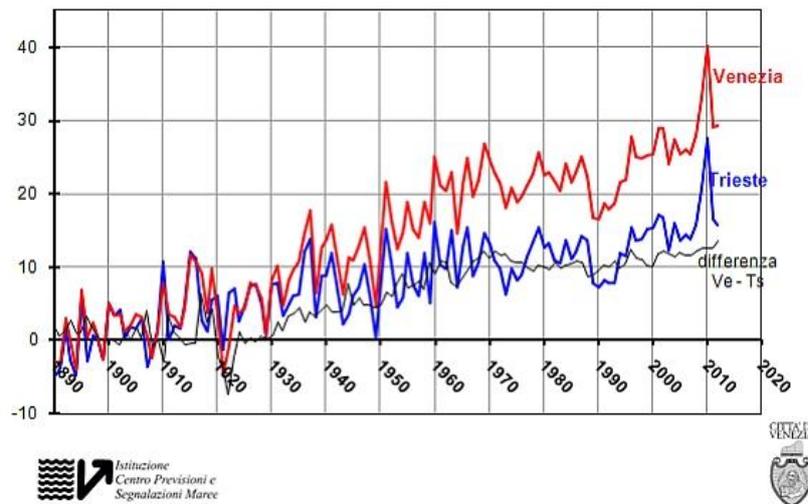


Figura 1.1 I dati di Trieste provengono da ISMAR-CNR Istituto di Scienze Marine Trieste. I dati di Venezia, per il periodo 1890-1922 provengono da fonti varie, per il periodo 1923-1982 dall'archivio Apat, per il periodo 1983-2012 dall'archivio ICPSM (Fonte: Centro Maree)

## 1.6 La propagazione della marea nella Laguna

La profondità media è di circa 1.5 m e varia da poche decine di centimetri nelle zone più interne, a qualche decina di metri nei canali artificiali e nelle bocche di porto.

La propagazione della marea all'interno della laguna presenta dei caratteri peculiari e tipici di questo ambiente, che sono tuttavia influenzati anche dal comportamento della marea nel bacino su cui la laguna si affaccia. Il mare Adriatico, infatti, per la sua conformazione stretta e poco profonda, tende ad ampliare la componente astronomica della marea che si sviluppa nel Mediterraneo: se nel Canale d'Otranto l'escursione media è pari a  $\pm 10$  cm, in Laguna di Venezia l'escursione media è dell'ordine di  $\pm 60$  cm, con valori massimi di  $\pm 75-80$  cm (Berrelli, 2004).

Nel golfo di Venezia l'onda di marea si propaga da nord-est a sud-ovest con un ritardo molto contenuto: essa si presenta alle tre bocche di porto quasi contemporaneamente, sfasata solo di pochi minuti. Attraverso le bocche di Lido, Malamocco e Chioggia, la

marea si espande nella laguna diramandosi attraverso i suoi canali (Polli, 1961b). Essi permettono il flusso e riflusso dell'acqua, consentendo il ricambio idrico necessario alla sopravvivenza dell'ecosistema lagunare stesso. La loro profondità, che diminuisce progressivamente dalle bocche verso la gronda lagunare, varia tra i 15 m del canale artificiale Malamocco-Marghera nel suo tratto più prossimo alla bocca di Malamocco e gli 1-2 m circa degli altri canali, mentre la loro lunghezza supera talvolta anche i 20 km.

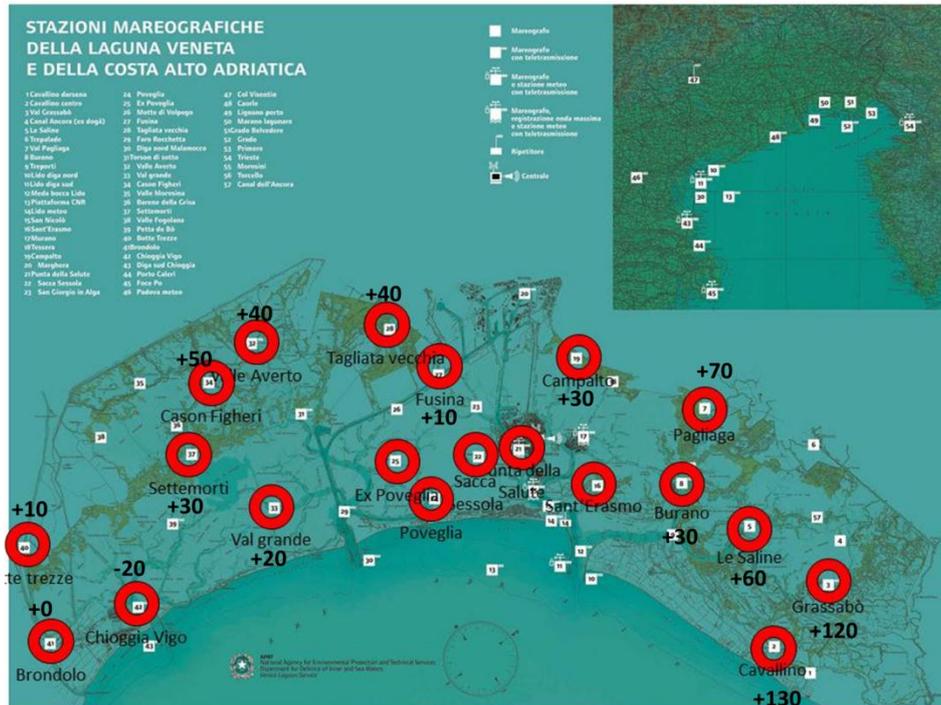
Durante la fase di flusso, la marea si propaga lungo i canali ed invade i vasti e bassi fondali della laguna.

Durante la fase di riflusso invece l'acqua affluita nella laguna si ritira nei canali e, lungo questi, torna al mare.

L'onda di marea che cerchiamo di prevedere nel bacino di San Marco non è la stessa in tutto il bacino lagunare, essa infatti non si propaga inalterata. Sappiamo infatti che l'onda di marea subisce un ritardo, un'attenuazione e una deformazione che si accrescono progressivamente nell'avanzare dalle bocche di porto alle località più interne della laguna. L'altezza dell'onda di marea viene smorzata all'interno della laguna, per effetto dell'attrito sviluppato dai bassi fondali e dall'andamento sinuoso dei canali più interni, contornati dalle barene. L'attenuazione, in particolare, risulta essere maggiore nelle zone più remote della laguna settentrionale, dove l'ampiezza di marea astronomica può essere inferiore del 20-30% rispetto a quella registrata a Venezia.

In prima approssimazione, pur sapendo che la curva di marea sarà diversa in ampiezza e leggermente modificata nella forma, è possibile fornire un tempo di ritardo medio per le diverse località, rispetto a Punta Salute (un valore negativo indica un anticipo di marea rispetto a Punta Salute).

# 1. LA MAREA A VENEZIA



Stazione	Ritardo (min)
MALAMOCCO DIGA NORD	-50
LIDO DIGA SUD	-49
CHIOGGIA DIGA SUD	-47
BOTTE	+14
BURANO	+32
CAMPALTO	+32
CASONFIGHERI	+52
CAVALLINO	+148
CHIOGGIAVIGO	-20
GRASSABO'	+121
LE SALINE	+78
PAGLIAGA	+74
SETTEMORTI	+35
TAGLIATA VECCHIA	+32
VALGRANDE	+17
VALLE AVERTO	+40

Tabella 1.1 Fonte: Ferla M., Cordella M., Michielli L., Rusconi A., "Long term variations on sea level and tidal regime in the lagoon of Venice", Estuarine, Coastal and Shelf Science

## 1.7 Lo scambio di flussi idrici tra laguna e mare

Come si è visto precedentemente i tre sottosistemi che costituiscono il sistema lagunare sono strettamente connessi tra loro, sul “lato mare” questa interconnessione si esplica nello scambio di flussi idrici tra il mare e la laguna che avviene attraverso le bocche di porto. Un’analisi della circolazione costiera e di questo scambio di flussi risulta pertanto utile per indagare in maniera più completa alcuni aspetti della propagazione delle maree all’interno della laguna di Venezia.

Si fa riferimento di seguito ai risultati delle misure della corrente nelle tre bocche di porto effettuate tra il 2000 e il 2003 in un programma di ricerca svolto dal Co.Ri.La<sup>4</sup>.

Per le misure dei flussi sono stati utilizzati profilatori verticali della corrente ad effetto Doppler (ADCP) posizionati sul fondo dei canali, uno per ciascuna bocca e così si sono ottenute le serie temporali di corrente ad ogni metro di profondità dalla superficie sino al fondo.

L’analisi armonica è stata applicata ai vettori delle correnti misurate ed è stato dimostrato più del 90% della varianza delle correnti nelle bocche è associata alla variabilità mareali. Le forzanti meteorologiche diventano importanti solo durante gli episodi isolati associati ai fenomeni di forte vento e/o acqua alta. Le correnti mareali nelle bocche sono prevalentemente semidiurne con le costituenti M2 e S2 responsabili per più di 50% della varianza totale. È stato dimostrato che l’asse della maggior varianza corrisponde all’asse lungo il quale soffia la bora, mentre l’asse della minor varianza corrisponde all’asse lungo il quale soffia lo scirocco.

È stato dimostrato che la variabilità non-mareale è dovuta soprattutto alle sesse adriatiche, quindi quelle diurne e semi-diurne (periodi di circa 22 e 11 ore). La frequenza dell’apparizione delle sesse è maggiore nella stagione invernale di quella estiva. Le correnti dovute alle sesse sono in fase in tutte e tre le bocche.

Dalla correlazione tra il vento con una velocità maggiore di 5 m/sec per le varie direzioni e la corrente assiale nelle bocche si è ottenuta la conferma che il vento di direzione est e nord-est, come forzante locale gioca un ruolo fondamentale nel generare le correnti a bassa frequenza attraverso le bocche di Chioggia e Lido. D’altra parte il flusso attraverso

---

<sup>4</sup> Il Co.Ri.La. acronimo di Consorzio di Ricerche Lagunari è un consorzio formato tra le Università di Venezia (Architettura, Ca’ Foscari e Scienze Ambientali) e l’Università di Padova per promuovere le ricerche in campo lagunare. La sua sede è a Venezia.

Malamocco appare indipendente dal vento. Più specificatamente, è stato dimostrato che il vento lungo l'asse della bora rafforza l'influsso d'acqua a Lido ed il deflusso a Chioggia. Questo è stato spiegato in termini di pendenza del livello del mare durante gli episodi di bora con il livello del mare più alto a sud che a nord della laguna. La bora localmente soffia parallelamente all'asse longitudinale della laguna da nord a sud creando la differenza del livello del mare che può raggiungere anche 20 cm. Nello stesso tempo fuori della laguna la pendenza del livello del mare nord-sud è molto minore e quindi a nord nella laguna il livello del mare è più basso di quello del mare aperto richiamando la corrente d'entrata a Lido. A Chioggia invece il livello del mare nella laguna è più alto di quello fuori di essa, generando così una corrente d'uscita. È bene tenere in considerazione questo fenomeno di "ricircolo" perché in seguito verrà ripreso come possibile giustificazione del notevole rialzo che si verrebbe a creare nella laguna Sud in presenza di forte vento di bora, a bocche di porto chiuse.

Dalla correlazione tra il vento e le correnti nelle bocche risulta che lo scirocco è molto meno efficiente nel generare lo scambio tra la laguna ed il mare aperto. La direzione del vento di scirocco è quasi perpendicolare alla linea di costa della laguna generando quindi un influsso contemporaneamente in tutte e tre le bocche, il quale però non può essere forte come durante gli eventi di bora quando le correnti a Chioggia e Lido si compensano. La corrente di influsso generata dallo scirocco può perdurare solo fino al momento in cui il livello marino dentro la laguna non oltrepassa quello fuori di essa. In tale situazione la pendenza del livello marino innesca la corrente di fuoriuscita. I flussi d'acqua stimati dalla corrente assiale mediata sulla verticale dimostrano che il deflusso/influsso totale (somma di tutte e tre bocche) raggiunge al massimo i valori di oltre 20.000 m<sup>3</sup>/sec.

Il flusso annuale medio attraverso le tre bocche è caratterizzato dall'influsso nella bocca di Lido, deflusso nella bocca di Chioggia che si bilanciano tra di loro (ca. 50 m<sup>3</sup>/sec). La bocca di Malamocco mostra un deflusso medio annuale di circa 100 m<sup>3</sup>/sec che equivale alla quantità dell'influsso di acque dolci nella laguna (scarico dei fiumi e delle acque industriali).

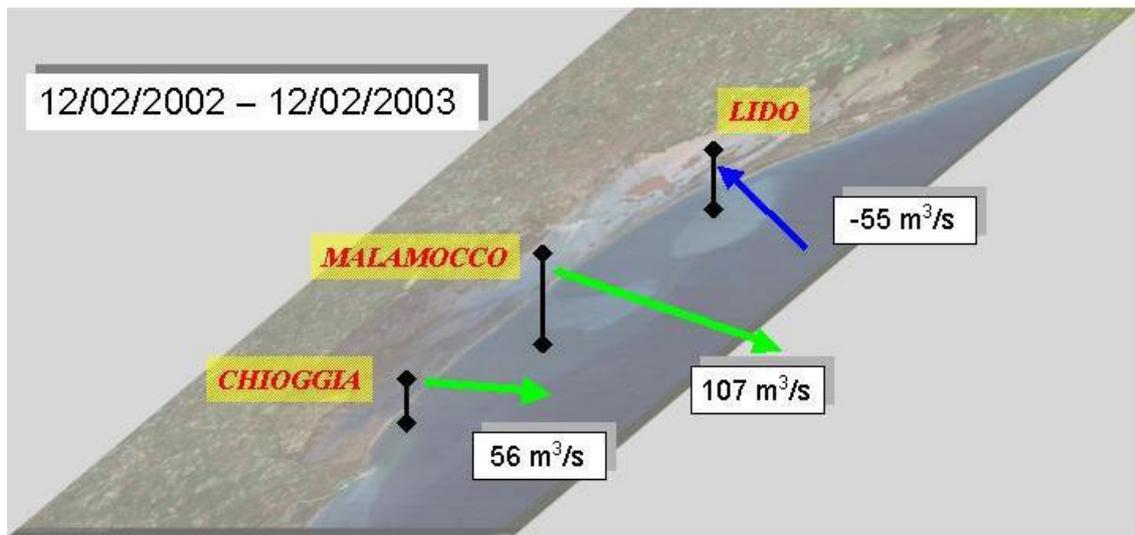


Figura 1.2 Flussi medi annui alle bocche di porto nel periodo 12 febbraio 2002 – 12 febbraio 2003. Lo sbilanciamento in uscita da Malamocco viene attribuito all’apporto delle acque dolci nella laguna.

Occorre notare che lo scambio idrico tra laguna e mare dipende non solo dai flussi attraverso le bocche ma anche dall’intensità e dalla struttura spaziale della corrente costiera fuori della laguna.

La circolazione costiera è stata studiata con l’utilizzo di una rete di sistemi radar HF.

Il radar utilizza due sistemi di antenne ricetrasmittenti posizionate sulle isole di Lido e di Pellestrina e un terzo sistema di antenne installato sulla piattaforma “Acqua Alta”, 8 miglia al largo delle bocche di porto. Con questa configurazione è stata coperta dalle misure una zona larga 15 chilometri davanti alla Bocca di Malamocco con una risoluzione spaziale di 750 m.

Il calcolo del campo medio mensile delle correnti superficiali ha dimostrato la presenza di una corrente media verso sud dell’ordine di 10 cm/sec, che fa parte della circolazione ciclonica dell’Adriatico, con un’importante variabilità stagionale. Le correnti più forti, dell’ordine di 20 cm/s appaiono nei mesi di novembre e dicembre.

É stata rilevata l’esistenza di un “jet” costiero (corrente forte di dimensioni orizzontali relativamente piccole) della larghezza di 5 km che in alcuni mesi era staccato dalla costa.

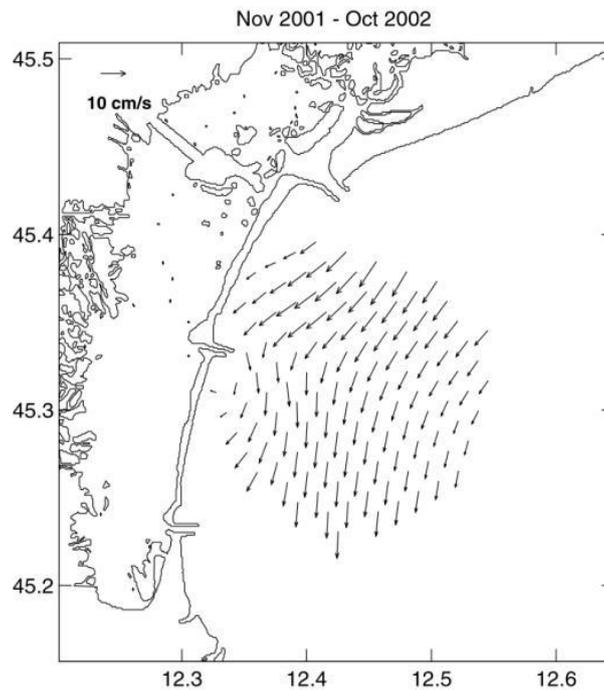


Figura 1.3 Mappa delle correnti medie superficiali annue nel periodo novembre 2001 – ottobre 2002 ottenute dai dati del Radar Costiero.



## 2 L'AQUISIZIONE DEI DATI DI MAREA IN LAGUNA

### 2.1 Cenni storici

Qualsiasi considerazione di carattere tecnico sul comportamento idraulico del sistema lagunare, sulla sua evoluzione, sui suoi problemi e sulla ricerca di possibili soluzioni non avrebbe alcun significato se non fosse accompagnata dalla sistematica osservazione e raccolta dei dati, in particolare dei livelli di marea.

Sotto tale aspetto Venezia vanta una più che secolare tradizione, risalgono infatti al 1871 le misurazioni sistematiche del livello del mare, e dei massimi e dei minimi di marea, quando l'Ing. Tomaso Mati istituì il primo mareografo a palazzo Loredan in Campo Santo Stefano, presso la sede del Genio Civile. Questa data rappresenta l'inizio delle registrazioni di marea con metodo scientifico, ossia con l'introduzione di un piano di riferimento da cui ricavare le altezze di marea rilevate in orari ben precisi.

Prima del 1871 non si hanno a disposizione dati quantitativi sulle quote raggiunte dalla marea, ma sono unicamente reperibili attraverso le cronache, disponibili fin dal VI secolo, compilate in occasione degli eventi di acqua alta e che forniscono delle informazioni di tipo qualitativo sul fenomeno.

Nel 1888, l'Istituto Geografico Militare istituì un altro mareografo presso l'Arsenale di Venezia e nel 1906 venne installata la stazione mareografica di Punta della Salute in bacino di San Marco. Inizialmente essa fu posta sul Canal Grande ma nel 1923 fu spostata nel sito dove si trova tuttora, sul Canale della Giudecca. Questa stazione è stata adottata per convenzione quale riferimento locale per la città di Venezia e l'intera laguna.

Come già accennato nel capitolo introduttivo il primo piano di riferimento fu il Comune Marino, ossia il livello medio delle alte maree, ne dà una chiara definizione F.C. Rossi in (Rossi 1887): *“Questo riferimento, popolarmente conosciuto col semplice appellativo di comun (il comune marino), ha la sua origine da un fatto naturale. È notorio, infatti, che l'acqua marina imprime nelle sponde murali dei canali una tinta verde-nerastra, la quale si addimostra tanto più spiccata, quanto meglio paramenti dei muri sono lisci e bianchi come quelli ad esempio formati col calcare d'/stria usatissimo nelle costruzioni veneziane. Lungo le sponde situate in plaghe tranquille l'estremo limite di detta zona verde-nerastra presenta una linea di livello senza sfumature né sinuosità, la quale*

*individua appunto il comune marino*". Questa quota venne materializzata sui muri di alcuni palazzi scolpendo una linea orizzontale e una lettera C.

Quando l'ing. Mati stabilì il primo mareografo in campo Santo Stefano assunse come riferimento il livello della Comune Alta Marea dell'anno 1825. Lo zero fu allora fissato a 1.50 m al di sotto del Comune Marino, al fine di non dover trattare valori numerici negativi.

Successivamente, venne scelto come piano di riferimento lo Zero Mareografico di Punta della Salute (ZMPS), pari al livello medio del mare del 1897, calcolato mediando 25 anni di osservazioni, dal 1885 al 1909, ed assegnando il valore di riferimento all'anno centrale. Il livello medio del 1897 risultò 127.54 cm sopra il piano di riferimento del mareografo di Santo Stefano, che, lo abbiamo appena visto, risultava 150 cm sotto il livello del Comune Marino. Perciò il livello della Comune Alta Marea del 1825 risultò di 22.46 cm sopra il livello medio mare del 1897.

Seppur con alterne convenzioni, succedutesi bel corso degli anni, la misura dei livelli di marea venne riferita sempre al livello medio del mare del 1897. Sebbene tale riferimento abbia oggi perso di significato per le rilevazioni geodetiche e topografiche, tale consuetudine, rimasta immutata fino ai nostri giorni, ha un suo valore del tutto particolare per Venezia e la sua laguna. Il vantaggio di avere mantenuto tale riferimento infatti ha consentito di svincolare le misure del livello marino dai movimenti relativi del suolo veneziano rispetto alla posizione media della superficie marina che, dal 1897 ad oggi, si è elevata per l'effetto combinato dei fenomeni di eustatismo e subsidenza.

Nel 1984 l'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque, "fotografò" le consuetudini che assumevano come riferimento per la misura delle maree il piano posto a 1,8181 mt al di sotto della piastrina posizionata sul bordo del pozzetto interno alla stazione di Punta della Salute. Tale riferimento è oggi denominato Zero Mareografico di Punta della Salute (ZMPS) ed è identificato da un apposito cippo posto sulla riva lungo il Canal della Giudecca a ridosso della parete dell'edificio ove aveva sede l'antica Dogana.

Rispetto alla rete altimetrica dello stato italiano, riferita al livello medio del mare registrato dal mareografo di Genova nel 1942 (mediando i dati registrati dal 1937 al 1946), lo ZMPS risulta più basso di circa 23.56 cm.

L'introduzione dello ZMPS comporta che questo riferimento sia solidale con il suolo veneziano, per cui risulta possibile confrontare acque alte della stessa altezza, ma avvenute in tempi diversi. Infatti in questi casi si dovrebbe verificare la stessa percentuale di allagamento nella città di Venezia.

### **2.2 Gli organi preposti alla raccolta dei dati**

Le misurazioni del livello del mare erano originariamente effettuate dal Genio Civile e dall'Istituto Geografico Militare (I.G.M.). Esse divennero di competenza del Magistrato alle Acque quando, con la Legge istitutiva n. 257 del 24 maggio 1907, lo Stato Italiano ricostituì questo istituto come autorità idraulica preposta al buon governo delle acque nei bacini idrografici, nelle lagune e lungo i litorali dell'area adriatica nord orientale. Tra i suoi compiti il Magistrato alle Acque doveva provvedere alla raccolta metodica ed ordinata delle osservazioni idrografiche riguardanti le lagune, i litorali, il mare, i fiumi e i bacini montani. Per assolvere a tali funzioni, all'interno del Magistrato alle Acque venne costituito l'Ufficio Idrografico con il proprio Servizio Mareografico, che acquisì il patrimonio di dati e osservazioni mareografiche iniziate nel 1871.

Alla fine del 1908 l'Ufficio Idrografico, insieme alle oltre 400 stazioni destinate all'attività di sistematica osservazione delle grandezze idrologiche territoriali (precipitazioni, parametri meteorologici, livelli e portate fluviali, livelli freatici), disponeva per il proprio Servizio Mareografico di 18 stazioni per il rilevamento della marea nella Laguna di Venezia e lungo il litorale Adriatico da Marano Lagunare alla Foce del Po, per salire poi a 23 stazioni nel 1911.

In seguito all'evento alluvionale del 4 novembre 1966 e all'emanazione della prima Legge Speciale per Venezia, l'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque realizzò nei primi anni Settanta del secolo scorso il progetto di ampliamento della rete mareografica in Laguna di Venezia. Tale progetto portò a 40 il numero delle stazioni fisse della rete, a cui si aggiunsero le preesistenti 5 stazioni nella Laguna di Marano-Grado, la stazione di Caorle lungo il litorale a nord della Laguna di Venezia, e quella di Porto Caleri, all'interno dell'omonima laguna a sud di Chioggia, per un totale di 47 stazioni di misura.

Attualmente le stazioni di misura della Rete Mareografica in Laguna di Venezia sono 50, di cui più della metà attrezzate per la trasmissione in tempo reale dei dati e la restante

parte per la trasmissione in tempo differito via GSM. Alcune di queste stazioni sono in grado di registrare anche l'ampiezza ed il periodo del moto ondoso nonché alcuni parametri climatici come pressione atmosferica, intensità e direzione del vento, temperatura, umidità, precipitazioni e radiazione solare (ISPRA, 2012).

L'Ufficio Idrografico svolse le sue funzioni per quasi un secolo, fino al 2002, quando l'attività è stata affidata all'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici (APAT), confluita nel 2008 all'interno dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). Tra le proprie mansioni, ISPRA assicura la continuità della raccolta delle osservazioni meteo-mareografiche ed il regolare esercizio della Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico.

Oltre ai dati provenienti dall'ISPRA, abbiamo a disposizione i dati di livelli di marea provenienti dall'Istituzione Centro Previsioni e Segnalazioni Maree (ICPSM), più comunemente noto come Centro Maree.

All'inizio degli anni '70, il Comune di Venezia istituì il primo servizio di osservazione delle maree, per segnalare, con una sirena posta sul campanile di San Marco, l'avvicinarsi di gravi eventi. Nel 1980, a seguito dell'inondazione del 1979, fu istituito un nuovo servizio, il Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, con il compito di garantire alla cittadinanza la massima informazione sulla marea ed un efficace e tempestivo servizio di allarme, in caso di acqua alta eccezionale. È infatti compito del IPSCM effettuare la previsione di marea, in genere per le 48 ore successive, sulla base dei livelli osservati e dell'analisi delle previsioni meteo-marine.

La rete telemareografica del Centro Maree è costituita da 15 stazioni automatiche, la maggior parte di esse collegate via radio ad una stazione centrale, attraverso una stazione aggiuntiva che funge da ripetitore.

### **2.3 Gli strumenti per la misura del livello del mare**

Le misurazioni mareografiche, da un punto di vista tecnico, presentano molte difficoltà legate sia ai problemi logistici che si incontrano per raggiungere il sito scelto, sia al posizionamento e all'utilizzo della strumentazione, che deve operare in modo sicuro ed affidabile in un ambiente spesso ostile.

Uno dei problemi più significativi delle misure strumentali di marea riguarda la necessità di filtrare il livello da misurare, poiché la superficie del mare è sempre agitata e mossa da onde aventi ampiezza e periodo eterogenei. Le misure di marea, infatti, presuppongono la capacità di isolare le onde a periodo lungo (le maree) da quelle a periodo corto, come le onde generate dal vento. Inoltre anche la temperatura e le proprietà fisiche dell'acqua, come la salinità o la densità, possono influire sulle misurazioni in modo più o meno evidente a seconda del tipo di strumento utilizzato.

I metodi per la misurazione del livello del mare possono essere divisi in due categorie: quelli appropriati per le misure in prossimità della costa, e quelli adatti ad essere impiegati al largo e offshore (Pugh, 1987; IOC, 1985). Le tecnologie attualmente disponibili per la misurazione del livello del mare in vicinanza della costa possono essere ricondotte a quattro tipologie:

- galleggiante alloggiato all'interno di un pozzetto di calma;
- strumenti a pressione;
- sistemi acustici;
- sistemi radar (ondametri).

La precisione con cui effettuare le misure deve essere almeno di 1 cm, valore adeguato per rappresentare i processi idrodinamici legati alla propagazione delle maree ed il livello medio del mare, qualora il sistema di misura sia costantemente monitorato, controllato e caratterizzato da una stabilità a lungo termine (IOC, 2006).

Le misure effettuate al largo si avvalgono generalmente di boe accelerometriche. Tuttavia ciò che a noi interessa, in questa tesi, sono i dati registrati dalle stazioni situate in prossimità della costa e all'interno della laguna.

Esistono numerose raccomandazioni da parte delle istituzioni internazionali che si occupano della raccolta ed analisi dei dati mareografici sulle caratteristiche che un sito deve avere per poter ospitare una stazione mareografica, in relazione allo scopo per cui le misurazioni vengono effettuate.

Elenchiamo qui brevemente alcune raccomandazioni:

- la stazione di misura deve essere in grado di resistere alle peggiori condizioni atmosferiche che si possano prevedere nel luogo prescelto per l'installazione;

- sono da evitare, se possibile, terreni soggetti a subsidenza naturale o antropica, perché poco stabili;
- sono da escludere inoltre, per la corretta registrazione del fenomeno della marea, bacini semichiusi in cui si verificano sconnessioni con il mare aperto in occasione di forti basse maree, aree in prossimità di promontori o stretti per le forti correnti di marea che vi si generano (Pugh,1987), zone soggette a traffico di natanti (per evitare il rischio di collisioni accidentali) o aree in cui si possano prevedere vicine espansioni portuali o marittime in grado di alterare il regime delle maree;
- è fondamentale, infine, che la stazione possa essere collegata ad un piano di riferimento geodetico (datum) e che la sua posizione permetta il controllo periodico del caposaldo (tide gauge bench mark).

Vediamo ora le caratteristiche principali delle quattro tipologie di strumenti elencati sopra.

### **Stazioni con galleggiante e pozzetto di calma**

Una stazione mareografica equipaggiata con un galleggiante alloggiato in un pozzetto di calma è in genere costituita da una cabina sorretta da pali di fondazione e circondata da dolphins, per permettere l'accosto delle imbarcazioni durante i periodici sopralluoghi per la manutenzione. All'interno della cabina sono posizionati gli strumenti di misura e le apparecchiature per l'acquisizione e la trasmissione dei dati rilevati.

La principale funzione della cabina mareografica, oltre ad alloggiare la strumentazione, è quella di ospitare il pozzetto di calma che si apre sul pavimento, collegato al mare aperto tramite fori opposti e sfalsati. Questo accorgimento permette di ottenere un filtro del segnale da registrare attraverso un'attenuazione delle oscillazioni ad alta frequenza causate dal moto ondoso. In questo modo si possono osservare solamente le oscillazioni più rilevanti dal punto di vista mareografico, ossia quelle aventi il periodo più lungo: le maree.

La marea viene misurata attraverso uno strumento detto mareografo, in grado di registrare le quote di marea con il relativo orario di rilevazione. Il mareografo è collegato

ad una puleggia sulla quale è allacciato il galleggiante inserito all'interno del pozzetto di calma tramite un cavo teso da un contrappeso.

Per fornire un livello di marea rispetto al piano di riferimento prescelto (datum), la quota rilevata dal galleggiante viene messa in relazione con la quota della piastrina mareografica della stazione (gauge contact point), riferita anch'essa allo stesso piano di riferimento attraverso la definizione del caposaldo della stazione (tide gauge bench mark). La differenza tra la quota del caposaldo della stazione e la quota fornita dal galleggiante determina l'altezza di marea registrata dal mareografo rispetto al piano di riferimento prescelto.

Esistono mareografi di tipo meccanico e, più recentemente, mareografi di tipo elettronico.

I mareografi meccanici sono dotati di diagrammi cartacei (mareogrammi) sui quali un pennino ad inchiostro segna in continuo la curva di marea. La durata di ciascun diagramma è variabile e può essere regolata, ad esempio, su periodi di 2 o 4 mesi, trascorsi i quali il mareogramma deve essere fisicamente sostituito da un operatore.

I mareografi digitali raccolgono il dato in modo informatizzato nella loro memoria interna (*data logger*), con la possibilità di trasmetterlo in tempo reale o differito, qualora la stazione mareografica sia equipaggiata con le necessarie apparecchiature. La frequenza di campionamento dei dati è variabile in base allo strumento utilizzato e può essere impostata in relazione alle proprie esigenze (si può registrare, ad esempio, un dato ogni 5-10 minuti o meno).

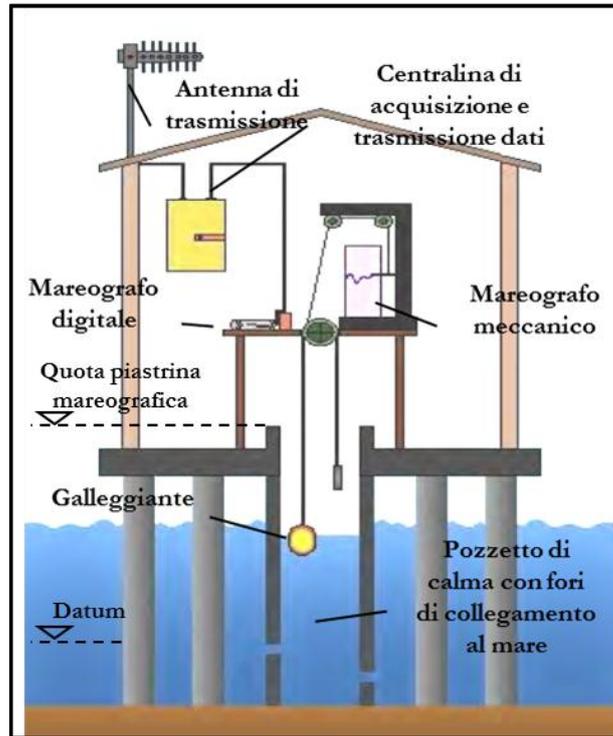


Figura 2.1 Sezione schematica di una stazione mareografica con galleggiante e pozzetto di calma



Figura 2.2 Mareografi in uso presso ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico. A sinistra: mareografo meccanico posto nella stazione mareografica di Val Grande. A destra: mareografo elettronico all'interno della stazione mareografica di Punta della Salute.

### Stazioni con strumenti a pressione

A differenza dei mareografi a galleggiante, che misurano direttamente il livello del mare, l'utilizzo di strumenti a pressione consente di ricavare in modo indiretto la quota di

marea attraverso la misura della pressione generata dalla colonna d'acqua che insiste sullo strumento. Nonostante l'impiego di questi dispositivi presupponga la conoscenza di parametri locali come densità, accelerazione gravitazionale e pressione atmosferica, essi presentano alcuni vantaggi pratici rispetto ai comuni strumenti a galleggiante: sono più economici in quanto non necessitano di opere civili, possono essere installati potenzialmente in qualsiasi tipo di ambiente marino (come ad esempio litorali sabbiosi o atolli corallini), presentano una maggior stabilità rispetto al datum prescelto, permettono di posizionare il dispositivo misuratore della pressione anche a centinaia di metri dallo strumento che ne acquisisce i dati (data logger). Tra i principali svantaggi si possono evidenziare la complessità della valutazione iniziale del caposaldo della stazione (tide gauge bench mark), la difficoltà nel riconoscere eventuali guasti o malfunzionamenti da parte di operatori poco esperti, gli errori che possono essere introdotti nelle misure nel caso di forti burrasche.

Gli strumenti a pressione più comuni possono essere raggruppati in due tipologie: i bubblers pneumatici e i trasduttori di pressione in mare.

Nei bubblers pneumatici, l'aria compressa fornita da un compressore viene pompata verso una camera gorgogliatrice posizionata sul fondale marino attraverso un tubo di connessione. Lungo di esso, una serie di valvole permette di ridurre la pressione dell'aria inizialmente pompata e di instaurare un flusso costante, mentre un trasduttore differenziale misura la pressione presente al suo interno. La pressione necessaria per liberare l'aria sotto forma di bolle dallo scarico situato sul fondale permette di ricostruire la quota del livello marino soprastante attraverso l'applicazione della legge di Stevino<sup>5</sup>. È indispensabile conoscere la densità dell'acqua.

L'altra tipologia di strumento a pressione è rappresentata dai trasduttori montati direttamente in mare. Essi possono essere usati negli ambienti più ostili e sono generalmente alloggiati in un tubo protettivo fissato su banchine o moli. In alternativa possono essere ancorati anche sul fondo del mare e collegati alla terraferma attraverso cavi armati, o inseriti all'interno del pozzetto di calma di una stazione a galleggiante. Il principio di funzionamento, come per i bubblers pneumatici, si basa sul calcolo del

---

<sup>5</sup> La legge afferma che dato un fluido di densità costante  $\rho$ , la pressione esercitata da una colonna di fluido in un suo punto di profondità  $h$  (distanza dal pelo libero) è direttamente proporzionale alla sua profondità  $\Delta z$  e all'accelerazione esterna  $g$ :  

$$\Delta p = \rho g \Delta z$$

livello idrometrico attraverso la legge di Stevino. A seconda del tipo di sensore utilizzato, si possono avere misure della sola pressione idrostatica, utilizzando un dispositivo differenziale direttamente collegato all'atmosfera, o misure di pressione totale (atmosfera e idrostatica), che richiedono l'utilizzo di un barometro per scindere le due componenti. Anche in questo caso la stima della densità dell'acqua è indispensabile per il corretto funzionamento di questi dispositivi, così come il monitoraggio della temperatura, che influenza fortemente la precisione delle misure.

### **Stazioni con strumenti acustici**

Questa tipologia di stazioni prevede l'utilizzo di una sonda in grado di registrare e calcolare il tempo che un impulso acustico impiega per riflettersi verticalmente sulla superficie del mare. La misura del livello idrometrico viene quindi ricavata indirettamente in base al tempo di riflessione e alla velocità del suono nell'aria.

Questo tipo di installazione è tipico degli ondometri, strumenti che registrano in continuo il moto ondoso. Da essi è possibile ricavare il livello di marea attraverso l'applicazione di una media mobile su un'opportuna finestra temporale al fine di filtrare il segnale dalle oscillazioni ad alta frequenza indotte dal moto ondoso. Ad esempio, in Piattaforma Acqua Alta (CNR-ISMAR) nell'alto Adriatico l'ampiezza della finestra temporale applicata alla media mobile è pari a 30 minuti su dati campionati ogni 5 minuti.

Lo strumento può essere inserito all'interno di un tubo di risonanza, che rende la superficie liquida più omogenea e protegge la sonda dall'ambiente esterno, oppure alloggiato nel pozzetto di calma di una stazione a galleggiante. Altrettanto frequente è l'installazione in un tubo protettivo, avente diametro di circa 25 cm, che può contenere solo la sonda acustica oppure il tubo di risonanza e la sonda stessa.

L'inconveniente principale di questo tipo di strumenti è legato al fatto che la velocità del suono dipende fortemente dalla temperatura e, in minor parte, dall'umidità dell'aria per cui è necessario installare uno o più sensori per registrare la temperatura.

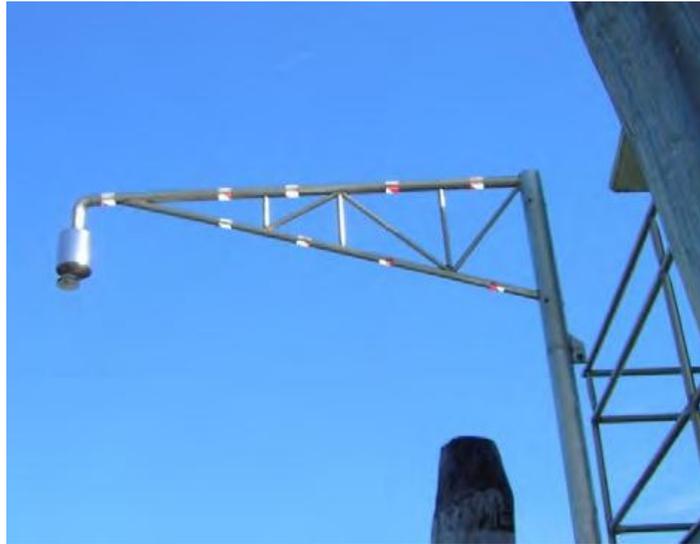


Figura 2.3 Ondametro ad ultrasuoni montato all'esterno della stazione di Murano (ISPRA – Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico).

### **Stazioni con strumenti radar**

Questo tipo di strumentazione è di concezione relativamente recente e si basa sullo stesso principio di funzionamento delle sonde acustiche. A differenza di quest'ultime, tuttavia, i dispositivi radar non soffrono del loro inconveniente principale, ossia dell'influenza della temperatura sulla velocità del suono nell'aria. Per questo motivo essi vengono spesso impiegati per sostituire le sonde acustiche da dismettere o per creare delle nuove reti di misura, grazie anche alla loro economicità.

Gli strumenti radar emettono degli impulsi elettromagnetici che vengono riflessi sulla superficie del mare. La misura del livello idrico viene ricavata in modo indiretto sulla base del tempo di riflessione.

Un metodo di misura più raffinato si fonda, invece, sull'invio di una frequenza continua da parte del dispositivo radar e sul calcolo della quota di marea attraverso lo sfasamento dell'onda riflessa.

Un'altra tecnologia recentemente introdotta nella Rete Mareografica Nazionale è quella che si avvale dei sensori radar a microonde. Essi sono equipaggiati con un cavo teso calato all'interno del pozzetto di calma e ancorato al fondo, attraverso cui viaggiano gli impulsi a microonde inviati verso il livello da misurare.

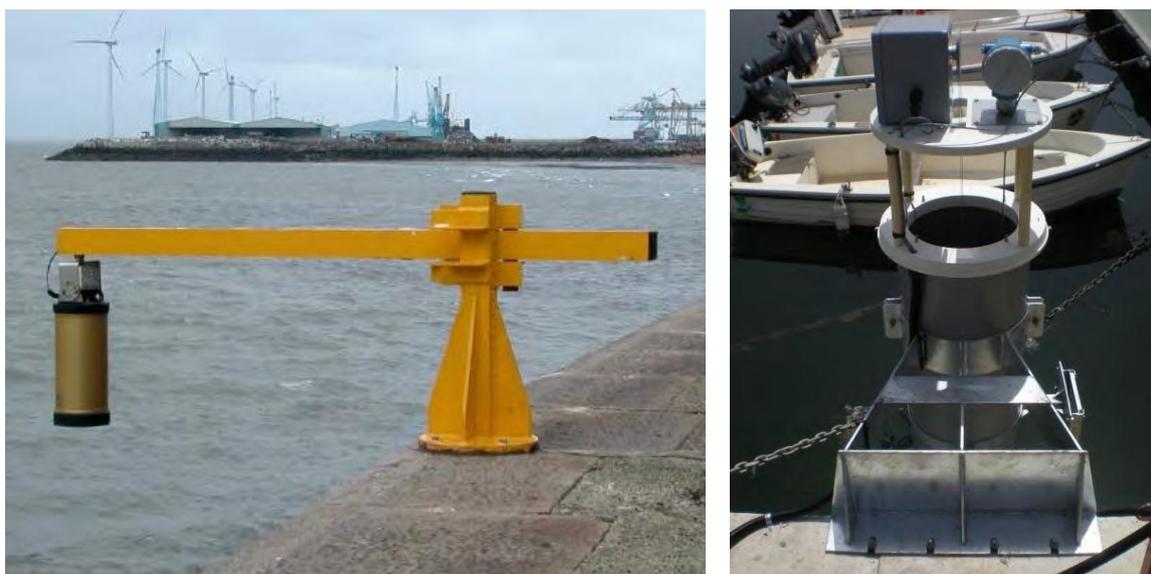


Figura 2.4 A sinistra: idrometro radar in fase di test presso il porto di Liverpool (Gran Bretagna). Fonte: IOC(2006), “Manual on Sea Level – Measurement and Interpretation, Volume IV, Manuals and Guides 14”. A destra: mareografo a microonde in fase di installazione presso il porto di Sciacca. Fonte: ISPRA – Rete Mareografica Nazionale.

## 2.4 Raccolta ed elaborazione dei dati

La prima fase del mio lavoro di tesi è consistita nella raccolta e organizzazione dei dati che avrei dovuto utilizzare in seguito, per la realizzazione di alcune statistiche, per l'introduzione delle condizioni al contorno del modello matematico e infine per operare il confronto con i risultati ottenuti dallo stesso modello.

I dati utilizzati sono di tre tipi:

- registrazione delle altezze di marea provenienti dalle stazione mareografiche dell'ISPRA (ogni 10 minuti);
- registrazione delle altezze di marea provenienti dalle stazione mareografiche dell'IPSCM (ogni 5 minuti);
- registrazioni di intensità e direzione del vento provenienti dalle stazioni di Chioggia e Le Saline (IPSCM).

Per quanto riguarda i dati ISPRA ho provveduto a raccogliarli e organizzarli secondo le seguenti fasi:

- a) raccolta dei file contenenti le misure di livello suddivisi per anno, mese e stazione ISPRA; i livelli sono registrati con la frequenza di un rilievo ogni 10 minuti (eccetto che nella stazione di Punta Salute nella quale i rilievi sono ogni mezz'ora)

e riguardano un arco temporale che va dalle ore 0 del 1 gennaio 2000 alle 24 del 31 dicembre 2008;

- b) ho costruito per ogni anno un file Excel contenente i rilevamenti ordinati temporalmente per tutte le stazioni, in questa fase del lavoro ho potuto appurare la mancanza di dati in alcune stazioni che si verifica sia sporadicamente sia per mesi interi o addirittura anni probabilmente dovuta a guasti della strumentazione e alla conseguente intempestiva riparazione o sostituzione;
- c) ho provveduto alla taratura degli zeri di alcune stazioni prendendo come riferimento il livello di Punta Salute; accadeva infatti che alcune stazioni presentassero uno zero mareografico diverso mostrando quindi una traslazione della curva dei livelli verso l'alto o verso il basso. Le incongruenze probabilmente sono state prodotte da fenomeni di subsidenza locale e differenziata delle stazioni o da errate tarature. La taratura è stata eseguita confrontando le curve dei livelli in assenza di vento e in corrispondenza dei periodi di quadratura in cui il livello si mantiene circa costante per un certo lasso temporale, situazione questa che si verifica poche volte durante l'anno.
- d) ho utilizzato infine il database ottenuto per creare un'altra serie di cartelle in cui gli andamenti dei livelli di marea delle varie stazioni negli anni sono allineati temporalmente alla stazione di Punta Salute, eliminando in questo modo il ritardo di fase che affligge l'onda di marea soprattutto nelle zone più remote della laguna settentrionale e di quella occidentale. Questo passaggio è stato svolto al fine di poter osservare in maniera diretta le differenze di altezza di marea tra le varie stazioni determinate sia dai fenomeni propagatori locali sia dall'effetto del vento o della pressione.

Nei prossimi capitoli vedremo in che modo sono stati usati i dati così raccolti e ordinati.

### **2.5 Stazioni meteo-marine utilizzate**

Nelle pagine che seguono sono descritte, tramite delle schede le stazioni ISPRA e le stazioni del Centro Maree da cui sono stati ricavati i dati per le elaborazioni contenute in questa tesi.

## STAZIONI ISPRA

### Stazione meteo - mareografica n° 03

#### Valle Grassabò

Bacino di appartenenza: Lido (Laguna Settentrionale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1971

Latitudine: 45° 31' 14,9193

Longitudine: 12° 22' 68,4504

Quota piastrina mareografica: 246,00 cm sopra Z.M.P.S.



#### *Caratteristiche delle strumentazioni.*

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante, tacheo-anemometro, pluviometro con trasmissione in tempo reale e registrazione locale dei dati su memory card da 4 Mbyte (Mod. SIAP - SM 3840).

### Stazione mareografica n° 05 – Le Saline

Bacino di appartenenza: Lido (Laguna Settentrionale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1971

Latitudine: 45° 30' 10,8240

Longitudine: 12° 26' 06,4829

Quota piastrina mareografica: 243,00 cm sopra Z.M.P.S.



#### *Caratteristiche delle strumentazioni*

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante a registrazione locale dei dati su EPROM da 32 Kbyte (Mod. Thalimedes– OTT Hydrometrie);

### **Stazione mareografica n° 07 – Pagliaga**

Bacino di appartenenza: Lido (Laguna Settentrionale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1921

Latitudine: 45° 31' 06,9496

Longitudine: 12° 23' 00,8191

Quota piastrina mareografica: 196,50 cm sopra Z.M.P.S.



#### ***Caratteristiche delle strumentazioni.***

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante a registrazione locale dei dati su EPROM da 32 Kbyte (Mod. Thalimedes– OTT Hydrometrie).

### **Stazione mareografica n° 08 – Burano**

Bacino di appartenenza: Lido (Laguna Settentrionale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1971

Latitudine: 45° 29' 12,6768

Longitudine: 12° 24' 96,5476

Quota piastrina mareografica: 249,50 cm sopra Z.M.P.S.



#### ***Caratteristiche delle strumentazioni***

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante, con trasmissione in tempo reale e registrazione locale dei dati su EPROM da 65 Kbyte (Mod. SIAP - SM 3820);

## Stazione mareografica n° 16 – Sant’Erasmus

Bacino di appartenenza: Lido (Laguna Settentrionale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1971

Latitudine: 45° 27' 12,1063

Longitudine: 12° 23' 48,8195

Quota piastrina mareografica: 249,00 cm sopra Z.M.P.S.



### *Caratteristiche delle strumentazioni.*

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante a registrazione locale dei dati su EPROM da 32 Kbyte (Mod. Thalimedes – OTT Hydrometrie).

## Stazione - mareografica n° 17 – Murano

Bacino di appartenenza: Lido (Laguna Settentrionale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1932

Latitudine: 45° 27'27,2035

Longitudine: 12° 20' 81,4540

Quota piastrina mareografica: 244,50 cm sopra Z.M.P.S.



### *Caratteristiche delle strumentazioni*

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante con trasmissione in tempo reale e registrazione locale dei dati su memory card da 4 Mbyte (Mod. SIAP – SM 3840);

Mareometro/Ondametro ad ultrasuoni con trasmissione in tempo reale e registrazione locale dei dati su EPROM da 158 Kbyte (Mod. CAE – SP200).

## Stazione mareografica n° 21 –

### Punta della Salute

Bacino di appartenenza: Lido (Laguna Settentrionale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1923

Latitudine: 45° 25' 48,2563

Longitudine: 12° 20' 12,6702

Quota piastrina mareografica: 181,10 cm sopra Z.M.P.S.



#### ***Caratteristiche delle strumentazioni.***

Mareografo meccanico a galleggiante a registrazione giornaliera su diagramma (Mod. G440 - Magistrato alle Acque - Officina di Stra);

Mareometro a galleggiante con trasmissione in tempo reale e registrazione locale dei dati su EPROM da 65 Kbyte (Mod. SIAP - SM 3820);

Mareometro/Ondametro ad ultrasuoni con trasmissione in tempo reale e registrazione locale dei dati su EPROM da 158 Kbyte (Mod. CAE – SP200);

Ricevitore GPS in continuo in doppia frequenza (Tipo Leica Geosystems – System - RS500) in configurazione REFERENCE STATION con trasmissione dei dati via cavo.

## Stazione mareografica n° 25 – Ex Poveglia

Bacino di appartenenza: Malamocco (Laguna Centrale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1971

Latitudine: 45° 22' 26,0541

Longitudine: 12° 17' 77,1166

Quota piastrina mareografica: 246,00 cm sopra Z.M.P.S.



#### ***Caratteristiche delle strumentazioni***

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante a registrazione locale dei dati su EPROM da 32 Kbyte (Mod. Thalimedes– OTT Hydrometrie);

## Stazione mareografica n° 27 – Fusina

Bacino di appartenenza: Lido (Laguna Settentrionale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1909

Latitudine: 45° 25' 04,0007

Longitudine: 12° 15' 74,6330

Quota piastrina mareografica: 263,00 cm sopra Z.M.P.S.



### *Caratteristiche delle strumentazioni.*

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante a registrazione locale dei dati su EPROM da 32 Kbyte (Mod. Thalimedes – OTT Hydrometrie).

## Stazione mareografica n° 32 – Valle Averno

Bacino di appartenenza: Malamocco (Laguna Centrale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1971

Latitudine: 45° 20' 51,6786

Longitudine: 12° 10' 52,3647

Quota piastrina mareografica: 267,00 cm sopra Z.M.P.S.



### *Caratteristiche delle strumentazioni*

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante con trasmissione in tempo reale e registrazione locale dei dati su EPROM da 65 Kbyte (Mod. SIAP - SM 3820).

### **Stazione mareografica n° 33 – Valgrande**

Bacino di appartenenza: Malamocco (Laguna Centrale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1971

Latitudine: 45° 18' 42,8498

Longitudine: 12° 16' 31,0318

Quota piastrina mareografica: 250,00 cm sopra Z.M.P.S.



#### ***Caratteristiche delle strumentazioni.***

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante a registrazione locale dei dati su EPROM da 32 Kbyte (Mod. Thalimedes – OTT Hydrometrie).

### **Stazione mareografica n° 34 – Cason Figheri**

Bacino di appartenenza: Malamocco (Laguna Centrale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1906

Latitudine: 45° 19' 06,6077

Longitudine: 12° 10' 70,6413

Quota piastrina mareografica: 197,00 cm sopra Z.M.P.S.



#### ***Caratteristiche delle strumentazioni***

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante a registrazione locale dei dati su EPROM da 32 Kbyte (Mod. Thalimedes – OTT Hydrometrie);

## **Stazione mareografica n° 37 – Settemorti**

Bacino di appartenenza: Chioggia (Laguna Meridionale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1940

Latitudine: 45° 17' 35,5032

Longitudine: 12° 12' 85,5867

Quota piastrina mareografica: 251,00 cm sopra Z.M.P.S.



### ***Caratteristiche delle strumentazioni.***

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante a registrazione locale dei dati su EPROM da 32 Kbyte (Mod. Thalimedes – OTT Hydrometrie).

## **Stazione mareografica n° 41 – Brondolo**

Bacino di appartenenza: Chioggia (Laguna Meridionale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1970

Latitudine: 45° 10' 59,3627

Longitudine: 12° 16' 28,8390

Quota piastrina mareografica: 313,50 cm sopra Z.M.P.S.



### ***Caratteristiche delle strumentazioni***

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante a registrazione locale dei dati su EPROM da 32 Kbyte (Mod. Thalimedes – OTT Hydrometrie);

## Stazione mareografica n° 42 – Chioggia Vigo

Bacino di appartenenza: Chioggia (Laguna Meridionale)

Anno di inizio delle registrazioni: 1954

Latitudine: 45° 13' 40,4848

Longitudine: 12° 18' 86,6245

Quota piastrina mareografica: 169,00 cm sopra Z.M.P.S.



### *Caratteristiche delle strumentazioni.*

Mareografo elettromeccanico a galleggiante a registrazione continua su diagramma bimestrale (Mod. ID5795 - SIAP);

Mareometro a galleggiante, con trasmissione in tempo reale e registrazione locale dei dati su memory card da 4 Mbyte (Mod. SIAP – SM 3840);



Figura 2.5 Posizione stazioni ISPRA

## STAZIONI CENTRO MAREE

### 1. Punta Salute (Canal Grande)

Coordinate Geografiche (Rete GPS2000):

Latitudine

45° 25' 51.45309" N

Longitudine

12° 20' 13.38616" E

Altezza del caposaldo: 2.56 m



Stazione automatica e sensori	Parametro misurato	Unità di misura	Altezza del sensore sul medio mare
SM3840			
Idrometro a galleggiante ID7877	Livello di marea	Metro	3 metri
Termometro TM9855B	Temperatura acqua	°C	-1.5 metri

### 4. Diga Sud Lido

Coordinate Geografiche (Rete GPS2000)

Latitudine

45° 25' 05.62622" N

Longitudine

12° 25' 35.59146" E

Altezza del caposaldo: 2.425 m



Stazione automatica e sensori	Parametro misurato	Unità di misura	Altezza del sensore sul medio mare
SM3840			
Idrometro a galleggiante ID7877	Livello di marea	Metro	3 metri

## 5. Diga Nord Malamocco

Coordinate Geografiche

Latitudine

45° 26' 43.19" N

Longitudine

12° 20' 10.34" E



Altezza del caposaldo: 2.055 m

Stazione automatica e sensori	Parametro misurato	Unità di misura	Altezza del sensore sul medio mare
SM3840			
Idrometro a galleggiante ID7877	Livello di marea	Metro	3 metri

## 6. Diga Sud Chioggia

Coordinate Geografiche (Rete GPS2000)

Latitudine

45° 13' 44.32420" N

Longitudine

12° 18' 32.81828" E



Altezza del caposaldo: 2.555 m

Stazione automatica e sensori	Parametro misurato	Unità di misura	Altezza del sensore sul medio mare
SM3840			
Idrometro a galleggiante ID7877	Livello di marea	Metro	3 metri
Anemometro VT0705B	Direzione vento	Gradi	9 metri
Anemometro VT0705B	Velocità vento	m/s	9 metri

## 8. Chioggia città

Coordinate Geografiche

Latitudine

45° 13' 2314" N

Longitudine

12° 16' 4855" E

Altezza del caposaldo: 1.865 m



Stazione automatica e sensori	Parametro misurato	Unità di misura	Altezza del sensore sul medio mare
SM3840			
Idrometro a galleggiante ID7877	Livello di marea	Metro	3 metri

## 9. Laguna Nord Saline

Coordinate Geografiche (Rete GPS2000)

Latitudine

45° 29' 44.13895" N

Longitudine

12° 28' 19.09607" E

Altezza del caposaldo: 2.525 m



Stazione automatica e sensori	Parametro misurato	Unità di misura	Altezza del sensore sul medio mare
SM3840			
Idrometro a galleggiante ID7877	Livello di marea	Metro	3 metri
Anemometro VT0705B	Direzione vento	Gradi	9 metri
Anemometro VT0705B	Velocità vento	m/s	9 metri
Pluviometro UM7525	Precipitazione	mm	8 metri

## 11. Burano

Coordinate Geografiche

Latitudine

45° 28' 58.94" N

Longitudine

12° 25' 03.09" E

Altezza del caposaldo: 2.840 m



Stazione automatica e sensori	Parametro misurato	Unità di misura	Altezza del sensore sul medio mare
SM3840			
Idrometro a galleggiante ID7877	Livello di marea	Metro	3 metri

## 12. Murano

Coordinate Geografiche

Latitudine

45° 27' 04.26" N

Longitudine

12° 20' 53.18" E

Altezza del caposaldo: 2.76 m



Stazione automatica e sensori	Parametro misurato	Unità di misura	Altezza del sensore sul medio mare
SM3840			
Idrometro a galleggiante ID7877	Livello di marea	Metro	3 metri



Figura 2.6 Posizione stazioni Centro Mare

### **2.6 La frequenza delle alte maree a Venezia e Chioggia.**

Uno degli aspetti più interessanti nell'analisi delle osservazioni mareografiche nella laguna di Venezia riguarda il calcolo delle frequenze degli eventi di alta marea che si accompagnano ad allagamenti nei centri urbani lagunari (Venezia, Chioggia, Murano, Burano) e che, nei casi più severi, favoriscono anche l'insorgere di condizioni di elevata criticità nei riguardi dell'intero sistema delle difese idrauliche territoriali e costiero-lagunari.

In base alla legislazione speciale per Venezia, il Magistrato alle Acque, da qualche decennio, ha dato corso ad un complesso ed articolato sistema di interventi volti a difendere i centri abitati lagunari dalle inondazioni dovute alle alte maree. In linea generale tale sistema è articolato su due livelli di difesa.

Il primo, il cosiddetto sistema delle difese locali, ha come obiettivo quello di porre a riparo le abitazioni, i percorsi pedonali, gli esercizi pubblici ed il patrimonio edilizio-architettonico dalle cosiddette maree medio-alte i cui livelli massimi non superano i 110 cm sopra lo ZMPS.

Gli interventi comprendono il rialzo ed il consolidamento delle rive e la relativa risistemazione di tutti i servizi (fognature, distribuzione di acqua potabile, gas, energia elettrica, rete telefonica, dragaggio dei ri).

Il secondo livello di intervento è quello relativo alla difesa dalle maree che superano i 110 cm sopra lo ZMPS, le cosiddette alte maree eccezionali. Per questa tipologia di rischio sono in corso di realizzazione opere finalizzate alla temporanea chiusura delle tre bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia, di cui si parlerà più in dettaglio nel capitolo 5.

Riveste quindi un significato di particolare utilità l'analisi della frequenza delle alte maree nell'ottica di poter monitorare con continuità l'efficacia dei provvedimenti che via via si vanno adottando per la difesa dalle inondazioni.

A questo proposito l'IPCSM dal febbraio 2010 ha reso disponibile in rete il nuovo "Bollettino della marea a Venezia", uno strumento per divulgare informazioni circa la previsione della marea per la città di Venezia, all'interno del quale i vari intervalli di livello di marea vengono identificati tramite le terminologie e i codici colore riportati nella tabella seguente.

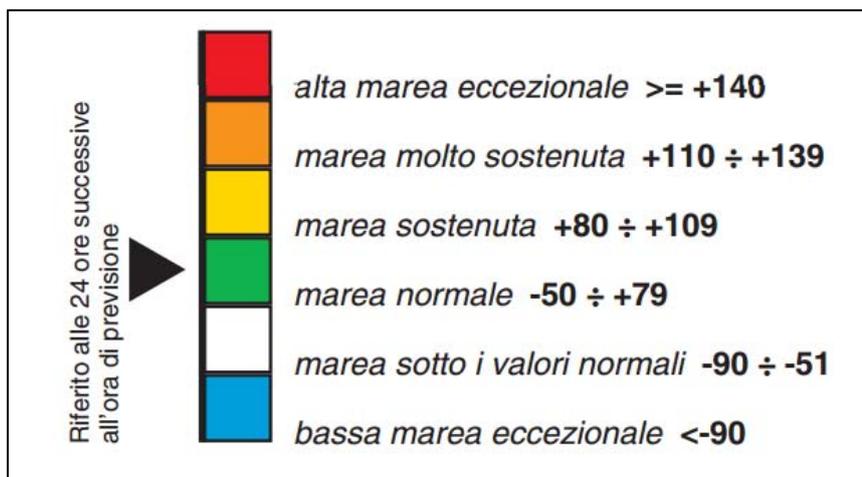
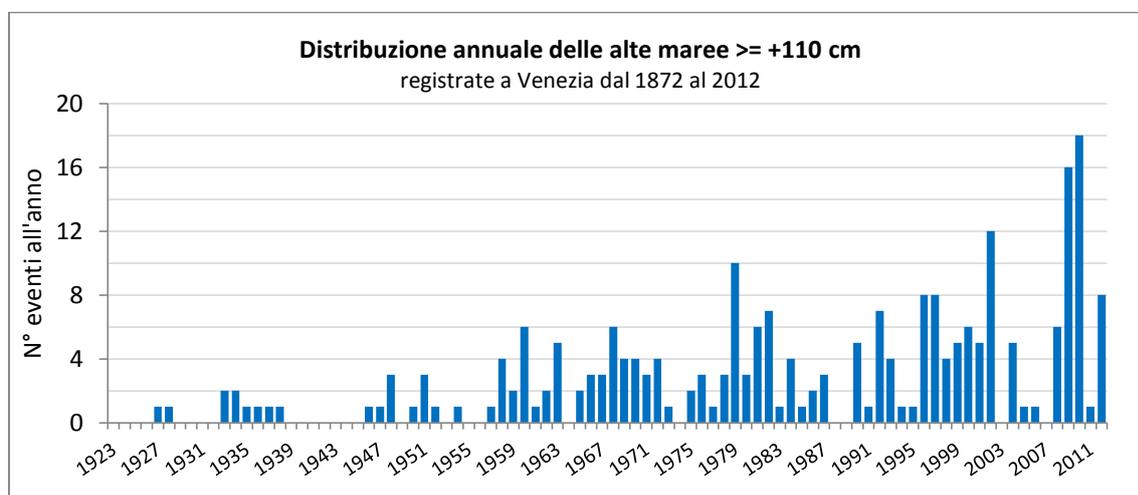


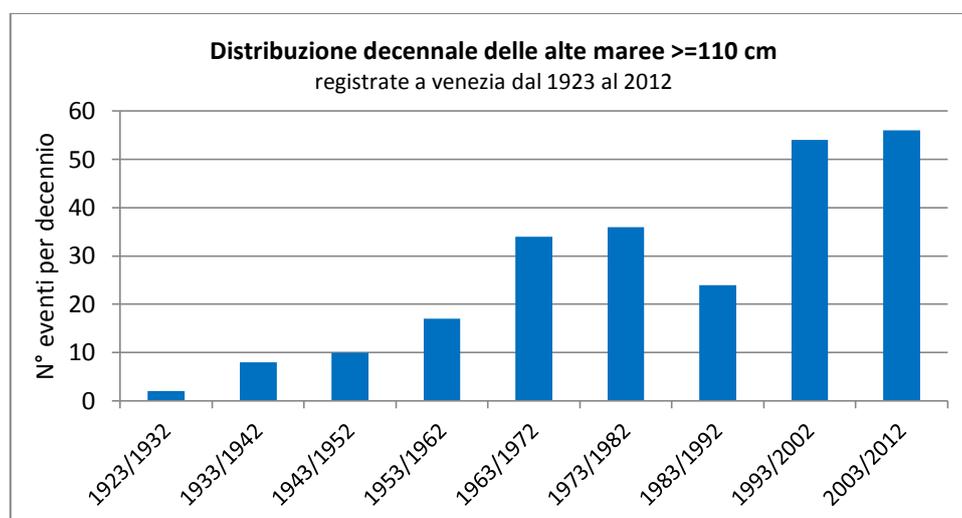
Figura 2.7 Intervalli di classificazione della marea

È interessante osservare il grafico seguente, il quale riporta il numero di maree eccezionali ( $>110$  cm) a Venezia nella stazione di Punta Salute dal 1923 al 2012. Possiamo osservare due cose: la prima, è che il numero di eventi è mediamente incrementato col passare degli anni, la seconda è che la crescita non ha un andamento continuo ma cambia nel tempo, ad esempio nel 2006-2007 non ci sono casi rilevanti mentre nel 2010 si arriva a 18.



Questo secondo aspetto è una conferma del fatto che il fenomeno non è legato solamente a cambiamenti che possono essere ritenuti graduali nel tempo come ad esempio l'innalzamento del livello del mare, ma è la somma di diversi fattori (la pressione atmosferica, il vento, le oscillazioni delle sesse, l'afflusso dal bacino scolante, l'apporto piovano...) che possono presentarsi tutti contemporaneamente e sommare i loro effetti esaltando il livello di marea oppure non verificarsi affatto o annullarsi reciprocamente.

Anche il grafico relativo alla distribuzione decennale delle alte maree è piuttosto significativo, esso mostra come già dal decennio 1963/1972 ci sia un forte aumento degli eventi, da imputarsi prevalentemente al forte tasso di subsidenza che investe la zona lagunare in seguito all'estrazione di acqua dal sottosuolo per l'utilizzo nelle fabbriche del polo industriale di Marghera che proprio in quegli anni viveva il suo massimo sviluppo. Nel decennio più vicino a noi, dal 2003 al 2012 sono stati registrati 56 eventi oltre i 110 cm, limite oltre il quale è prevista l'attivazione delle barriere mobili del progetto per la salvaguardia di Venezia dalle "acque alte".





## 3 SOPRALZI DIFFERENZIALI DOVUTI AL VENTO

### 3.1 La spinta del vento sulla superficie marina

Nel capitolo introduttivo, tra i fattori che determinano il fenomeno delle “acque alte” a Venezia ho elencato il contributo del vento o meglio dello sforzo tangenziale alla superficie marina prodotto nel contatto aria-acqua. Poiché l'effetto del vento sui livelli di marea è il punto centrale della presente tesi affronterò ora in maniera più approfondita questo aspetto, avvalendomi anche di osservazioni effettuate in occasione di particolari eventi di marea, associati a venti di forte intensità, all'interno della laguna veneta.

Sono stati usati molti metodi per misurare la spinta del vento sul mare ma essi appartengono essenzialmente a quattro tipi principali.

La prima tecnica cerca di ricavare tale informazione dall'inclinazione prodotta dal vento in bacini; se soffia vento su di un lago, la superficie viene inclinata, verso l'alto dal lato sottovento; la misura della pendenza media, i cui valori tipici sarebbero dell'ordine di un centimetro per sei chilometri, può dare una stima della spinta esercitata.

Ci sono difficoltà teoriche per quanto riguarda gli effetti al contorno, ma le maggiori difficoltà sono pratiche: necessitano condizioni stazionarie e, pur essendo possibile eliminare l'effetto delle onde superficiali in modo da avere osservazioni di sufficiente precisione, è spesso difficile eliminare l'effetto delle oscillazioni a lungo periodo dell'intera massa d'acqua, note come sesse.

Un secondo metodo sfrutta la misura della distribuzione verticale media del vento in uno strato di pochi metri al di sopra della superficie; se l'aria e l'acqua hanno la stessa temperatura, la velocità del vento aumenta col logaritmo dell'altezza, secondo un coefficiente di proporzionalità che dà una misura della spinta esercitata.

Questo metodo è empirico ma molto sicuro; le sue difficoltà di carattere tecnico più che scientifico; è difficile ottenere strumenti di sufficiente precisione (la velocità dev'essere misurata con una tolleranza di circa 1 cm/sec) ed è ancor più difficile esporre gli strumenti in modo che i loro supporti non vengano ad interferire col vento, le onde o la corrente.

Perciò gran parte delle osservazioni di questo tipo sono state fatte sui laghi od acque basse, sebbene alcuni ricercatori abbiano sviluppato tecniche per misurare abbastanza accuratamente il vento anche da una piccola nave.

Una terza tecnica si rifà ancora alla misura della distribuzione verticale del vento, però ad altezze maggiori; in condizioni stazionarie si può stimare la spinta del vento sul mare dalla componente che attraversa le isobare; il metodo perciò richiede misure accurate sia della distribuzione della pressione atmosferica che del vento.

Ne deriva che questo metodo non è adatto alle medie latitudini dato, che il vento forma un angolo piccolo con le isobare fino a circa un chilometro d'altezza; il metodo è più adatto agli alisei, dove i tentativi di applicarlo hanno avuto un certo successo.

La quarta tecnica ricorre ancora a misure del vento, studiandone in dettaglio le variazioni nel tempo: si deve quindi far uso di uno strumento rapido, con un tempo di risposta dell'ordine del decimo di secondo.

Vengono misurate sia la componente orizzontale che quella verticale del vento ed il valor medio del loro prodotto dà la spinta.

Anche in questo caso ci sono delle difficoltà teoriche nell'interpretazione dei risultati; è probabile però che si possa superarle.

Le maggiori difficoltà riguardano però, anche in questo caso, la bontà e la corretta disposizione degli strumenti e la notevole quantità di analisi numerica necessaria ad ottenere i risultati.

D'altra parte il metodo fornisce dettagliate informazioni sulla struttura del flusso turbolento ed il suo uso andrà estendendosi con lo sviluppo di metodi per la manipolazione dei dati.

Un'ulteriore pregio di questo metodo è che la misura delle fluttuazioni dell'umidità e della temperatura, assieme a quella della componente verticale delle velocità, permette di stimare l'evaporazione e gli scambi termici.

Si potrebbe pensare che, avendo a disposizione tutti questi metodi, si ottengano valori sostanzialmente concordanti per la spinta prodotta sul mare da un determinato vento; ciò purtroppo non avviene e nei risultati pubblicati si notano discordanze difficilmente conciliabili.

C'è un discreto accordo sul fatto che la spinta è piccola rispetto a quella su di una superficie fissa e solida colla stessa geometria e sul fatto che tale spinta aumenta con la velocità del vento secondo una potenza in qualche modo superiore a due.

Il vento sembra essere il fattore principale, ma anche la differenza di temperatura fra l'aria ed il mare ha un effetto misurabile; è stato pure suggerito che sottili lamine naturali di sostanze con particolari caratteristiche di contatto abbiano un effetto maggiore di quanto comunemente si creda sulla dinamica del sistema.

Per cause pratiche si hanno poche osservazioni in venti forti, caratteristici di violente mareggiate; in tali casi la misura dell'inclinazione è forse più appropriata ed indica che la spinta del vento può essere considerata proporzionale al prodotto del quadrato della sua velocità per la densità dell'aria, secondo un fattore di circa 0.002.

#### **3.2 Esempi di dislivelli osservati**

Al di là della ricerca della correlazione più corretta esistente tra l'intensità di un dato vento e l'entità della spinta esercitata sulla superficie marina ciò che a noi interessa in questo contesto è appurare che il vento abbia una rilevante influenza sull'andamento della marea sia sulla costa che all'interno della laguna e evidenziare il fenomeno dei sovralti differenziati in diversi settori della laguna.

#### **Eventi di bora.**

In occasione di alcuni particolari eventi di marea eccezionale (8 dicembre 1992, 10 novembre 2004, ecc.) al mareografo di Chioggia Vigo sono stati osservati livelli massimi di marea superiori anche di 20 cm rispetto a Punta Salute a causa della concomitanza di forti venti da nord-est. E' noto che quando la bora spira con velocità fino a 30-40 nodi si determinano cospicui fenomeni di insaccamento (wind set-up) a ridosso di tutto il perimetro centro meridionale della laguna.

Alcune importanti misurazioni (Ferla-Rusconi 1994) relative all'evento dell'8 dicembre 1992 hanno quantificato gli estremi di colmo dei sopralzi differenziali da bora, rispetto a Punta Salute e durante lo stesso evento, fino a circa + 40 cm in laguna Sud e circa -40 cm in laguna Nord.

Valori dello stesso ordine di grandezza sono ricostruiti da un modello matematico di simulazione degli effetti del vento in laguna (Zecchetto-Ungiesser-Brocchini 1998).

Tale modello ha utilizzato le effettive rilevazioni di direzione e stress di vento effettuate da diverse stazioni meteorologiche lagunari durante casi reali di acqua alta con bora. La simulazione degli eventi reali così effettuata quantifica valori di soprizzo differenziale di -55 cm in laguna Nord e + 45 cm in laguna Sud.

In presenza di tali valori può risultare confermato il fenomeno di livelli interni lagunari presso la bocca di Chioggia più elevati di quelli del mare, nonostante la fase di alta marea crescente. In presenza di bora si configura infatti una corrente lagunare proveniente dalle altre zone e dalle altre bocche di Lido e Malamocco, dove l'acqua continua ad entrare per il richiamo del vento che la insacca verso la laguna Sud presso la bocca di Chioggia. Qui l'acqua si attesta su livelli più elevati di quelli del mare alla bocca e quindi continua a defluirne, con movimento contrario a quello delle altre bocche, fino a che il vento la mantiene internamente sostenuta.

Anche di tale fenomeno di circolazione acqua lagunare si è recentemente iniziata la caratterizzazione quali-quantitativa.

È noto ed ufficialmente commentato (Ferla Rusconi, 1994) il caso dell'evento complesso di marea dei giorni 7-10 dicembre '92, durante il quale, in presenza di bora dominante, il fenomeno del ricircolo si sarebbe ripetutamente verificato per un totale di circa 20 ore.

Anche di questo evento sono state studiate e completate alcune ricostruzioni modellistiche sulla base delle rilevazioni del vento e delle correnti reali (Zecchetto Ungiesser Brocchini 1998).

Un altro evento interessante sotto questo aspetto è stato quello verificatosi nella notte tra il 31 ottobre e il 1 novembre 2012, in seguito ai forti venti di bora. Il picco registrato a Punta Salute fu di +143 cm mentre a Chioggia si raggiunsero i +164 cm misurando quindi un dislivello di 20 cm.

### Eventi di scirocco

Situazione opposta invece si osserva in caso di venti da sud est (scirocco) che in genere hanno come effetto quello di scaricare la laguna meridionale e di caricare la laguna settentrionale dando luogo a livelli più sostenuti nei centri abitati di Burano e Torcello.

Recentemente, a seguito di alcune operazioni di riordino degli archivi mareografici dell'APAT, ubicati presso la sede di Venezia-Lido, sono venute alla luce le registrazioni mareografiche raccolte presso alcune stazioni che funzionarono regolarmente durante il memorabile evento del 4 novembre 1966, tra cui Chioggia Vigo. I dati relativi a quello storico evento evidenziano, ad esempio, come la differenza fra i livelli massimi di Venezia e di Chioggia sia andata progressivamente aumentando man mano che cresceva la forza del vento che in quell'occasione spirava dal quadrante sud-orientale (scirocco). Al culmine dell'evento il livello di Venezia risultò più alto di quasi 30 cm rispetto a quello di Chioggia. Estremamente significativi risultarono i livelli massimi raggiunti in prossimità della parte centro-settentrionale del perimetro lagunare con valori di 197 cm ZMPS alla stazione di Marghera (all'interno del porto industriale) e di 204 cm ZMPS alla stazione di Pagliaga posta in vicinanza della testata nord dell'aeroporto di Tessera. Ciò ha fatto addirittura ipotizzare che l'ultimo colmo di marea del giorno 4 novembre '66 registrato a Punta Salute, ovvero l'ultimo balzo di 20 cm fino al massimo storico dei 194 cm, sia stato determinato dalla contemporanea caduta del vento di scirocco e quindi del riversarsi pressoché subitaneo sulla laguna centrale del sopralzo differenziato accumulato fino ad allora sostenuto in laguna nord proprio dal vento<sup>6</sup>.

Tra le altre poi, sono importanti le rilevazioni dell'evento 1 febbraio 1986, ove il sopralzo differenziato della laguna settentrionale e centro occidentale fu superiore di circa 10 cm rispetto al quello registrato a Punta Salute.

---

<sup>6</sup> Collegio degli Esperti Internazionali, Rapporto, Cap. 4.3.1

Vediamo ora in maniera un po' più dettagliata due eventi rappresentativi del fenomeno dei sopralzi differenziati osservati dall'analisi dei dati ottenuti dalle stazioni ISPRA.

In Figura 3.1 sono rappresentati i livelli di marea registrati in diverse stazioni in occasione del già citato evento di marea del 10/11/2004 caratterizzato da vento di bora di intensità media pari a 16 m/s. In questo grafico le onde di marea sono state allineate temporalmente al fine di renderlo più leggibile ed evidenziare le differenze di livello raggiunto dalle varie stazioni che si trovano lungo la direttrice longitudinale della laguna, come indicato in Figura 3.2.

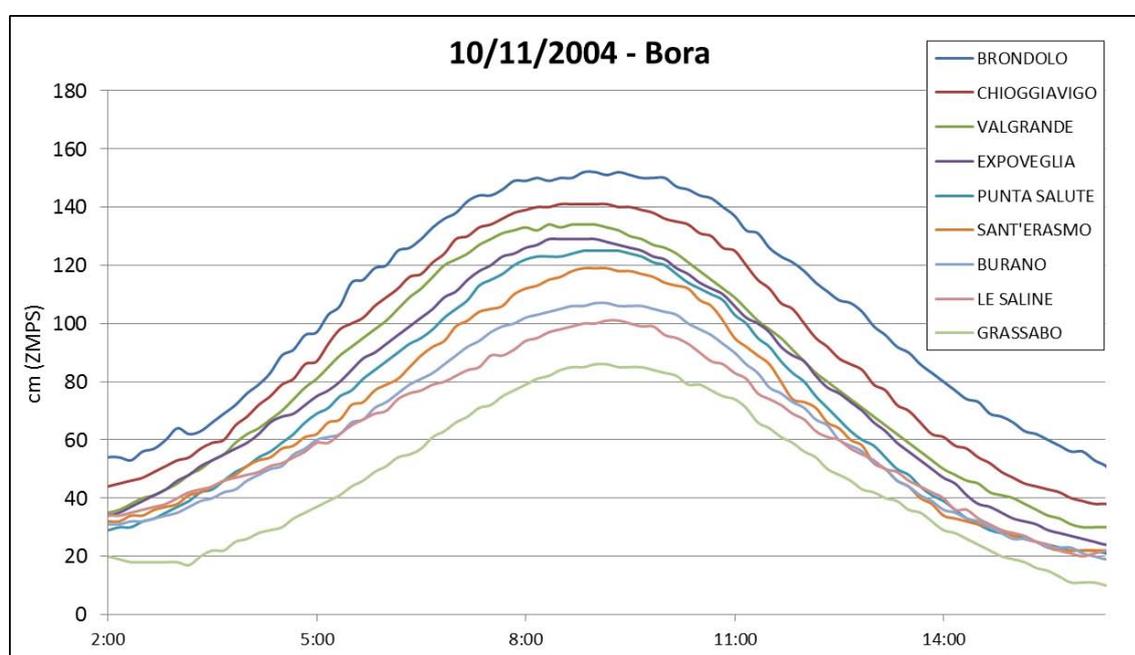


Figura 3.1 Regrazioni livelli di marea in occasione dell'evento del 10/11/2004. I livelli sono allineati temporalmente. (Dati ISPRA)

In Figura 3.3 invece sono rappresentati gli andamenti dei livelli in diversi istanti temporali, per lo stesso evento, durante la fase di crescita della marea. Si può notare la graduale crescita del dislivello tra laguna nord e sud, in particolare tra Punta Salute e Chioggia Vigo si legge un dislivello al colmo di 20 cm. Se mettiamo a confronto le due stazioni più estreme di Brondolo e Grassabò il dislivello sale a 81 cm, in questo caso tuttavia il dislivello non è dovuto solo al vento ma anche al ritardo di fase dell'onda nelle zone della laguna settentrionale che fa sì che il colmo arrivi in ritardo rispetto alle zone centrali della laguna risultando un livello inferiore. Infine in Figura 3.4 si può vedere

### 3. I SOPRALZI DIFFERENZIALI

come il dislivello, nella fase crescente della marea astronomica, cresce in un primo tratto e poi si mantenga costante per quasi due ore sostenuto dal vento.



Figura 3.2 Posizione delle stazioni ISPRa prese in considerazione

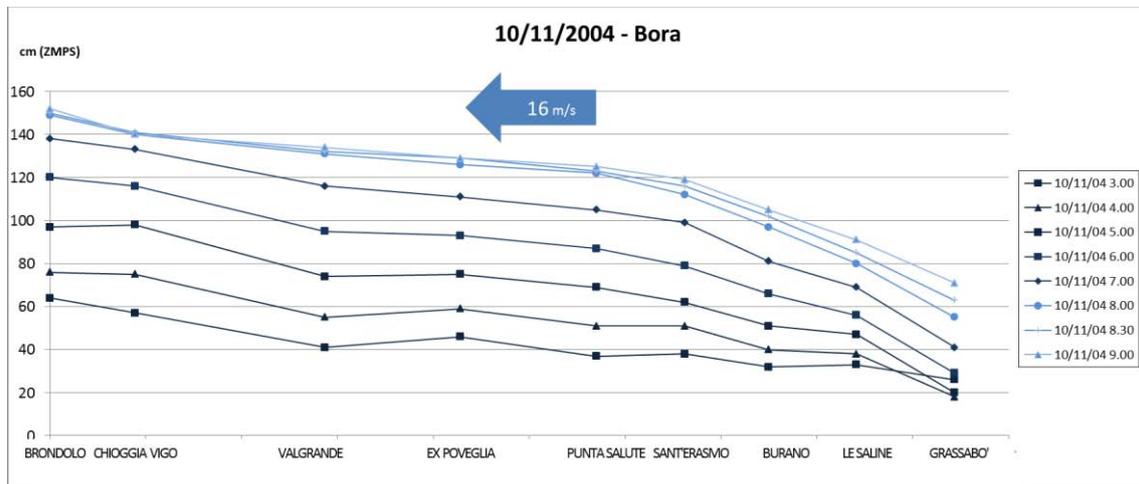


Figura 3.3 Andamento dei livelli tra Brondolo e Grassabò durante la fase di crescita della marea del 10/11/2004

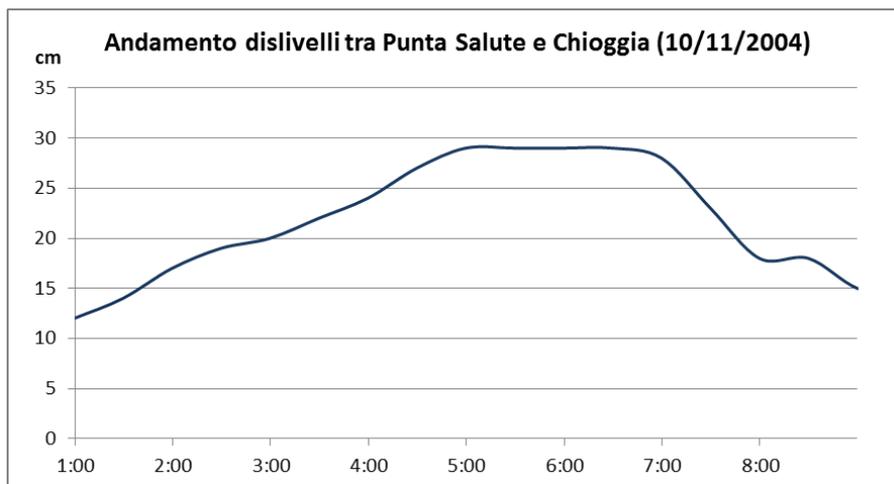


Figura 3.4 Andamento dislivelli tra Punta Salute e Chioggia durante la fase crescente dell'evento 10/11/2004

Per quanto riguarda invece l'effetto del vento di scirocco si è preso in considerazione l'evento del 6/11/2000. Come mostrano la Figura 3.6 e la Figura 3.7 la spinta del vento di scirocco fa aumentare il dislivello tra Chioggia e Punta Salute fino a un massimo di 30 cm registrato alle ore 21. Si assiste poi a una brusca diminuzione dovuta alla particolare coincidenza per cui il vento ha smesso di soffiare nel momento in cui la marea astronomica aveva raggiunto il colmo.

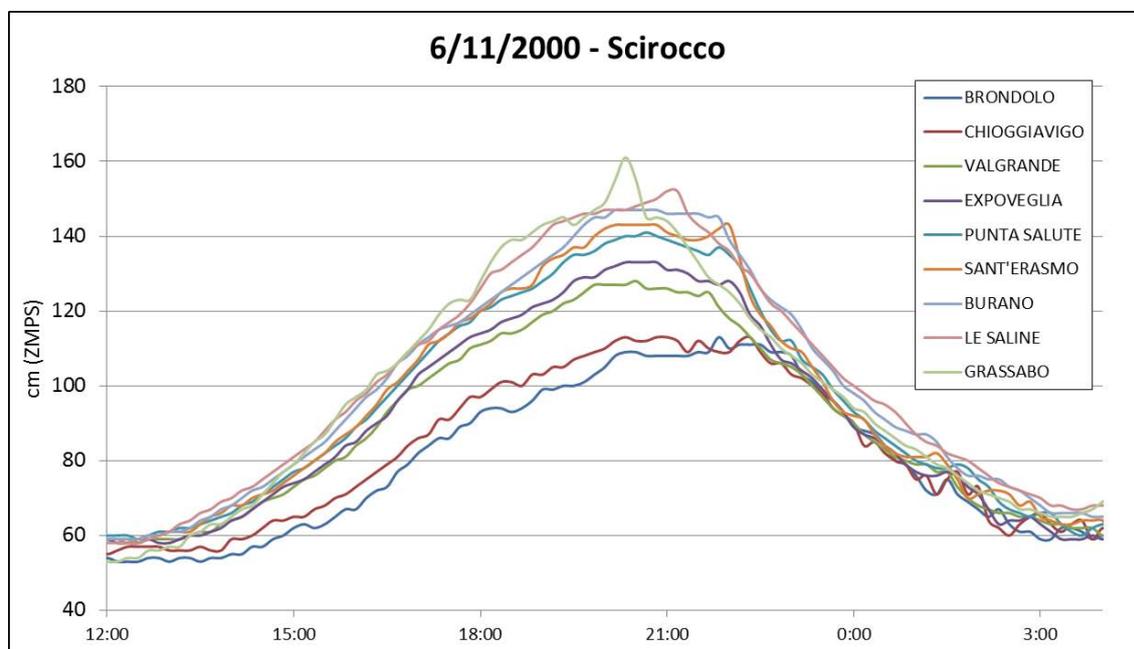


Figura 3.5 RegISTRAZIONI livelli di marea in occasione dell'evento del 6/11/2000. I livelli sono allineati temporalmente. (Dati ISPRA)

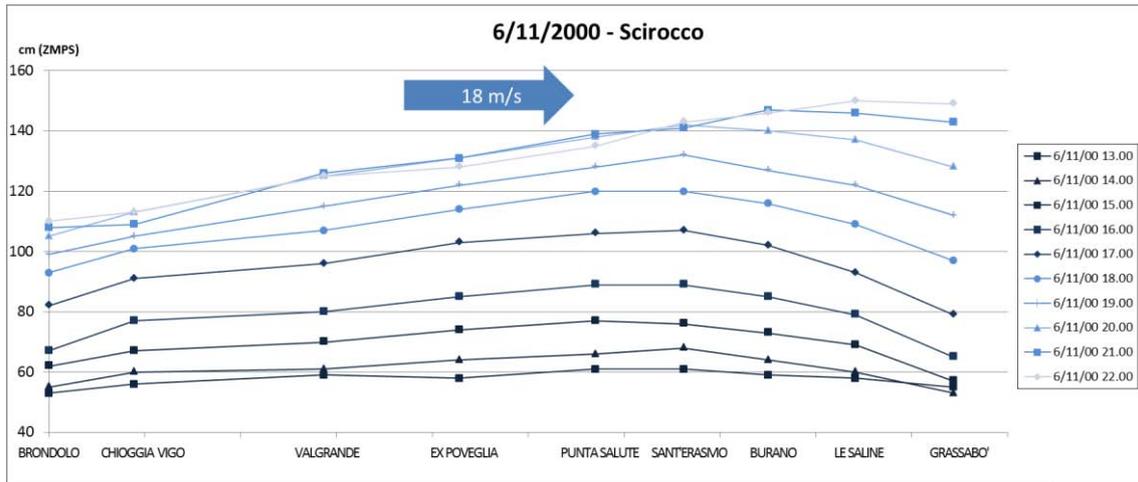


Figura 3.6 Andamento dei livelli tra Brondolo e Grassabò durante la fase di crescita della marea del 6/11/2000

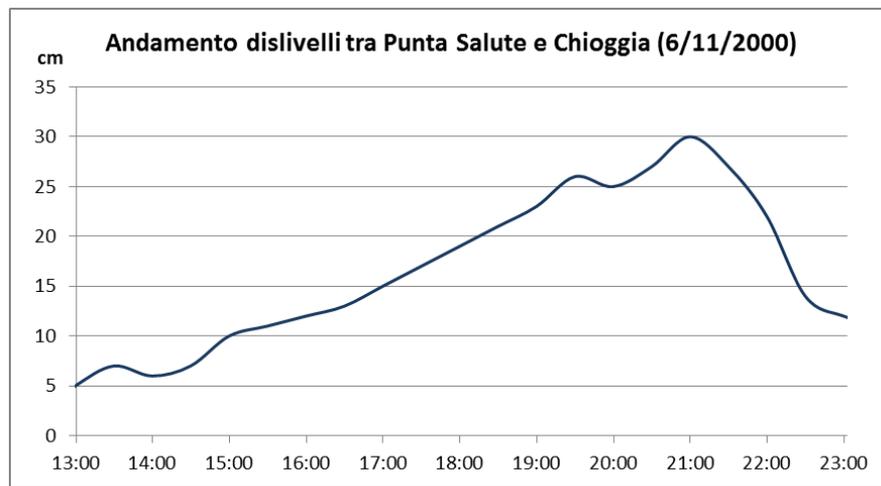


Figura 3.7 Andamento dislivelli tra Punta Salute e Chioggia durante l'evento 6/11/2000

**Statistiche dislivelli.** Sulla base della serie di dati quasi decennale che va dal 1 gennaio 2000 al 31 dicembre 2008 a disposizione ho potuto fare una statistica dei dislivelli di marea che si vengono a realizzare tra più coppie di stazioni della laguna ottenendo i risultati nelle figure seguenti.

I dislivelli sono calcolati nell'ordine in cui sono scritte le coppie ovvero livello della stazione più a nord meno il livello della stazione più a sud.

Poiché le registrazioni dei livelli sono state fatte con intervallo di 5 minuti, il calcolo dei dislivelli è stato effettuato con la stessa frequenza. Si è poi diviso il numero di valori di

dislivello appartenente ad ogni classe di frequenza per sei, ottenendo così il numero di ore totali in cui si è presentato un dato dislivello.

Si vede innanzitutto che tra Burano e Punta Salute si verificano dei dislivelli importanti per un maggior numero di ore e la curva risulta più appiattita, si tratta tuttavia dei dislivelli indotti soprattutto dal ritardo di fase e dall'attenuazione dell'ampiezza dell'onda a Burano.

Per quanto riguarda la coppia Chioggia-Brondolo si osserva una asimmetria della curva: si verificano con maggior frequenza dislivelli negativi che positivi ovvero le ore in cui il livello di Brondolo è più elevato del livello a Chioggia sono maggiori che nel caso contrario, fatto dovuto ad una maggiore frequenza di eventi di bora rispetto a quelli di scirocco (lo si può leggere dalle tabelle di pagina seguente).

Tra Punta Salute e Chioggia infine si osserva anche qui un'asimmetria, con una maggior frequenza di dislivelli negativi maggiori di 10 cm (indotti da venti di bora) che di dislivelli negativi (indotti dalla scirocco).

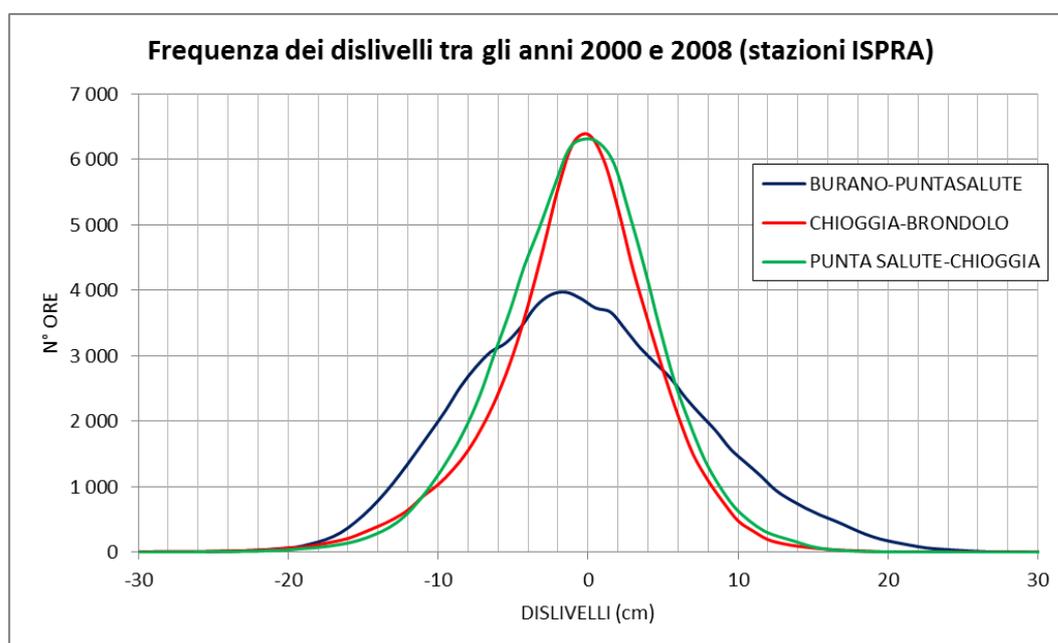


Figura 3.8 Frequenza dei dislivelli di marea tra diverse coppie di stazioni

DISLIVELLI BURANO-PUNTASALUTE						
i	+		-		TOT	
	n°ore > i	%	n°ore < -i	%	n°ore TOT	%
5	17928	23.89	21332	28.42	39260	52.31
10	7358	9.80	7541	10.05	14899	19.85
15	2382	3.17	1377	1.83	3759	5.01
20	478	0.64	202	0.27	680	0.91
25	59	0.08	34	0.04	93	0.12
30	5	0.01	5	0.01	9	0.01
35	0	0.00	0	0.00	0	0.00
40	0	0.00	0	0.00	0	0.00

Tabella 3.1

DISLIVELLI CHIOGGIA-BRONDOLO						
i	+		-		TOT	
	n°ore > i	%	n°ore < -i	%	n°ore TOT	%
5	6926	9.85	11859	16.86	18786	26.71
10	984	1.40	3625	5.16	4609	6.55
15	166	0.24	908	1.29	1074	1.53
20	36	0.05	267	0.38	303	0.43
25	4	0.01	122	0.17	126	0.18
30	0	0.00	59	0.08	59	0.08
35	0	0.00	25	0.04	25	0.04
40	0	0.00	7	0.01	7	0.01

Tabella 3.2

DISLIVELLI PUNTA SALUTE-CHIOGGIA						
i	+		-		TOT	
	n°ore > i	%	n°ore < -i	%	n°ore TOT	%
5	9243	11.85	16194	20.76	25437	32.61
10	1494	1.92	3799	4.87	5293	6.79
15	173	0.22	695	0.89	868	1.11
20	43	0.06	154	0.20	197	0.25
25	20	0.03	46	0.06	66	0.08
30	8	0.01	8	0.01	16	0.02
35	3	0.00	1	0.00	4	0.01
40	0	0.00	1	0.00	1	0.00

Tabella 3.3

## 4 IL MODELLO: TARATURA E VERIFICA DEL COEFFICIENTE DI ATTRITO DEL VENTO

Il problema dei dislivelli differenziati in laguna, dovuti alla presenza di venti intensi, è noto e ben documentato, come si è visto nel precedente capitolo. Ciò che si vuole indagare nella presente tesi è però l'entità di tale fenomeno in caso di bacino "chiuso" ovvero nel caso cui le bocche di porto vengano sbarrate come previsto dal progetto per la difesa dalle "acque alte", condizione con la quale verrebbe meno la possibilità di parziale riequilibrio dei livelli mediante ricircolo.

Per questo scopo si è reso necessario utilizzare un modello matematico che simuli la propagazione della marea in laguna in presenza di vento.

### 4.1 Introduzione al modello.

Il modello proposto dai ricercatori dell'Università di Padova per la soluzione del problema idrodinamico, si basa su di una soluzione numerica con il metodo agli elementi finiti delle equazioni che governano la propagazione di un'onda di marea in ipotesi bidimensionali (D'Alpaos e Defina 1993; D'Alpaos e Defina 2006; Defina 2000).

La soluzione implementata è particolarmente adatta ed efficiente per l'ambiente lagunare veneziano caratterizzato da:

- a) ampie superfici periodicamente destinate ad asciugarsi o ad allagarsi durante l'alternarsi delle fasi di marea;
- b) un diffuso reticolo di canali, più o meno importanti ma dalla morfologia molto articolata, che innerva le zone d'acqua e le superfici di barena, con effetti sul regime delle correnti non trascurabili, soprattutto per gli specchi d'acqua situati ai margini della laguna.

La soluzione del primo problema è stata risolta modificando le equazioni del moto bidimensionale attraverso l'introduzione di un modello di sottogriglia (D'Alpaos e Defina 1993; Defina 2000) che permette di tener conto «concettualmente» degli effetti esercitati sull'invaso e sulle resistenze al moto dalle irregolarità del terreno presenti in una qualsiasi maglia del reticolo di calcolo.

Per tenere conto invece del ruolo idraulico dei canali minori il modello accoppia:

- a) elementi bidimensionali, che permettono di simulare la propagazione dell'onda di marea sui bassifondi e sulla barene, in cui il campo di moto è chiaramente bidimensionale;
- b) elementi monodimensionali disposti in modo da seguire il tracciato dei canali, che permette di descrivere il ruolo dei canali minori, anche dei più piccoli, non trascurabile, nella propagazione della marea.

Ne risulta uno schema complessivo particolarmente potente ed efficace che in questi anni ha dimostrato la capacità di cogliere sia gli aspetti generali della propagazione della marea sia quelli locali attraverso sistematici confronti tra i valori forniti dal calcolo e quelli misurati per alcune grandezze tipiche del moto (livelli di marea, portate, velocità e così via) nelle diverse parti della laguna.

Le equazioni delle onde lunghe in acque basse, integrate lungo la verticale e modificate per tenere conto delle irregolarità del fondo, utilizzate nello schema di calcolo, sono le seguenti:

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{Y} \right) - \left( \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{\tau_{wx}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_y}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y^2}{Y} \right) - \left( \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{\tau_{wy}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\eta \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

dove  $t$  indica il tempo,  $q_x$  e  $q_y$  sono le portate per unità di larghezza nelle direzioni del piano  $x$  e  $y$ ,  $R_{ij}$  sono gli sforzi di Reynolds ( $i$  e  $j$  denotano gli indici  $x$  e  $y$  nel piano considerato),  $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$  è lo sforzo di attrito al fondo prodotto dalla corrente,  $\tau_w = (\tau_{wx}, \tau_{wy})$  è lo sforzo di attrito del vento prodotto sulla superficie,  $\rho$  è la densità del fluido,  $h$  è l'altezza della superficie libera,  $g$  è la gravità.

$Y$  è la profondità dell'acqua equivalente, intesa come il volume di acqua per unità di area che grava sul fondo,  $\eta$  è l'elevazione di superficie.

Assumendo che l'elevazione del fondo nell'area rappresentativa elementare su cui le equazioni sono mediate sia descrivibile non da un singolo valore ma da una gaussiana per tenere conto delle variazioni dovute alla scabrezza, le espressioni di  $\eta$  e  $Y$  sono:

$$\eta = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[ \frac{2D}{a_r} \right] \right\} \quad (4)$$

$$Y = a_r \left\{ \eta \left( \frac{D}{a_r} \right) + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \exp \left[ -4 \left( \frac{D}{a_r} \right)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

dove  $\operatorname{erf}()$  è la funzione di errore,  $a_r$  è la tipica altezza delle irregolarità del fondo,  $D = h - z_b$  è la profondità media dell'acqua, essendo  $z_b$  l'elevazione media del fondo all'interno del dominio elementare.

Nel caso di un flusso turbolento su una superficie scabra, lo sforzo di attrito al fondo può essere scritto come:

$$\frac{\tau_b}{\rho Y} = g \left( \frac{|\mathbf{q}|}{K_s^2 H^{\frac{10}{3}}} \right) \mathbf{q} \quad (6)$$

dove  $\mathbf{q} = (q_x, q_y)$ ,  $|\mathbf{q}| = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$ ,  $K_s$  è il coefficiente di scabrezza di Strickler e  $H$  è una profondità equivalente che può essere approssimata con la seguente formula di interpolazione:

$$H/a_r \cong Y/a_r + 0.27 \sqrt{Y/a_r} e^{-2Y/a_r} \quad (7)$$

Lo sforzo di attrito da vento sulla superficie libera  $\tau_w$  è assunto:

$$\tau_w = \rho_a c_d U_{wind}^2 (1 - e^{e_w U_{wind}}) \quad (8)$$

dove  $\rho_a$  è la densità dell'aria ( $1.25 \text{ kg/m}^3$ ),  $c_d$  è il coefficiente di drag, oggetto della taratura come verrà poi spiegato,  $U_{wind}$  è la velocità del vento e  $e_w$  è un coefficiente pari a  $1.62 \cdot 10^{-6}$ . Tale coefficiente è supposto costante, anche se nella realtà si può notare una sua dipendenza dalle condizioni termo-igrometriche dell'aria e, soprattutto,

dall'altezza delle onde: infatti è intuibile come una superficie increspata opponga un attrito maggiore; vi sarebbe quindi una dipendenza dall'intensità del vento ma anche dalla sua direzione (strettamente collegata al fetch) e dalla durata: sono questi i tre fattori principali che determinano l'altezza delle onde.

Occorre specificare che, nel modello, l'elevazione di superficie  $h$  è assunta variabile linearmente tra nodo e nodo mentre le componenti di portata specifica sono assunte costanti dentro ogni elemento.

L'obiettivo di questa fase di lavoro è quello di tarare il coefficiente di drag  $c_d$  contenuto nell'espressione della tensione tangenziale dovuta al vento sulla superficie marina. In breve la taratura consiste nel simulare tramite il modello alcuni eventi noti caratterizzati da vento intenso con diversi coefficienti di drag, estrarre gli andamenti dei livelli di marea relativi a determinate stazioni e confrontarli con i dati realmente osservati al fine di stabilire quale sia il coefficiente che meglio riproduce la situazione reale.

Scendiamo ora nel dettaglio del procedimento vedendo innanzitutto qual è la situazione di partenza del modello idrodinamico su cui si è operato.

**Geometria.** Il reticolo di calcolo è costituito da 49771 nodi e 94162 maglie bidimensionali. Ad ogni singola maglia sono assegnate tre caratteristiche: le quote del fondo, i valori del coefficiente di scabrezza di Strickler e i valori di  $a_r$ .

Le quote del fondo sono assegnate sulla base della batimetria del 2003, la più recente effettuata.  $a_r$  è stato posto ovunque uguale a 0.3 m. La distribuzione dei coefficienti di scabrezza deriva da recenti operazioni di taratura del modello idrodinamico, condotte considerando le registrazioni mareografiche relative a una quarantina di stazioni interne, sia in condizioni di marea normale sia in caso di eventi di "acqua alta", alcuni dei quali fortemente perturbati dal vento. Il criterio generale utilizzato lega il valore del coefficiente di scabrezza alle diverse forme lagunari (canali, bassifondi, velme e barene) suddivise in classi. Il risultati sono i seguenti:

- mare:  $K_s = 40 \text{ m}^{1/3}/s$  ;
- canali e bocche:  $K_s = 35 \text{ m}^{1/3}/s$  ;
- bassifondi:  $K_s = 30 \text{ m}^{1/3}/s$  ;

- zone semi-emerse non vegetate:  $K_s = 20 \text{ m}^{1/3}/s$  ;
- barene:  $K_s = 15 \text{ m}^{1/3}/s$  .

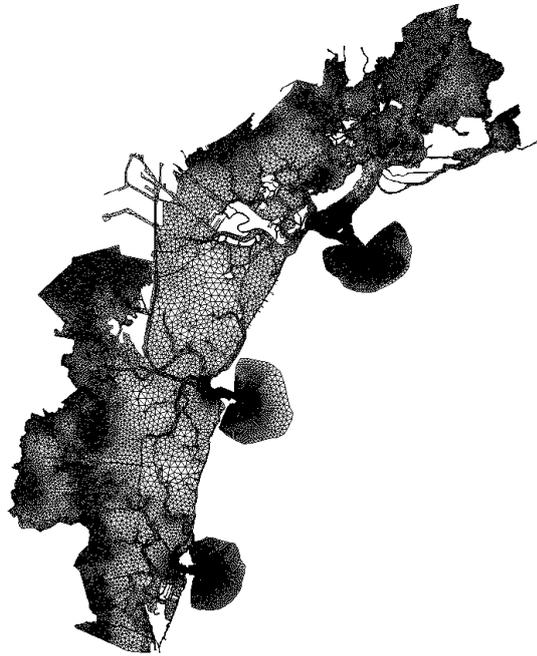


Figura 4.1 Reticolo di calcolo

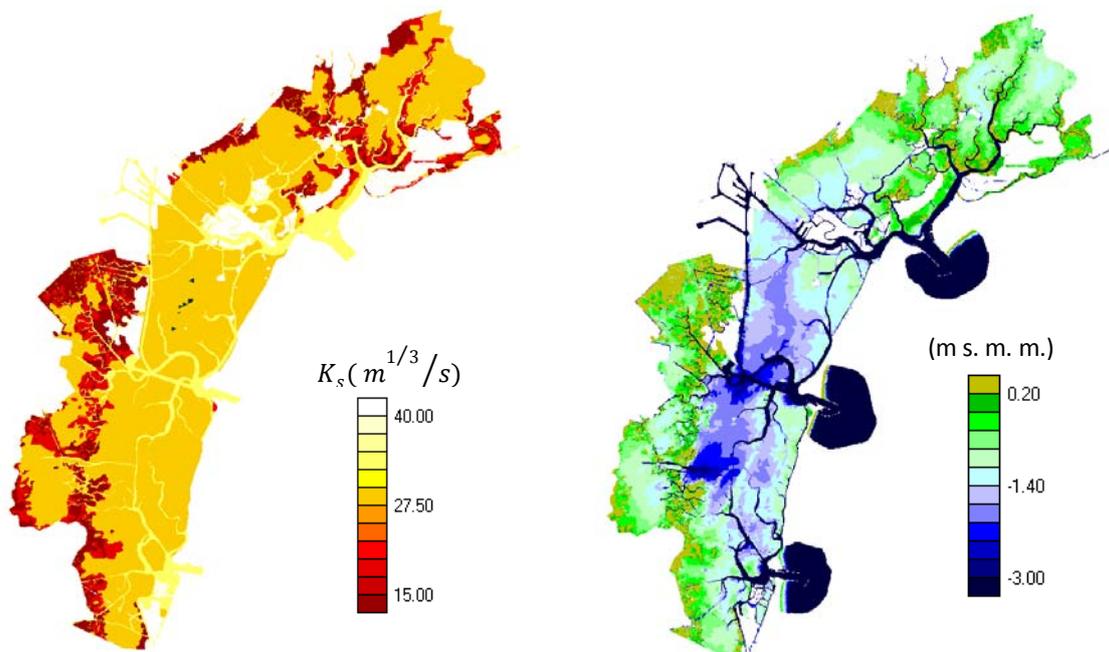


Figura 4.2 Distribuzione dei coefficienti di Strickler e batimetria a scala di colori adottati nel modello matematico

**Condizioni al contorno.** Le condizioni al contorno vengono fornite al modello tramite il file .sim e sono rappresentate dai livelli registrati alle bocche. I dati presentano cadenza ogni 5 minuti e sono forniti dalle seguenti stazioni del Centro Maree che si trovano sul lato mare delle dighe: Diga Sud Lido, Malamocco e Chioggia.

**Condizione iniziale.** La condizione iniziale è quella di un livello costante di allagamento delle maglie. La correttezza delle condizioni iniziali influisce solamente sul tempo di messa a regime del sistema, pertanto si aggira facilmente il problema utilizzando una serie di dati precauzionalmente allungata a monte e a valle di un giorno rispetto al periodo da analizzare, anche se i risultati mostrano che il modello va a regime in poche ore.

**Vento.** I dati di vento forniti al modello consistono in registrazioni di intensità e direzione con frequenza di 5 minuti provenienti dalle stazioni di Chioggia e Le Saline.

Il vento è supposto distribuito su tutta l'area presa in considerazione assegnando i valori di intensità e direzione a 20 stazioni di cui 13 stazioni in laguna sud e mare che fanno riferimento ai dati di Chioggia e 7 stazioni in laguna nord che fanno riferimento ai dati delle Saline. Partendo quindi dalle stazioni assegnate il modello calcola, tramite interpolazione, un campo di vento distribuito.

#### 4.1 Taratura del coefficiente di attrito del vento

Il coefficiente di drag era stato oggetto di una precedente taratura<sup>7</sup> caratterizzata da:

- l'utilizzo nel modello di un campo di vento uniforme con i dati provenienti dalla sola stazione di Chioggia distribuiti su tutta la laguna da nord e sud;
- la scelta dell'evento del 10 novembre 2004 e del 6 novembre 2000 come unici eventi di taratura;
- l'utilizzo dei dati di sei stazioni di taratura dell'ISPRA: Le Saline, Burano, Murano, Ex Poveglia, Settemorti, Brondolo e di due del centro Maree (Punta Salute e Chioggia). Come già sottolineato in precedenza le stazioni dell'ISPRA forniscono registrazioni dei livelli di marea ogni 10 minuti, mentre per quelle del Centro maree i dati disponibili erano orari.

Al termine della taratura risultava un valore di 0.06.

---

<sup>7</sup> Riccardo Mel, Tesi di Laurea, 2009

Rispetto a quella operazione, sono state introdotte delle migliorie sostanziali che ora andrò gradualmente a descrivere.

Innanzitutto si è indagato sull'ordine di grandezza che il coefficiente di drag può assumere, arrivando alla conclusione che il range più probabile fosse quello compreso tra 0.01 e 0.2.

Si sono selezionati quindi alcuni eventi di taratura e altri per la validazione. I criteri di scelta sono stati due: la prima scrematura è stata fatta selezionando gli eventi che hanno portato a maree eccezionali (>110 cm), il secondo criterio invece è stato la presenza di vento superiore ai 15 m/s durante la fase di marea sigiziale. Poiché sono eventi piuttosto rari, per non limitare troppo il numero di casi da analizzare, in un secondo momento si è deciso di scegliere anche eventi di marea medio alta che conservassero tuttavia valori alti di intensità del vento. Sono stati selezionati 5 eventi :

Data evento	Direzione vento (°N)	Intensità vento (m/s)
18 gennaio 2004	45	19
28-29 febbraio 2004	20	18
10 novembre 2004	43	18
4-5 marzo 2008	30	20
1 dicembre 2008	10	15

Nella compilazione del modello si è assunta la presenza di un vento distribuito su tutta la laguna tramite inserimento dei dati di intensità e direzione non solo relativi a Chioggia ma anche a Le Saline, come spiegato sopra, al fine di ottenere una maggiore completezza nella descrizione del comportamento dei flussi d'aria e della loro interazione con la superficie marina.

Si è fatto quindi girare il modello per tutti i valori di  $C_d$  compresi nell'intervallo tra 0 e 0.2 con un passo di 0.01 per tutti gli eventi, per un totale quindi di 200 simulazioni. Ogni simulazione comprende un lasso temporale di 72 ore durante le quali l'evento preso in considerazione si colloca nella parte centrale.

Si sono poi estratte le misure di livello da 5 punti della laguna corrispondenti alle posizioni di 5 stazioni mareografiche IPSCM (Centro Maree): Punta Salute, Murano, Chioggia, Burano, Le Saline.

La predilezione di queste stazioni rispetto a quelle dell'ISPRA è dovuta al fatto che i dati osservati che si hanno a disposizione in queste stazioni, necessari per il confronto con i valori simulati, hanno cadenza ogni 5 minuti e permettono quindi un confronto dei livelli più dettagliato.

Come esempio osserviamo l'evento del 28-29 febbraio 2004.

Prima di analizzare i risultati della taratura vediamo un grafico di confronto dei dati osservati per cogliere alcuni aspetti che ci saranno utili poi nella trattazione successiva.

L'evento è associato ad un vento di bora, proveniente quindi da Nord-NordEst, possiamo infatti vedere che il livello a Chioggia è molto più alto degli altri. Le differenze maggiori tra le varie stazioni si registrano nel tratto temporale in cui si alza il vento, mentre nel periodo precedente le differenze nei livelli delle stazioni sono prodotte principalmente dal ritardo di fase (lo si nota bene dalla posizione dei colmi di marea). In particolare le stazioni delle Saline e di Burano sono quelle che accumulano maggior ritardo a causa della posizione in cui si trovano.

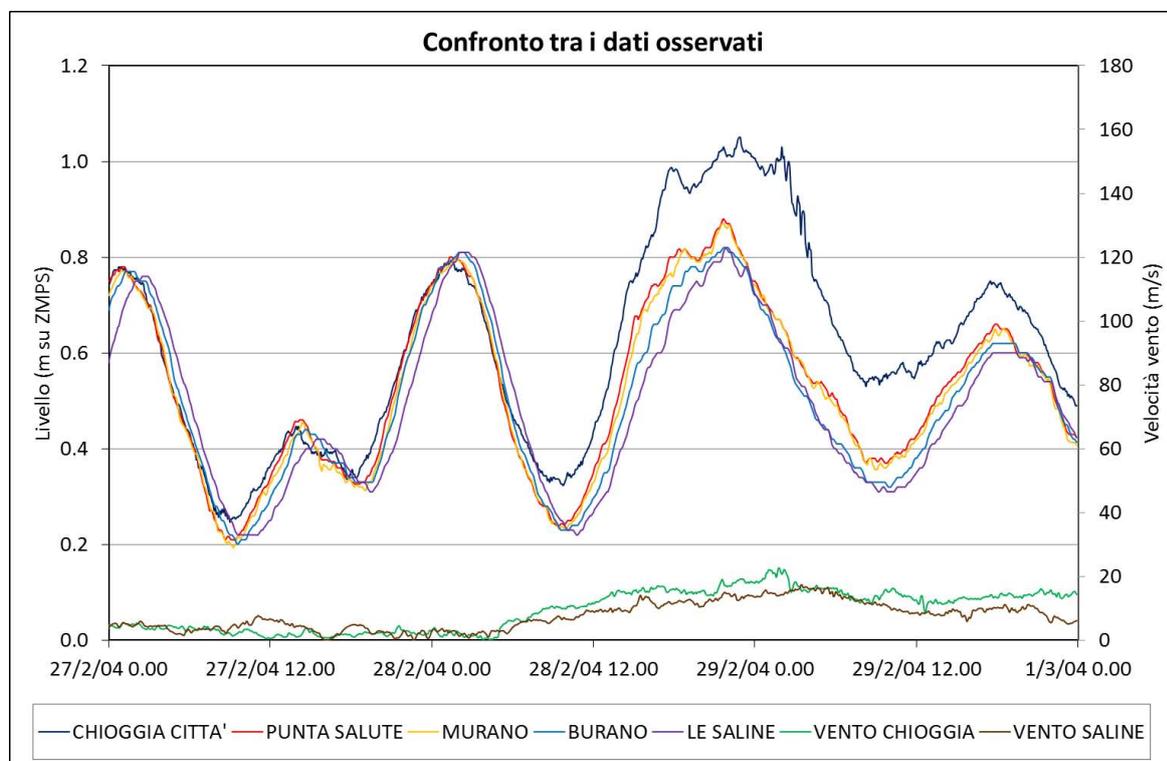


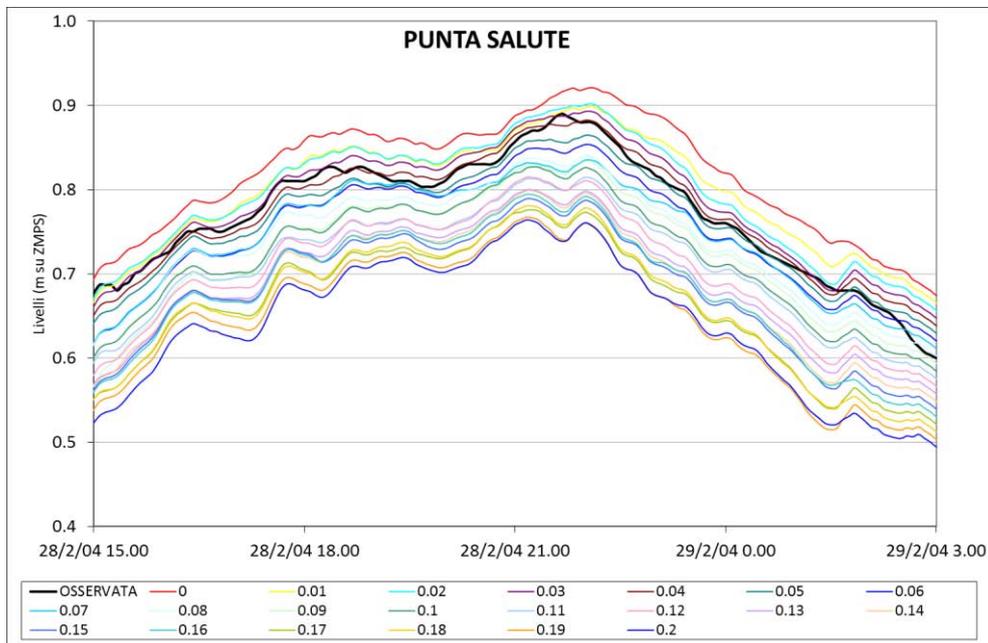
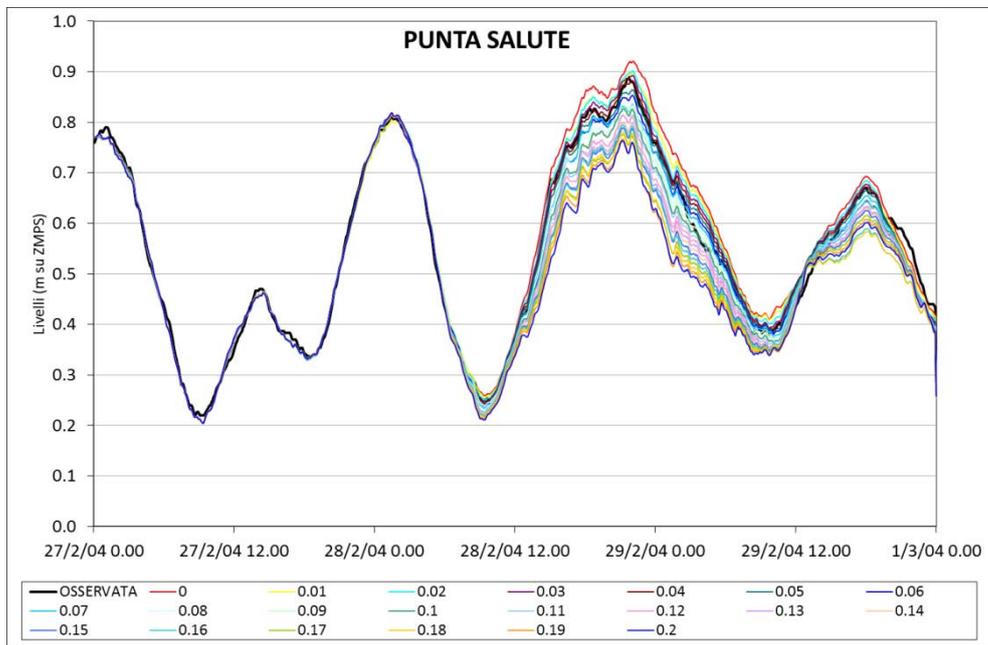
Figura 4.3 Andamento dei livelli osservati nelle stazioni prese in considerazione

Vediamo ora, in relazione allo stesso evento, tre serie di grafici relativi alle stazioni di Punta Salute, Chioggia e Le Saline, i quali mettono a confronto i livelli osservati con quelli simulati dal modello per tutti i diversi valori assegnati al coefficiente di drag. Ricordiamo che all'aumentare del coefficiente di drag aumenta lo sforzo tangenziale trasmesso dal vento alla superficie lagunare e a questo corrisponderanno quindi effetti differenti nei livelli registrati nelle tre stazioni.

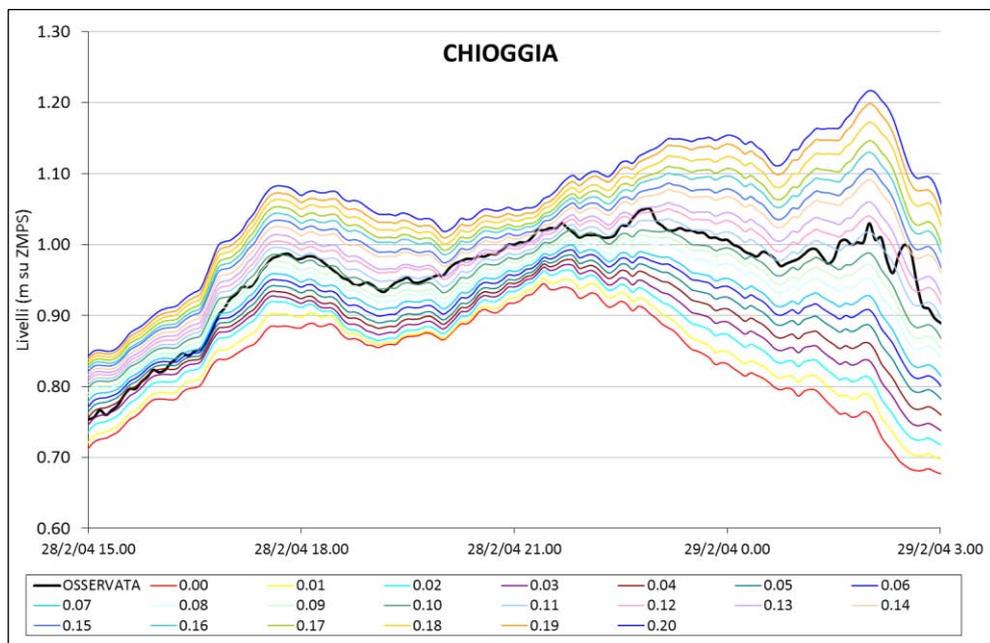
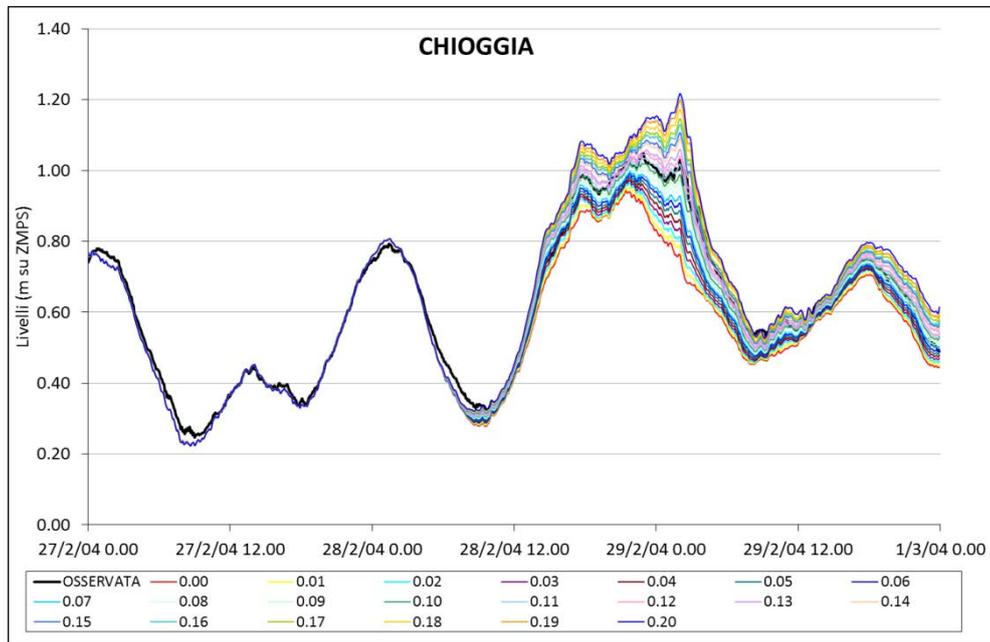
L'incremento del coefficiente provocherà quindi, con venti di bora, un proporzionale aumento dei livelli nella stazione di Chioggia, la più a sud, mentre nelle stazioni di Punta Salute e ancora di più Le Saline provocherà una diminuzione degli stessi.

Per ogni stazione vengono presentati due grafici: il primo ricopre l'intervallo complessivo di tre giorni della simulazione al fine di poter notare come la modifica del coefficiente di drag non comporti differenze nel periodo in cui non c'è vento. Il secondo grafico invece restringe il campo al solo periodo di 12 ore in cui l'effetto combinato di vento e marea ha massima intensità per visualizzare con maggior dettaglio le differenze che intervengono al variare del coefficiente. Possiamo notare che per ogni variazione di 0.01 del coefficiente di drag c'è una variazione del livello pari a circa un centimetro. E' questo quindi l'ordine di grandezza dell'errore nella scelta del coefficiente.

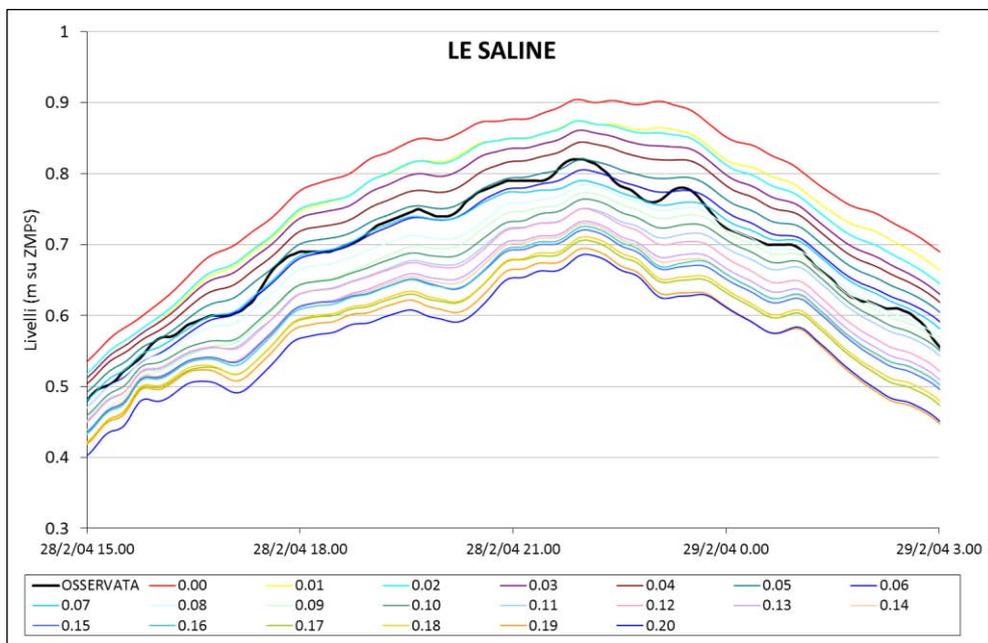
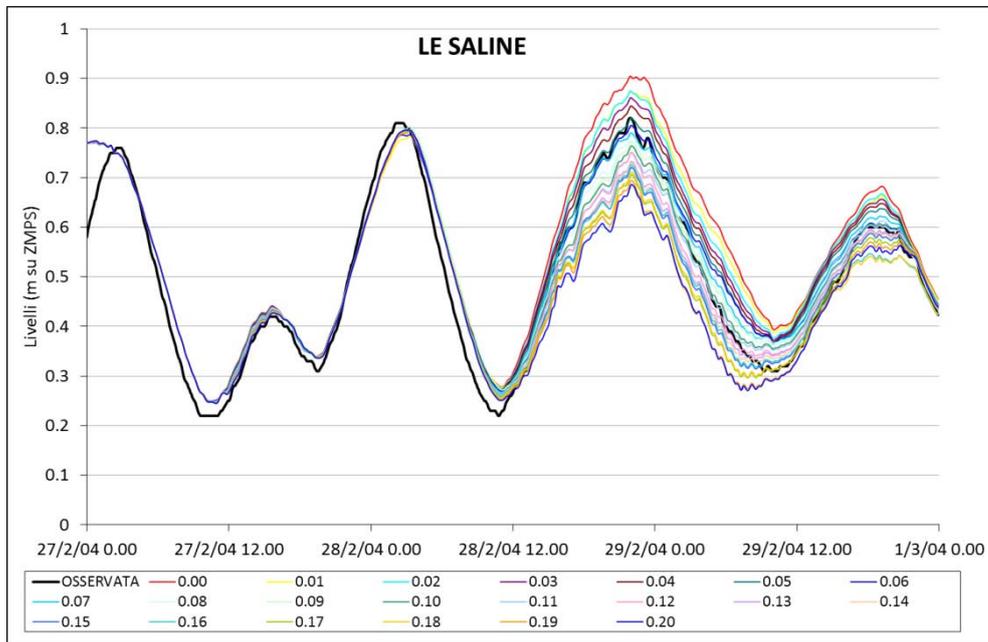
Confronto coefficienti- Stazione di Punta Salute



## Confronto coefficienti- Stazione di Chioggia



Confronto coefficienti- Stazione Le Saline



Il metodo utilizzato per determinare la curva dei livelli simulati che approssimasse in maniera migliore i valori osservati tuttavia non si è basato solo sull'osservazione dei grafici ma su una procedura più articolata che permettesse di tenere conto dei risultati di tutte le stazioni e di tutti gli eventi simulati.

Per spiegare in modo più chiaro la procedura utilizzata prendiamo ancora una volta ad esempio l'evento del 29 febbraio 2004.

Per ognuna delle 5 stazioni analizzate si è costruita una tabella in cui ogni colonna indica la serie di livelli simulati relativa ad un certo valore del coefficiente di drag (ad esempio, colonna 1: serie temporale dei livelli ottenuti con coefficiente 0.01), un'ulteriore colonna riporta la serie dei valori osservati. Tramite una media mobile fatta su tre valori, quindi ogni 15 minuti sono state ripulite le serie da disturbi e eccessive oscillazioni del segnale, senza tuttavia modificare minimamente l'andamento generale dello stesso.

Partendo dalla prima, si è costruito una seconda tabella, delle stesse dimensioni riportante tuttavia per ogni cella la differenza in termini assoluti tra il valore simulato ad un certo istante temporale e il valore reale, la tabella contiene quindi gli errori relativi del modello al variare del coefficiente di drag.

Arrivati a questo punto si sarebbe dovuta osservare ogni colonna per determinare quale contenesse i valori minori, a quella colonna dovrebbe quindi corrispondere il più corretto valore di  $C_d$ , tuttavia la soluzione non si è presentata in maniera così netta, chiara e lineare, come era prevedibile. Occorre inoltre tenere presente che, visto il basso ordine di grandezza dell'errore al variare del coefficiente di drag, ogni stazione e ogni evento potrebbero dare un valore di  $C_d$  diverso dall'altro, entro un determinato range.

Si è dovuta adottare una procedura di visualizzazione dei risultati chiara ed efficace e che permettesse, inoltre, di determinare un valore medio di  $C_d$  che minimizzi gli errori tra valori simulati e osservati per tutte le stazioni e per tutti gli eventi, nei confronti dei quali il comportamento di  $C_d$  è, certamente, deve essere indipendente.

Si è quindi operata un'ulteriore media mobile, questa volta effettuata sugli errori di sei ore, tre ore precedenti e tre ore successive all'istante considerato.

Si è infine ridotto il passo temporale delle serie di errori estraendo i valori orari.

Riporto di seguito, come esempio, le tabelle risultanti da queste operazioni relative all'evento 10/11/2004 per le stazioni di Chioggia e Le Saline.

4. IL MODELLO: TARATURA E VERIFICA

CHIOGGIA	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20
10/11/04 0.00	0.038	0.034	0.029	0.024	0.021	0.017	0.014	0.013	0.012	0.012	0.013	0.016	0.018	0.022	0.026	0.028	0.032	0.035	0.039	0.040	0.046
10/11/04 1.00	0.048	0.041	0.034	0.027	0.022	0.016	0.013	0.012	0.013	0.014	0.016	0.020	0.023	0.028	0.033	0.036	0.041	0.045	0.050	0.053	0.060
10/11/04 2.00	0.062	0.052	0.042	0.032	0.024	0.016	0.011	0.010	0.012	0.014	0.018	0.023	0.028	0.033	0.039	0.043	0.049	0.054	0.060	0.064	0.071
10/11/04 3.00	0.078	0.066	0.052	0.040	0.029	0.019	0.011	0.009	0.013	0.018	0.023	0.029	0.036	0.043	0.050	0.055	0.062	0.068	0.074	0.079	0.086
10/11/04 4.00	0.090	0.077	0.060	0.045	0.032	0.021	0.012	0.009	0.012	0.019	0.026	0.034	0.041	0.048	0.055	0.062	0.068	0.075	0.080	0.085	0.092
10/11/04 5.00	0.099	0.085	0.065	0.049	0.034	0.021	0.010	0.007	0.012	0.022	0.029	0.037	0.044	0.051	0.057	0.066	0.071	0.078	0.082	0.087	0.094
10/11/04 6.00	0.104	0.090	0.069	0.053	0.037	0.024	0.013	0.008	0.012	0.019	0.026	0.034	0.041	0.049	0.055	0.064	0.069	0.077	0.079	0.085	0.093
10/11/04 7.00	0.111	0.097	0.076	0.060	0.045	0.031	0.019	0.011	0.012	0.016	0.022	0.030	0.038	0.047	0.053	0.065	0.069	0.078	0.080	0.087	0.096
10/11/04 8.00	0.122	0.109	0.088	0.072	0.057	0.043	0.030	0.019	0.016	0.016	0.018	0.025	0.032	0.042	0.049	0.064	0.068	0.078	0.081	0.088	0.099
10/11/04 9.00	0.130	0.117	0.098	0.082	0.066	0.053	0.038	0.027	0.019	0.014	0.014	0.019	0.025	0.037	0.046	0.065	0.068	0.079	0.085	0.092	0.105
10/11/04 10.00	0.136	0.123	0.106	0.090	0.073	0.059	0.043	0.033	0.023	0.013	0.011	0.017	0.026	0.041	0.052	0.075	0.078	0.091	0.101	0.110	0.124
10/11/04 11.00	0.146	0.132	0.117	0.100	0.082	0.068	0.050	0.040	0.027	0.011	0.008	0.015	0.026	0.045	0.059	0.085	0.088	0.102	0.119	0.129	0.145
10/11/04 12.00	0.154	0.140	0.126	0.108	0.089	0.075	0.054	0.044	0.028	0.012	0.009	0.017	0.030	0.051	0.068	0.097	0.100	0.113	0.135	0.147	0.164
10/11/04 13.00	0.159	0.145	0.130	0.111	0.091	0.076	0.054	0.043	0.027	0.012	0.010	0.019	0.033	0.055	0.075	0.104	0.108	0.120	0.147	0.160	0.177
10/11/04 14.00	0.151	0.137	0.123	0.105	0.085	0.071	0.050	0.040	0.025	0.010	0.010	0.020	0.035	0.056	0.078	0.104	0.110	0.120	0.150	0.163	0.180
10/11/04 15.00	0.136	0.123	0.110	0.094	0.076	0.063	0.044	0.035	0.021	0.008	0.009	0.020	0.035	0.053	0.073	0.096	0.103	0.112	0.141	0.154	0.169
10/11/04 16.00	0.117	0.106	0.095	0.081	0.066	0.055	0.040	0.032	0.021	0.011	0.010	0.018	0.030	0.044	0.060	0.078	0.084	0.090	0.115	0.126	0.139
10/11/04 17.00	0.091	0.083	0.074	0.064	0.053	0.044	0.033	0.027	0.019	0.012	0.013	0.018	0.027	0.036	0.049	0.061	0.067	0.072	0.091	0.100	0.110
10/11/04 18.00	0.069	0.062	0.055	0.049	0.041	0.035	0.027	0.022	0.016	0.011	0.012	0.015	0.021	0.027	0.036	0.044	0.049	0.053	0.067	0.073	0.080
10/11/04 19.00	0.048	0.044	0.039	0.036	0.031	0.027	0.022	0.019	0.015	0.011	0.011	0.012	0.015	0.017	0.023	0.028	0.031	0.034	0.042	0.046	0.050
10/11/04 20.00	0.030	0.028	0.025	0.023	0.020	0.018	0.016	0.014	0.012	0.010	0.010	0.010	0.011	0.012	0.015	0.016	0.017	0.020	0.023	0.025	0.027
10/11/04 21.00	0.018	0.017	0.015	0.015	0.014	0.013	0.011	0.012	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.012	0.012	0.013	0.013	0.014	0.015
10/11/04 22.00	0.010	0.010	0.009	0.010	0.009	0.010	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.012	0.012	0.011	0.013	0.012	0.013	0.013	0.014
10/11/04 23.00	0.007	0.006	0.006	0.007	0.007	0.008	0.006	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.010
11/11/04 0.00	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.007	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
11/11/04 1.00	0.006	0.005	0.005	0.006	0.005	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
11/11/04 2.00	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.007	0.006	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
11/11/04 3.00	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
11/11/04 4.00	0.007	0.007	0.007	0.006	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
11/11/04 5.00	0.009	0.009	0.009	0.009	0.008	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
11/11/04 6.00	0.011	0.011	0.010	0.011	0.010	0.011	0.010	0.009	0.010	0.009	0.010	0.010	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.010	0.010
11/11/04 7.00	0.011	0.011	0.010	0.011	0.010	0.011	0.011	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011	0.012	0.011	0.012	0.012	0.013	0.013
11/11/04 8.00	0.012	0.012	0.011	0.012	0.011	0.011	0.011	0.011	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.012	0.012	0.012	0.013	0.013	0.014	0.015
11/11/04 9.00	0.014	0.013	0.012	0.014	0.011	0.012	0.010	0.010	0.009	0.009	0.010	0.011	0.011	0.012	0.014	0.013	0.014	0.015	0.018	0.018	0.018
11/11/04 10.00	0.014	0.013	0.012	0.014	0.009	0.010	0.009	0.010	0.007	0.007	0.008	0.009	0.010	0.010	0.015	0.013	0.014	0.016	0.021	0.020	0.021
11/11/04 11.00	0.015	0.013	0.013	0.015	0.008	0.008	0.006	0.008	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.008	0.016	0.012	0.014	0.017	0.025	0.023	0.024
11/11/04 12.00	0.016	0.013	0.015	0.015	0.006	0.006	0.005	0.008	0.004	0.004	0.006	0.006	0.008	0.009	0.019	0.014	0.017	0.020	0.030	0.027	0.030

Tabella 4.1

LE SALINE	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20
10/11/04 0.00	0.067	0.063	0.059	0.055	0.051	0.047	0.043	0.039	0.036	0.032	0.029	0.025	0.022	0.019	0.016	0.015	0.014	0.014	0.013	0.015	0.016
10/11/04 1.00	0.074	0.069	0.064	0.059	0.054	0.049	0.044	0.039	0.035	0.032	0.028	0.025	0.022	0.020	0.017	0.017	0.017	0.017	0.018	0.018	0.021
10/11/04 2.00	0.075	0.068	0.062	0.056	0.050	0.045	0.041	0.038	0.035	0.032	0.030	0.028	0.027	0.025	0.024	0.024	0.024	0.025	0.027	0.026	0.031
10/11/04 3.00	0.074	0.065	0.055	0.047	0.041	0.037	0.036	0.034	0.035	0.034	0.035	0.034	0.035	0.035	0.035	0.036	0.037	0.040	0.043	0.041	0.047
10/11/04 4.00	0.073	0.061	0.048	0.036	0.028	0.027	0.030	0.032	0.034	0.036	0.040	0.041	0.046	0.048	0.050	0.052	0.055	0.061	0.066	0.065	0.073
10/11/04 5.00	0.077	0.060	0.045	0.028	0.019	0.017	0.027	0.032	0.037	0.042	0.050	0.053	0.062	0.066	0.071	0.075	0.081	0.090	0.096	0.097	0.106
10/11/04 6.00	0.088	0.066	0.048	0.025	0.015	0.009	0.026	0.035	0.043	0.053	0.067	0.074	0.087	0.094	0.102	0.108	0.115	0.126	0.134	0.135	0.146
10/11/04 7.00	0.107	0.082	0.061	0.031	0.019	0.007	0.028	0.042	0.054	0.068	0.086	0.097	0.114	0.124	0.134	0.140	0.150	0.164	0.173	0.177	0.187
10/11/04 8.00	0.134	0.107	0.082	0.045	0.030	0.011	0.028	0.046	0.060	0.079	0.101	0.115	0.135	0.149	0.161	0.170	0.182	0.197	0.209	0.216	0.225
10/11/04 9.00	0.158	0.131	0.105	0.063	0.047	0.021	0.032	0.045	0.056	0.076	0.101	0.118	0.139	0.157	0.172	0.183	0.197	0.214	0.227	0.237	0.247
10/11/04 10.00	0.182	0.154	0.127	0.083	0.067	0.034	0.038	0.043	0.050	0.068	0.095	0.114	0.136	0.158	0.175	0.187	0.205	0.223	0.238	0.251	0.261
10/11/04 11.00	0.200	0.175	0.147	0.104	0.087	0.049	0.044	0.042	0.044	0.056	0.081	0.102	0.124	0.150	0.169	0.183	0.204	0.223	0.240	0.256	0.267
10/11/04 12.00	0.216	0.192	0.164	0.122	0.106	0.067	0.052	0.042	0.039	0.043	0.061	0.083	0.104	0.132	0.153	0.168	0.191	0.212	0.231	0.249	0.260
10/11/04 13.00	0.228	0.206	0.176	0.138	0.121	0.084	0.062	0.043	0.034</												

Con l'obiettivo di rendere i risultati leggibili graficamente si è assegnato ad ogni valore di errore relativo, che ricordiamo essere lo scarto tra livello osservato e livello simulato, un colore diverso in base all'entità di tale differenza:

- bianco: errore compreso tra 0 e 2 cm;
- verde: errore compreso tra 2 e 5 cm;
- giallo: errore compreso tra 5 e 10 cm;
- rosso: errore maggiore di 10 cm;

La lettura della tabella risulta quindi più agevole, essa restringe il campo dei più probabili valori del coefficiente tuttavia non fornisce ancora in maniera univoca una soluzione.

Si sono resi necessari due ulteriori passaggi: nel primo sono stati mediati gli errori di tutti gli eventi per ogni singola stazione, poi si sono ulteriormente mediati gli errori di tutte le stazioni ottenendo così in definitiva la seguente tabella:

TOTALE	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20
0:00	0.027	0.026	0.024	0.023	0.021	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.023	0.023	0.024	0.025	0.025	0.027	0.027	0.027
1:00	0.030	0.028	0.025	0.023	0.021	0.019	0.019	0.020	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.031	0.029	0.031	0.031
2:00	0.033	0.030	0.027	0.024	0.022	0.020	0.019	0.020	0.020	0.021	0.021	0.022	0.023	0.025	0.026	0.027	0.029	0.034	0.031	0.033	0.034
3:00	0.034	0.031	0.028	0.026	0.024	0.022	0.021	0.021	0.022	0.023	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.030	0.034	0.032	0.033	0.034
4:00	0.035	0.032	0.029	0.026	0.024	0.024	0.023	0.023	0.024	0.026	0.026	0.026	0.027	0.027	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035
5:00	0.040	0.036	0.032	0.028	0.027	0.025	0.025	0.025	0.026	0.028	0.028	0.028	0.029	0.029	0.031	0.032	0.033	0.033	0.035	0.036	0.037
6:00	0.048	0.043	0.038	0.032	0.030	0.028	0.027	0.027	0.027	0.030	0.029	0.030	0.031	0.032	0.034	0.035	0.037	0.038	0.040	0.041	0.043
7:00	0.057	0.051	0.045	0.037	0.034	0.030	0.030	0.029	0.028	0.030	0.029	0.031	0.033	0.034	0.037	0.038	0.041	0.043	0.046	0.047	0.049
8:00	0.065	0.058	0.052	0.043	0.039	0.034	0.033	0.031	0.029	0.031	0.029	0.030	0.032	0.034	0.037	0.039	0.042	0.043	0.047	0.050	0.052
9:00	0.069	0.062	0.056	0.048	0.043	0.037	0.036	0.034	0.031	0.032	0.030	0.031	0.032	0.033	0.035	0.037	0.039	0.042	0.044	0.047	0.049
10:00	0.071	0.064	0.058	0.051	0.044	0.039	0.036	0.033	0.031	0.030	0.030	0.031	0.032	0.034	0.036	0.037	0.042	0.042	0.045	0.048	0.048
11:00	0.071	0.063	0.057	0.050	0.043	0.037	0.033	0.030	0.028	0.027	0.028	0.029	0.030	0.032	0.035	0.036	0.039	0.043	0.046	0.048	0.052
12:00	0.066	0.058	0.051	0.044	0.038	0.032	0.029	0.026	0.024	0.025	0.025	0.027	0.031	0.034	0.038	0.041	0.044	0.047	0.053	0.055	0.058
13:00	0.065	0.056	0.050	0.043	0.037	0.032	0.029	0.026	0.025	0.027	0.027	0.030	0.034	0.039	0.043	0.046	0.050	0.054	0.058	0.062	0.065
14:00	0.068	0.058	0.051	0.045	0.039	0.034	0.031	0.028	0.027	0.030	0.030	0.034	0.038	0.043	0.048	0.051	0.055	0.060	0.064	0.069	0.073
15:00	0.069	0.057	0.051	0.044	0.037	0.033	0.030	0.028	0.027	0.031	0.032	0.036	0.040	0.047	0.052	0.056	0.061	0.065	0.070	0.076	0.082
16:00	0.069	0.057	0.050	0.042	0.036	0.032	0.030	0.028	0.029	0.033	0.034	0.039	0.044	0.051	0.056	0.060	0.064	0.070	0.075	0.081	0.087
17:00	0.068	0.056	0.049	0.041	0.034	0.031	0.030	0.029	0.030	0.036	0.037	0.042	0.047	0.053	0.059	0.062	0.067	0.073	0.078	0.084	0.090
18:00	0.067	0.055	0.049	0.039	0.032	0.029	0.030	0.030	0.033	0.038	0.040	0.045	0.049	0.055	0.061	0.064	0.069	0.074	0.079	0.085	0.091
19:00	0.067	0.056	0.049	0.039	0.032	0.029	0.031	0.032	0.035	0.040	0.043	0.048	0.052	0.059	0.063	0.067	0.071	0.076	0.081	0.087	0.092
20:00	0.067	0.056	0.049	0.039	0.030	0.027	0.029	0.031	0.035	0.040	0.044	0.049	0.053	0.060	0.064	0.068	0.072	0.077	0.082	0.088	0.092
21:00	0.066	0.055	0.048	0.037	0.029	0.024	0.026	0.028	0.032	0.036	0.041	0.046	0.050	0.057	0.062	0.066	0.069	0.075	0.080	0.086	0.091
22:00	0.064	0.054	0.046	0.037	0.028	0.023	0.024	0.025	0.028	0.032	0.036	0.041	0.046	0.052	0.057	0.061	0.065	0.071	0.075	0.083	0.087
23:00	0.063	0.053	0.045	0.037	0.028	0.023	0.022	0.023	0.024	0.027	0.031	0.036	0.041	0.047	0.051	0.056	0.059	0.066	0.070	0.078	0.081
0:00	0.063	0.054	0.045	0.037	0.030	0.025	0.023	0.022	0.022	0.024	0.028	0.031	0.036	0.042	0.046	0.051	0.053	0.060	0.064	0.072	0.075
1:00	0.063	0.054	0.046	0.039	0.033	0.028	0.024	0.023	0.021	0.022	0.025	0.028	0.032	0.036	0.040	0.044	0.046	0.053	0.056	0.064	0.066
2:00	0.060	0.052	0.045	0.040	0.035	0.030	0.026	0.024	0.021	0.021	0.023	0.024	0.028	0.031	0.034	0.038	0.039	0.045	0.048	0.054	0.057
3:00	0.055	0.048	0.041	0.038	0.033	0.030	0.027	0.024	0.022	0.021	0.022	0.023	0.025	0.027	0.029	0.032	0.034	0.038	0.041	0.046	0.048
4:00	0.050	0.044	0.038	0.035	0.032	0.030	0.027	0.025	0.023	0.024	0.023	0.024	0.026	0.027	0.029	0.032	0.033	0.036	0.039	0.043	0.045
5:00	0.047	0.042	0.037	0.035	0.033	0.032	0.030	0.029	0.027	0.028	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.034	0.036	0.038	0.040	0.044	0.046
6:00	0.043	0.039	0.035	0.034	0.033	0.033	0.031	0.031	0.030	0.031	0.031	0.032	0.032	0.033	0.034	0.036	0.038	0.039	0.041	0.044	0.046
7:00	0.038	0.035	0.032	0.031	0.030	0.030	0.030	0.031	0.030	0.032	0.032	0.033	0.034	0.034	0.035	0.038	0.039	0.040	0.042	0.044	0.046
8:00	0.035	0.032	0.028	0.028	0.027	0.027	0.027	0.029	0.028	0.030	0.031	0.032	0.033	0.033	0.034	0.037	0.038	0.040	0.041	0.043	0.046
9:00	0.035	0.032	0.028	0.027	0.026	0.027	0.026	0.028	0.027	0.029	0.030	0.030	0.032	0.032	0.033	0.036	0.037	0.039	0.040	0.041	0.044
10:00	0.035	0.033	0.029	0.028	0.027	0.027	0.026	0.028	0.027	0.028	0.029	0.029	0.030	0.031	0.031	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.041
11:00	0.037	0.036	0.033	0.029	0.029	0.027	0.028	0.027	0.028	0.028	0.030	0.029	0.030	0.030	0.032	0.032	0.033	0.034	0.036	0.037	0.041
12:00	0.041	0.039	0.036	0.032	0.032	0.029	0.029	0.028	0.029	0.028	0.029	0.029	0.029	0.029	0.030	0.030	0.030	0.031	0.032	0.033	0.035

Tabella 4.3

Il risultato è quindi una tabella degli errori che tenga conto delle diverse stazioni e dei diversi eventi e permetta di scegliere il coefficiente di drag che meglio approssima il reale effetto del vento sulla variazione dei livelli di marea. La soluzione sembra convergere su un valore compreso tra 0.07 e 0.08.

A questo punto si è utilizzato un'ulteriore tipo di rappresentazione grafica. Per spiegare in cosa consiste prendiamo ad esempio la Tabella 4.1, relativa a Chioggia per l'evento

#### 4. IL MODELLO:TARATURA E VERIFICA

10/11/2004, se estraiamo la riga relativa a una data ora, preferibilmente nella parte centrale dell'evento, in cui le differenze tra coefficienti diversi sono più marcate, e riportiamo i valori in un grafico in cui in ordinata è indicata l'entità dell'errore e in ascissa il coefficiente di drag relativo, si ottiene una curva concava che presenta un minimo in corrispondenza del valore di drag che minimizza lo scarto tra valore osservato e ottenuto da modello.

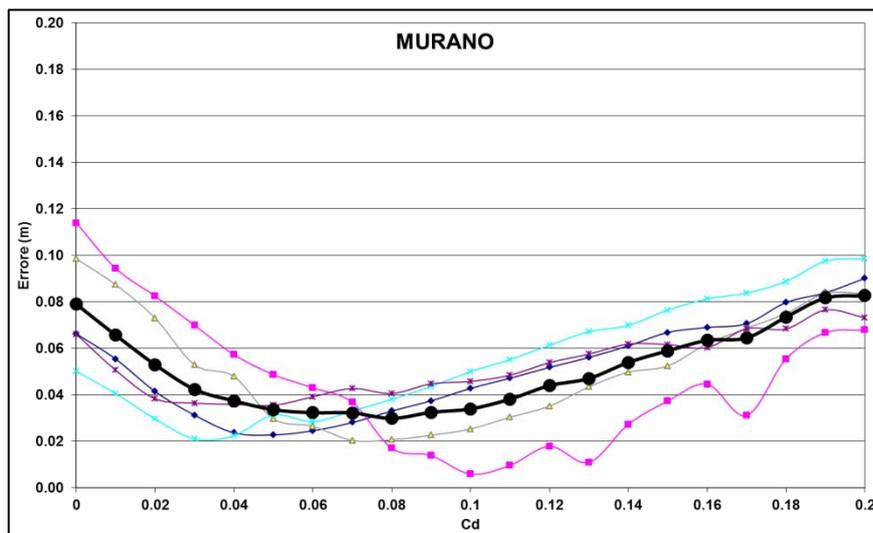
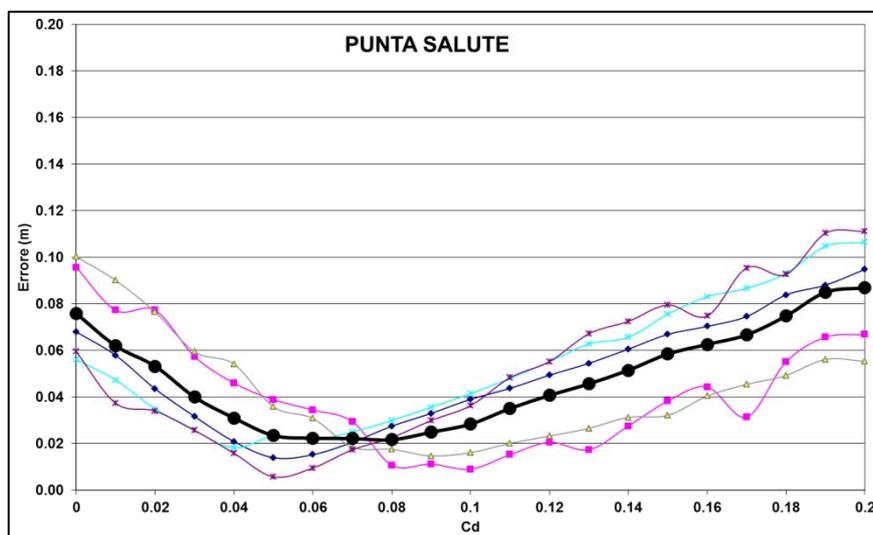
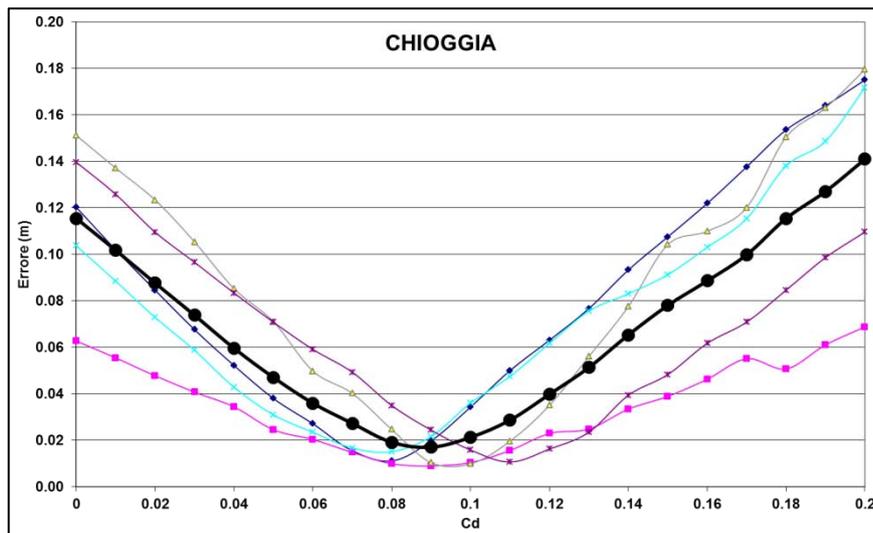
In ognuno dei grafici che seguono, relativi a ogni singola stazione, sono riportate le suddette curve di minimizzazione degli errori per i cinque eventi, più una sesta curva più spesso data dalla media delle altre cinque. Quest'ultima fornisce nel suo punto di minimo il coefficiente di drag mediato su tutti gli eventi per ogni stazione.

I punti di minimo oscillano tra 0.08 e 0.09.

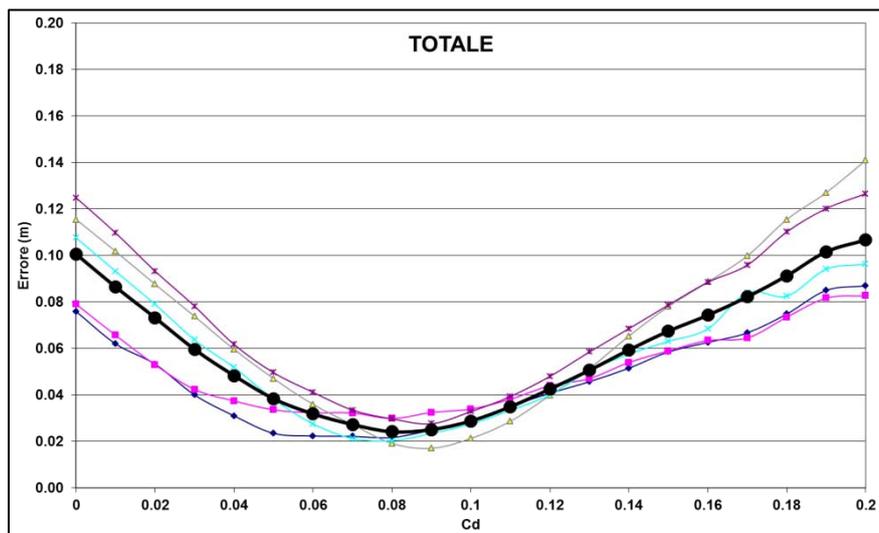
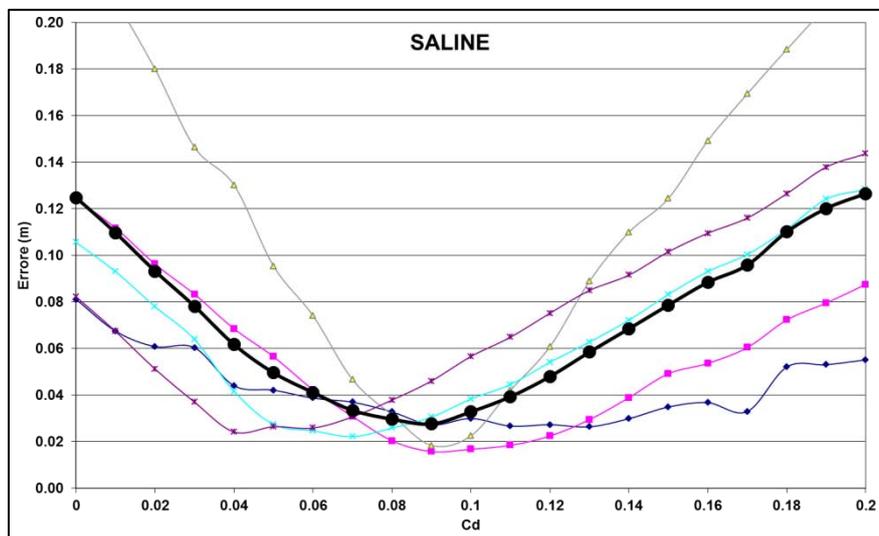
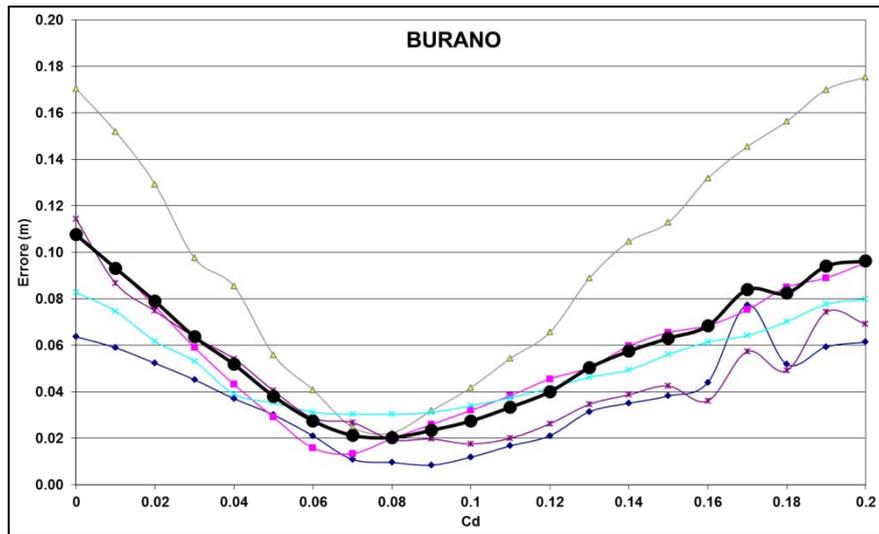
Un sesto grafico denominato "Totale" infine sintetizza tutti i precedenti.

In esso leggiamo un errore minimo in corrispondenza del valore 0.08 del coefficiente, quest'ultima analisi ci ha fatto propendere proprio per questa definitiva soluzione.

Abbiamo quindi ritenuto conclusa la taratura.



#### 4. IL MODELLO: TARATURA E VERIFICA



## 4.2 La validazione del modello

Il passaggio successivo è consistito nel processo di validazione del modello per quanto riguarda l'effetto del vento sugli sforzi tangenziali alla superficie marina e quindi sulla variazione dei livelli in posizioni diverse della laguna.

La validazione è stata effettuata su un totale di 11 eventi, scelti tra casi di marea medio-alta ed eccezionale in cui si fossero registrati venti intensi.

I casi ricoprono in maniera piuttosto omogenea un arco temporale che va dal 2000 al 2012, in particolare sono presenti 4 eventi di scirocco (125-165° N), 6 eventi di bora (30-60° N) e un evento di libeccio (205° N).

Gli eventi sono elencati in tabella.

Data evento	Tipo vento	Direzione vento (°N)	Intensità vento (m/s)
6 novembre 2000	Scirocco	150	18
16 novembre 2002	Scirocco	125	12
24 settembre 2004	Bora	50	24
3 dicembre 2005	Scirocco	165	12
19 marzo 2007	Libeccio	205	13
14 settembre 2008	Bora	35	16
28 novembre 2008	Bora	30	18
26 dicembre 2008	Bora	60	18
9 marzo 2010	Bora	45	23
1 novembre 2012	Bora	20	16
11 novembre 2012	Scirocco	120	15

I livelli calcolati sono stati comparati con quelli osservati in 15 diverse stazioni (5 del Centro Maree e 10 ISPRA) ben distribuite dentro la laguna.

I grafici che sono stati costruiti riportano i livelli osservati, quelli calcolati in presenza di vento (ponendo quindi il coefficiente di drag pari a 0.08) e quelli calcolati in assenza di

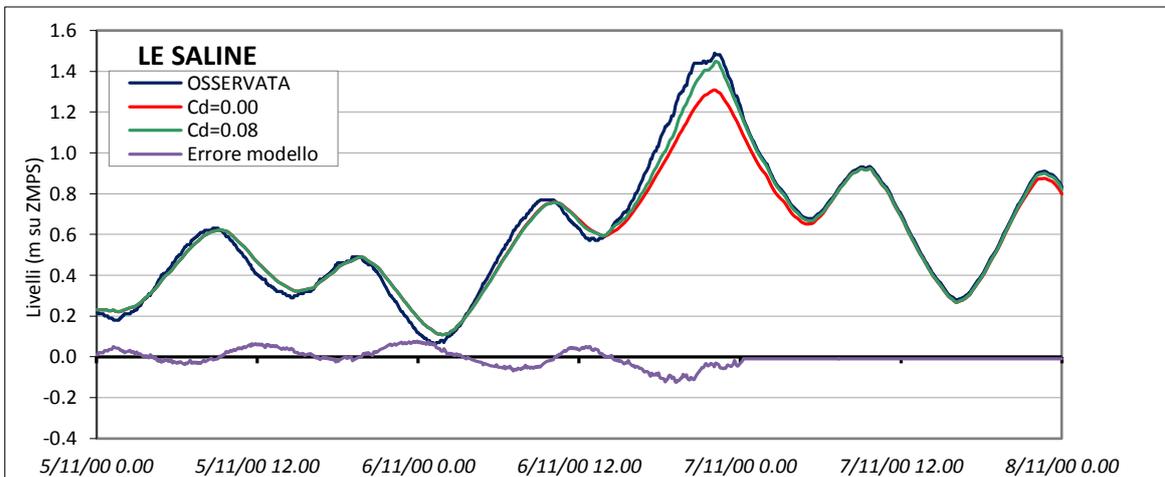
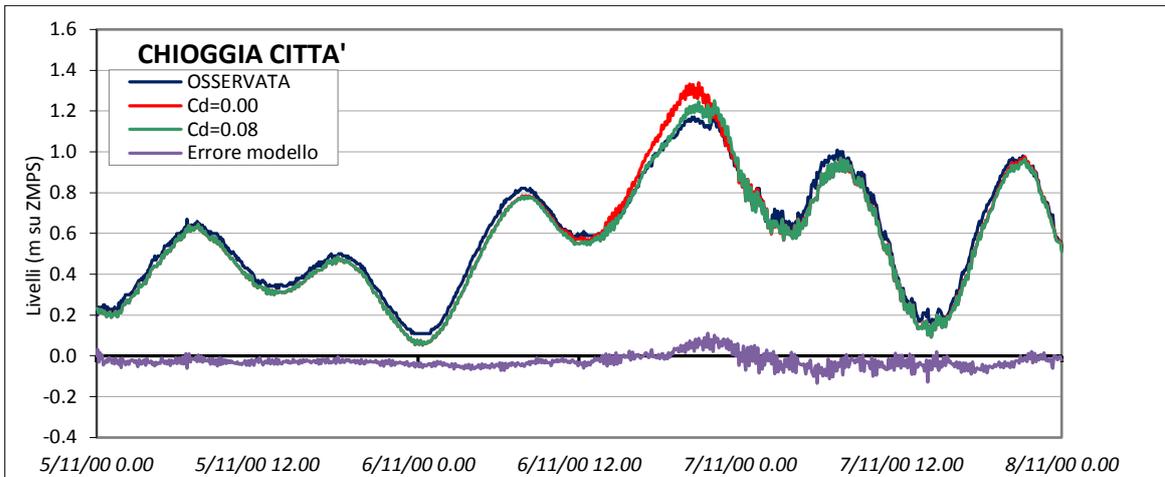
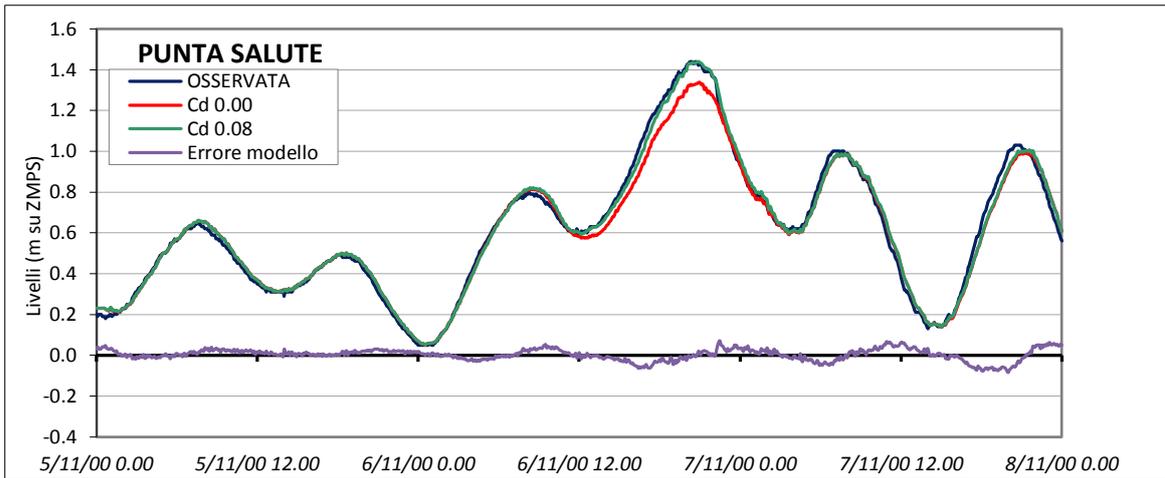
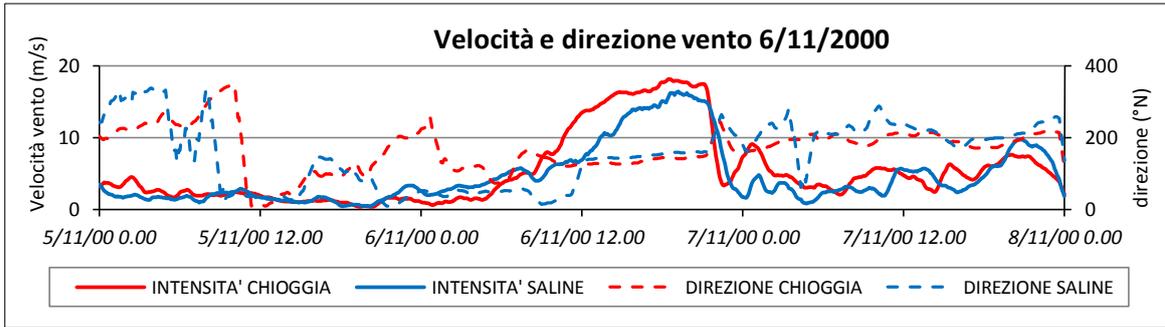
vento (ponendo  $C_d = 0$ ). Infine si riporta l'errore del modello ossia la differenza tra valore osservato e simulato in presenza di vento.

Per non appesantire la trattazione riporterò ora i grafici relativi ai soli due eventi del 6 novembre 2000 (scirocco) e del 26 dicembre 2008 (bora) relativi a diverse stazioni ISPCM e ISPRA. La mancanza di alcune stazioni per il primo o il secondo evento dipende dalla carenza dei dati osservati per quel periodo.

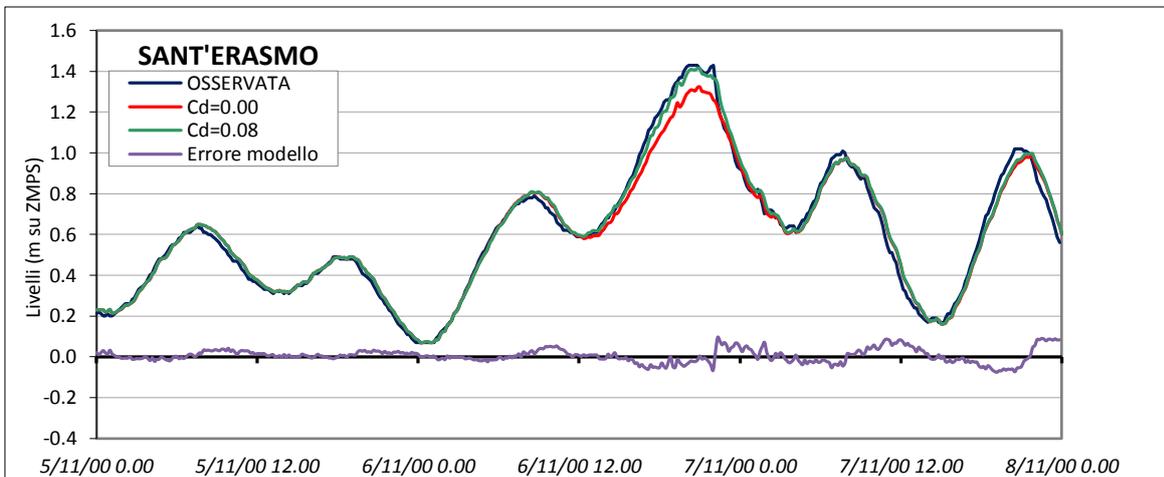
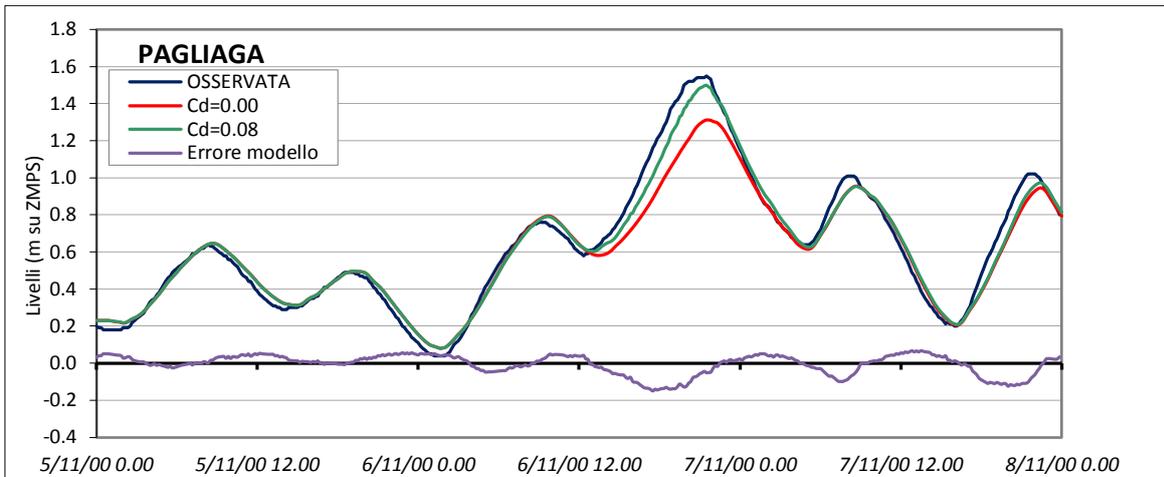
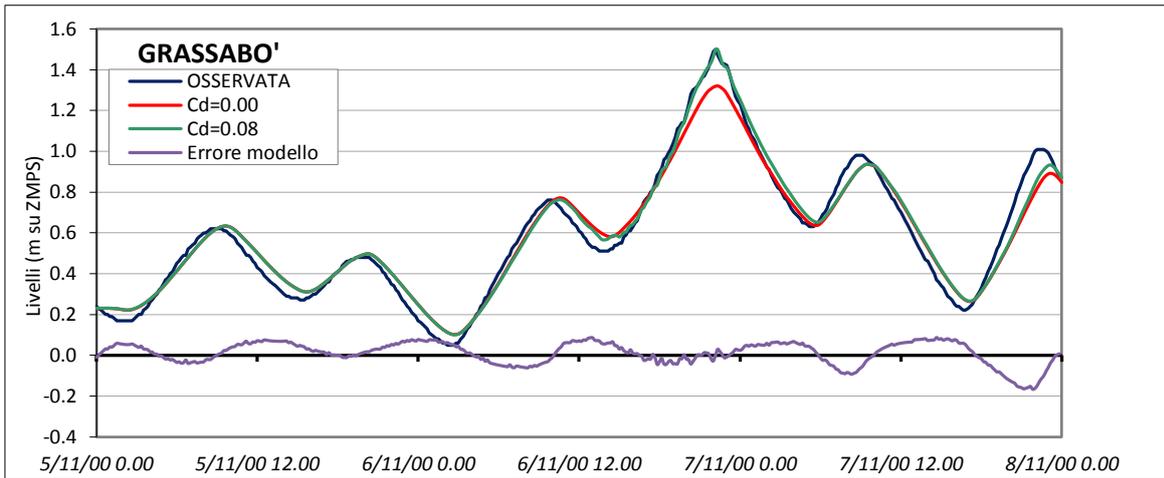
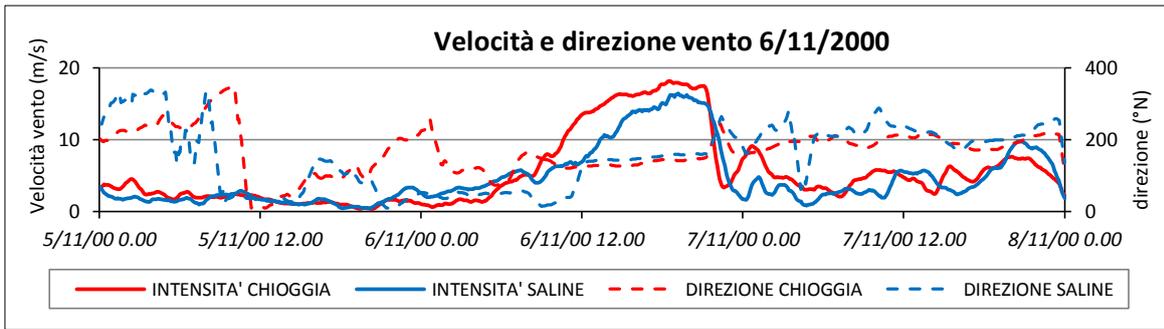
All'inizio di ogni pagina si riporta l'andamento delle velocità e delle direzioni del vento alle due stazioni di Chioggia e Le Saline.

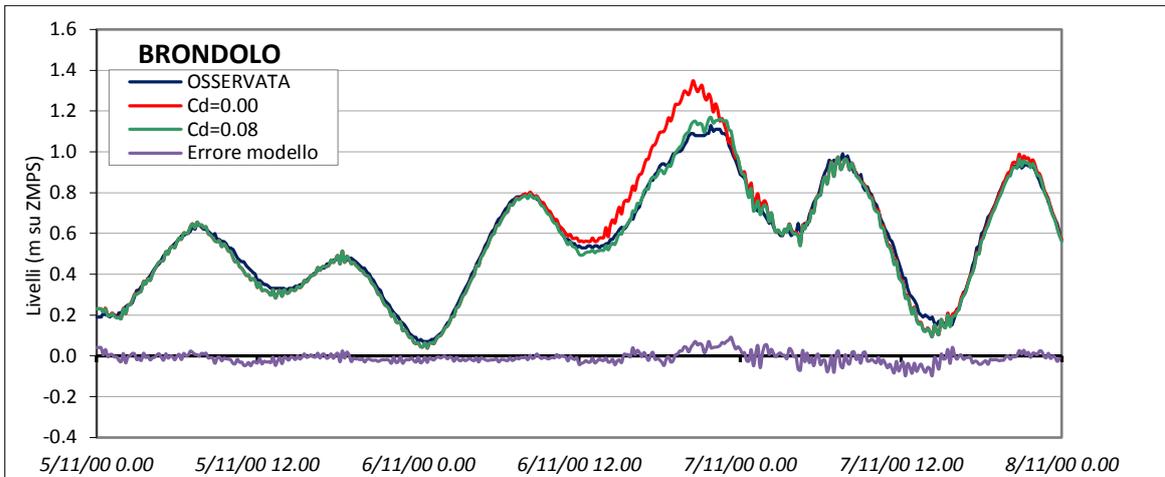
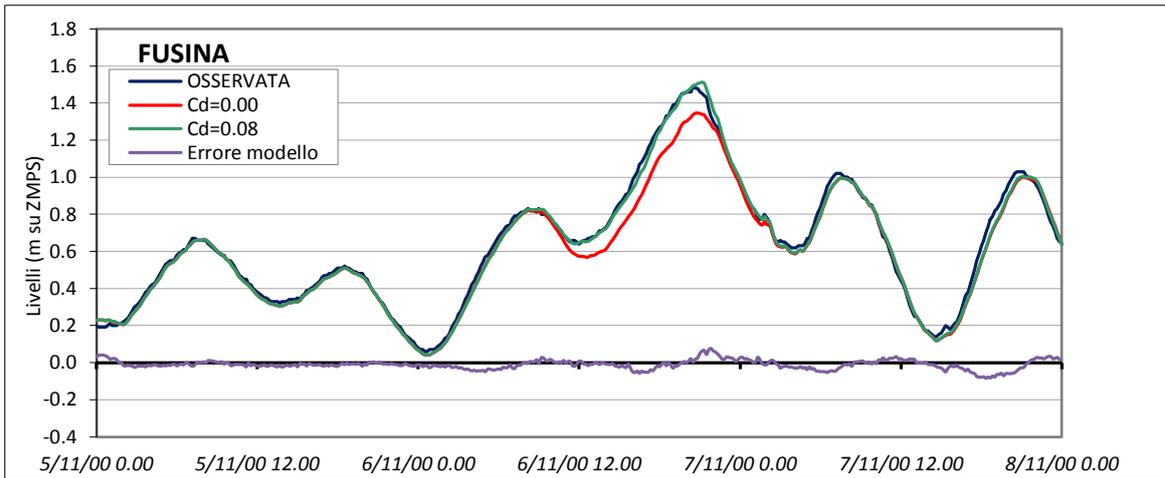
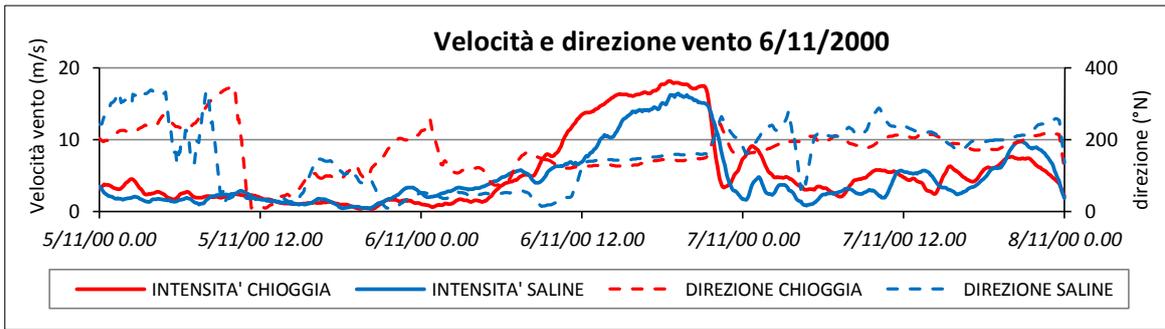
È piuttosto evidente l'effetto del vento nella variazione dei livelli se consideriamo o meno l'effetto dello sforzo di attrito sulla superficie dell'acqua (linee verdi e rosse, rispettivamente).

Prendendo ad esempio il primo evento, di scirocco, emerge abbastanza chiaramente che quando non si tiene conto degli effetti dello sforzo d'attrito del vento si ottiene una scarsa corrispondenza tra livelli calcolati e misurati e il modello genera livelli più alti nelle stazioni a sud, come ad esempio Chioggia, e livelli più alti a nord, ad esempio Punta Salute. In fatti quando il vento di scirocco soffia sulla laguna, l'effetto è una riduzione nei livelli di marea sottovento (Chioggia) e un incremento nei livelli di marea sopravento (Punta Salute). La capacità del modello di riprodurre gli effetti dei sopralzi indotti dal vento e l'entità di tale fenomeno sono quindi ben confermati dalla semplice osservazione dei grafici.

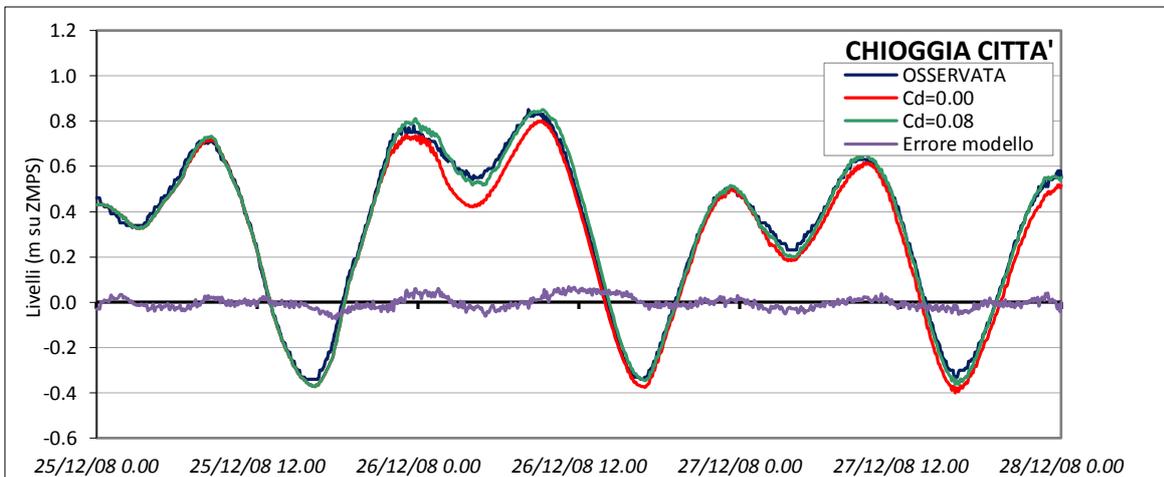
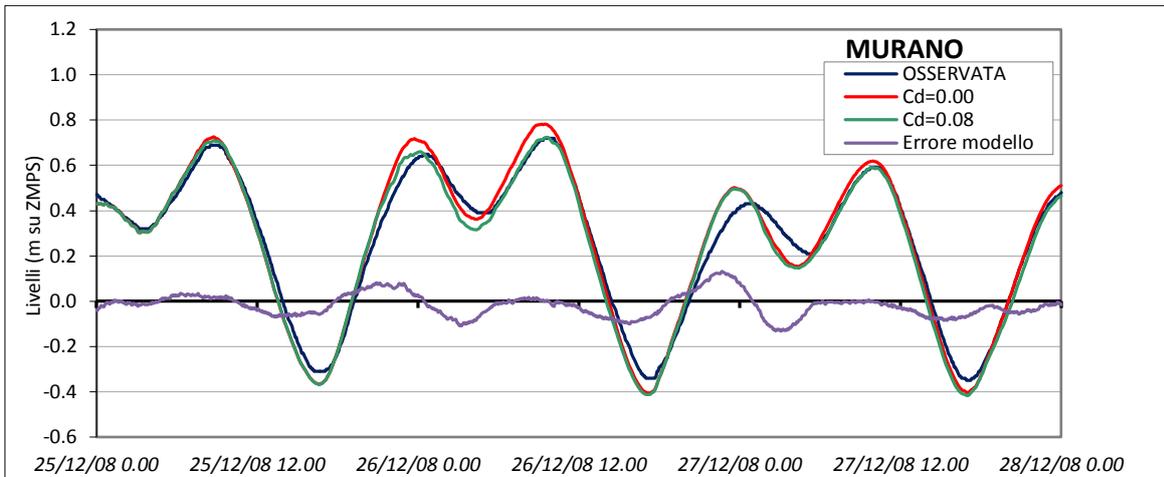
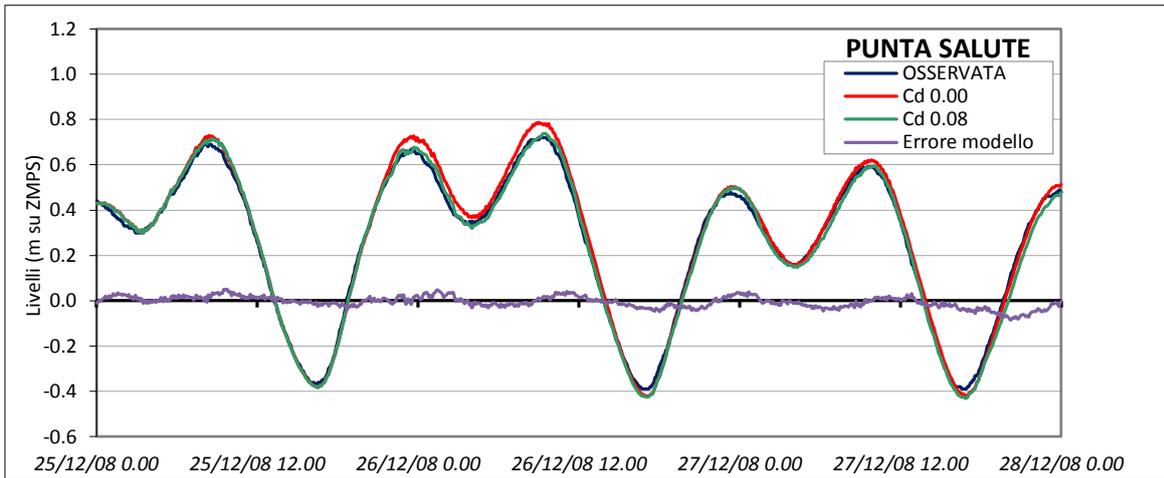
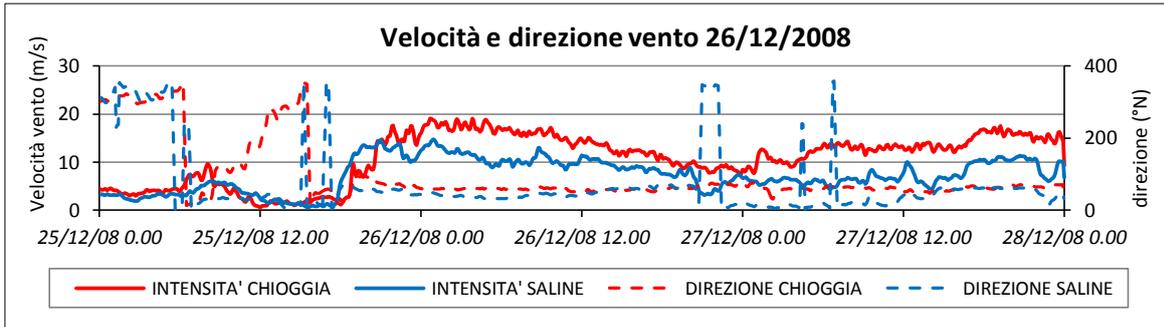


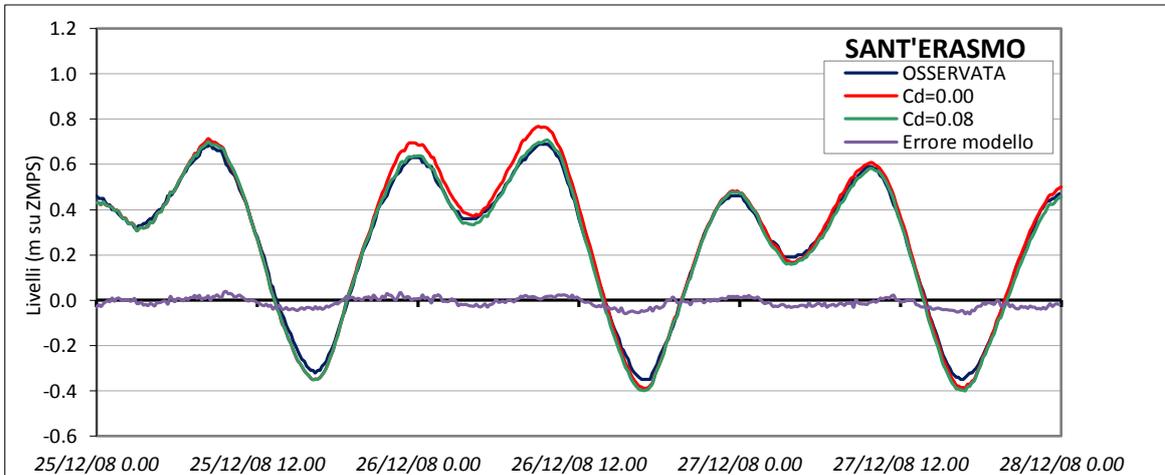
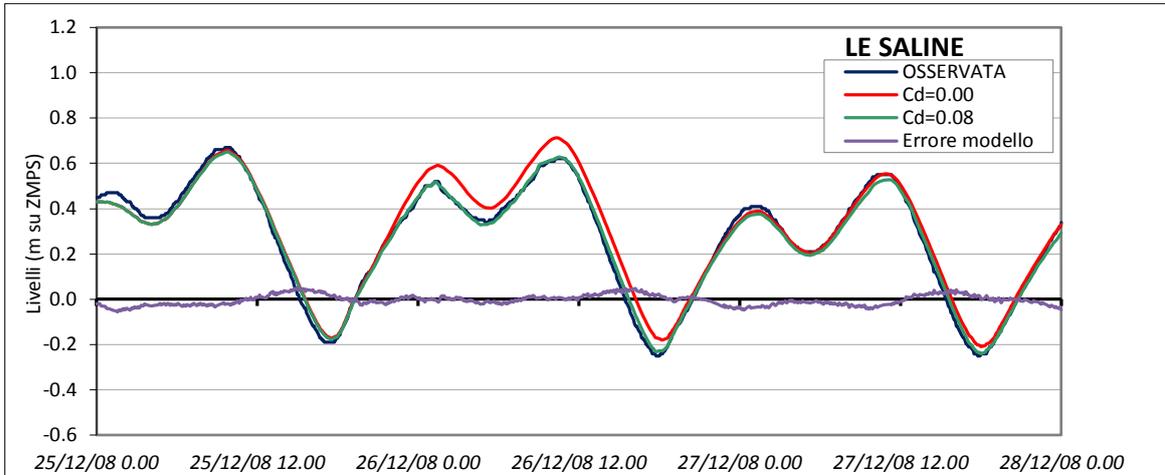
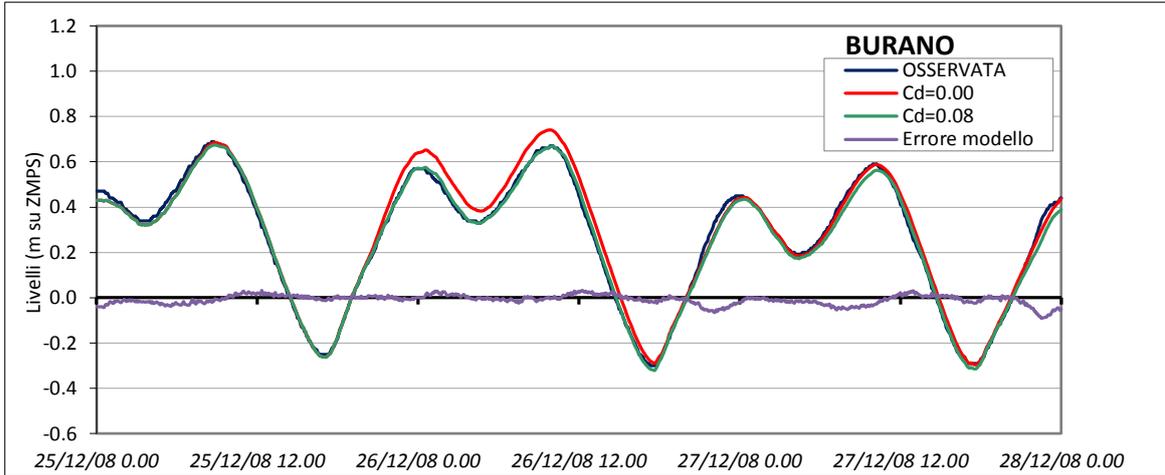
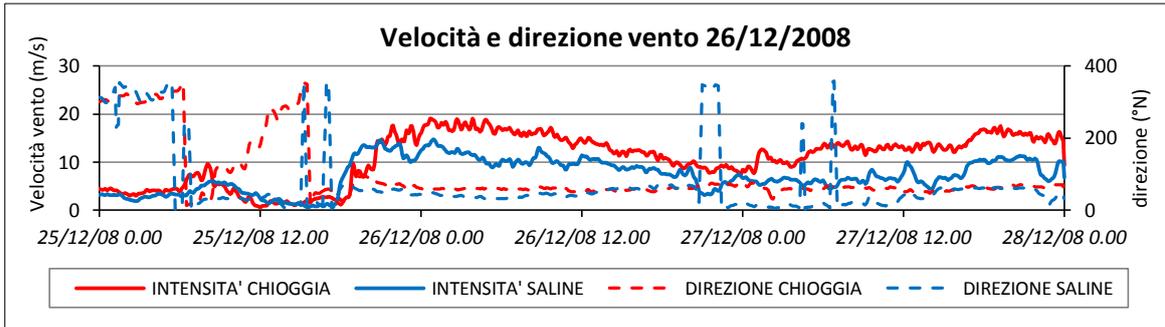
4. IL MODELLO: TARATURA E VERIFICA



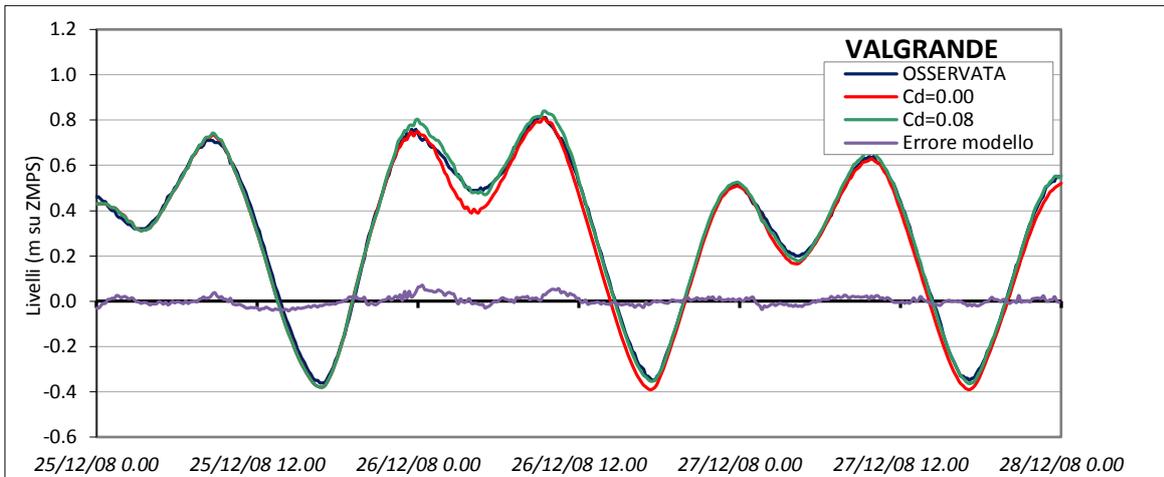
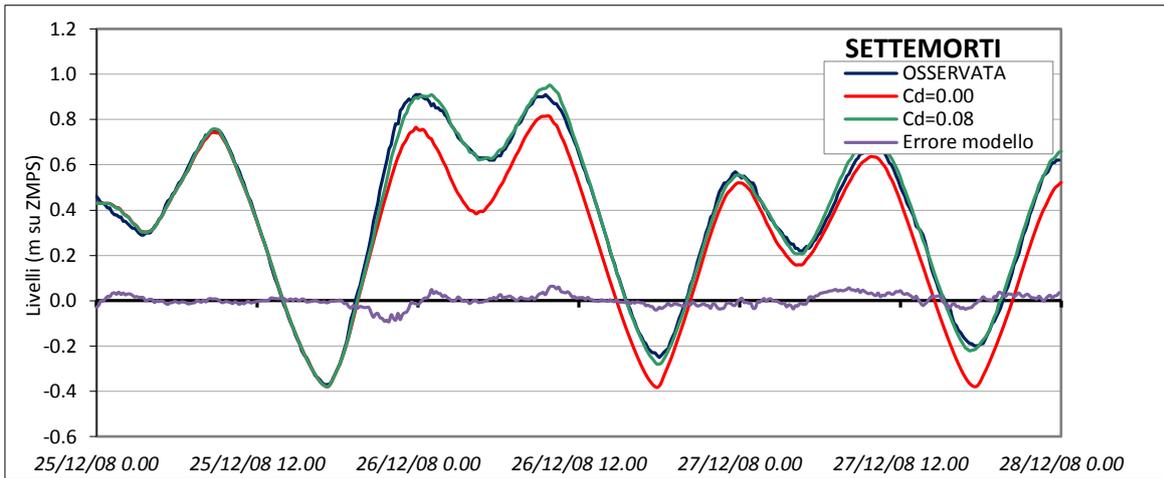
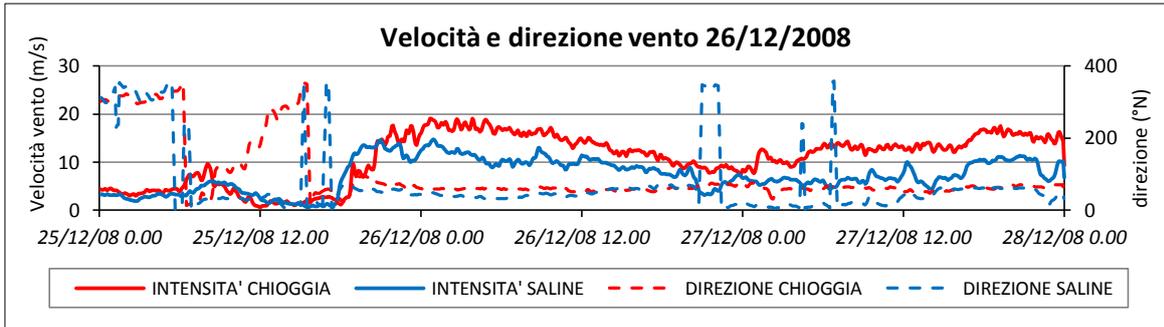


4. IL MODELLO: TARATURA E VERIFICA





4. IL MODELLO: TARATURA E VERIFICA



Tuttavia il confronto visivo dei grafici non è sufficiente a dare una seria valutazione sul comportamento del modello nel simulare gli eventi considerati. Si è deciso, perciò, di stimare l'efficienza del modello, o meglio del coefficiente di drag assegnato ad esso, tramite tre parametri statistici: il Nash-Sutcliffe Model Efficiency (ME), il Percentage Model Bias (PB), e lo Scatter Index (SI).

L'indice di efficienza del modello di Nash-Sutcliffe (ME) è una misura del rapporto tra l'errore del modello e la variabilità dei dati osservati ed è dato dalla differenza tra la prestazione di un modello "perfetto" (l'unità) e la prestazione del modello preso in considerazione, relativamente ai cambiamenti osservati.

$$ME = 1 - \frac{(d - m)^2}{(d - D)^2}$$

dove con  $d$  si indicano il dato osservato,  $m$  è il corrispondente valore stimato dal modello e  $D$  è la media dei dati osservati.

Il coefficiente di efficienza del modello è stato utilizzato per due verifiche: la prima riguarda l'efficienza del modello nel simulare la propagazione dell'onda, in questo caso l'indice è stato denominato ME-P e la seconda riguarda l'efficienza nel simulare il solo contributo del vento, l'indice in questo caso è stato denominato ME-V.

Mentre in ME-P il termine  $D$  indica il livello medio dell'ampiezza dell'onda di marea, in ME-V,  $d$  indica il solo contributo del vento (quindi la differenza tra valore osservato e simulato senza vento) mentre  $D$  è la tendenza media del contributo da vento ottenuta tramite una media mobile su 6 ore della serie dei contributi da vento.

Quindi, in definitiva, mentre in ME-P il termine  $(d - D)^2$  rappresenta la variabilità del livello di marea sul livello medio del mare, in ME-V tale termine rappresenta la variabilità del solo contributo del vento al livello di marea.

I valori dell'indice ME che si sono ottenuti per ogni evento e per ogni stazione analizzata sono stati riassunti in una tabella assegnando ad ogni cella un colore in relazione alla bontà del valore dell'indice ottenuto. Ad ogni colore corrisponde una categoria di prestazione del modello secondo la seguente classificazione:

<b>ME-P e ME-V</b>	<b>Prestazione del modello</b>	<b>Colore cella</b>
> 0.65	Eccellente	Blu
0.65 ÷ 0.5	Molto buona	Verde
0.5 ÷ 0.2	Buona	Giallo
< 0.2	Scarsa	Rosso

Il secondo indice esaminato è il Percentage Model Bias (PB) e valuta l'errore del modello normalizzato dal corrispondente dato osservato:

$$PB = \frac{|d - m|}{d} \cdot 100$$

Questo indice è stato calcolato per valutare l'errore del modello solo per quanto riguarda la riproduzione degli effetti del vento sui livelli e quindi è stato indicato con PB-V. Per questo la sua formulazione cambia leggermente, rispetto a quella classica proposta sopra, infatti, al numeratore, si ha il valore assoluto dell'errore, mentre, al denominatore, non c'è il valore di livello osservato ma solo una sua porzione, cioè il contributo dovuto al vento.

In questo caso le categorie di giudizio sono le seguenti:

<b>PE-V</b>	<b>Prestazione del modello</b>	<b>Colore cella</b>
< 10	Eccellente	Blu
10 ÷ 20	Molto buona	Verde
20 ÷ 40	Buona	Giallo
> 40	Scarsa	Rosso

Infine si è utilizzato lo Scatter Index (SI), definito come la radice dell'errore quadratico medio normalizzata con la media dei dati osservati (D):

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}(d - m)^2}}{D}$$

dove n è il numero di dati. Anche questo parametro è stato calcolato solo per il contributo di sopralzo sul livello di marea dato dal vento.

<b>SI-V</b>	<b>Prestazione del modello</b>	<b>Colore cella</b>
$\leq 0.3$	Eccellente	Blu
$0.3 \div 0.5$	Molto buona	Verde
$0.5 \div 1$	Buona	Giallo
$> 1$	Scarsa	Rosso

Occorre ricordare infine che nel computo dell'errore si è tenuto conto di un errore sistematico in termini assoluti di 1 cm, sottratti quindi all'errore assoluto. Tale valore rappresenta la sensibilità degli strumenti di misura.

Si riportano di seguito le tabelle relative agli indici ME-P, ME-V, PE-V, SI-I utilizzati per testare l'efficienza del modello nel riprodurre la propagazione dell'onda di marea (ME-P) e il solo effetto del vento sui dislivelli per tutti gli eventi e per ogni stazione considerata.

Ogni tabella contiene nella prima colonna la data dell'evento preso in considerazione, nella seconda, l'ora centrale dell'evento in cui è stato massimo l'effetto di sopralzo del vento, in cui quindi è interessante osservare la risposta del modello, nella terza e quarta colonna rispettivamente la direzione e la velocità del vento. Dopo le tabelle è presente anche un'immagine in cui sono indicate le posizioni delle stazioni considerate per la validazione la cui conoscenza permette di spiegare alcuni dei risultati ottenuti.

4. IL MODELLO: TARATURA E VERIFICA

Indice ME-P : efficienza del modello nel simulare la propagazione dell'onda di marea																			
Data evento	h	DV [°N]	VV [m/s]	PUNTA SALUTE	MURANO	CHIOGGIA CITTA'	BURANO	LE SALINE	GRAS SABO'	PAGLIAGA	SANT'ERASMO	FUSINA	BRON DOLO	SETTE MORTI	VAL GRANDE	EX POVEGLIA	CASON FIGHERI	VALLE AVERTO	
6-nov-2000	19	150	18	0.999	#N/D	0.997	#N/D	0.995	1.000	0.992	1.000	1.000	1.000	0.997	1.000	1.000	0.986	0.998	
16-nov-2002	14	125	12	0.999	#N/D	0.990	#N/D	0.996	0.997	1.000	0.998	0.999	0.986	0.994	0.995	0.999	0.998	0.998	
24-set-2004	18	50	24	0.996	0.994	0.992	#N/D	0.999	0.989	0.998	1.000	0.999	0.993	#N/D	0.999	1.000	0.997	0.995	
3-dic-2005	12	165	12	1.000	0.999	0.999	0.997	0.997	0.996	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
19-mar-2007	10	205	13	0.994	0.969	0.997	0.989	0.987	0.990	#N/D	0.992	0.998	0.989	0.998	0.995	0.999	0.961	0.993	
14-set-2008	14	35	16	0.996	0.988	0.992	0.995	0.994	0.983	0.999	0.995	0.997	#N/D	0.999	0.997	0.999	0.990	0.991	
28-nov-2008	16	30	18	0.999	0.998	0.999	0.999	0.998	0.996	0.999	0.997	0.999	0.995	0.999	0.999	0.999	1.000	0.998	
26-dic-2008	5	60	18	0.997	0.997	0.997	0.999	0.992	0.985	0.996	0.997	0.993	0.996	0.999	0.998	0.999	0.995	0.995	
9-mar-2010	7	45	23	0.990	#N/D	0.999	0.994	0.997	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	
1-nov-2012	1	20	16	0.999	#N/D	0.995	0.999	0.991	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	
11-nov-2012	12	120	15	0.999	#N/D	0.997	0.999	0.999	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	

Indice ME-V : efficienza del modello nel simulare l'effetto del vento sull'onda di marea																			
Data evento	h	DV [°N]	VV [m/s]	PUNTA SALUTE	MURANO	CHIOGGIA CITTA'	BURANO	LE SALINE	GRAS SABO'	PAGLIAGA	SANT'ERASMO	FUSINA	BRON DOLO	SETTE MORTI	VAL GRANDE	EX POVEGLIA	CASON FIGHERI	VALLE AVERTO	
6-nov-2000	19	150	18	0.674	#N/D	0.651	#N/D	#N/D	0.948	#N/D	0.769	0.506	0.777	N/S	N/S	0.645	#N/D	#N/D	
16-nov-2002	14	125	12	0.930	#N/D	N/S	#N/D	N/S	0.796	0.897	N/S	0.849	N/S	N/S	N/S	N/S	0.868	0.901	
24-set-2004	18	50	24	N/S	N/S	N/S	#N/D	0.890	0.815	0.479	0.721	0.702	#N/D	N/S	N/S	N/S	0.676	0.253	
3-dic-2005	12	165	12	0.891	0.906	0.809	0.508	0.532	#N/D	0.906	0.677	0.737	0.924	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	
19-mar-2007	10	205	13	N/S	N/S	0.882	0.380	0.748	0.640	#N/D	0.856	N/S	0.881	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	
14-set-2008	14	35	16	0.645	0.588	0.877	0.890	0.707	0.688	0.896	0.807	N/S	#N/D	0.889	0.886	N/S	0.771	0.815	
28-nov-2008	16	30	18	0.819	0.817	0.668	0.492	0.465	0.232	0.680	0.594	N/S	0.530	0.899	0.790	N/S	0.363	0.252	
26-dic-2008	5	60	18	0.689	0.900	0.603	0.957	0.672	0.752	0.782	0.896	N/S	0.775	0.895	0.849	N/S	0.789	0.767	
9-mar-2010	7	45	23	0.249	#N/D	0.750	0.794	0.877	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	
1-nov-2012	1	20	16	0.653	#N/D	0.448	0.979	0.993	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	
11-nov-2012	12	120	15	0.774	#N/D	0.238	0.733	0.286	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	

**Indice PB-V : efficienza del modello nel simulare l'effetto del vento sull'onda di marea**

Data evento	h	DV [°N]	VV [m/s]	PUNTA SALUTE	MURANO	CHIOGGIA CITTA'	BURANO	LE SALINE	GRAS SABO'	PAGLIAGA	SANT' ERASMO	FUSINA	BRON DOLO	SETTE MORTI	VAL GRANDE	EX POVEGLIA	CASON FIGHERI	VALLE AVERTO
6-nov-2000	19	150	18	6.2	#N/D	11.8	#N/D	#N/D	3.8	#N/D	8.7	7.7	5.6	N/S	N/S	8.3	#N/D	#N/D
16-nov-2002	14	125	12	5.2	#N/D	N/S	#N/D	N/S	21.4	2.7	N/S	2.1	N/S	N/S	N/S	N/S	8.9	5.7
24-set-2004	18	50	24	N/S	N/S	N/S	#N/D	4.3	5.5	16.1	6.6	13.3	#N/D	N/S	N/S	N/S	12.7	16.1
3-dic-2005	12	165	12	2.9	3.1	8.9	19.3	20.7	#N/D	5.9	13.8	12.2	2.3	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
19-mar-2007	10	205	13	N/S	N/S	16.4	28.3	19.9	19.8	#N/D	9.5	N/S	2.8	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
14-set-2008	14	35	16	18.1	19.6	5.0	2.0	5.6	5.0	4.2	9.8	N/S	#N/D	4.7	3.0	N/S	9.3	10.4
28-nov-2008	16	30	18	9.7	8.8	14.7	7.8	14.2	26.4	11.8	9.9	N/S	28.7	4.1	0.8	N/S	14.2	11.9
26-dic-2008	5	60	18	10.0	5.6	8.4	1.7	14.9	7.7	2.8	8.3	N/S	6.0	3.4	3.6	N/S	10.9	8.6
9-mar-2010	7	45	23	10.5	#N/D	2.9	3.5	1.9	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1-nov-2012	1	20	16	9.7	#N/D	19.8	1.5	0.3	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
11-nov-2012	12	120	15	7.1	#N/D	24.6	14.4	29.4	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D

**Indice SI-V : efficienza del modello nel simulare l'effetto del vento sull'onda di marea**

Data evento	h	DV [°N]	VV [m/s]	PUNTA SALUTE	MURANO	CHIOGGIA CITTA'	BURANO	LE SALINE	GRAS SABO'	PAGLIAGA	SANT' ERASMO	FUSINA	BRON DOLO	SETTE MORTI	VAL GRANDE	EX POVEGLIA	CASON FIGHERI	VALLE AVERTO
6-nov-2000	19	150	18	0.116	#N/D	0.227	#N/D	#N/D	0.199	#N/D	0.240	0.119	0.252	N/S	N/S	0.164	#N/D	#N/D
16-nov-2002	14	125	12	0.118	#N/D	N/S	#N/D	N/S	0.370	0.319	N/S	0.071	N/S	N/S	N/S	N/S	0.142	0.131
24-set-2004	18	50	24	N/S	N/S	N/S	#N/D	0.017	0.100	0.278	0.166	0.424	#N/D	N/S	N/S	N/S	0.260	0.394
3-dic-2005	12	165	12	0.050	0.100	0.213	0.270	0.283	#N/D	0.442	0.508	0.254	0.117	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
19-mar-2007	10	205	13	N/S	N/S	0.316	0.488	0.299	0.292	#N/D	0.274	N/S	0.198	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
14-set-2008	14	35	16	0.273	0.297	0.123	0.064	0.105	0.307	0.108	0.267	N/S	#N/D	0.055	0.058	N/S	0.410	0.253
28-nov-2008	16	30	18	0.201	0.215	0.215	0.130	0.199	0.416	0.225	0.133	N/S	0.436	0.008	0.166	N/S	0.272	0.269
26-dic-2008	5	60	18	0.172	0.118	0.135	0.043	0.213	0.118	0.053	0.146	N/S	0.209	0.085	0.446	N/S	0.137	0.274
9-mar-2010	7	45	23	0.158	#N/D	0.065	0.060	0.024	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1-nov-2012	1	20	16	0.158	#N/D	0.275	0.030	0.011	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
11-nov-2012	12	120	15	0.102	#N/D	0.378	0.237	0.467	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D



Figura 4.4 Stazioni utilizzate per la validazione

Occorre fare alcune considerazioni sui risultati ottenuti.

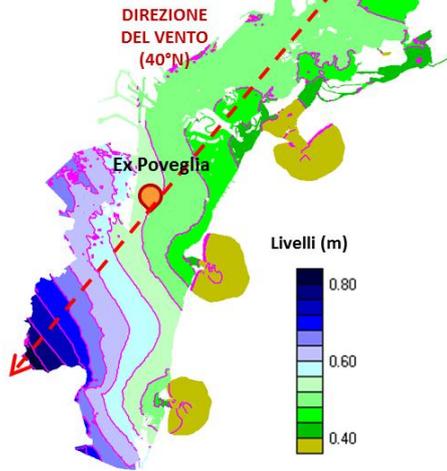
Per quanto riguarda la propagazione, l'indice ME-P conferma che c'è un'eccellente corrispondenza tra livelli calcolati e osservati per tutte le stazioni.

Anche per quanto riguarda l'effetto del vento sui sopralzi, gli indici assegnano al modello una buona valutazione. Occorre però fare alcune precisazioni e commenti sulla lettura delle tabelle.

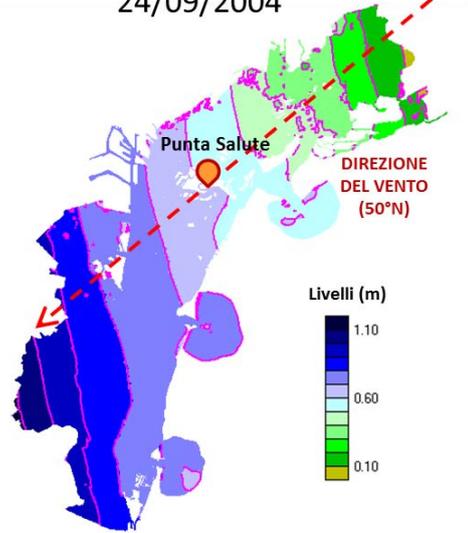
Le celle con sfondo bianco e simbolo #N/D indicano la mancanza dei dati osservati per quella stazione e per quel dato evento, su di essi quindi non è possibile fare alcun confronto.

Le celle con sfondo grigio e simbolo N/S indicano che il contributo dato dal vento al livello di marea (valori osservati meno i valori simulati senza vento) non è significativo, ovvero è inferiore ad un limite che noi abbiamo posto pari a 4 cm. La causa principale è data dalla posizione della stazione: si ottengono sopralzi non significativi qualora la stazione si trovi in posizione baricentrica rispetto alla linea orientata secondo la direzione del vento che congiunge due lembi di terra opposti della laguna come è possibile vedere dalle figure sotto.

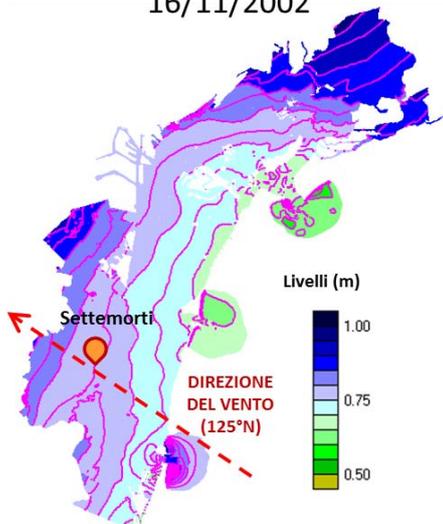
28/11/2008



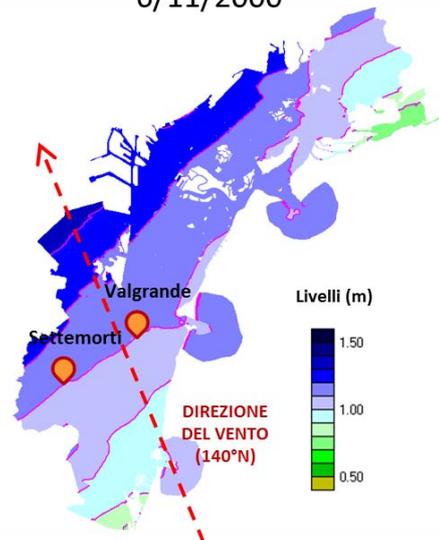
24/09/2004



16/11/2002



6/11/2000



## 5 LE NUOVE OPERE DI CHIUSURA DELLE BOCCHE

La seconda parte del lavoro di tesi è consistita nell'applicazione del modello idrodinamico tarato, ad un caso particolare. Si è voluto indagare l'influenza della temporanea chiusura delle bocche di porto (prevista dal progetto per salvaguardare Venezia dalle "acque alte" eccezionali) sui sopralzi differenziati all'interno della laguna causati da vento intenso.

Il presente capitolo si occuperà quindi di presentare brevemente le caratteristiche principali del progetto di chiusura delle bocche, per quanto riguarda gli aspetti che più interessano alla nostra trattazione. Mentre il prossimo capitolo conterrà la descrizione dell'applicazione del modello bidimensionale e l'analisi e commento dei risultati ottenuti.

### 5.1 Introduzione

La laguna veneta è stata soggetta sin dal XVI secolo all'azione dell'uomo, che, con interventi<sup>8</sup> sempre più poderosi e impattanti, ha tentato di sfruttarla, adattandola alle proprie necessità e influenzando pesantemente sulla sua evoluzione naturale.

L'ultimo intervento in ordine temporale è la grande opera progettata per difendere la città di Venezia dalle "acque alte". Il sistema integrato di opere progettato viene comunemente denominato MOSE, acronimo di Modulo Sperimentale Elettromeccanico, prende il nome dal sistema di paratoie mobili a scomparsa poste alle bocche di porto, anche se propriamente esso consiste in una serie più ampia di interventi a partire dalle opere fisse alle bocche destinate ad accogliere gli elementi manovrabili, i moli esterni, i rinforzi dei litorali, il rialzo di rive e pavimentazioni.

L'approvazione del progetto, che ora è in corso di attuazione, è stato oggetto di molti contrasti e numerose polemiche, si vuole tuttavia tralasciare questi aspetti, per i quali si rimanda alla corposa documentazione e bibliografia a riguardo, per presentare brevemente la cronologia del progetto, gli intenti che lo hanno ispirato e le caratteristiche principali delle opere di chiusura delle bocche di porto.

---

<sup>8</sup> Mi riferisco alle grandi opere di diversione delle foci dei fiumi, alla costruzione dei moli alle bocche, allo scavo dei grandi canali navigabili, ecc.

## 5.2 Storia del progetto.

Il 4-5 novembre 1966 una marea straordinaria colpì la laguna di Venezia, allagando gran parte della città. Fu la massima marea mai registrata a Punta della Salute con un livello al colmo di 1.94 m sullo zero mareografico. Quell'evento portò alla luce in modo improvviso e drammatico il problema di come difendere una città unica al mondo e un ambiente, quello della laguna, che con Venezia forma da sempre un contesto unico e inarrivabile. Come spesso accade nel nostro Paese fu necessario un evento catastrofico affinché anche il mondo politico e culturale muovesse i primi passi alla ricerca di una soluzione al problema. La prima tappa di questo tormentato percorso iniziò il 13 aprile 1973 con l'approvazione della prima Legge Speciale su Venezia che dichiarò il problema della salvaguardia della città "di preminente interesse nazionale" dando inizio a un lungo iter legislativo e tecnico per garantire a Venezia e alla laguna un efficace sistema di difesa dalle "acque alte".

In seguito a questa iniziativa lo Stato attraverso il Ministero dei Lavori Pubblici indisse nel 1975 un appalto-concorso internazionale "per l'esecuzione delle opere necessarie ai fini della conservazione dell'equilibrio idrogeologico della laguna di Venezia e dell'abbattimento delle acque alte nei centri storici" ma la procedura si concluse nel 1978 quando la Commissione giudicatrice decise di non aggiudicare la gara, ritenendo che nessuno dei cinque progetti esaminati potesse essere dichiarato idoneo. Tuttavia il Ministero dispose l'acquisizione degli elaborati presentati al concorso, in modo da poter eventualmente utilizzare alcuni interessanti contributi specifici in essi contenuti.

Con queste premesse quindi nel 1980 il Ministero dei Lavori Pubblici affidò a un gruppo di eminenti studiosi<sup>9</sup>, esperti nel settore, l'incarico dello studio delle opere per la difesa della città di Venezia dalle "acque alte".

Poco più di un anno dopo, nel 1981, gli esperti trasmettevano ufficialmente al Ministero dell'ambiente il loro studio-progetto, il cosiddetto "Progettone".

La soluzione prevedeva di accoppiare sulle tre bocche, alle paratoie mobili sommergibili, una serie di opere fisse con l'obiettivo di incrementare la resistenza idraulica delle bocche stesse, per ridurre i colmi di marea nel centro storico.

---

<sup>9</sup> Il gruppo di studiosi era formato dai professori Augusto Ghetti, Enrico Marchi, Pietro Matildi, Roberto Passino, Giannantonio Pezzoli, ai quali si aggiunsero l'olandese ing. Jan Agema e il dott. Roberto Frassetto.

Gli esperti tuttavia raccomandavano di procedere per gradi successivi, realizzando dapprima le parti fisse delle opere e procedendo solo in una fase successiva all'inserimento delle parti mobili in corrispondenza dei varchi, dopo un'adeguata sperimentazione, richiamandosi in questo modo all'indicazione contenuta nella stessa legislazione speciale su Venezia che prevedeva soluzioni "sperimentali, graduali e reversibili".

Qualche anno dopo, un'altra Legge Speciale (798/1984) sottolineò la necessità di affrontare in maniera unitaria gli interventi di salvaguardia, istituì il Comitato di indirizzo, coordinamento e controllo di questi interventi (il cosiddetto "Comitatone") e ne affidò la progettazione e l'esecuzione ad un unico soggetto, il Consorzio Venezia Nuova.

Nel 1989 il Magistrato alle Acque - Consorzio Venezia Nuova presentò un articolato sistema di interventi per la salvaguardia di Venezia (Progetto REA Riequilibrio e Ambiente) che prevede opere mobili alle bocche di porto per la regolazione della marea in laguna.

Nel 1992 il Magistrato alle Acque approvò il progetto preliminare di massima delle opere mobili.

Nel 1994 il progetto preliminare di massima venne approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, sottoposto a procedura di valutazione di impatto ambientale (1998) e a ulteriori approfondimenti richiesti dal Comitatone (2001).

Nel novembre 2002 venne approvato dal Magistrato alle Acque il progetto definitivo delle opere alle bocche per la regolazione dei livelli di marea in laguna.

Manca un "progetto esecutivo", al quale si sopperisce con "stralci esecutivi".

Il 3 aprile 2003, il "Comitatone" decise all'unanimità il passaggio agli esecutivi e alla realizzazione del sistema Mose per la difesa di Venezia e della Laguna dalle acque alte, nello stesso anno vennero aperti i cantieri alle tre bocche di porto.

### **5.3 Breve descrizione dell'opera alle bocche**

Il sistema è costituito da opere fisse alle bocche destinate ad accogliere schiere di paratoie mobili, mediante le quali si potrà separare temporaneamente la laguna dal mare in caso di "acqua alta".

Le paratoie sono costituite da strutture scatolari metalliche (larghezza 20 metri per tutte le schiere, lunghezza variabile da 18,5 a 29 metri e spessore da 3,6 a 5 metri) connesse ai cassoni di attraverso delle cerniere.

In condizioni normali di marea, le paratoie sono adagiate nei loro alloggiamenti, piene d'acqua; quando è prevista una marea con colmo superiore a 110 cm rispetto allo Z.M.P.S., le paratoie vengono svuotate dall'acqua mediante l'immissione di aria compressa e in questo modo si sollevano per spinta di galleggiamento, ruotando sull'asse delle cerniere, fino a emergere. Quando la marea cala, le paratoie vengono di nuovo riempite d'acqua e rientrano nella loro sede.

In comune alle tre bocche è la presenza di un molo esterno con la funzione di incrementare le resistenze idrauliche al flusso delle correnti di marea attraverso i passi navigabili.



Figura 5.1 Fase di sollevamento delle paratoie

**La bocca di Lido.** La bocca di Lido è la più complessa dal punto di vista morfologico poiché da essa si dipartono direttamente verso l'interno della laguna i canali di S. Nicolò, di S. Erasmo e di Treporti. È stata costruita un'isola centrale, in arretrato rispetto alle testate delle attuali dighe foranee, destinata a fungere da struttura di appoggio per le opere fisse dei due sbarramenti previsti.



Figura 5.2 Bocca di Lido

Sul fondo dei due varchi che consentiranno di accedere rispettivamente al bacino di S. Marco, attraverso il canale di S. Nicolò, e alla laguna superiore, attraverso il canale di Treporti, sono inseriti i cassoni di alloggiamento in calcestruzzo destinati ad accogliere in condizioni di riposo gli elementi mobili di ciascun sbarramento.

Mentre per il canale di S. Nicolò la luce libera dello sbarramento ha una larghezza di 400 m e una profondità di 12 m, per il canale di Treporti la sezione trasversale del varco presidiato presenta una larghezza di 420 m e una profondità di soli 6 m, venendo meno lungo questa direttrice la necessità di garantire la navigazione a battelli di maggiore pescaggio. Per le 2 luci sono previste due schiere di paratoie, rispettivamente di 21 e 20 elementi.

A cavallo dei due sbarramenti il fondale dei canali è protetto contro l'erosione da parte delle correnti di marea su di una fascia della lunghezza complessiva di ~400 m, nel caso del canale di S. Nicolò, e di ~350 m, per quanto riguarda il canale di Treporti.

Per dare spazio al porto rifugio destinato ad accogliere le piccole imbarcazioni nei periodi di chiusura della bocca, è stata apprezzabilmente modificata rispetto all'assetto precedente la configurazione delle rive del canale di Treporti sia lungo il litorale di Punta



Figura 5.3 Bocca di Malamocco

Sabbioni sia lungo la sponda opposta. Il nuovo andamento planimetrico, con curvature più accentuate, comporterà verosimilmente incrementi locali delle velocità con effetti inevitabili sui fondali, ove non opportunamente protetti contro l'erosione.

**La bocca di Malamocco.** In adiacenza al molo sud il progetto ha previsto una conca di navigazione, che dovrebbe permettere alle grandi navi dirette verso gli attracchi portuali di accedere all'interno della laguna anche in caso di chiusura della bocca.

Il molo esterno, si sviluppa per una lunghezza di quasi 1400 m ed è chiaramente orientato in modo da difendere l'accesso alla conca di navigazione rispetto all'azione del moto ondoso. È difficile ipotizzare per la struttura esterna un ruolo diverso da quello evidenziato, in particolare la capacità dichiarata di produrre una attenuazione significativa dei colmi di marea all'interno della laguna.

La sezione del varco presidiato ha una larghezza di 380 m e una profondità di 14 m, profondità per la quale il progetto ha previsto il rialzo dei fondali della bocca, su di una lunghezza complessiva di circa 1100 m. Il riposizionamento in quota dei fondali, che interessa prevalentemente il lato a mare del canale portuale, è positivo e riporta il canale stesso verso profondità più ragionevoli di quelle che si erano raggiunte soprattutto dopo

la costruzione del canale Malamocco-Marghera. Nel varco è prevista una schiera di 19 paratoie.



Figura 5.4 Bocca di Chioggia

**La bocca di Chioggia.** Il molo esterno previsto per questa bocca ha una lunghezza di circa 700 m, e si trova a breve distanza dalla testata dell'esistente diga sud, pressoché di fronte all'opera. Lo sbarramento mobile, che controlla una luce della larghezza di 360 m e della profondità di 11m, è posto quasi al limite interno della bocca, con fondali a cavallo dello sbarramento stesso portati a loro volta alla profondità di 11.0 m su di un tratto, protetto contro l'erosione, della lunghezza di circa 400 m.

Un porto rifugio trova spazio in adiacenza al molo nord, per permettere alle imbarcazioni di più modesto pescaggio di sostare in zona protetta in attesa che venga ripristinata la navigazione lungo il porto canale.

È prevista una schiera di 18 paratoie.

Il Consorzio Venezia Nuova indica come tempi di sollevamento delle paratoie 30 minuti circa e 15 minuti per l'abbassamento.

Al di là dei dubbi che sono stati sollevati in passato e tuttora sono motivo di discussione circa l'efficacia del funzionamento delle paratoie, come, ad esempio i possibili fenomeni di amplificazione delle oscillazioni degli elementi mobili, occorre considerare anche un altro aspetto di più lungo termine. Infatti se il fenomeno dell'innalzamento del livello medio del mare dovesse manifestarsi con l'intensità paventata la frequenza di sollevamento delle paratoie potrebbe passare dalle 3-4 volte l'anno prevista dal progetto attuale alle 35 volte l'anno entro fine secolo. Questo scenario comporterebbe una quasi costante regimazione artificiale della laguna, mantenendo le bocche più chiuse che aperte con conseguenze negative sia sul ricambio d'acqua lagunare sia sull'ingresso delle navi in laguna. In questa prospettiva le conche di navigazione sarebbero utilizzate con maggiore assiduità e risulterebbero probabilmente insufficienti a far fronte al continuo arrivo di navi, con buona pace di uno degli obiettivi dichiarati dell'opera, ovvero la salvaguardia delle attività portuali.

## 6 L'EFFETTO DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE DI PORTO SUI SOPRALZI DIFFERENZIALI

Come abbiamo visto nei capitoli precedenti il fenomeno dei sopralzi differenziati indotti dal vento, soprattutto tra laguna nord e laguna sud, non è trascurabile. Nei casi in cui l'effetto del vento si associa a condizioni favorevoli al fenomeno dell'acqua alta i sopralzi sono il discrimine tra l'allagamento o meno dei centri abitati all'interno della laguna, come Venezia, Chioggia, Murano e Burano, i quali essendo situati in zone diverse vengono penalizzati da diverse direzioni del vento.

Si vuole indagare se la chiusura delle bocche di porto, nei modi e nei tempi previsti dal progetto, abbia influenza sull'entità di tali dislivelli, potendo dar luogo ad un allagamento non previsto di uno o più centri abitati.

La variazione del livello in laguna a barriere chiuse è determinata sia dagli apporti della pioggia e del bacino scolante, sia dall'eventuale passaggio d'acqua tra le paratoie (traferri); tuttavia l'effetto principale è quello dovuto al vento il quale è in grado di ridistribuire le masse d'acqua, non più influenzate dalla marea, e generare dislivelli anche considerevoli tra le diverse zone della laguna.

Nel nostro studio si è tenuto conto solo dell'effetto del vento, sia per i notevoli sopralzi che esso può produrre, sia per le differenze spaziali di tali sopralzi.

L'ipotesi che si vuole suffragare con i rilievi sperimentali è che il livello d'acqua in laguna, a barriere chiuse, possa raggiungere livelli di emergenza che non sarebbero stati tali studiando il problema (come si è fatto tuttora) trascurando l'effetto della chiusura delle paratoie.

Il procedimento adottato è quindi il seguente:

- si sono scelti degli eventi storici di alta marea che fossero associati ad intensi fenomeni ventosi di bora o di scirocco;
- si sono simulati attraverso il modello idrodinamico tali eventi inserendo le relative condizioni al contorno di livelli e vento, sia con bocche aperte che chiuse;

- si sono poi estratti i risultati di livello di marea in diverse stazioni distribuite sulla laguna corrispondenti alle stazioni mareografiche del Centro Maree e dell'Ispra,
- si sono infine confrontati i livelli tra le stazioni al fine di poter stimare il contributo al sopralzo dato dal vento.

Verranno ora analizzate in dettaglio le varie fasi del lavoro.

### **6.1 Modalità di chiusura delle bocche**

La chiusura delle bocche è stata riprodotta nel modello innalzando, ad un certo istante da noi fissato con precisi criteri, la quota del fondo degli elementi bidimensionali posti sulle tre bocche in corrispondenza degli alloggiamenti delle paratoie mobili. Successivamente verrà discussa la scelta dei tempi in cui attivare il sollevamento ed il successivo abbassamento delle paratoie.

Preliminarmente ci si è soffermati ad indagare sulla modalità di chiusura delle bocche, in modo da cercare di capire se la velocità di sollevamento delle paratoie avesse una qualche influenza sui livelli interni e sulle portate nei canali interni antistanti le bocche.

Si sono scelte quattro modalità di chiusura:

- 1) sollevamento delle paratoie a velocità uniforme completata nell'arco di mezz'ora;
- 2) sollevamento delle paratoie a velocità uniforme completata nell'arco di un'ora;
- 3) sollevamento delle paratoie a velocità non uniforme completata nell'arco di mezz'ora;
- 4) sollevamento delle paratoie a velocità non uniforme completata nell'arco di un'ora;

Si precisa che per velocità non uniforme si intende l'ipotesi per cui, tra la quota del fondo dei cassoni e -2 m.s.l.m.m, il sollevamento avvenga alla velocità lineare  $v$ , mentre da -2 a 0 m la velocità sia ridotta della metà ( $v/2$ ), per poi tornare a  $v$  nel tratto finale. La quota massima di sollevamento delle paratoie è stata fissata a +3 m sul livello medio mare.

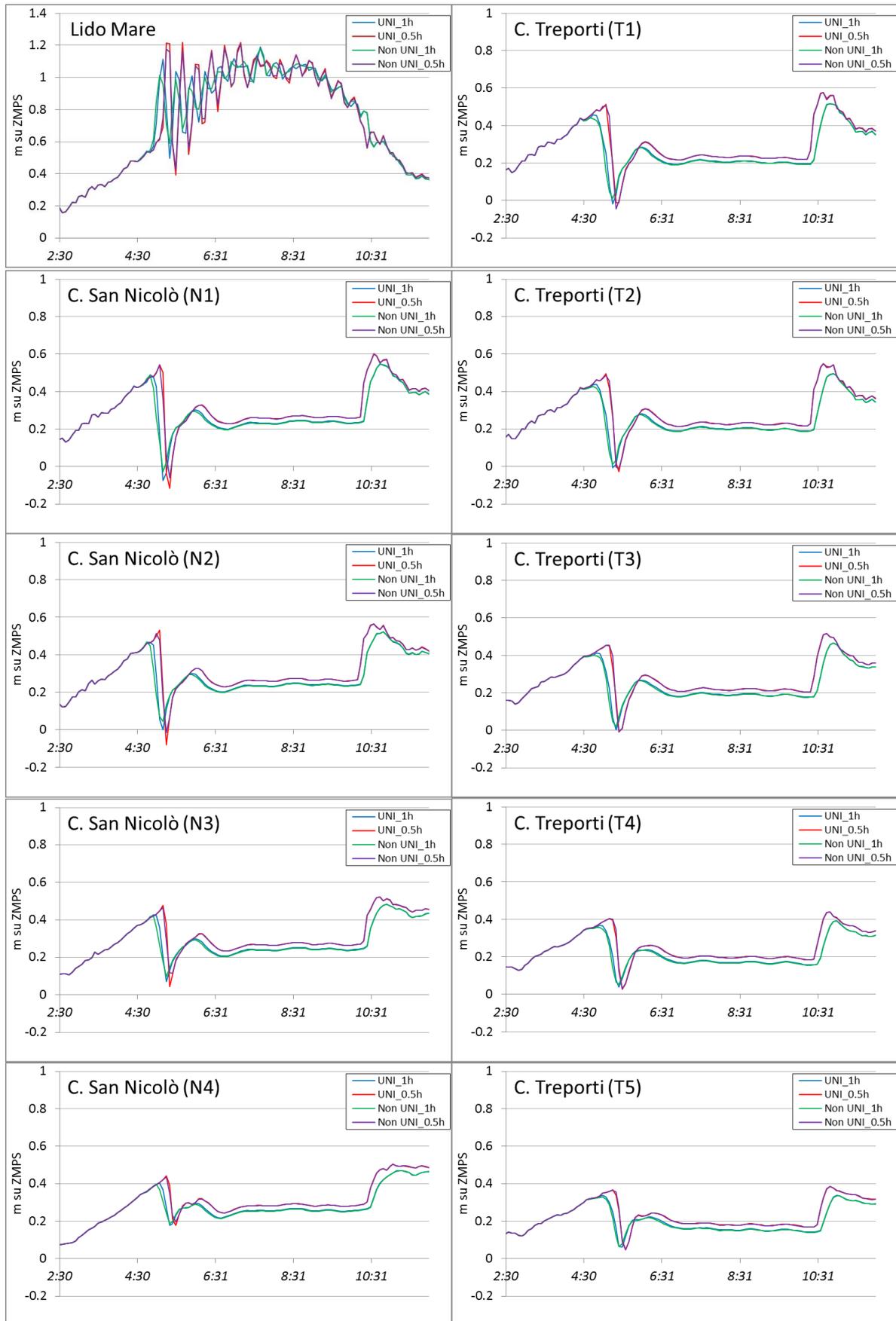
Si sono quindi avviate le simulazioni relative ai quattro modi di chiusura per due eventi di marea, per un totale quindi di otto simulazioni. I due eventi scelti sono quelli del 10 novembre 2004 e del 1 dicembre 2008, il primo di bora ed il secondo di scirocco.

## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

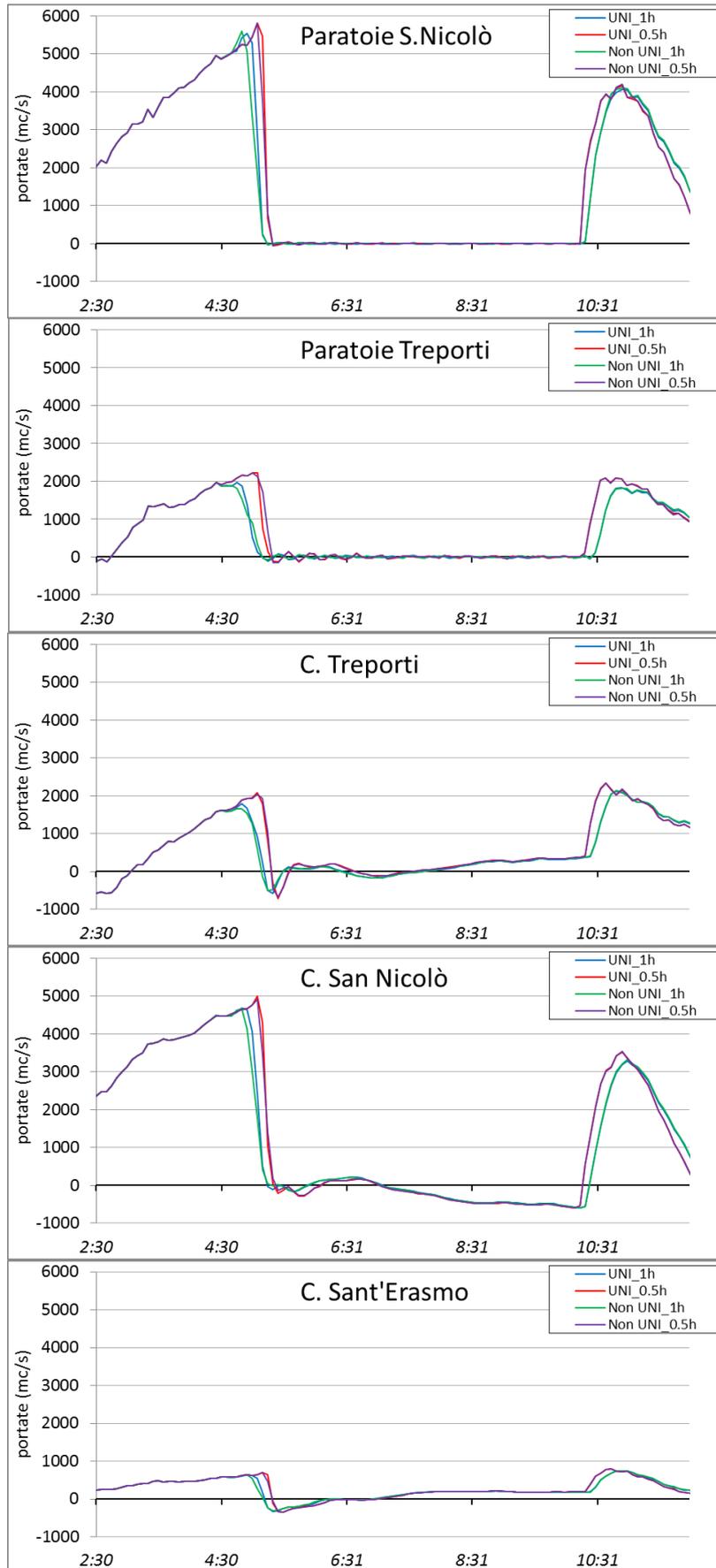
I risultati estratti sono i dati di livello in diversi punti lungo i canali di san Nicolò e Treporti che dipartono dalla bocca di Lido e le portate sulle sezioni dei tre canali Treporti, Sant'Erasmus e San Nicolò come indicato nelle figure sottostanti.



Vediamo quindi i risultati ottenuti per quanto riguarda l'evento del 10 novembre 2004 nei pressi della bocca di Lido. Si riportano di seguito i grafici relativi ai livelli e alle portate per i quattro modi di chiusura.



## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI



Per quanto riguarda i livelli si nota, nella fase finale di sollevamento delle paratoie, un brusco abbassamento seguito da una fase di recupero e una di stabilizzazione fino a raggiungere il livello di equilibrio che si mantiene per tutto il periodo di chiusura.

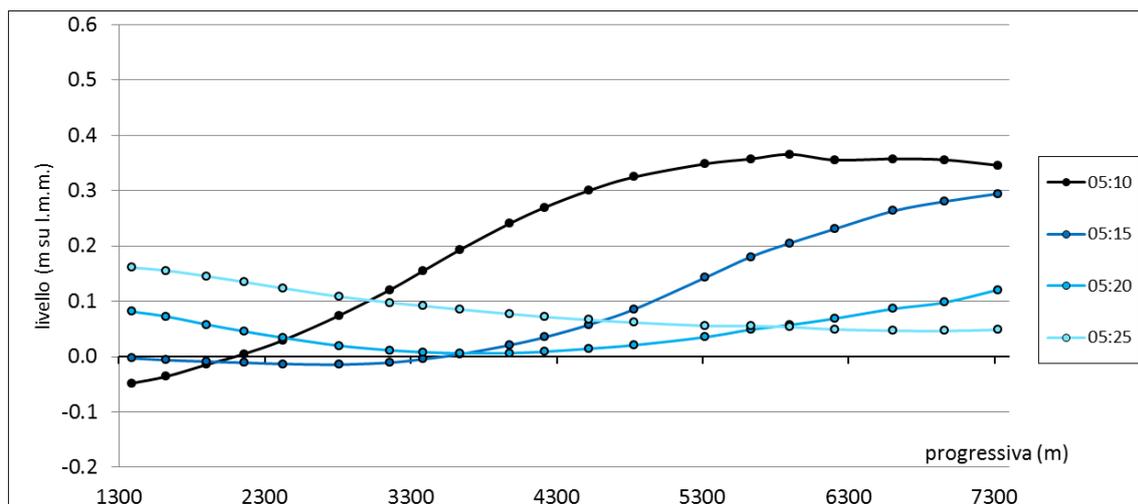
Questo è il comportamento tipico di onda negativa generata dalla brusca chiusura della bocca, comportamento evidenziato dai grafici relativi alle portate: nel canale di San Nicolò per esempio si passa da quasi 6000 mc/s a 0 in meno di 20 minuti.

L'onda ripida generata si propaga sia a monte (lato mare) che a valle dello sbarramento (lato laguna): in laguna si osserva un brusco abbassamento di livello, con propagazione dell'onda nel verso della corrente preesistente, mentre in mare avviene l'effetto opposto, ovvero un forte innalzamento della superficie libera e la successiva generazione di forti oscillazioni di livello.

Nei grafici presentati è possibile notare l'andamento della superficie libera conseguente al sollevamento delle paratoie nel canale di Treporti, dalla bocca di Lido fino al fondo del canale stesso (punto T5).

L'onda negativa simulata si propaga con celerità di circa 6,5 m/s, in linea con la sua formulazione teorica.

**Evoluzione del profilo longitudinale lungo il canale Treporti negli istanti successivi alla chiusura delle paratoie (ore 4:55).**



## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

Tale particolare fenomeno, studiato in maniera approfondita in passato, non ha influenza pratica su questa parte del nostro studio, il quale mira ad indagare le differenze tra i vari modi di chiusura delle bocche.

I risultati riassunti in tabella indicano che tra le diverse modalità di chiusura non sussistono differenze significative termini di livello che si attestano a 3 cm dimezzando la velocità di chiusura delle bocche stesse, a fronte di oltre un metro di ampiezza di marea durante la fase crescente studiata nell'esempio.

Differenze di livello	1 ORA	1/2 ORA	UNI	NON UNI
	UNI-NON UNI	UNI- NON UNI	1 ORA-1/2 ORA	1 ORA-1/2 ORA
$\Delta h$ (m)	0.00	0.00	0.03	0.03
$\Delta h$ (%)	0.3	0.1	2.6	2.9

In conclusione, in mancanza di più dettagliate informazioni circa la manovra di sollevamento delle paratoie, ci sembra opportuno fissare una velocità di apertura uniforme e costante tale per cui la chiusura avvenga in mezz'ora, come da indicazioni contenute nello Studio di Impatto Ambientale redatto dal Magistrato alle Acque.

## 6.2 Le simulazioni con bocche chiuse

Le simulazioni mediante il modello idrodinamico bidimensionale sono state condotte secondo le seguenti condizioni e ipotesi.

- **Tempo di simulazione:** 72 ore ( l'evento si colloca nella parte centrale del periodo considerato).
- **Passo temporale:** 300 s.
- **Condizioni al contorno:** livelli alle bocche reali registrati presso le stazioni mareografiche di Diga Sud Lido, Diga Nord Malamocco e Diga Sud Chioggia;
- **Forzante:** vento distribuito con i dati osservati di direzione e intensità delle stazioni di Chioggia e Le Saline, stress del vento valutato con coefficiente di drag pari a 0,08.
- **Chiusura delle bocche:** le simulazioni sono state condotte ipotizzando la chiusura contemporanea di tutte e tre le bocche tale che le paratoie risultino completamente sollevate al raggiungimento del livello di un livello prefissato sullo Z.M.P.S. alla bocca. Tale livello non è stato ancora definito in via ufficiale, per questo motivo sono state eseguite più simulazioni per ogni evento, cambiando il momento in cui le bocche vengono chiuse: 10 diversi tempi di chiusura, il primo nel momento in cui viene raggiunto il valore di 110 cm alla bocca di Lido ed i restanti anticipando tale momento di 20 minuti fino ad arrivare a tre ore prima dal raggiungimento di tale quota.
- **Riapertura delle bocche:** si ipotizza la riapertura delle bocche nella fase di marea calante al raggiungimento del pareggio dei livelli in laguna ad ogni bocca: l'istante in cui essa inizia può cambiare leggermente da bocca a bocca, tuttavia la modalità di apertura è del tutto ininfluenza sul nostro studio poiché ci interessa il comportamento della laguna nel periodo in cui le bocche sono chiuse e non tanto le manovre delle paratoie nella fase finale dell'evento.

Al fine di poter fare diversi confronti si sono condotte simulazioni di tre tipi:

- simulazione degli eventi senza chiusura delle paratoie in presenza di vento;
- simulazione degli eventi con chiusura delle paratoie in presenza di vento;

## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCHE SUI SOPRALZI

- simulazione degli eventi con chiusura delle paratoie facendo cessare il vento in poche decine di minuti non appena le bocche sono state completamente chiuse, in modo da confrontare gli effetti “assoluti” del vento sui dislivelli.

Le condizioni al contorno imposte al modello riguardano eventi reali registrati nel periodo 2000-2012.

I requisiti per la scelta degli eventi da simulare sono la presenza di vento intenso (superiore a 15 m/s) e il superamento del livello di marea di 110 m su ZMPS. Si tratta perciò di eventi per i quali sarebbe stata prevista la chiusura delle bocche di porto secondo il progetto di difesa dalle “acque alte”.

Gli eventi presi in considerazione sono i seguenti:

Data evento	Tipo vento	Direzione (°N)	Intensità (m/s)
6 novembre 2000	Scirocco	158	18
13 novembre 2001	Bora	70	15
16 novembre 2002	Scirocco	135	10
10 novembre 2004	Bora	43	18
3 dicembre 2005	Scirocco	165	11
1 dicembre 2008	Scirocco	175	16
1 novembre 2012	Bora	10	15
11 novembre 2012	Scirocco	120	15

## **FASE 1: Confronto tra valori simulati e osservati con bocche aperte**

Si è ritenuto necessario in via preliminare confermare l'affidabilità del modello negli eventi presi in considerazione (non tutti rientrano tra quelli di taratura e/o validazione), confrontando i valori osservati con quelli simulati senza chiudere le bocche. Il modello si è rivelato molto efficiente, come raffigurato nei grafici seguenti.

In ogni grafico sono rappresentati livelli osservati e simulati per le due principali coppie di stazioni: Punta Salute e Chioggia e Punta Salute e Burano. Le coppie così costituite verranno utilizzate in seguito per il confronto dei livelli di marea (nei risultati finali tali coppie saranno sei).

Spesso tornerà utile allineare temporalmente i grafici per filtrare il dislivello oscillante dovuto al ritardo di fase in modo da evidenziare solamente il dislivello tra le due stazioni dovuto al vento. Si precisa che tali sfasamenti sono dell'ordine di poche decine di minuti per quanto riguarda i centri abitati (rispetto a Punta salute si registra un anticipo di 20 minuti a Chioggia ed un ritardo di 40 minuti a Burano).

L'oscillazione è causata dallo sfasamento delle onde di marea: una parte del dislivello è dovuta al vento e un'altra è dovuta proprio al ritardo di fase. Per spiegare meglio questo concetto si può guardare il confronto tra Punta Salute e Chioggia con le bocche aperte in uno degli eventi presentati: Chioggia è in anticipo rispetto a Punta Salute di circa 20 minuti e questo comporta nella fase crescente un maggior dislivello tra le due stazioni e nella fase decrescente un dislivello minore, come ben visibile dalle linee tratteggiate del grafico a sinistra.

Nei grafici presentati nella seconda colonna l'onda di marea delle due stazioni è allineata temporalmente, si elimina quindi, artificialmente il ritardo di fase dovuto alla propagazione mediante una traslazione delle curve. Quelli della prima colonna invece non sono allineati.

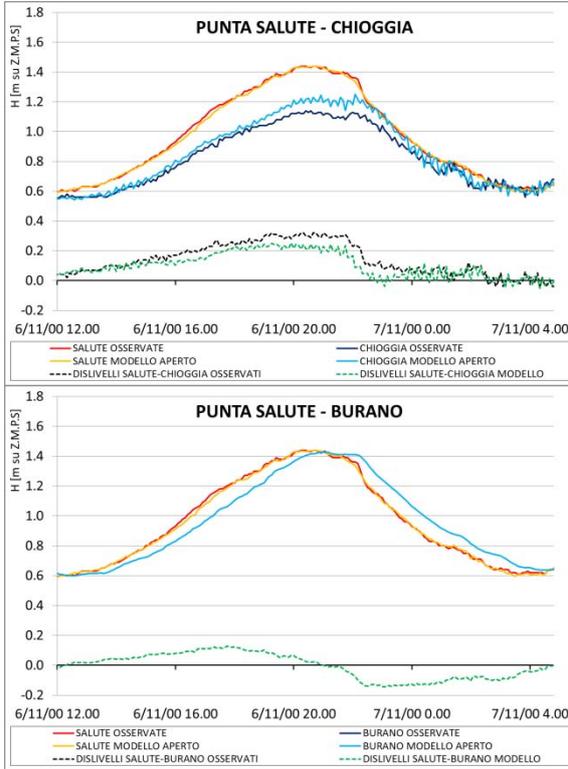
In definitiva i seguenti grafici danno due informazioni:

- l'entità dei dislivelli osservati e simulati tra le due stazioni, sia nel caso allineato che non allineato;
- l'errore compiuto dal modello nel calcolo dei dislivelli, che è dato dalla differenza delle due linee tratteggiate.

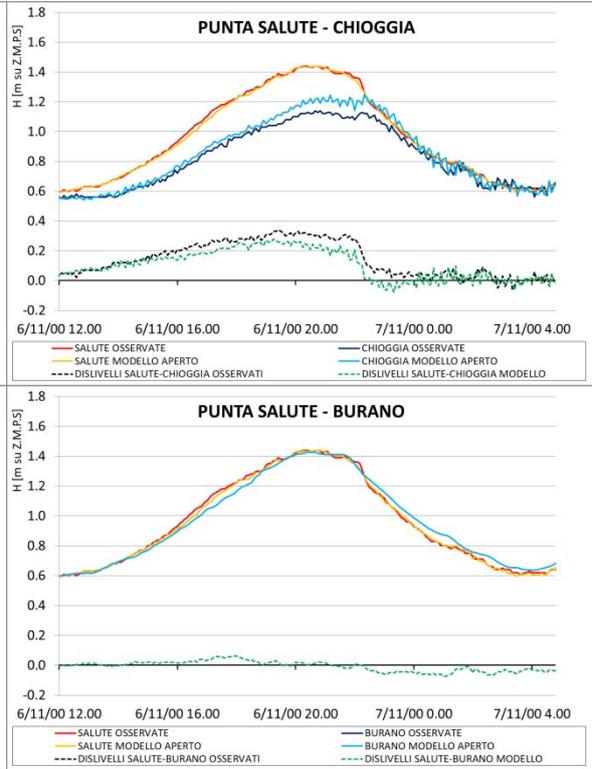
6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

Evento del 6 novembre 2000

NON ALLINEATI

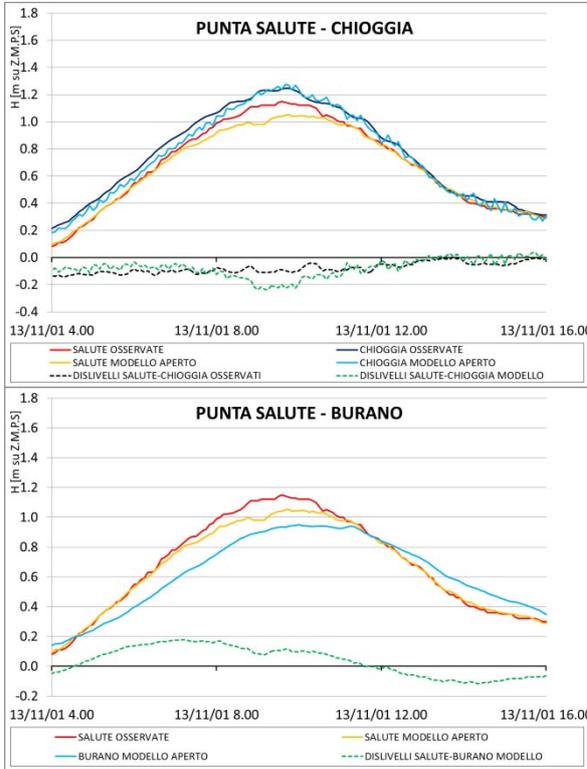


ALLINEATI

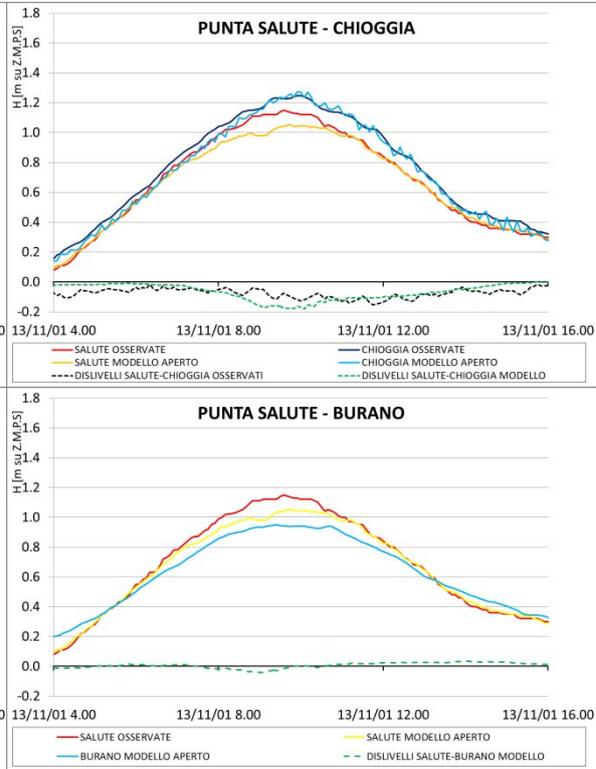


Evento del 13 novembre 2001

NON ALLINEATI

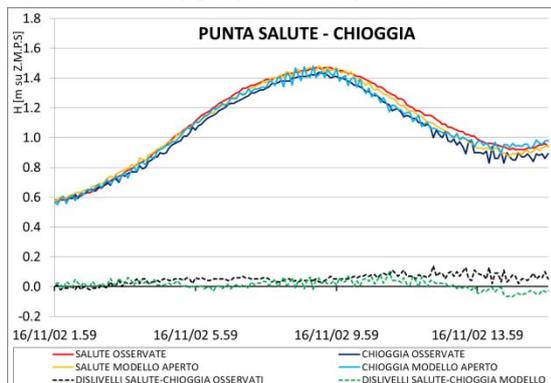


ALLINEATI

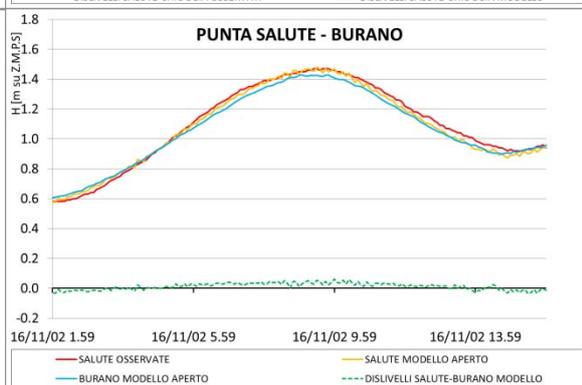
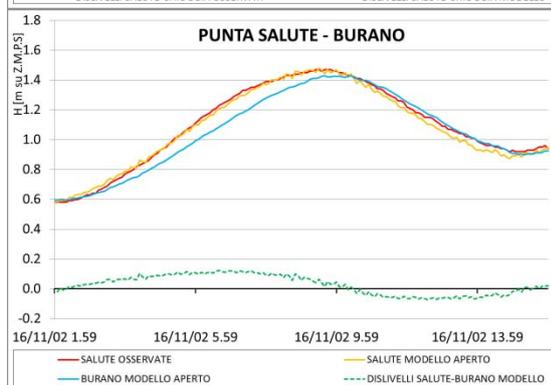
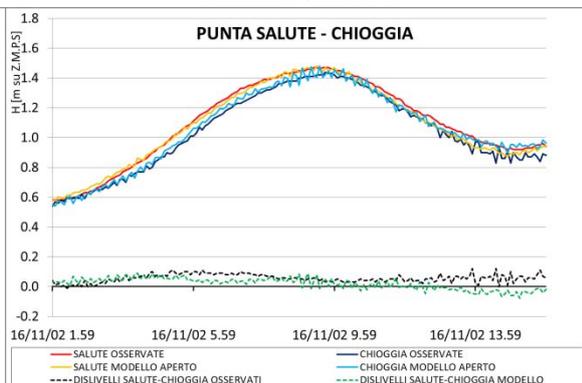


## Evento del 16 novembre 2002

### NON ALLINEATI

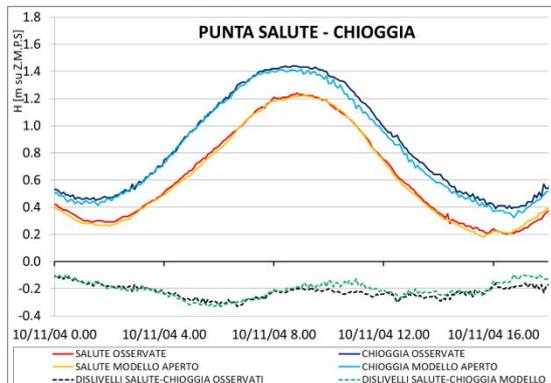


### ALLINEATI

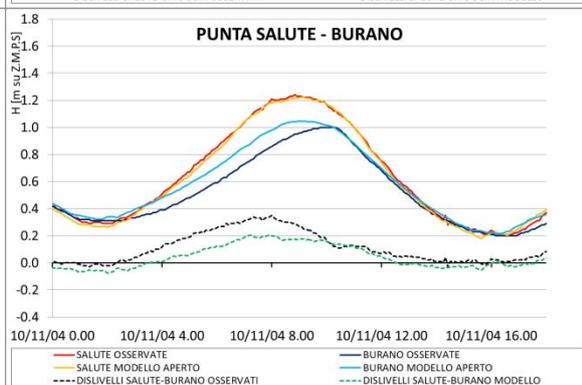
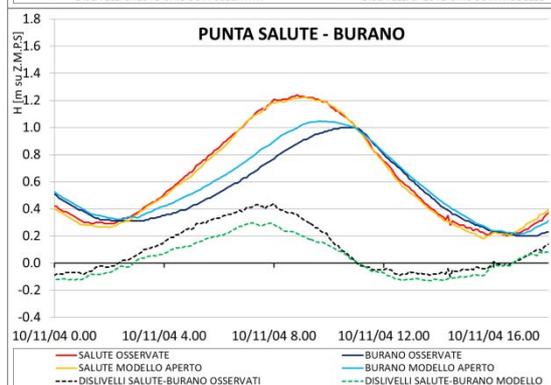
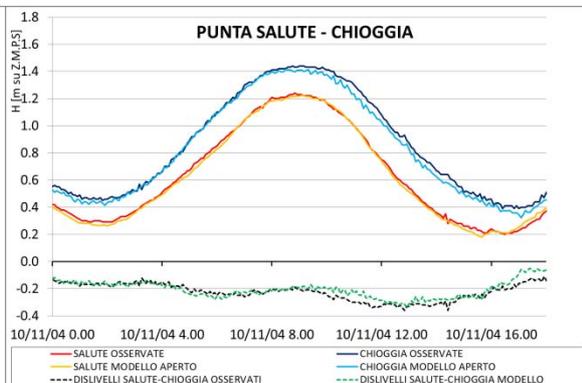


## Evento del 10 novembre 2004

### NON ALLINEATI

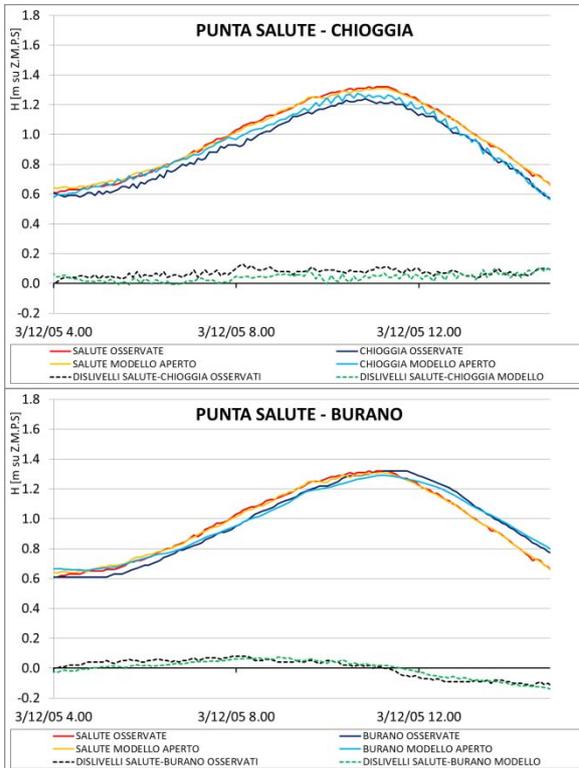


### ALLINEATI

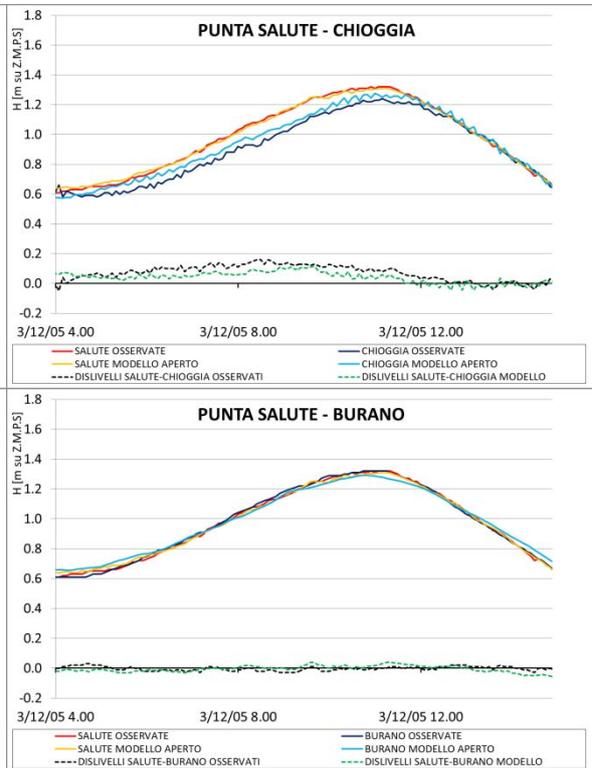


Evento del 3 dicembre 2005

NON ALLINEATI

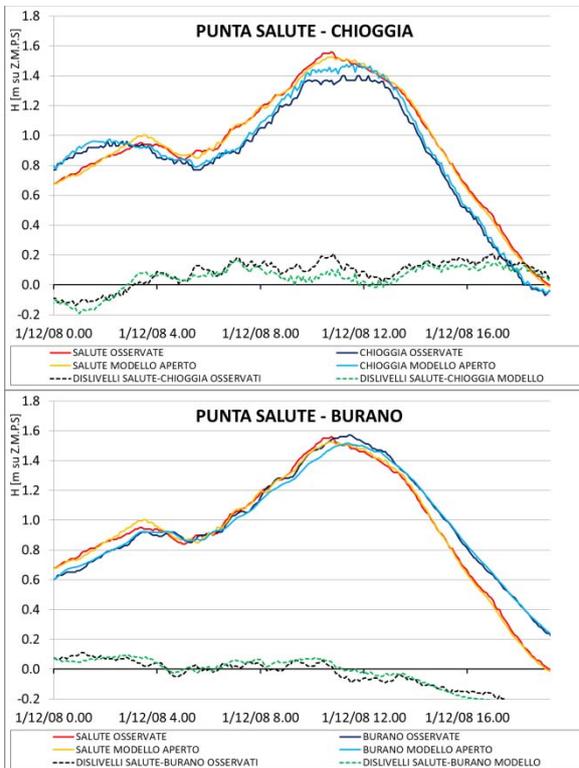


ALLINEATI

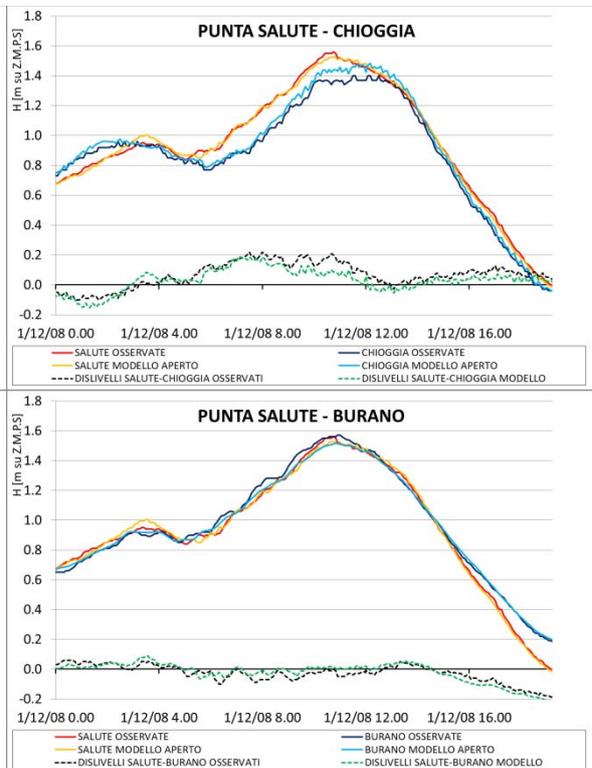


Evento del 1 dicembre 2008

NON ALLINEATI

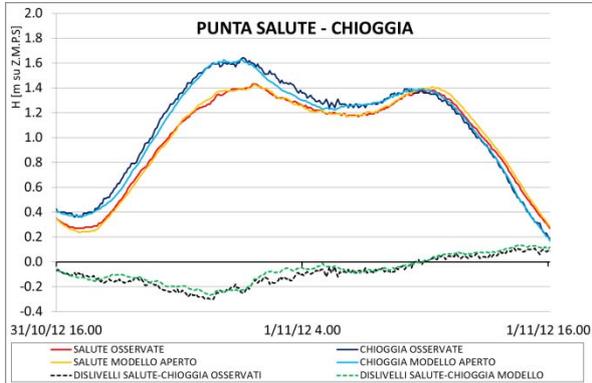


ALLINEATI

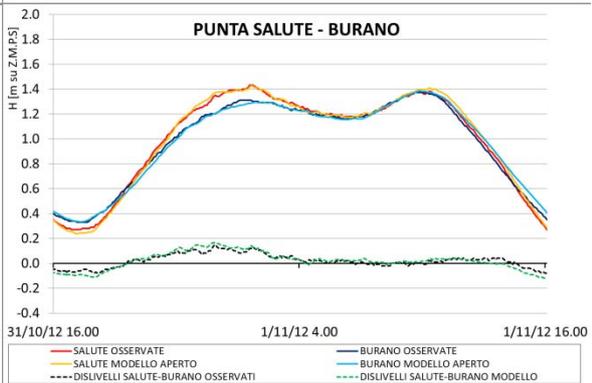
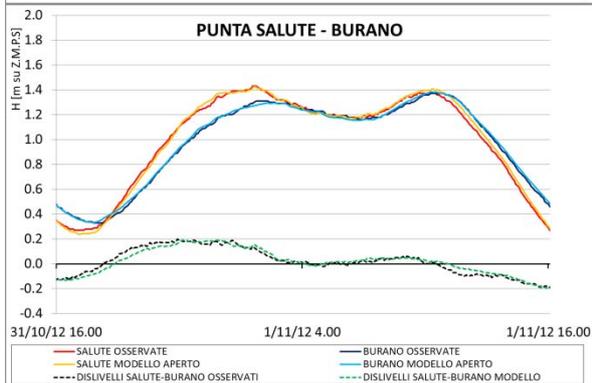
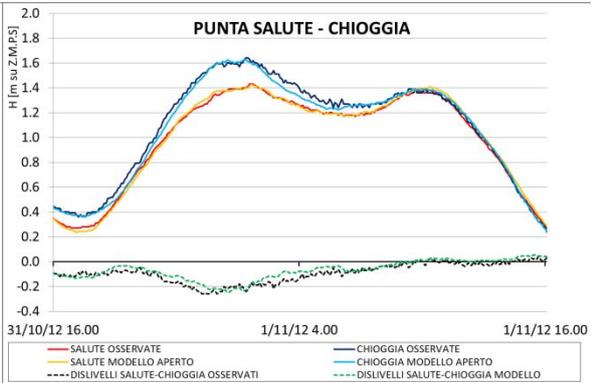


## Evento del 1 novembre 2012

### NON ALLINEATI

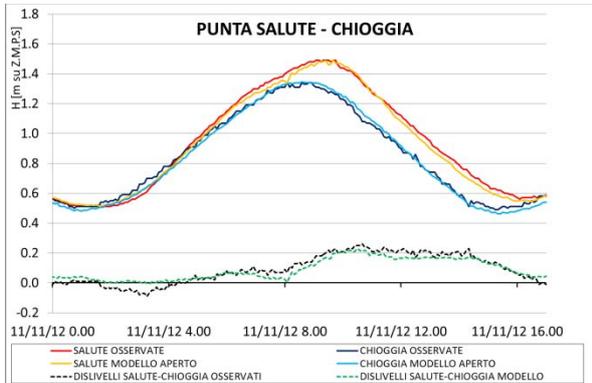


### ALLINEATI

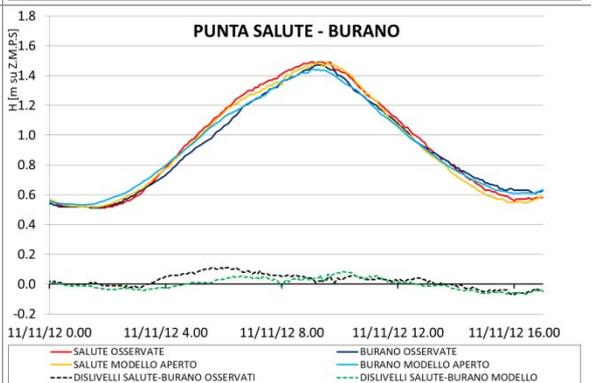
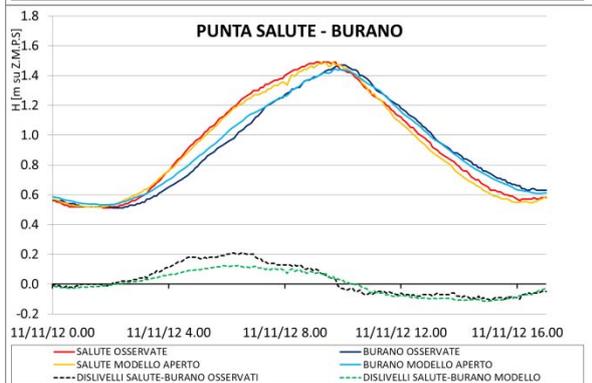
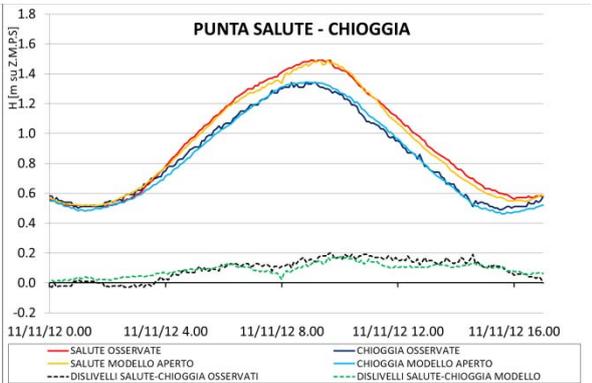


## Evento del 11 novembre 2012

### NON ALLINEATI

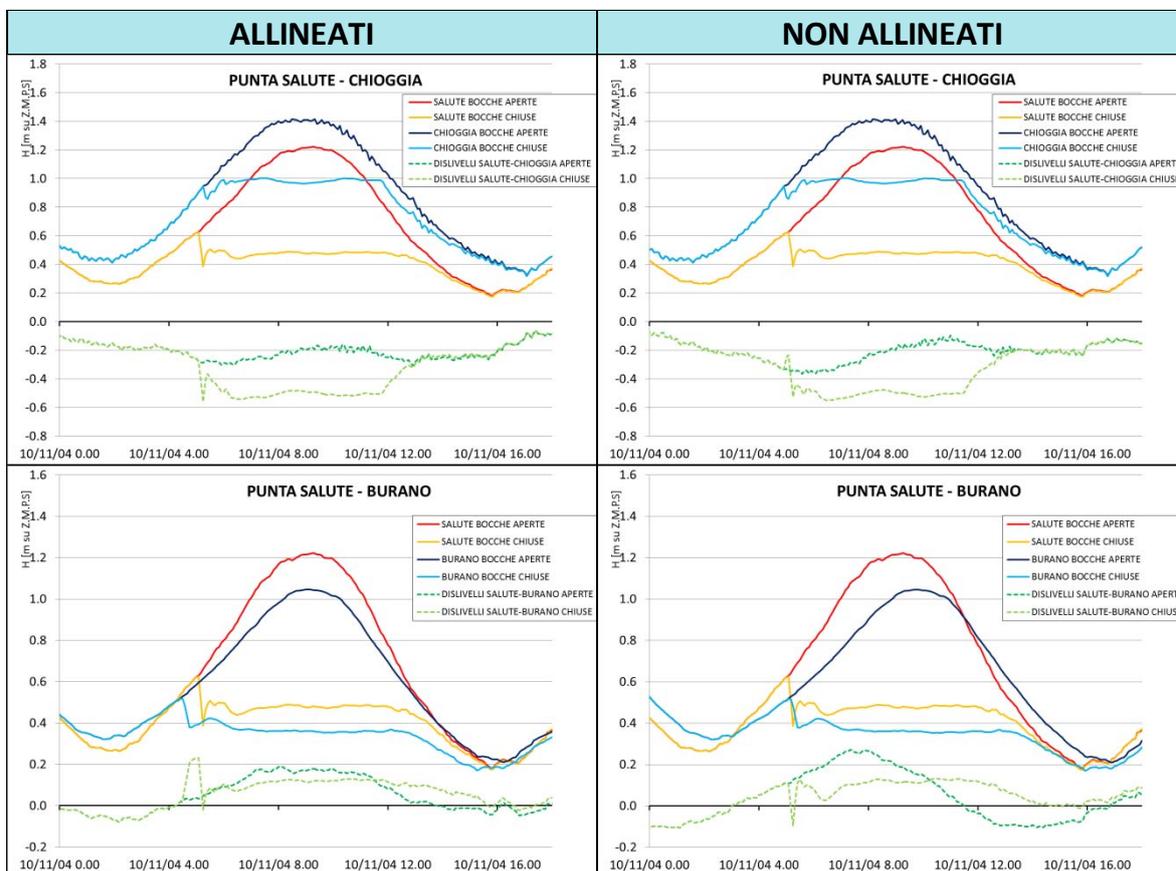


### ALLINEATI



**FASE 2: Confronto dei valori simulati con bocche chiuse, tra stazioni diverse.**

I dislivelli a bocche chiuse non soffrono invece del problema del ritardo di fase, se non nel breve periodo immediatamente successivo alla chiusura delle bocche: ciò è ben visibile dal confronto tra i grafici a destra e quelli a sinistra.



L'obiettivo del lavoro è confrontare il dislivello a bocche chiuse con quello a bocche aperte, come conseguenza della sola presenza del vento: si è quindi deciso di depurare il dislivello a bocche aperte del contributo dato dal ritardo di fase, allineando temporalmente le curve dei livelli a bocche aperte delle due stazioni.

A sostegno di questo metodo di procedere è sufficiente un semplice ragionamento: si considerino le due stazioni di Punta Salute e Chioggia, quello che ci preme studiare non è tanto il dislivello istantaneo tra le due stazioni, quanto la differenza tra i livelli che raggiungono istante per istante le due stazioni all'interno dello stesso evento, differenza dovuta al vento. Non è quindi importante se il colmo dell'onda di marea si presenta nelle due stazioni allo stesso istante o con una differenza, ma l'entità del dislivello medio tra le

due stazioni per effetto del vento, studiando in particolare se questo dislivello sarà incrementato quando la laguna verrà chiusa alle bocche.

L'allineamento temporale si esegue traslando la serie di dati di livello lungo la linea temporale di un tempo  $\Delta t$  tale per cui i colmi e i cavi dell'onda nelle due stazioni coincidano. Il periodo  $\Delta t$  è il ritardo di fase che l'onda di marea accumula nella sua propagazione tra una stazione e l'altra nelle coppie considerate. Nel capitolo introduttivo si è già trattato della propagazione dell'onda di marea in laguna ed i relativi ritardi di fase tipici di ogni stazione, prendendo come riferimento la stazione di Punta Salute.

I grafici che riassumono i risultati, presentati nelle prossime pagine, hanno l'intento di mostrare le differenze tra i dislivelli a bocche chiuse e a bocche aperte in presenza di vento intenso che si vengono a creare in sei coppie di stazioni distribuite all'interno della laguna.

Si è detto però che mentre nel caso in cui le bocche restano aperte è necessario allineare temporalmente le curve di marea per filtrare il ritardo di fase, nel caso in cui le bocche siano chiuse tale ritardo diventa nullo: ciò rende leggermente più complicata l'interpretazione grafica dei risultati.

Infatti nel caso in cui si simula che cosa avviene con la chiusura delle paratoie la fase e quindi la traslazione delle curve è nulla, in modo da fotografare ciò che realmente avviene nelle due stazioni confrontate, mentre per quanto dislivelli a bocche aperte essi vengono rappresentati filtrati dell'effetto del ritardo di fase. In sostanza risulta che entrambe le curve dei dislivelli a bocche aperte e chiuse vengono filtrate della fase, fase che tuttavia è nulla nel confronto a bocche chiuse. Solamente tramite questa soluzione è possibile apprezzare l'entità del dislivello tra stazioni, dovuto solo all'effetto del vento e confrontare la sua differenza quando le paratoie entrano in funzione.

Si riassume di seguito il contenuto di ogni grafico:

- andamento dei livelli a bocche aperte: non allineati temporalmente;
- andamento dei livelli a bocche chiuse: non allineati temporalmente;
- andamento dei livelli a bocche chiuse senza vento: non allineati temporalmente;
- andamento dei dislivelli tra le due stazioni a bocche aperte: allineati;

## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

- andamento dei dislivelli tra le due stazioni a bocche chiuse: allineati, tranne che nella parte centrale di chiusura delle bocche;
- andamento dei dislivelli tra le due stazioni a bocche chiuse, senza vento: allineati, tranne che nella parte centrale di chiusura delle bocche.

Si riporta qui sotto la posizione delle stazioni prese in considerazione per meglio comprendere i risultati dei grafici.

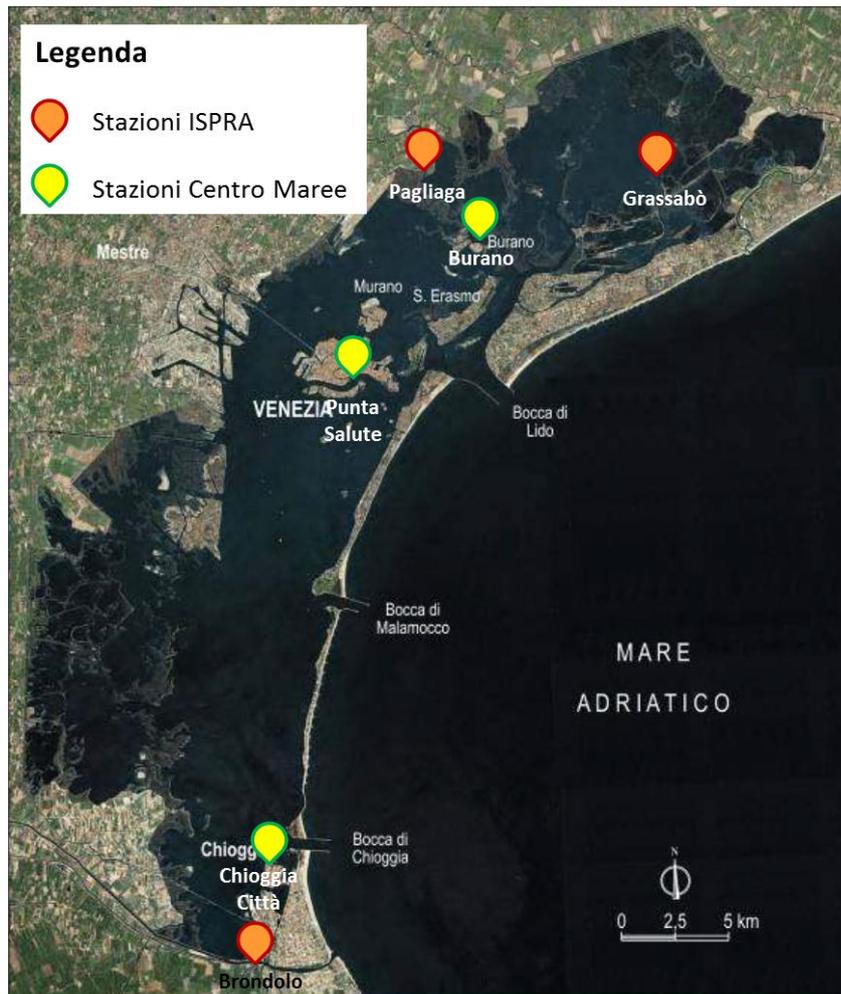


Figura 6.1 Posizione stazioni di riferimento

## Evento del 6 novembre 2000

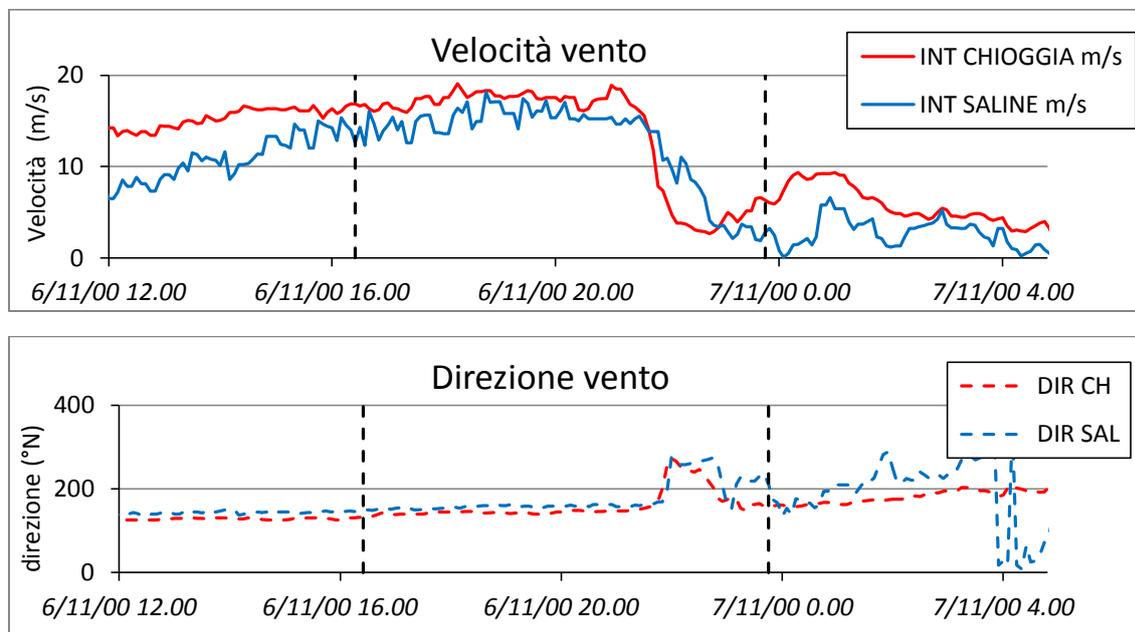
Questo evento è particolarmente interessante, esso infatti si colloca al 7° posto nella classifica dei maggiori eventi di “acqua alta” del XX secolo. Nella serata del 6 novembre 2000 la marea raggiunse alle ore 20:35 a Punta della Salute quota +144 cm.

Il fenomeno fu generato da forti venti meridionali originati da un rilevante gradiente barico: la pressione diminuì a Venezia di 27 millibar in 24 ore e nel pomeriggio nella città lagunare si abbatté un violento temporale causato da un fronte freddo. Il contributo meteorologico raggiunse i 118 cm alle ore 21; non furono raggiunti livelli più elevati in quanto la marea era in fase di quadratura.

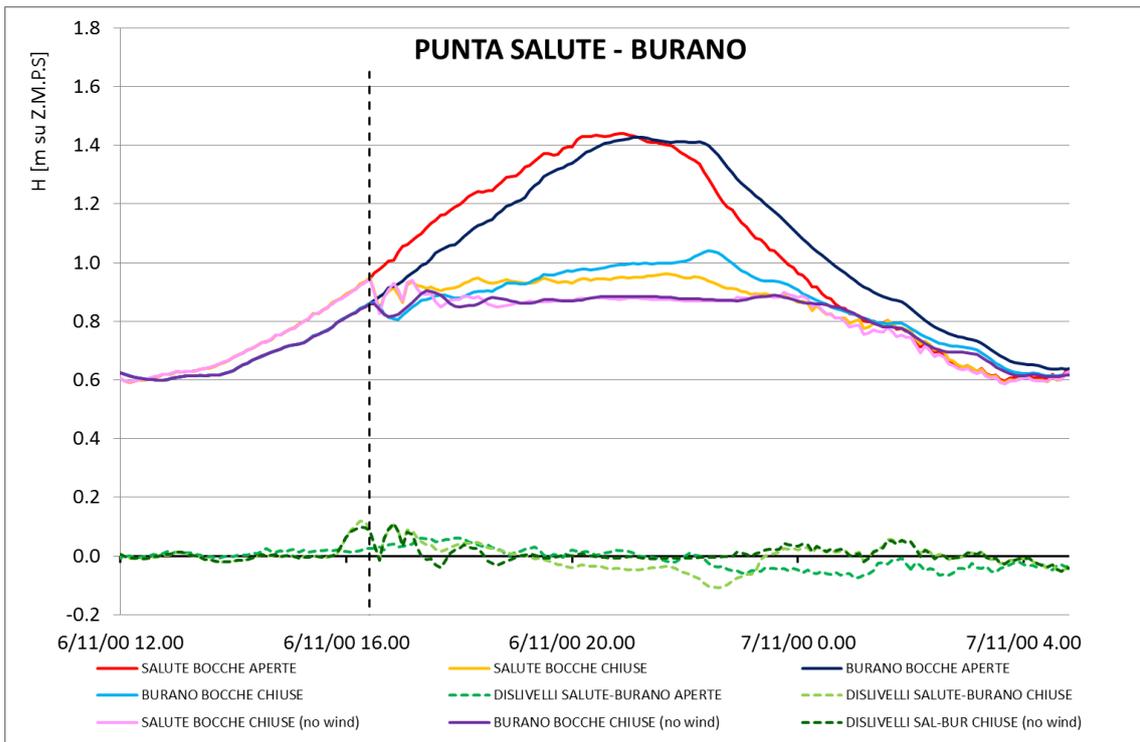
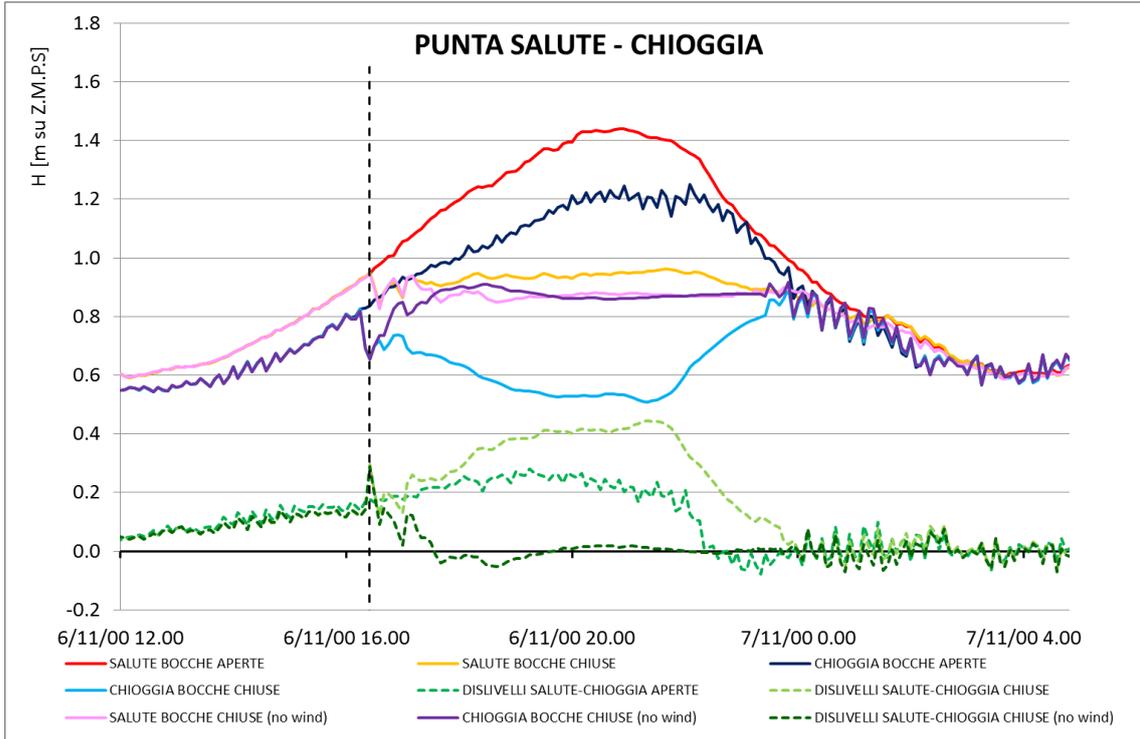
Nel periodo in cui sarebbe stata prevista la chiusura delle bocche si registrano venti molto intensi di scirocco che superano i 18 m/s. Poco dopo le 21.30 invece il vento gira e soffia da Ovest, con intensità minori, determinando la conclusione dell'evento.

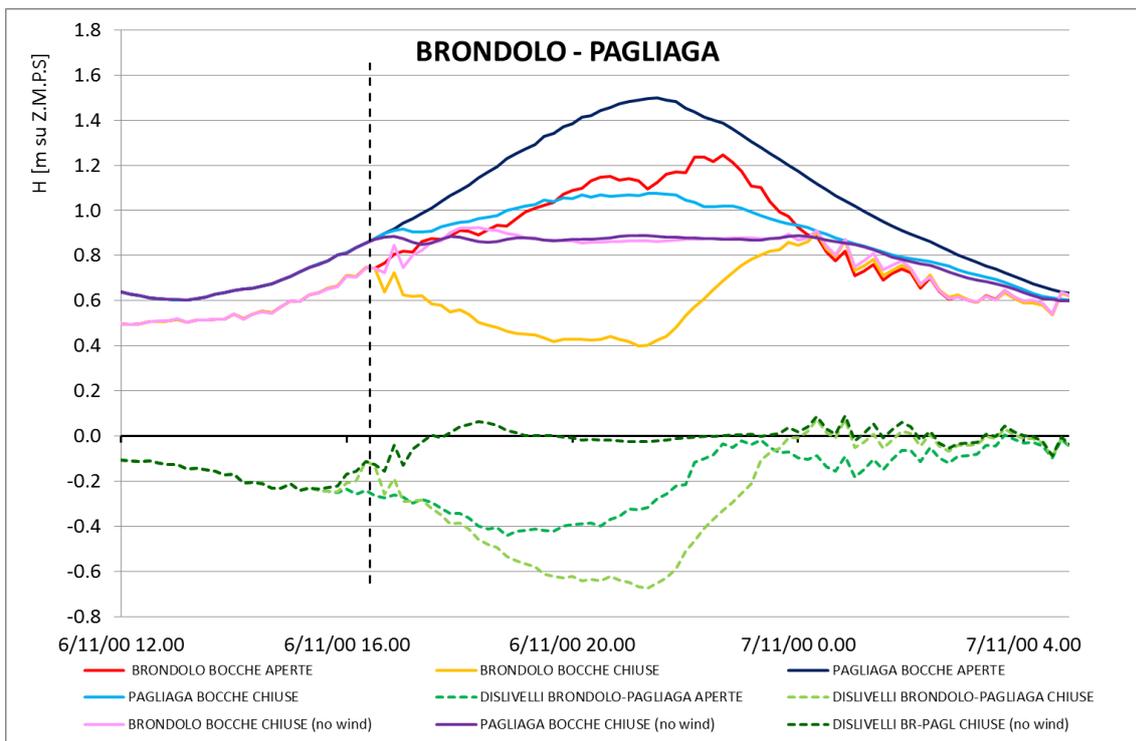
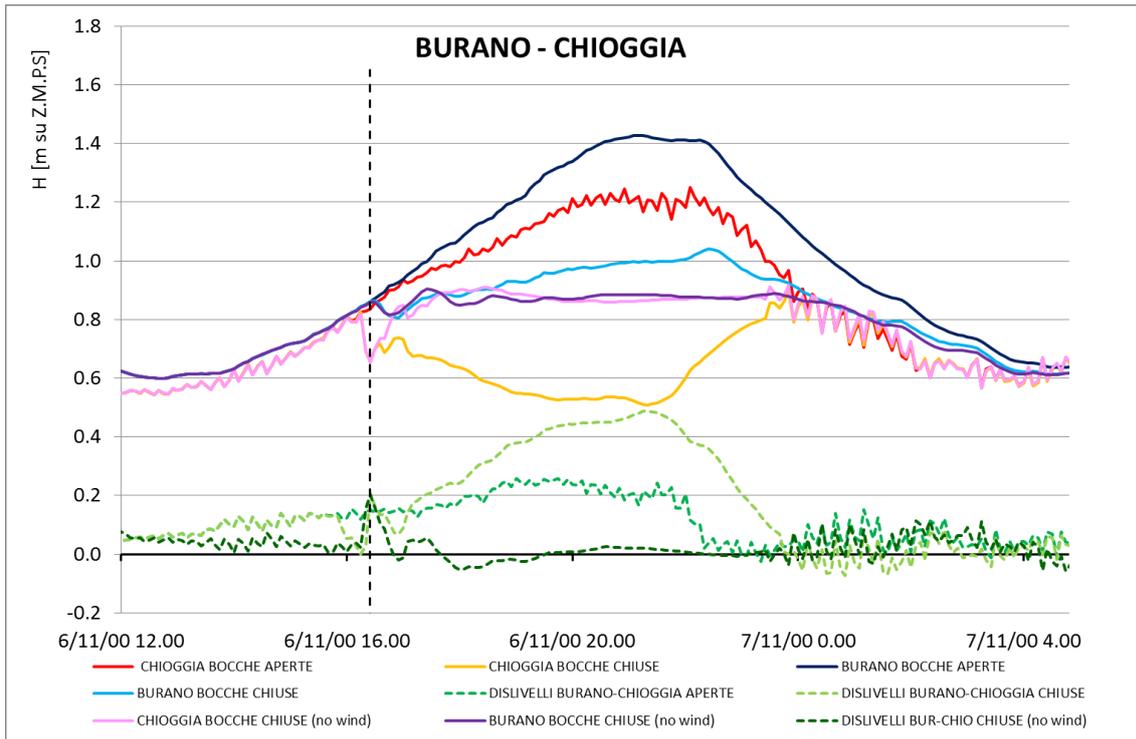
In questa simulazione la laguna rimane chiusa per poco più di sette ore ma il contributo maggiore al sopralzo dovuto al vento si può osservare nelle prime 5 ore di chiusura.

Vediamo quindi i grafici, premettendo che il riassunto dei dislivelli tra stazioni viene lasciato alla fine, assieme ai commenti.

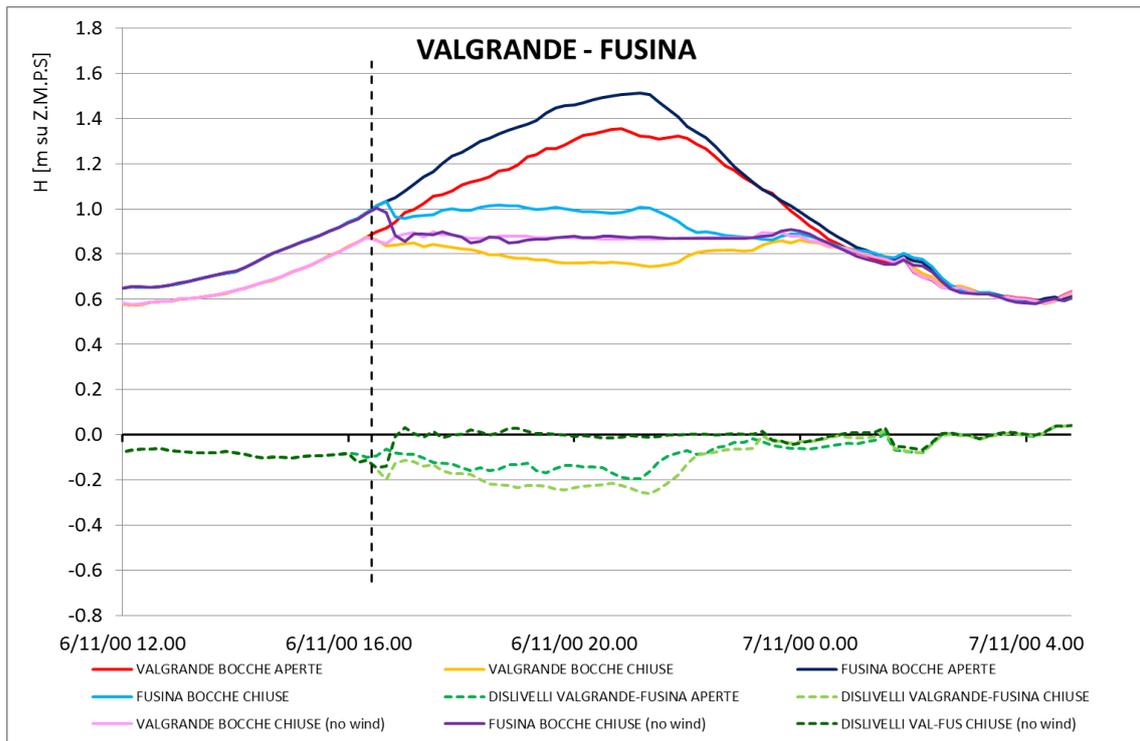
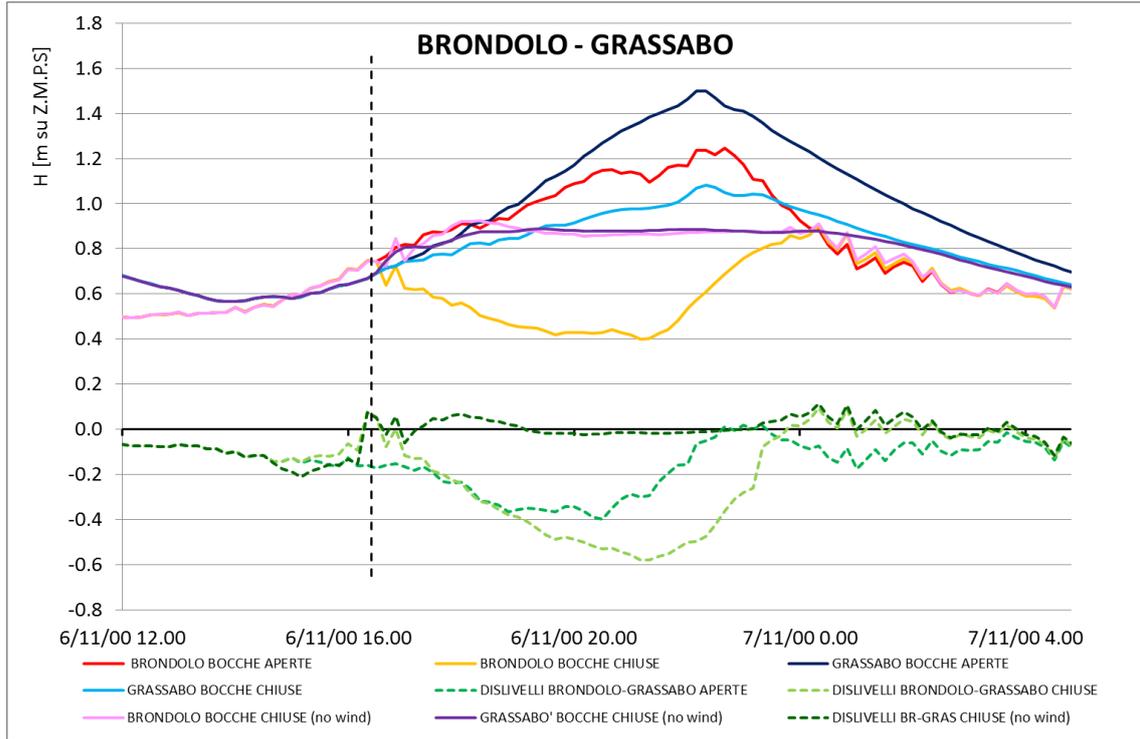


6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHHE SUI SOPRALZI





6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI



## Evento del 13 novembre 2001

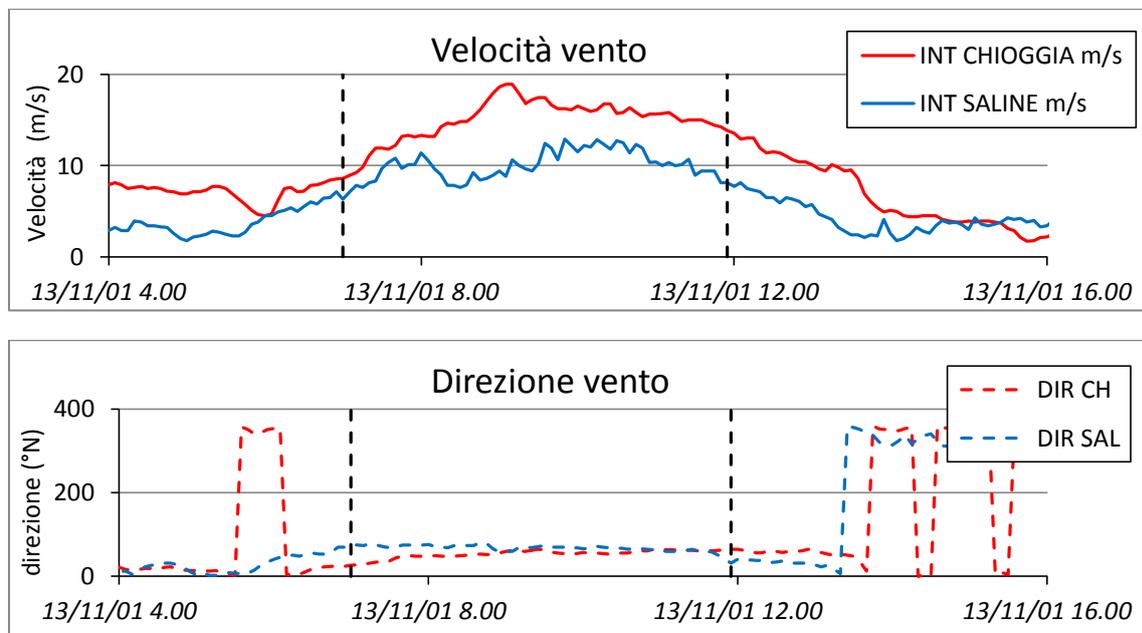
Si tratta di un evento di bora, in cui si sono registrate punte di 125 cm a Chioggia e naturalmente livelli inferiori (115 cm) a Venezia.

Durante la fase per cui è prevista la chiusura delle bocche l'intensità aumenta da 10 a una punta di 18,5 m/s per poi decrescere lentamente. Si può osservare come l'andamento dell'intensità del vento abbia curiosamente seguito l'andamento della marea, infatti la fase di aumento di intensità corrisponde alla marea astronomica crescente, il picco di intensità è quasi corrisposto al colmo di marea, questa fatalità ha fatto sì che i due contributi di marea, astronomica e meteorologica venissero esaltati. Si può notare dagli andamenti dei livelli soprattutto delle stazioni a sud l'andamento quasi a cuspidato dell'onda di marea (basti vedere Brondolo) conseguenza appunto del forte contributo al soprizzo dato dalla velocità di picco del vento.

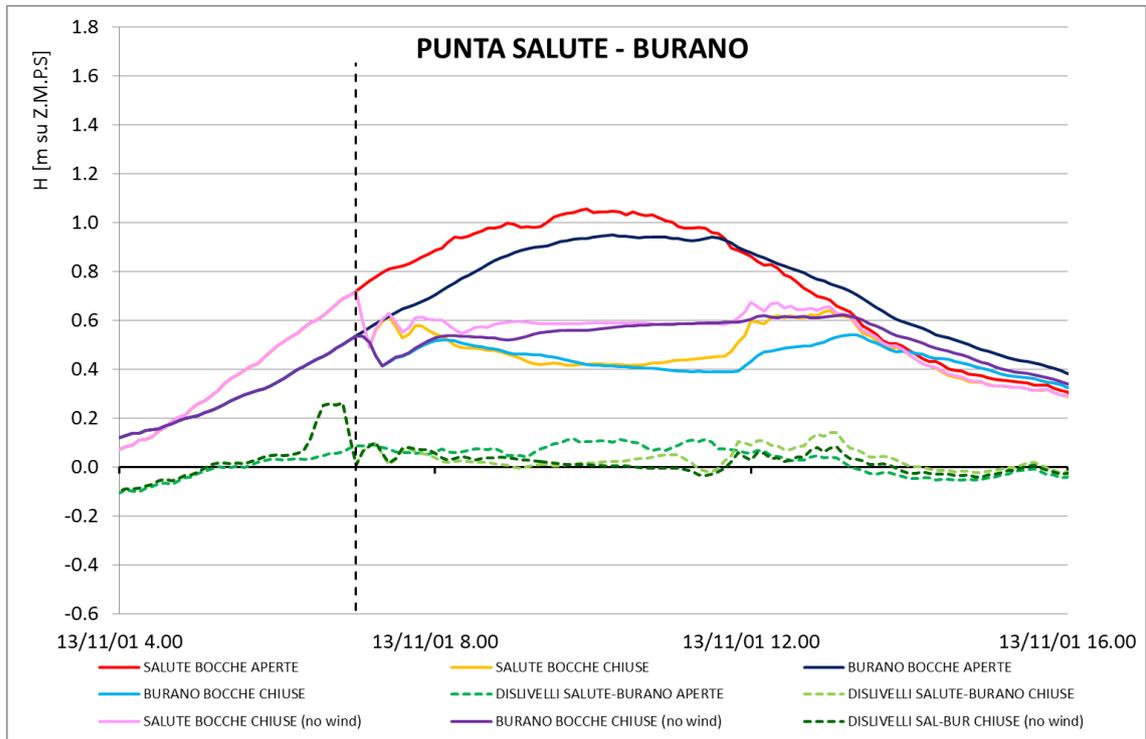
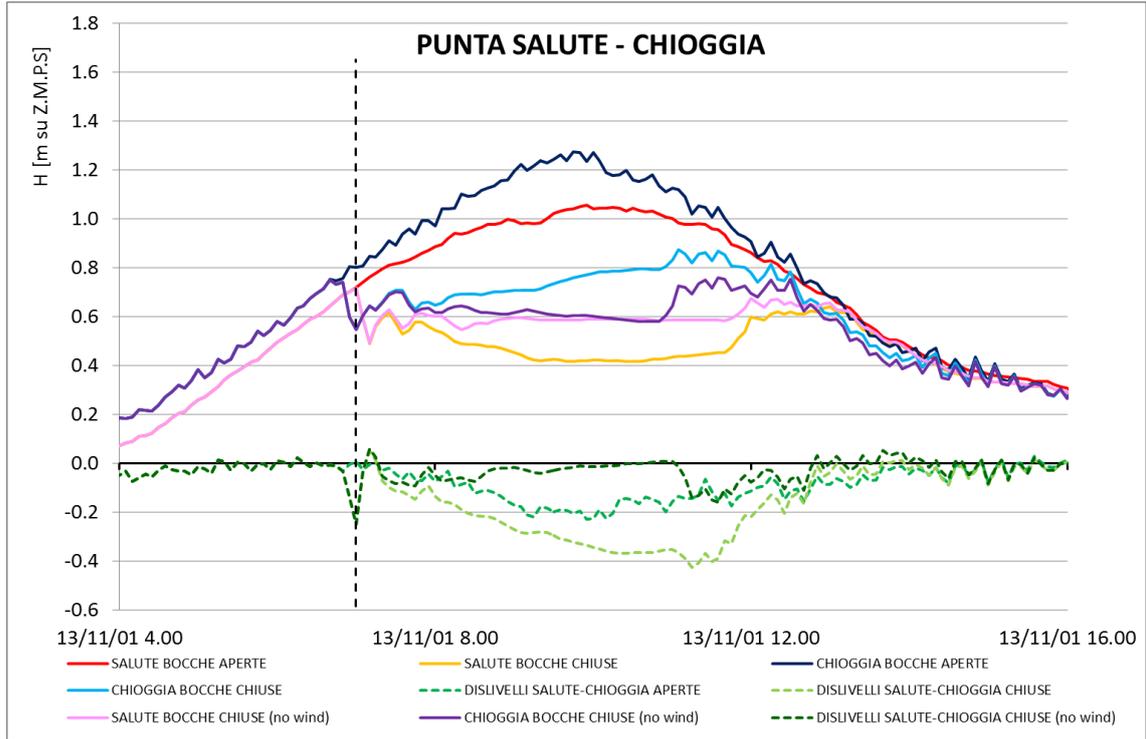
La direzione invece si mantiene circa costante.

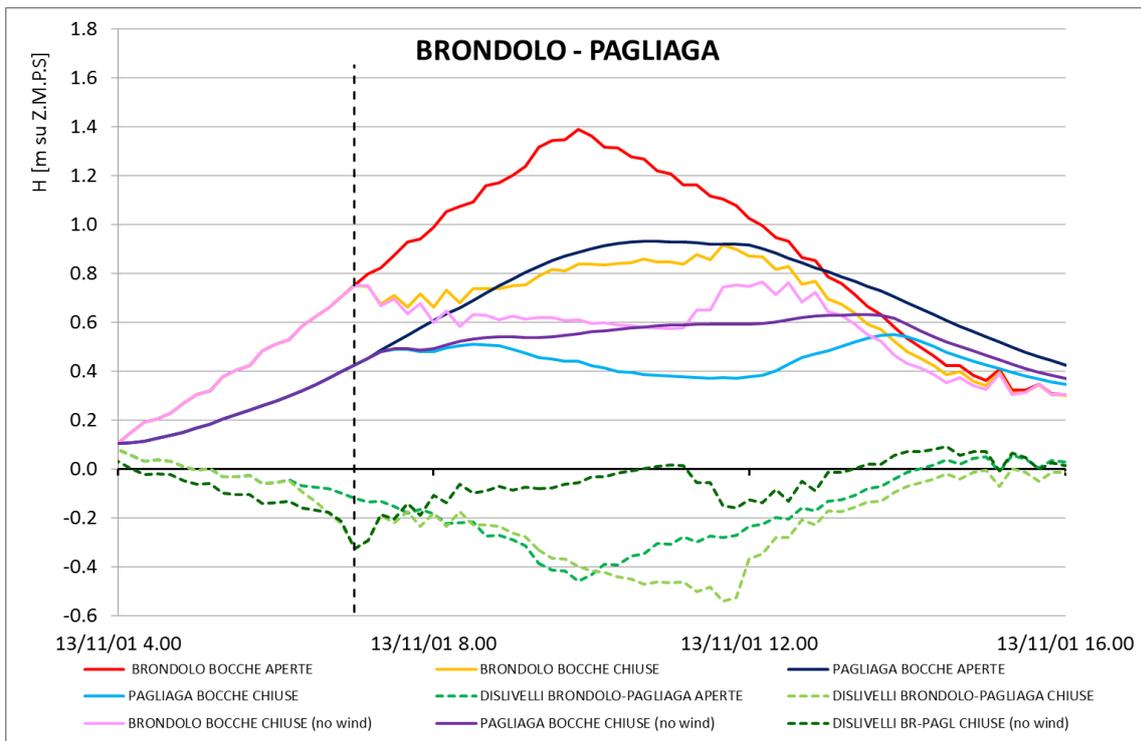
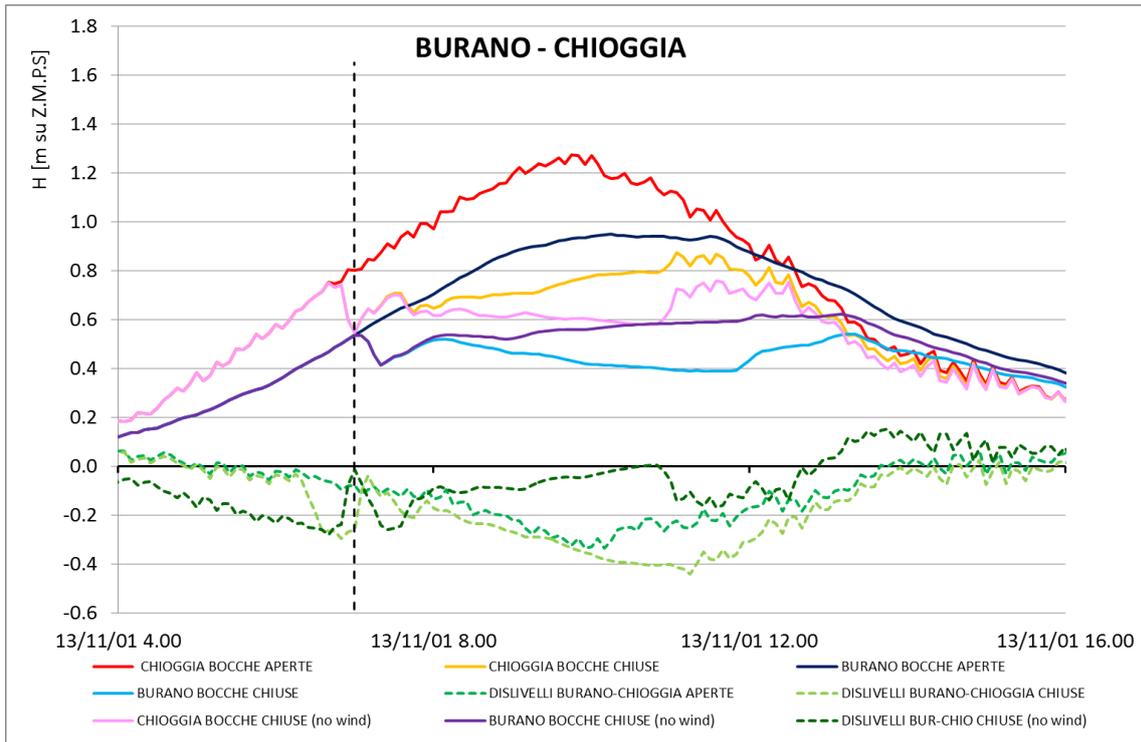
La durata della chiusura che abbiamo previsto è di 5 ore.

In questo, come in tutti gli eventi di bora sarà interessante osservare, come crescono i dislivelli soprattutto nella zona sud della laguna.

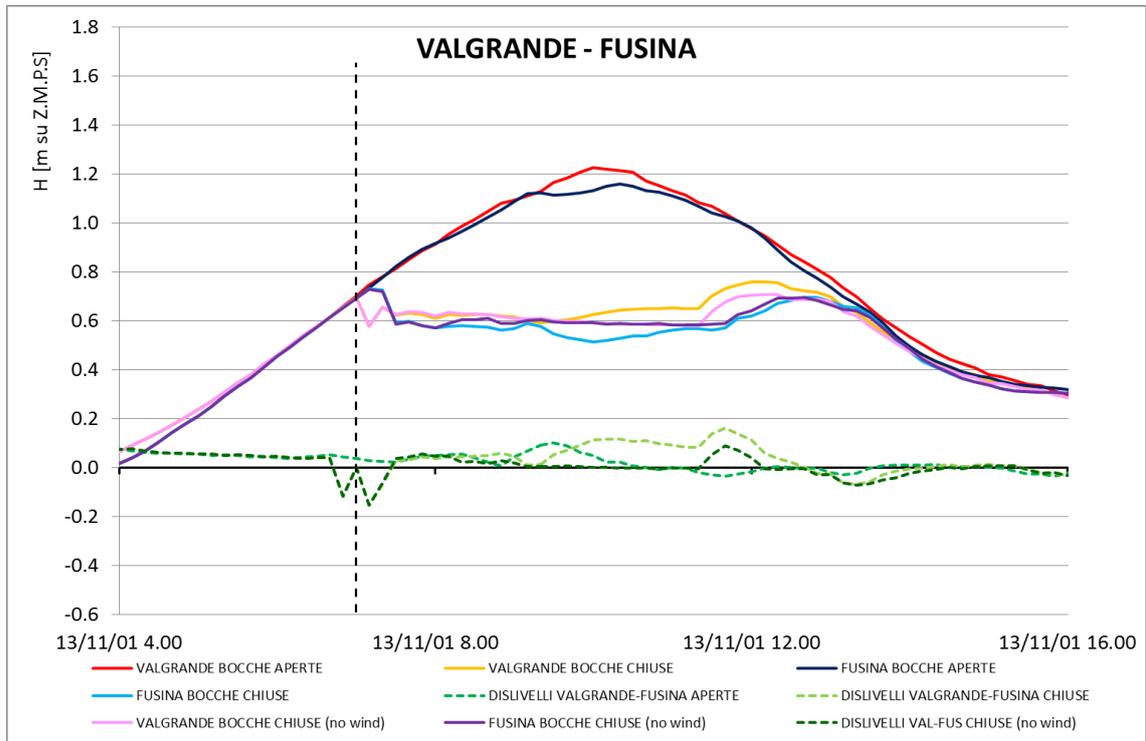
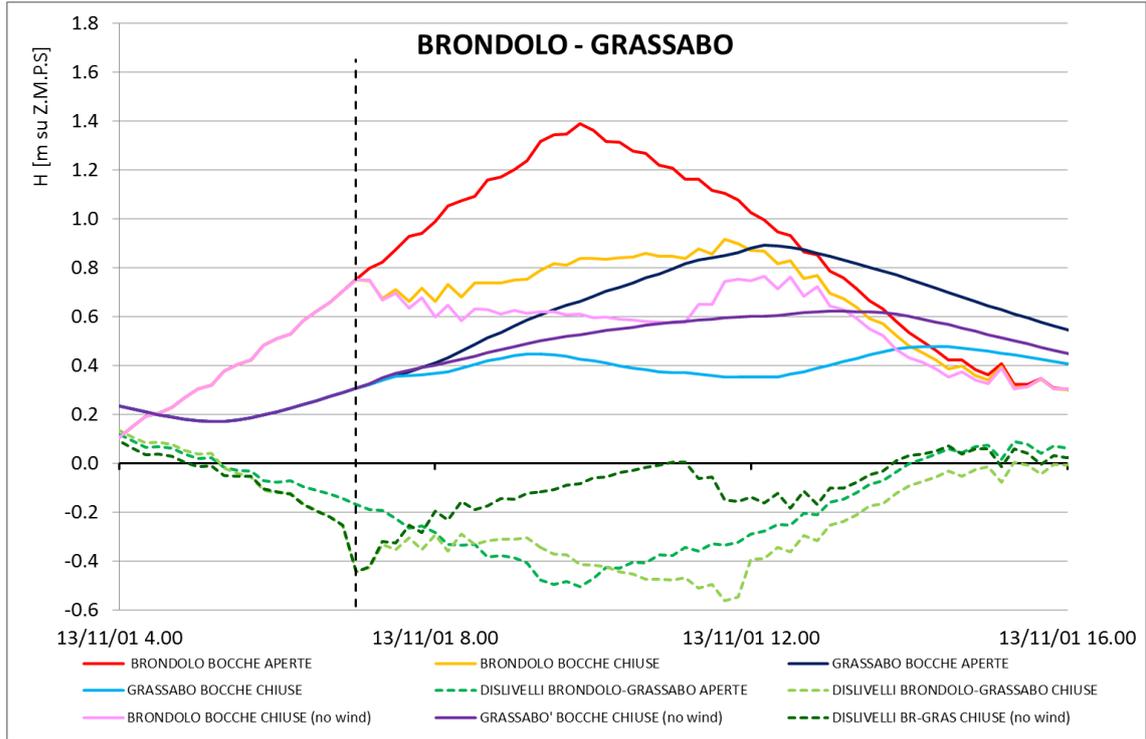


6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHHE SUI SOPRALZI





6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI



## Evento del 16 novembre 2002

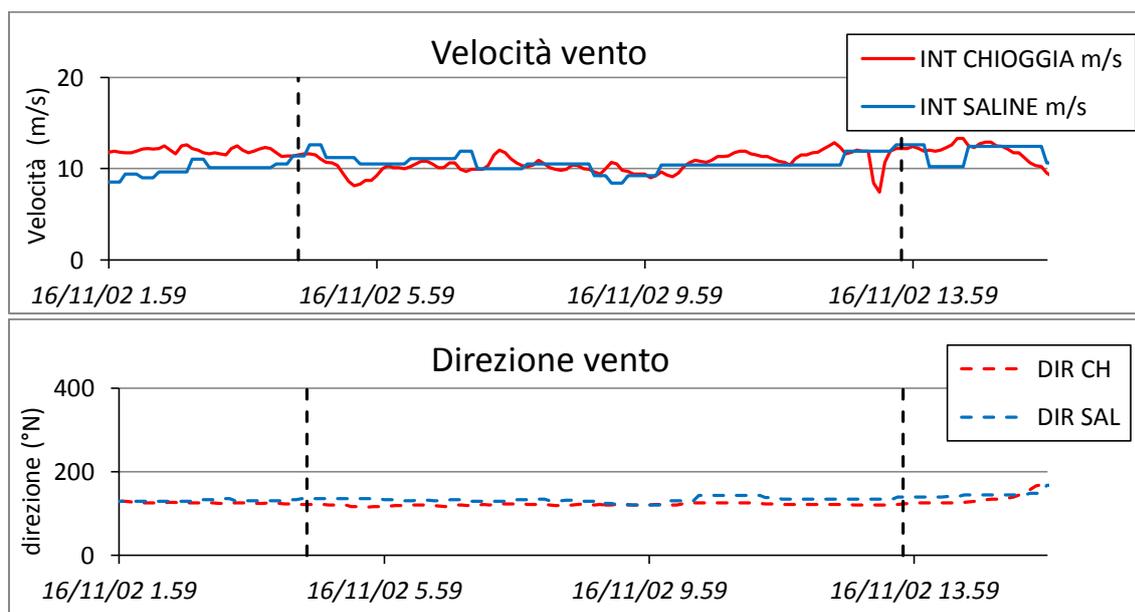
L'evento eccezionale di acqua alta del 16 novembre 2002 è il quarto evento in ordine di importanza dal 2000 ad oggi.

Sabato 16 novembre 2002 alle ore 9:45 venne registrata a Punta della Salute una punta massima di +147 cm. Già il 15 novembre si erano verificate due maree sostenute, con valori massimi di 103 cm (ore 8:10) e 102 cm (ore 20.25). La mattina successiva si è verificata l'acqua alta eccezionale, dopodiché la marea è scesa poco, segnando una minima alle 15:10 di 92 cm. La successiva punta massima, alle ore 19:55, è stata di 126 cm (marea molto sostenuta). Si tratta di uno dei rari casi in cui vi sono state due punte superiori ai 110 cm in un giorno. Noi tuttavia prenderemo in considerazione il primo picco in quanto è quello caratterizzato da vento più intenso e circa costante in tutto il periodo di chiusura delle bocche, pari a circa 10 m/s. Il vento poi ruoterà e calerà rapidamente dopo le 15. Si tratta di un evento di scirocco.

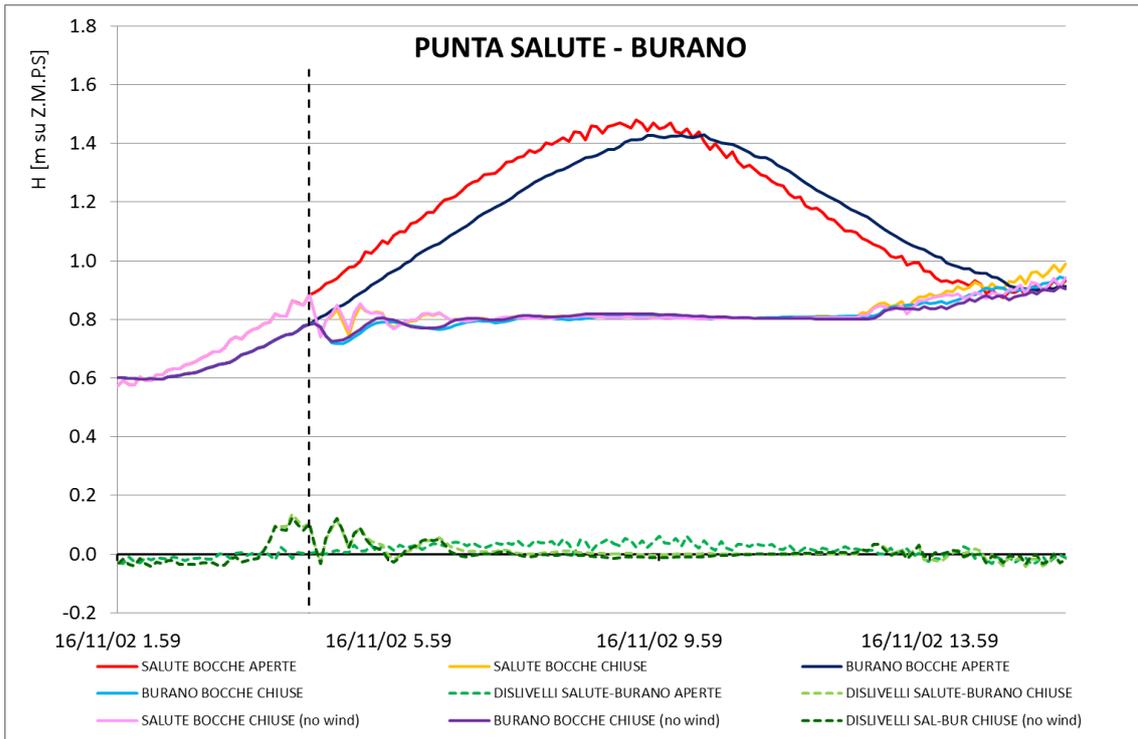
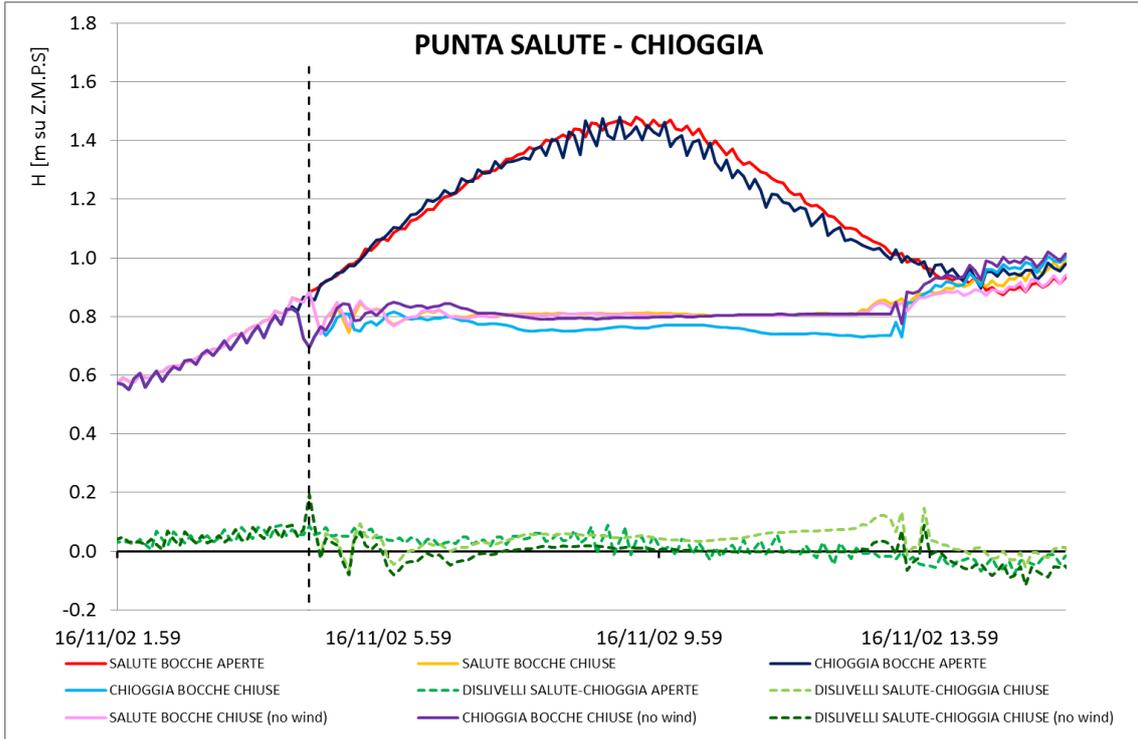
Si è prevista la chiusura della laguna per 9 ore solo per questo picco.

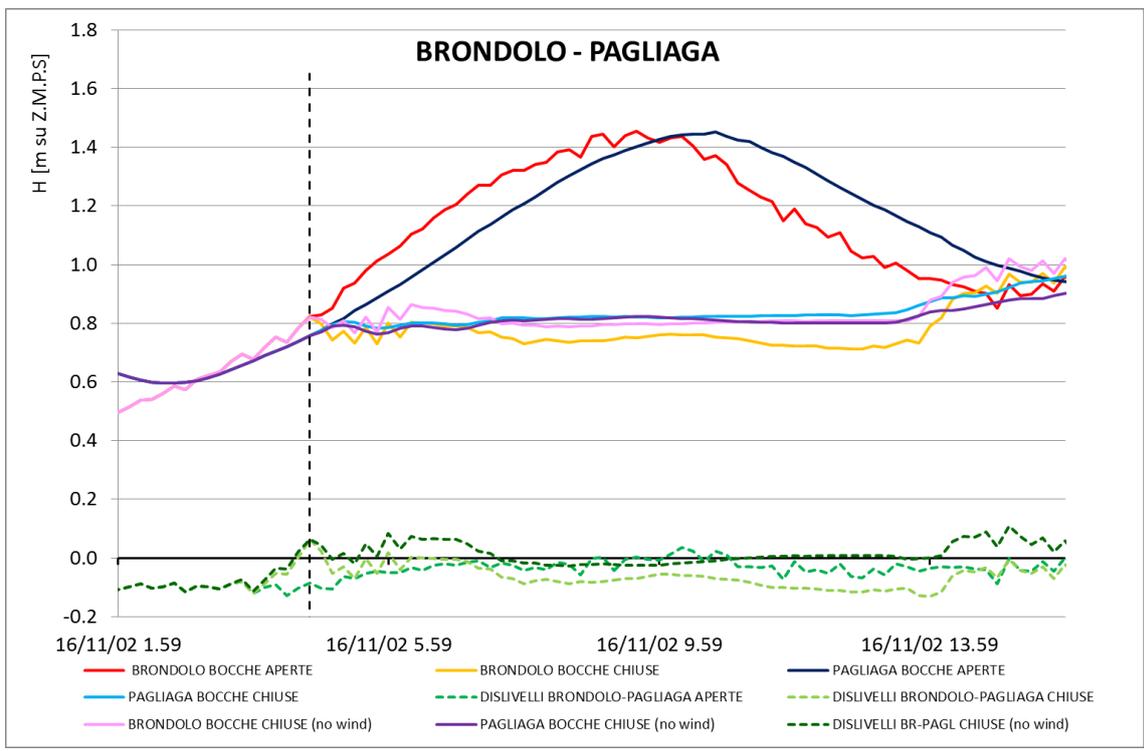
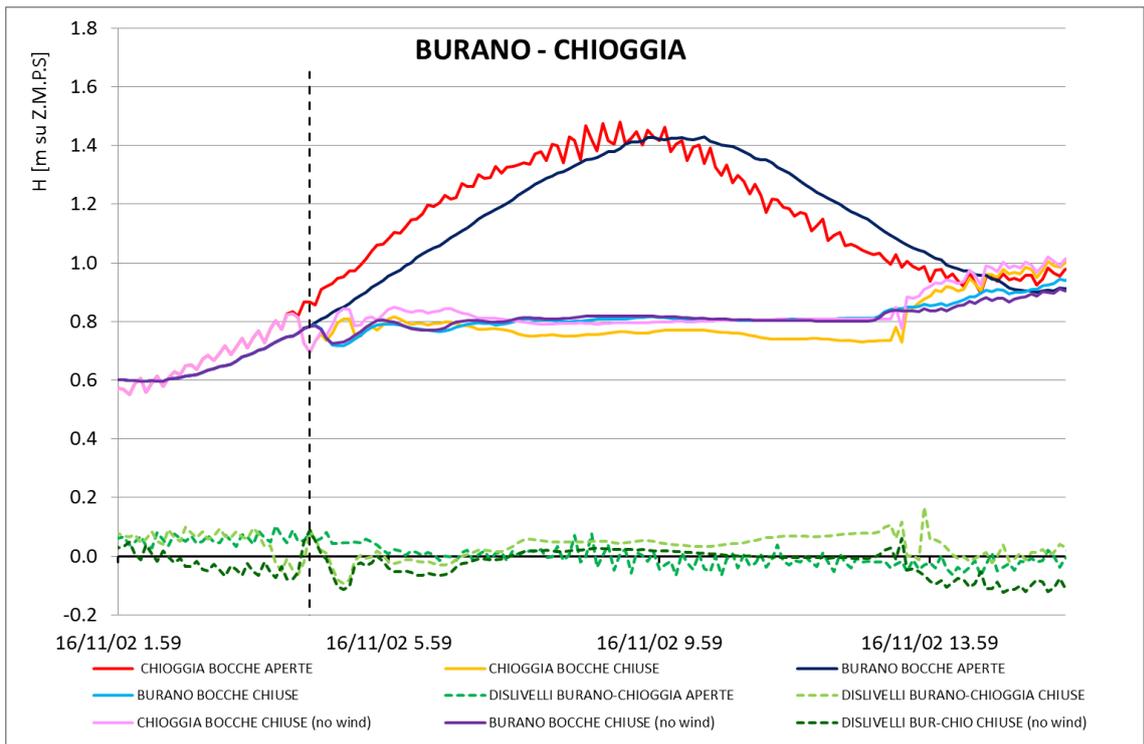
L'andamento dei dislivelli a bocche chiuse segue praticamente l'andamento del vento, essi infatti si mantengono circa costanti per poi aumentare leggermente nella fase finale.

Come si può vedere dall'andamento dei dati di vento, la stazione delle Saline presentava delle discontinuità nelle rilevazioni, essi quindi sono stati ricostruiti basandosi anche sull'andamento di Chioggia.

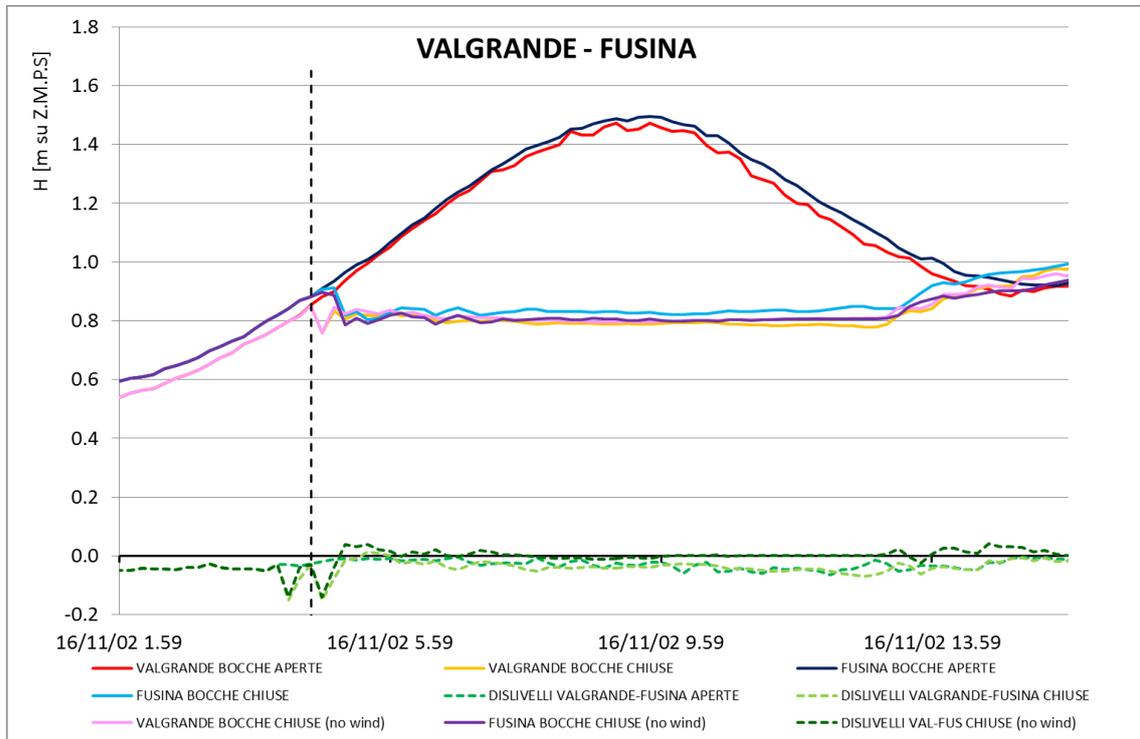
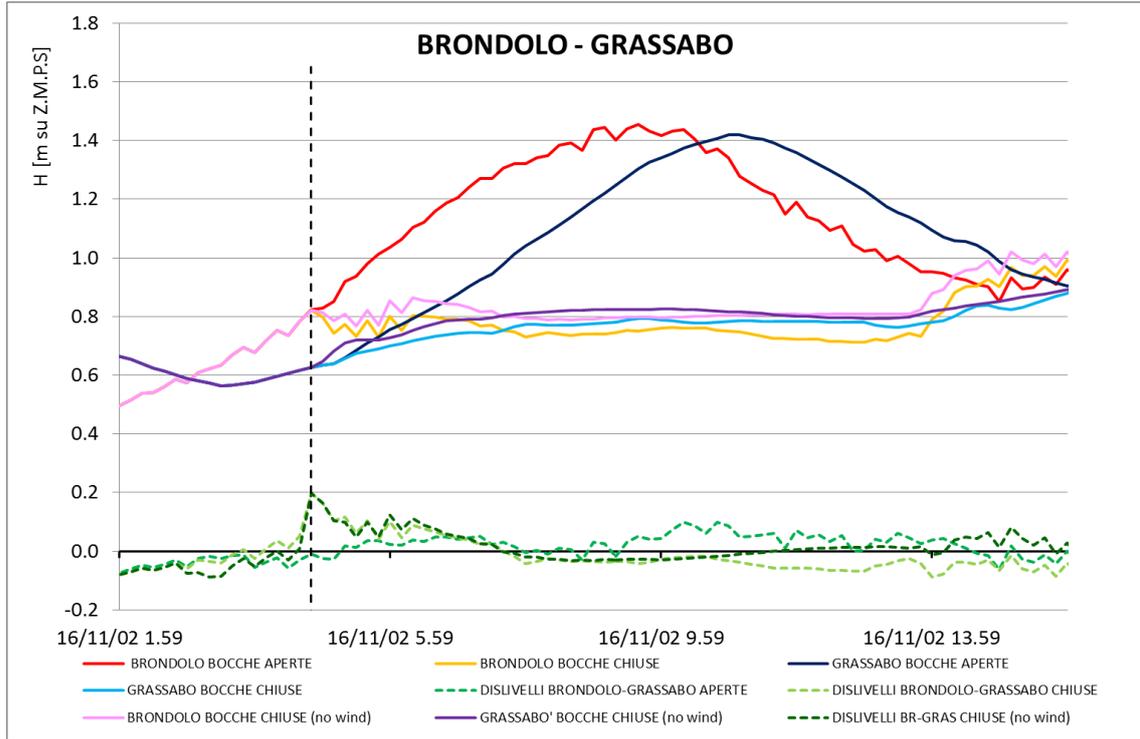


6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI





6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI



## Evento del 10 novembre 2004

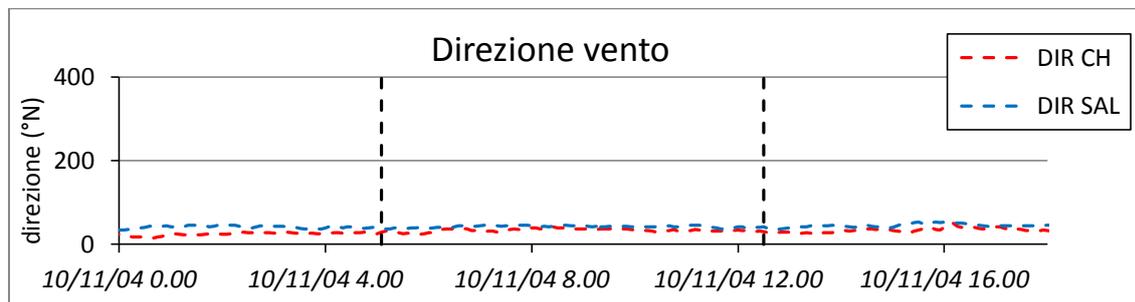
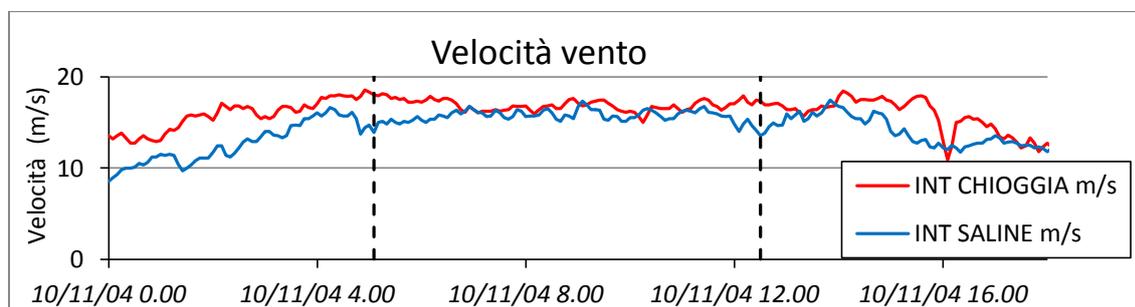
L'evento del 10 novembre 2004 è molto importante dal punto di vista del contributo del vento dato alla marea di sigizie. Esso ha determinato un picco di 124 cm a Venezia allagando il 70% del centro storico e un picco di 144 cm a Chioggia.

Si tratta di un evento di bora in cui il vento ha raggiunto la velocità di 18.3 m/s e ha mantenuto una media di poco inferiore per tutta la durata di prevista chiusura delle bocche, ossia 7 ore e mezza.

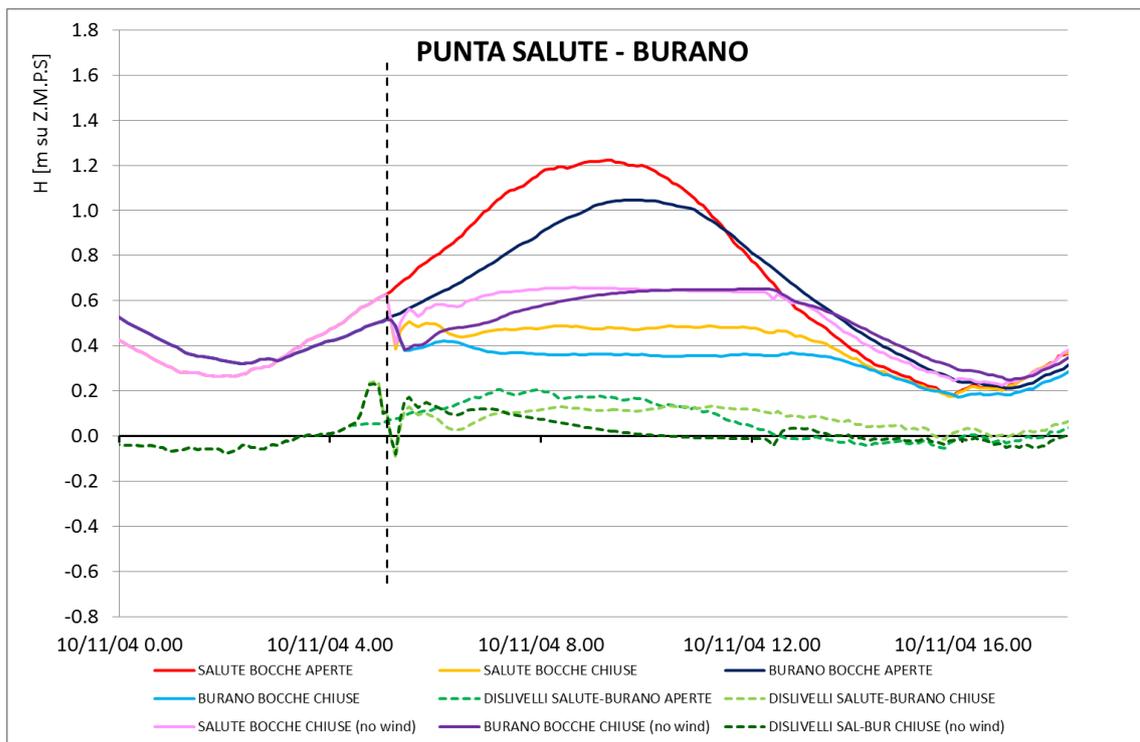
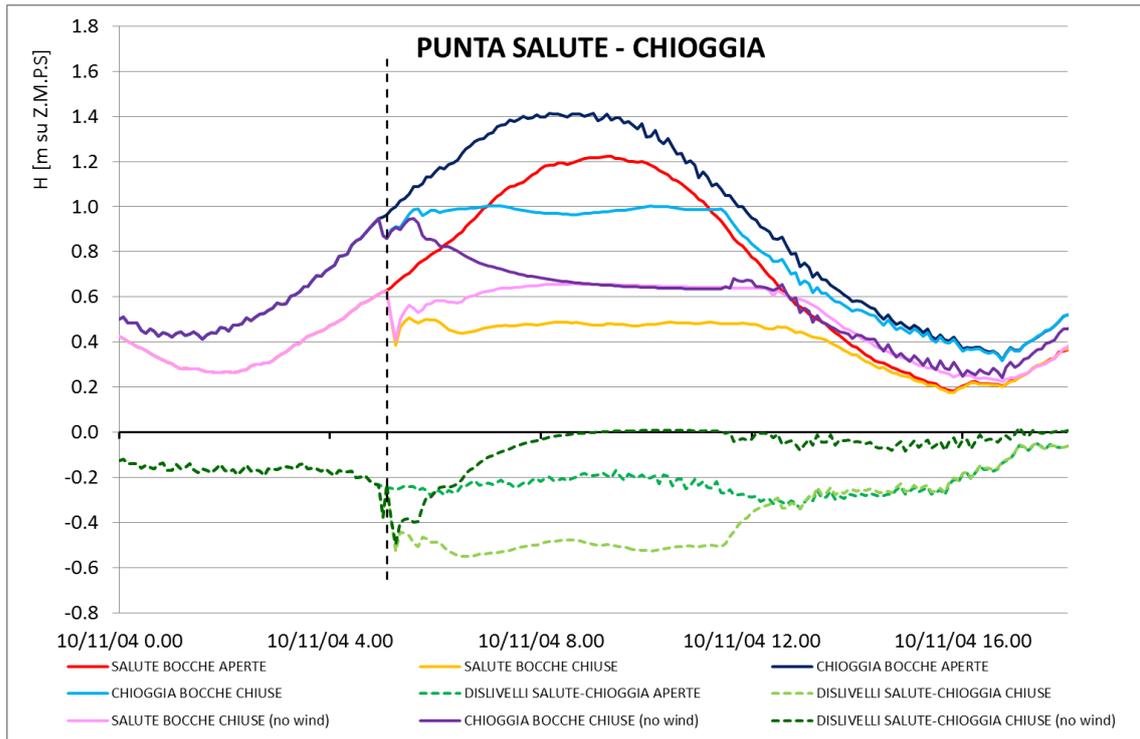
La quasi costanza dell'intensità del vento permette di delineare chiaramente i dislivelli che si vengono a creare tra le stazioni nord e sud in seguito alla chiusura delle bocche.

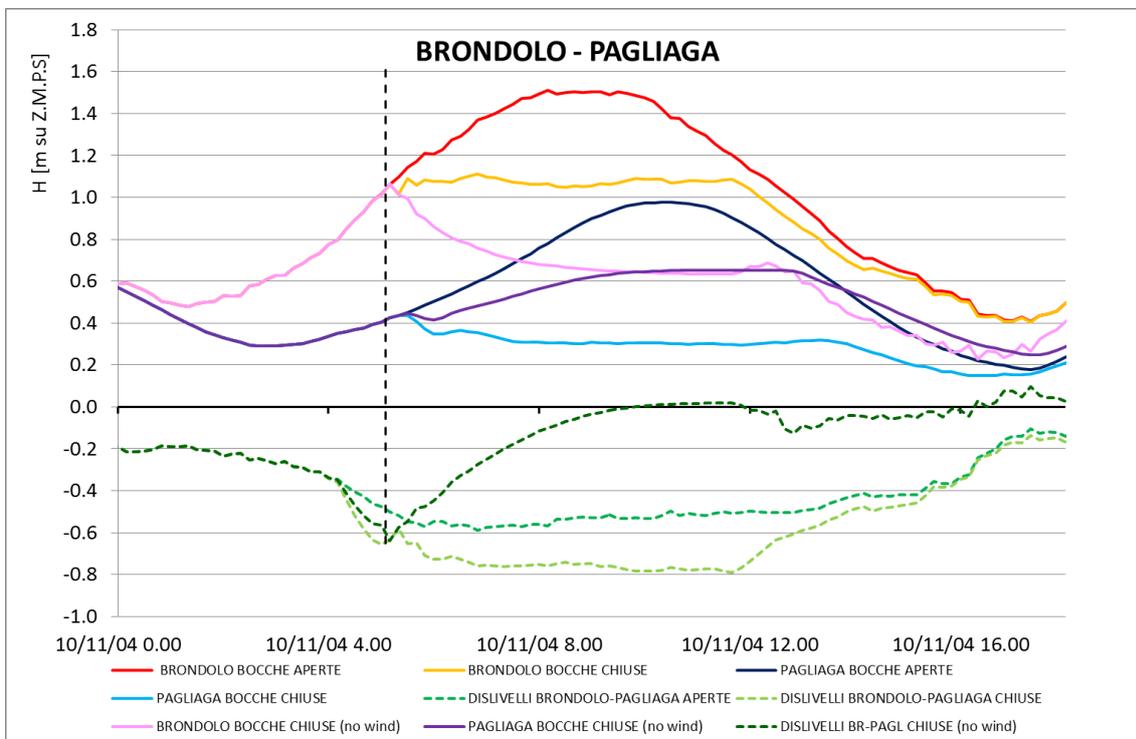
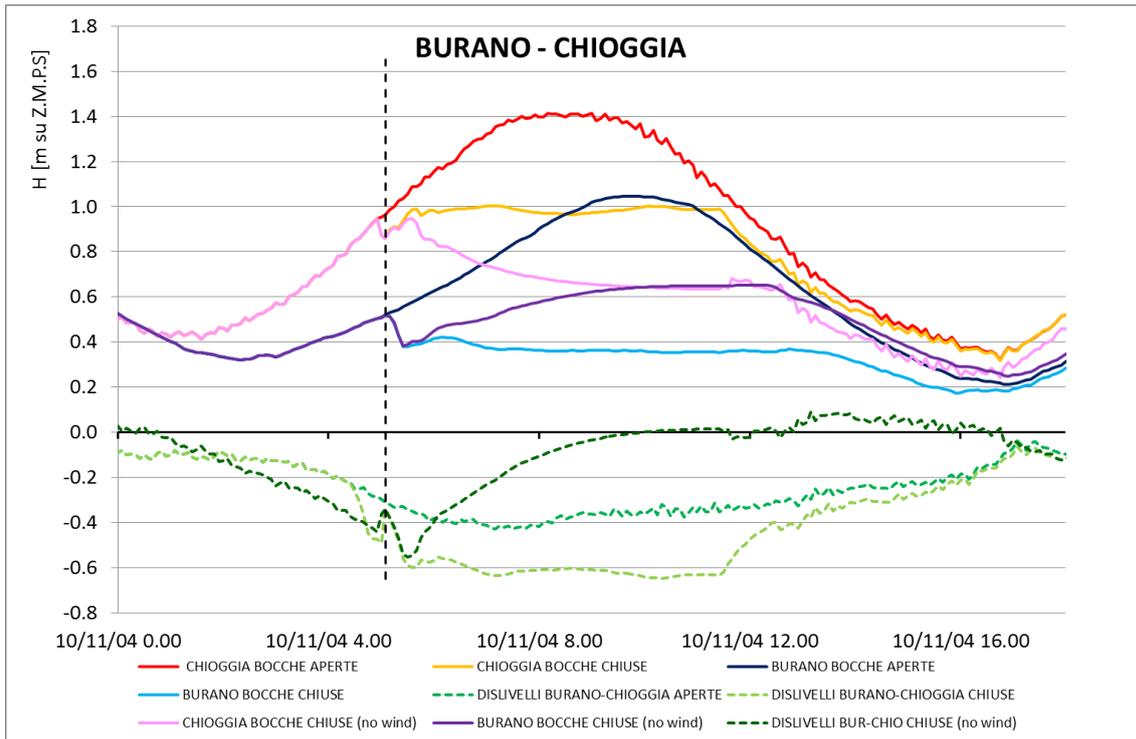
I dislivelli sono mantenuti costanti per tutta la durata della chiusura in quanto il vento con la sua spinta sostiene per tutto il periodo considerato la massa d'acqua nella zona sud. Si registrano dislivelli davvero notevoli: in media 50 cm tra Punta Salute e Chioggia e quasi 90 cm tra Brondolo e Grassabò poste ai due estremi della laguna.

Si faranno in seguito altre considerazioni interessanti riguardo a questo evento.

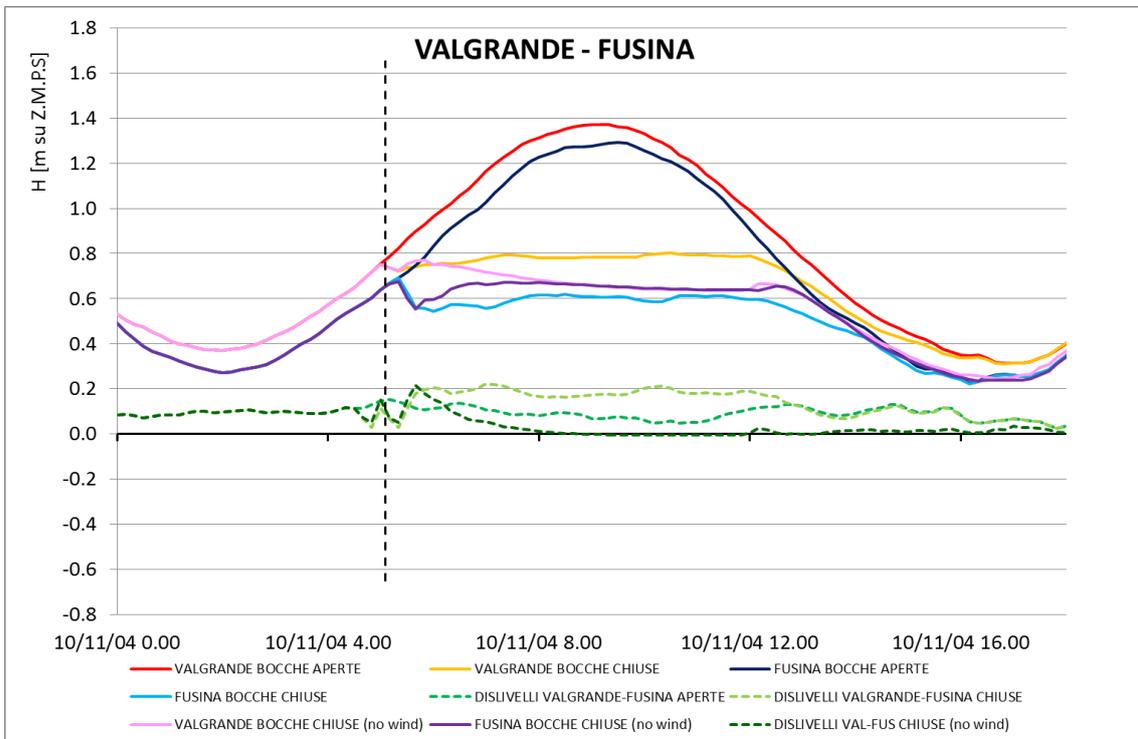
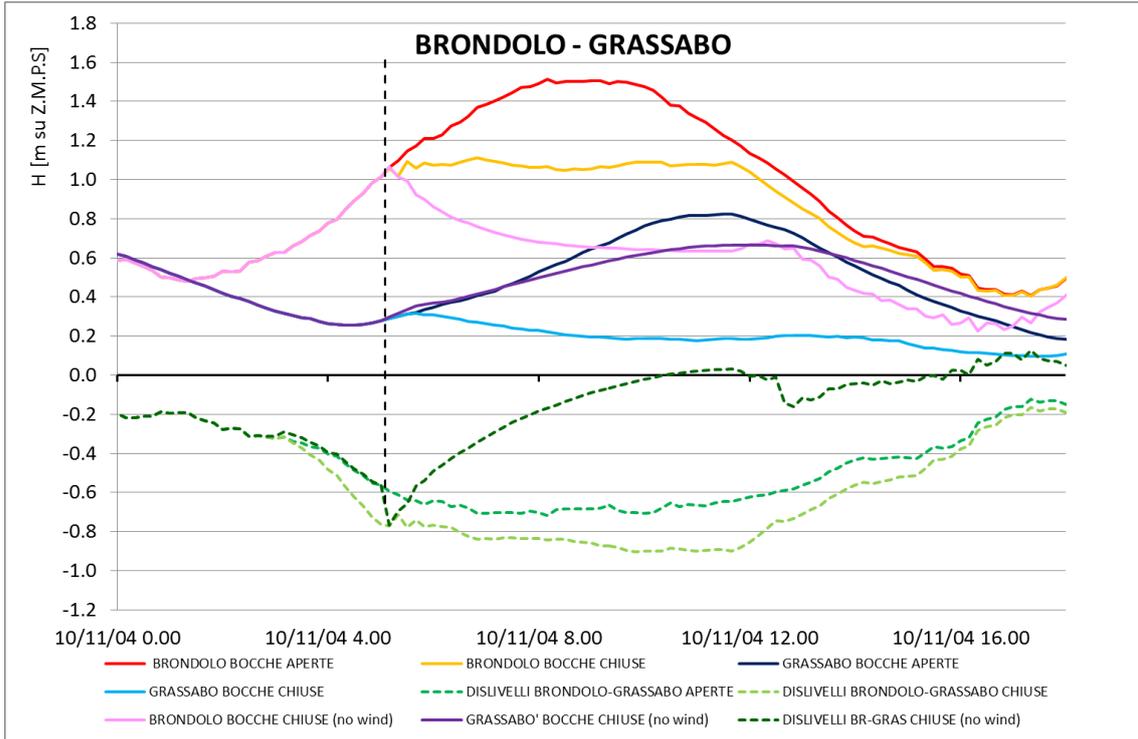


6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHIE SUI SOPRALZI





6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

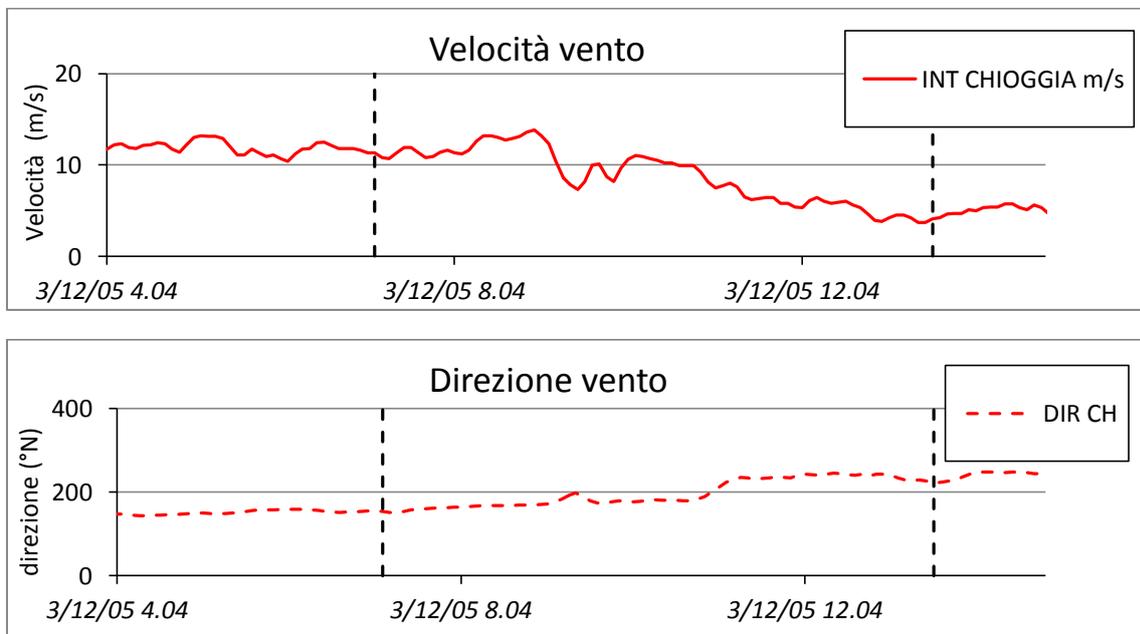


## Evento del 3 dicembre 2005

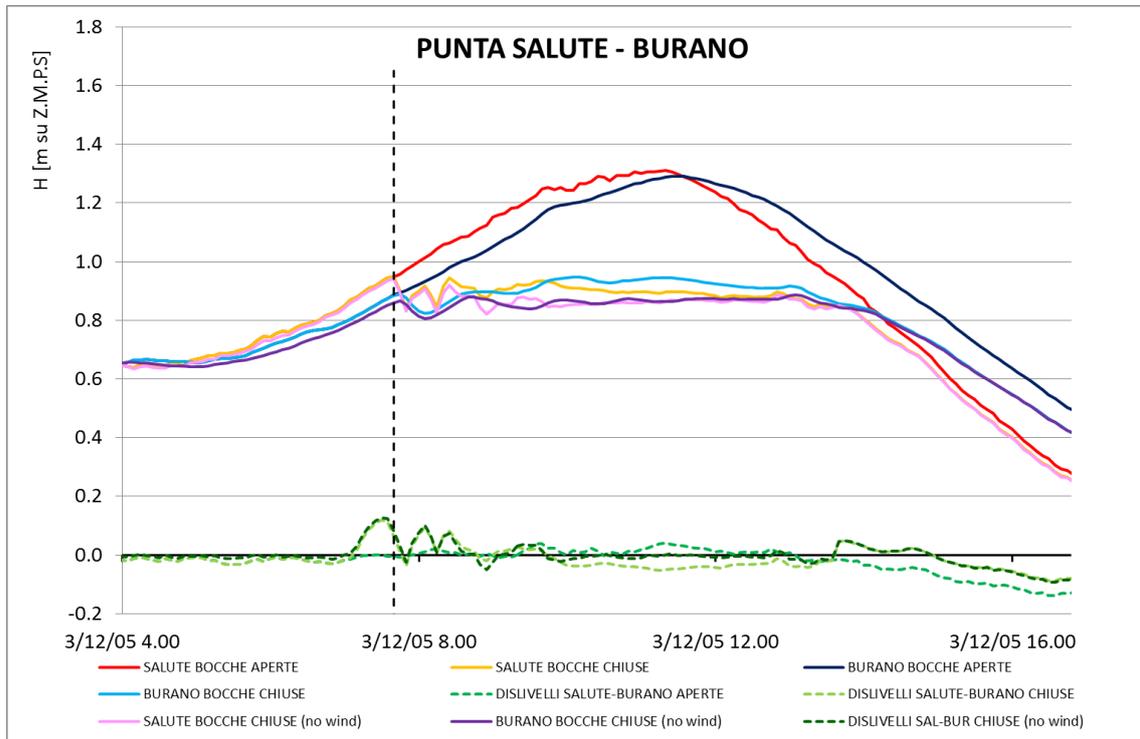
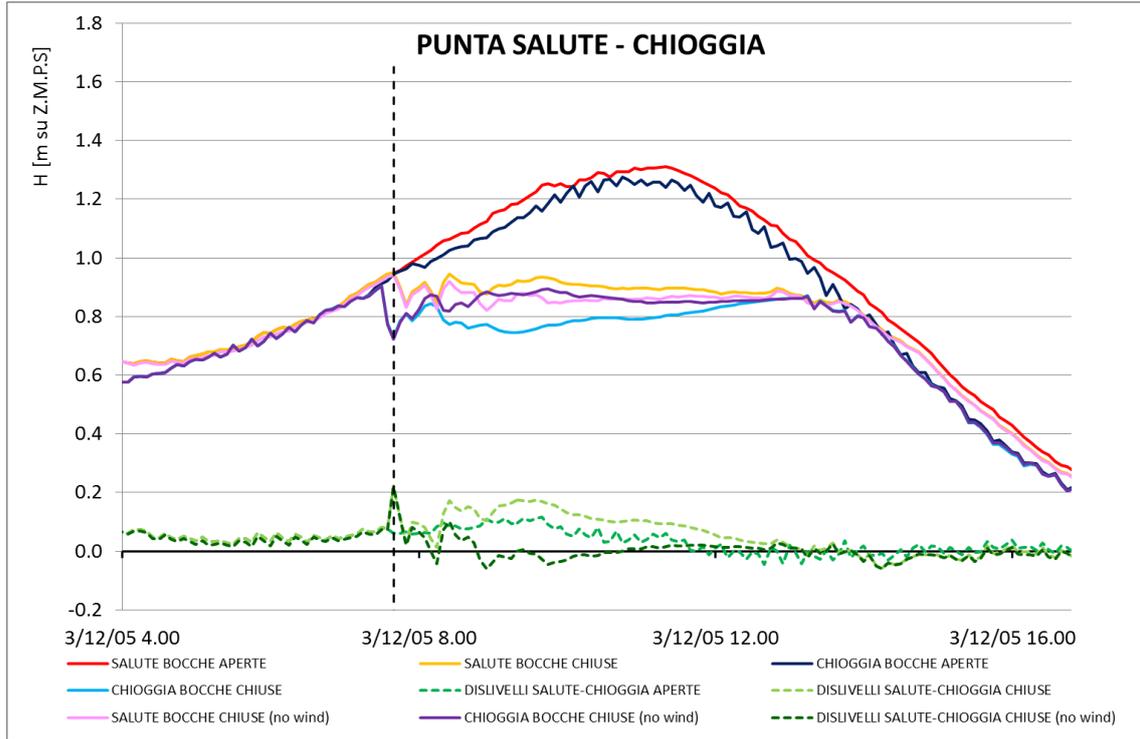
Questo evento è caratterizzato dalla presenza di venti da sud che mantengono una velocità abbastanza elevata di 11 m/s per il primo periodo di chiusura delle bocche, poi dopo un picco di 13 m/s il vento ruota in direzione sud-sud-est e cala.

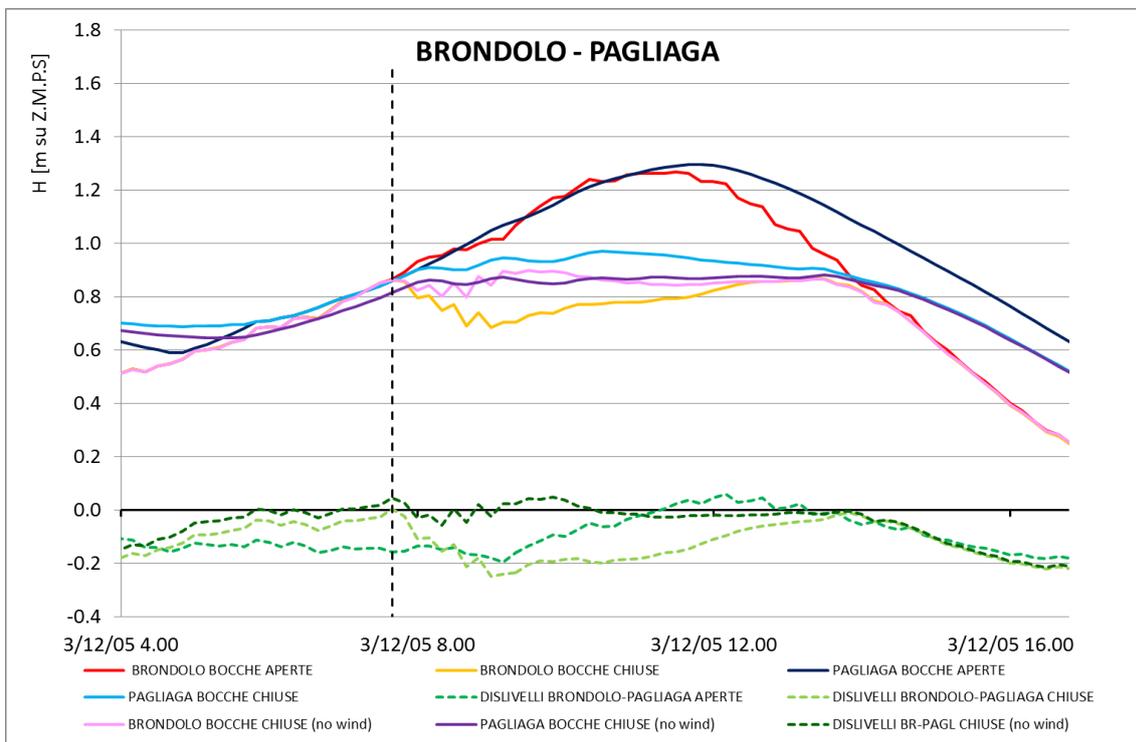
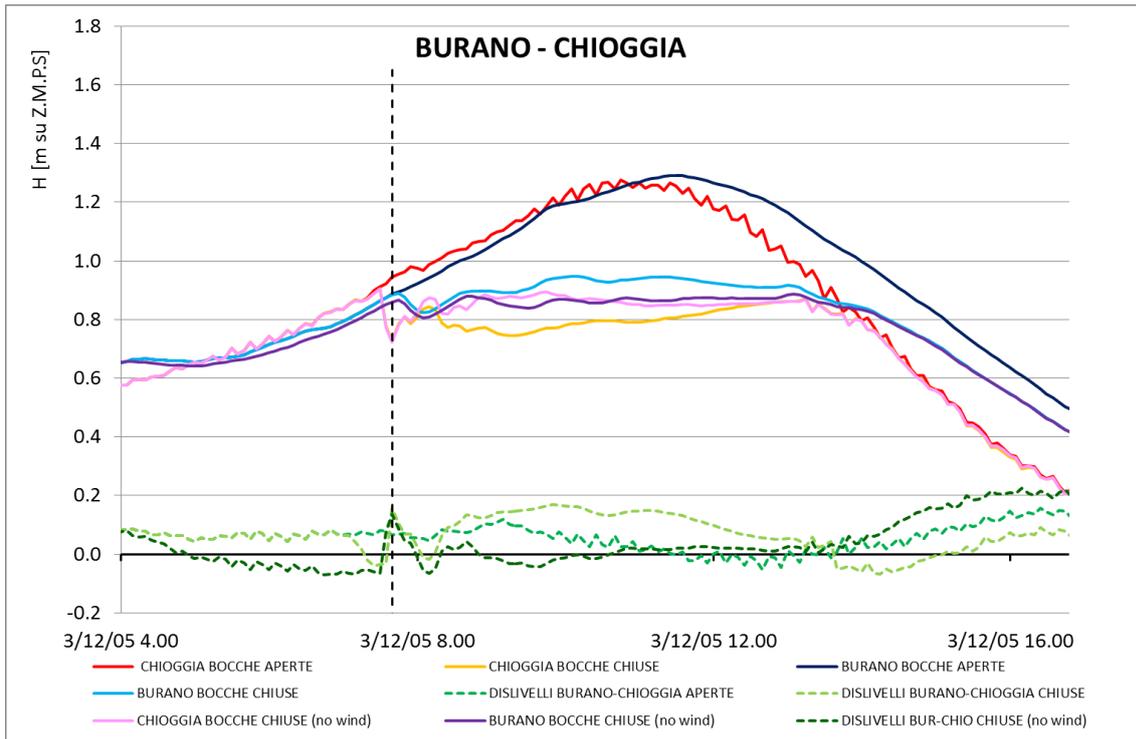
Anche in questo caso l'andamento dei dislivelli segue quello del vento. L'acqua si insacca nella laguna settentrionale determinando i maggiori livelli in stazioni come Grassabò, Pagliaga e Burano.

In questo evento mancavano i dati di vento relativi alle Saline, si è usata quindi la condizione di vento di Chioggia per tutto il bacino.

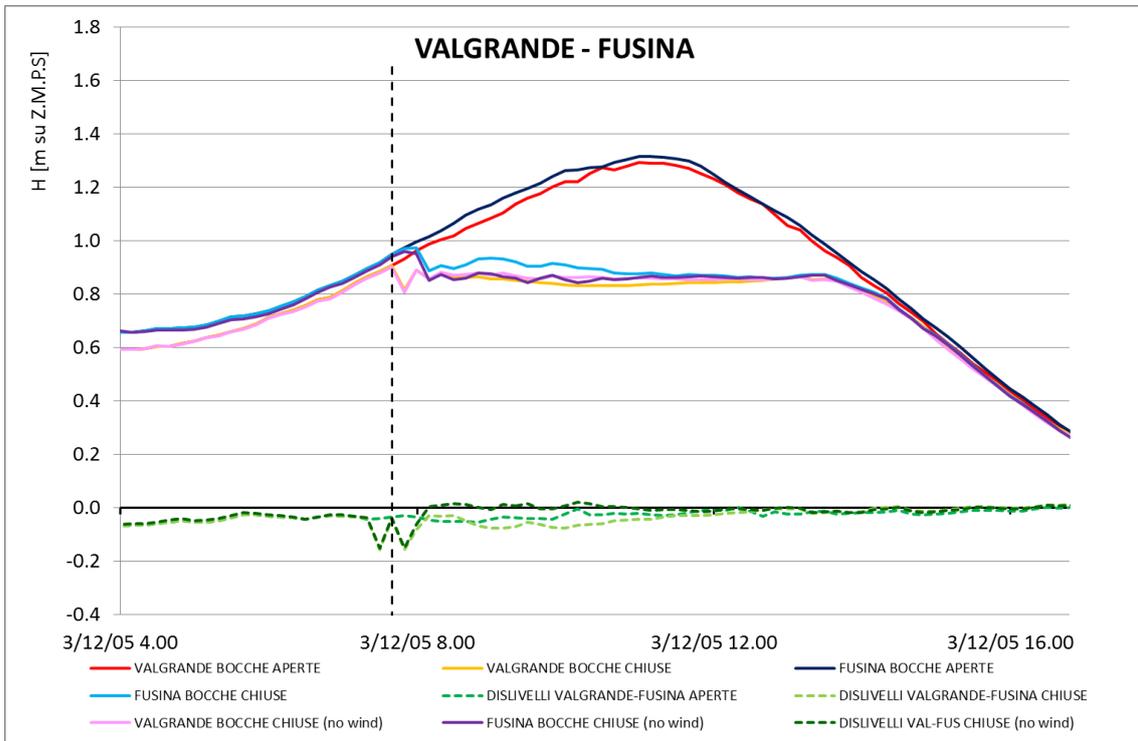
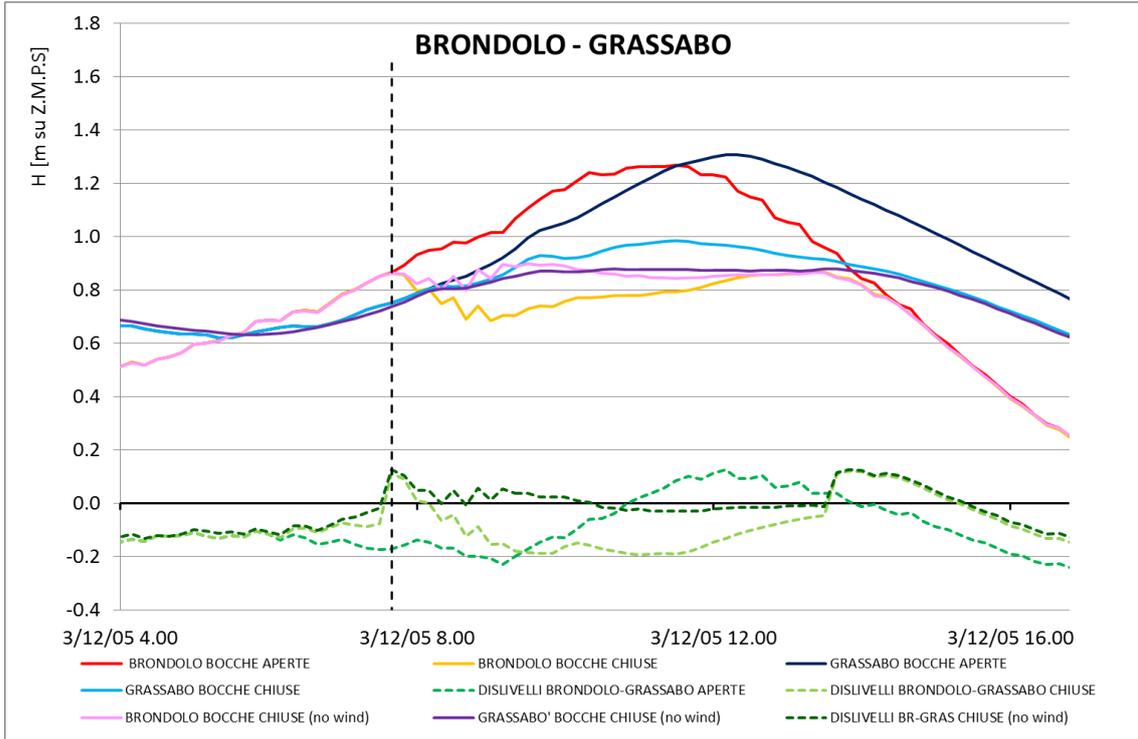


6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHIE SUI SOPRALZI





6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

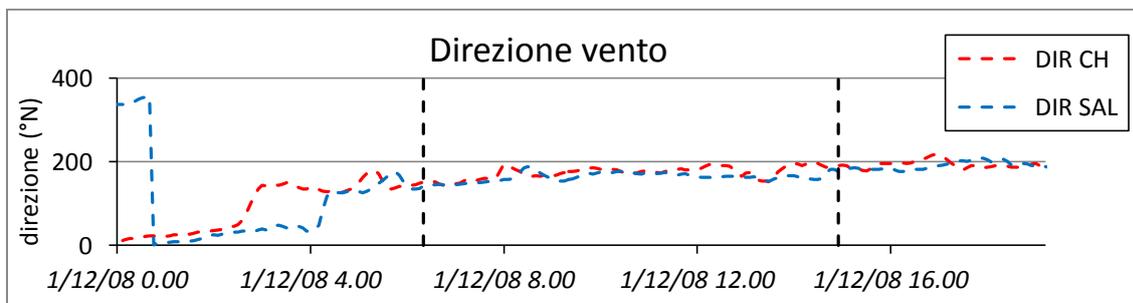
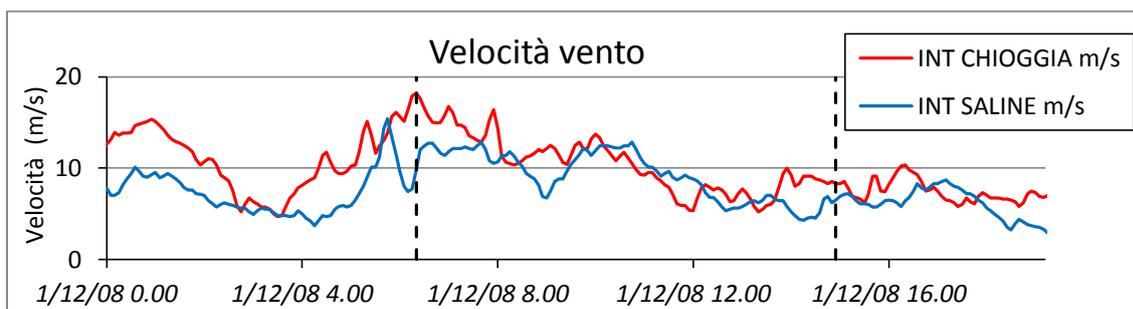


## Evento del 1 dicembre 2008

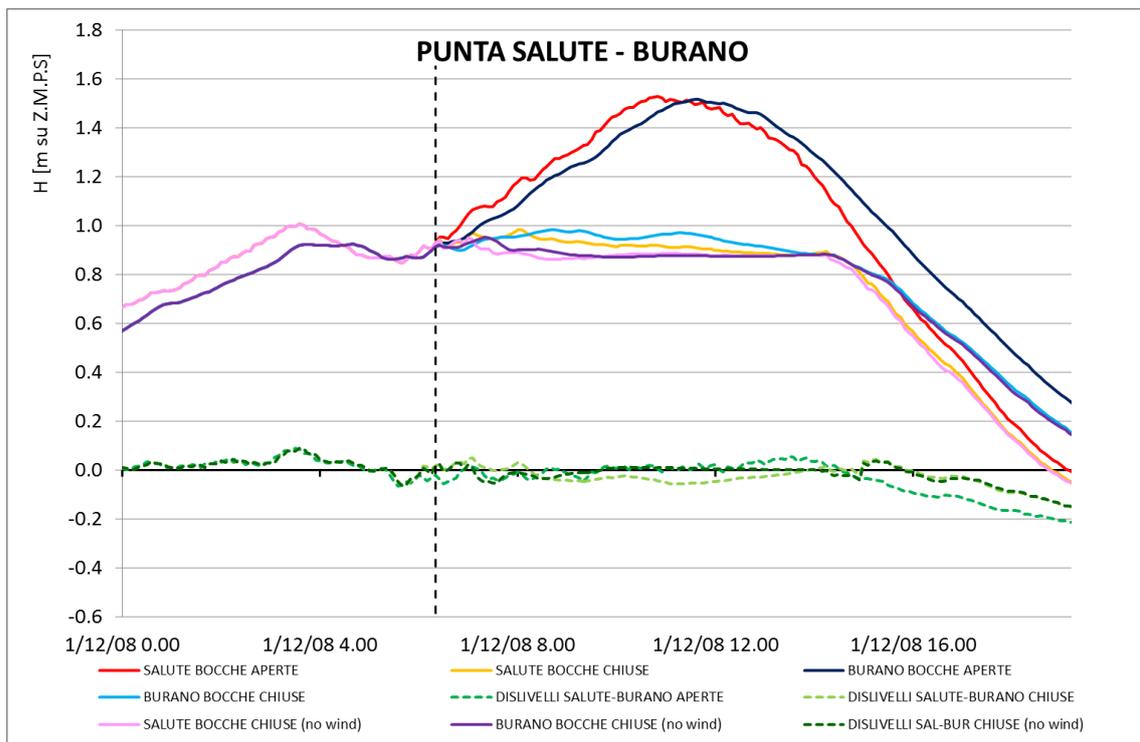
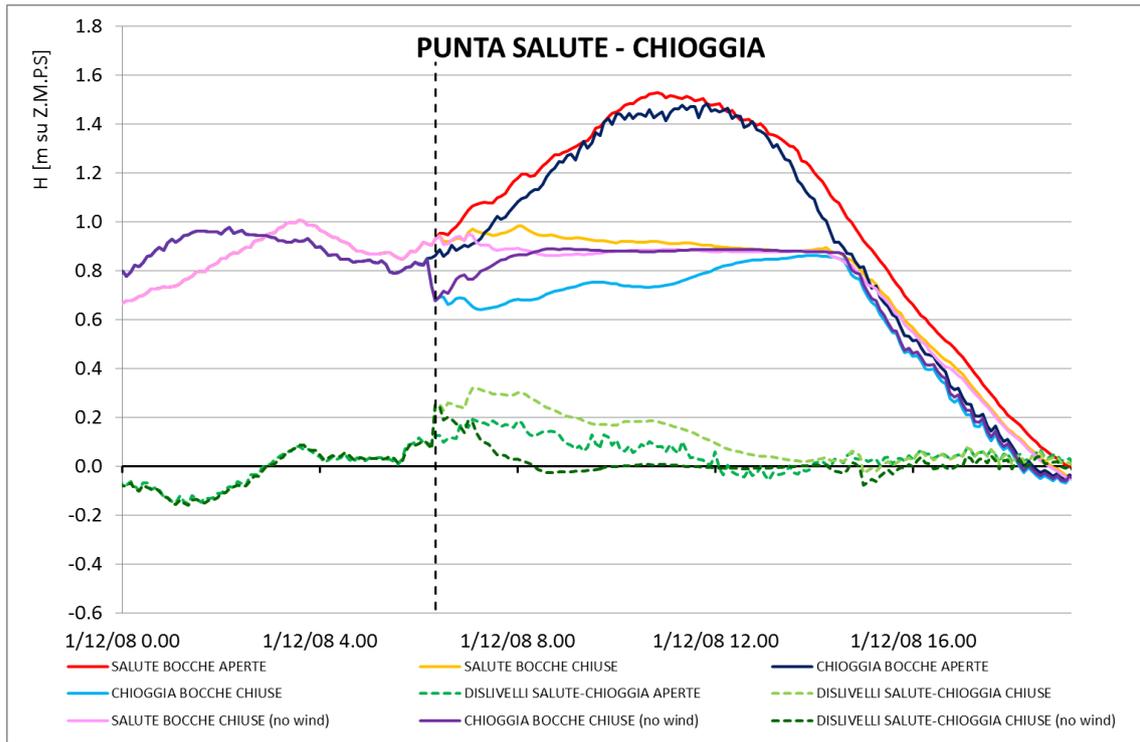
Si tratta di un evento di scirocco molto importante. Lunedì 1 dicembre 2008 alle ore 10:45 venne registrata al mareografo di Punta della Salute una massima di +156 cm che ha provocato l'allagamento del 98 % del centro storico. Si tratta della quarta punta massima in ordine decrescente registrata dal 1923 (inizio delle rilevazioni sistematiche) e la prima dal 2000 ad oggi. L'evento è stato preceduto da diversi giorni di maree sostenute. Nella notte dell'1 è stata raggiunta una massima di 95 cm alle 3:25. La marea poi, a causa del vento di scirocco, è scesa pochissimo, registrando una minima alle 5:00 di 84 cm, che ha preceduto la massima delle 10:45 di 156 cm.

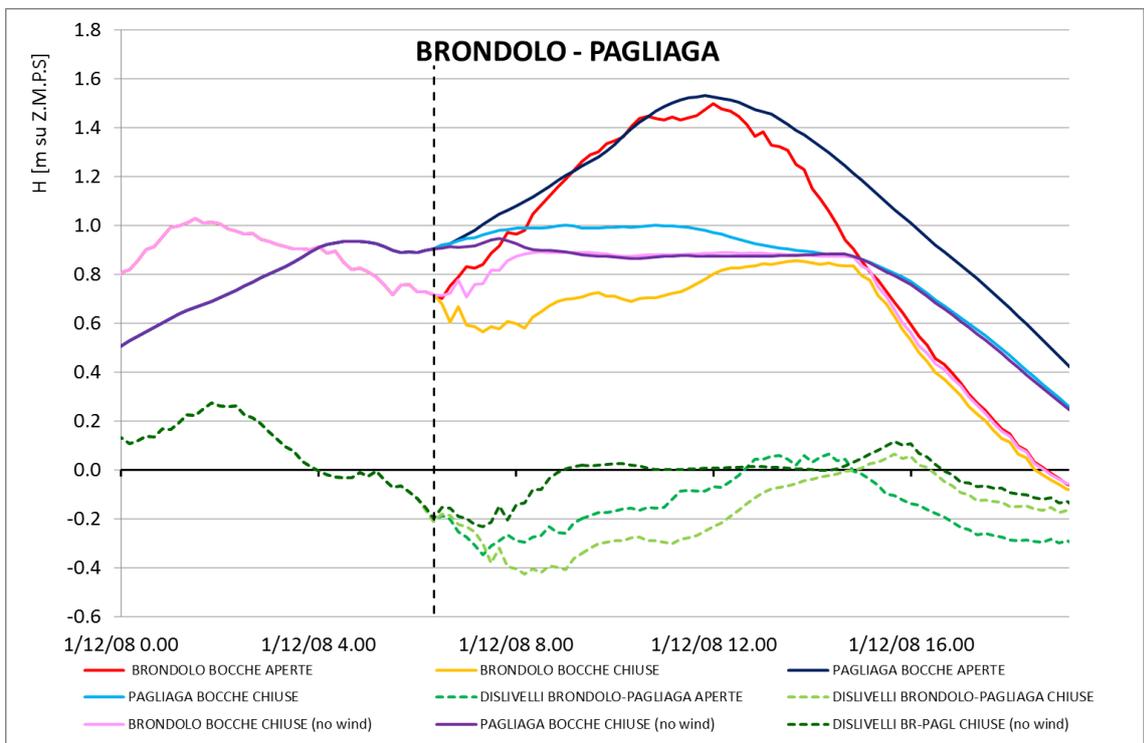
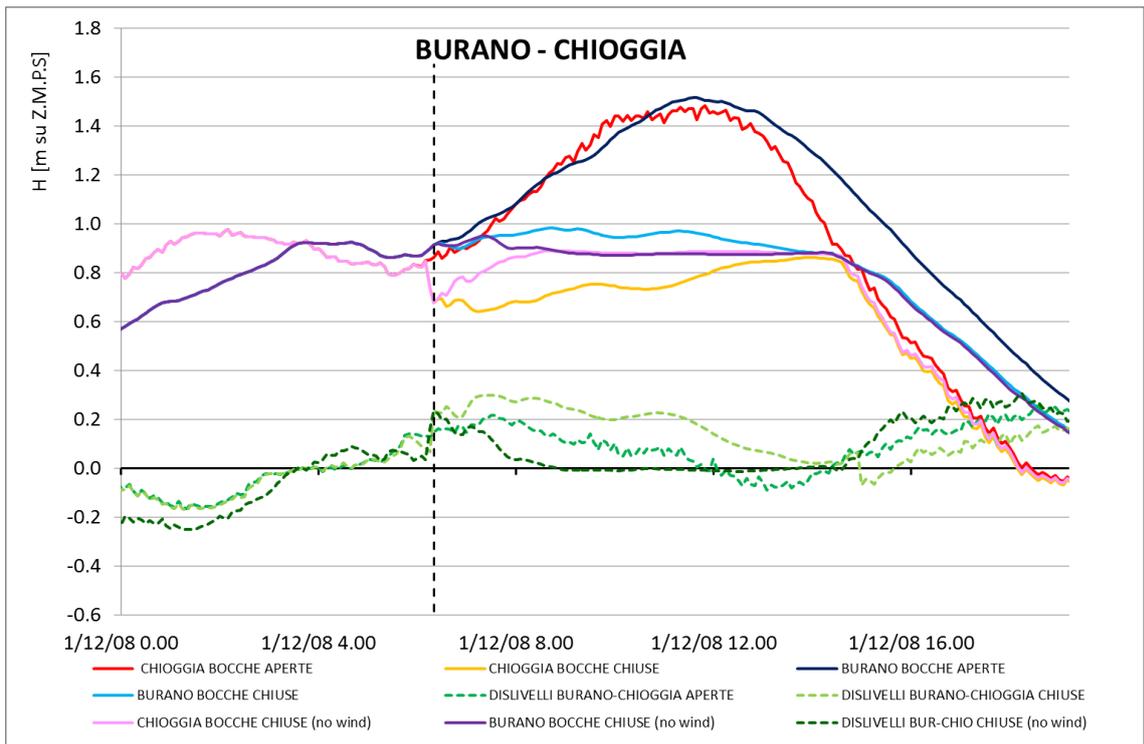
La causa principale del fenomeno sono i forti venti di scirocco. Tra la mezzanotte e le 8:00 del 1° dicembre si è avuto un rinforzo dei venti di scirocco, che hanno presentato un'intensità media di 18,6 m/s con raffiche fino a 23 m/s. Questo ha fatto sì che ai 56 cm di marea astronomica si sia sommato un contributo meteorologico di 100 cm.

Il periodo di chiusura da noi simulato è di circa 8 ore e mezza e comprende la fase di decrescita del vento da un picco di 18 m/s (a Chioggia) a circa 8 m/s. L'effetto della diminuzione del vento si registra nella diminuzione dei dislivelli ad esempio tra Punta Salute e Chioggia, sebbene il loro andamento sia anch'esso piuttosto oscillante.

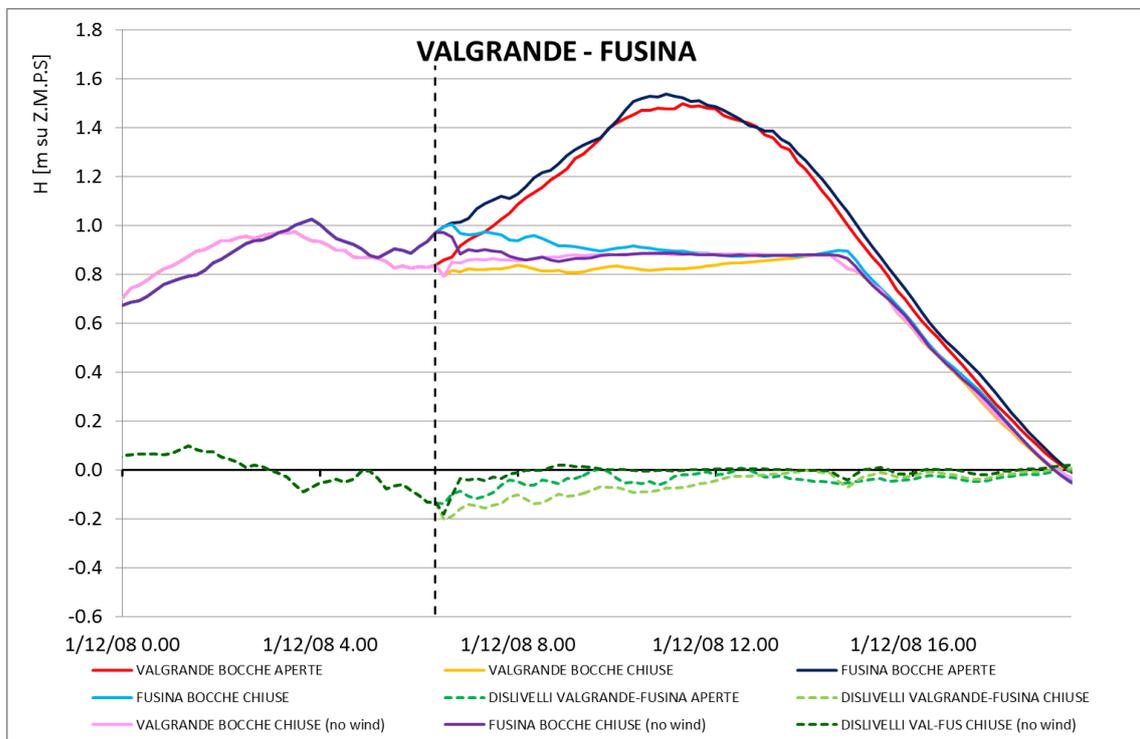
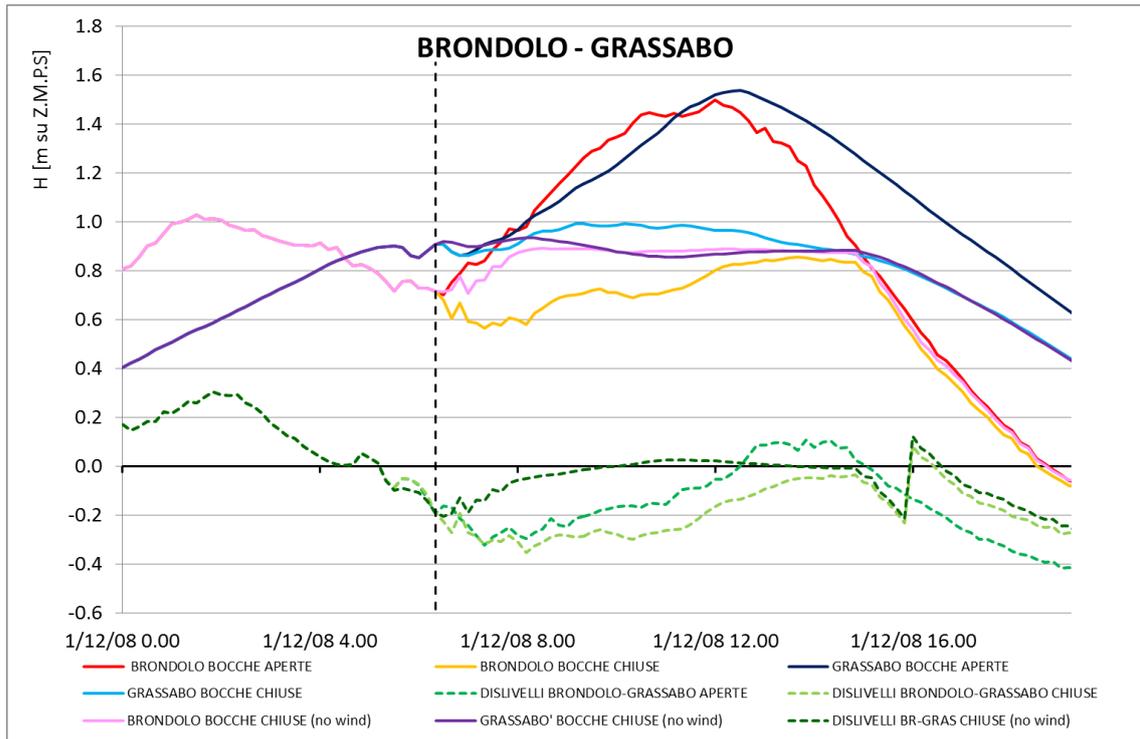


6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI





6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHHE SUI SOPRALZI

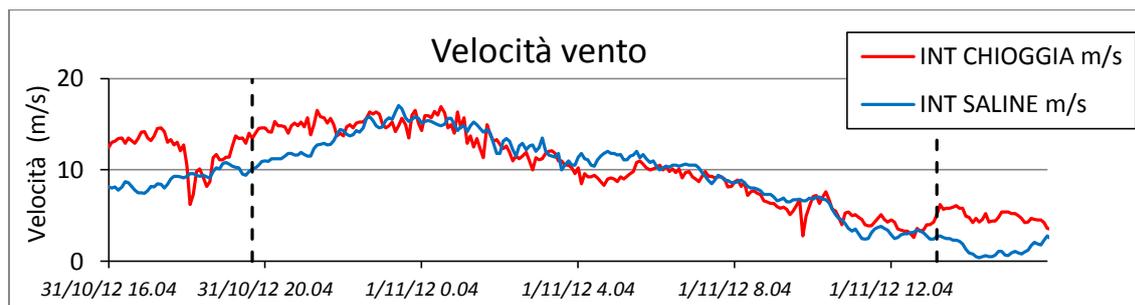


## Evento del 1 novembre 2012

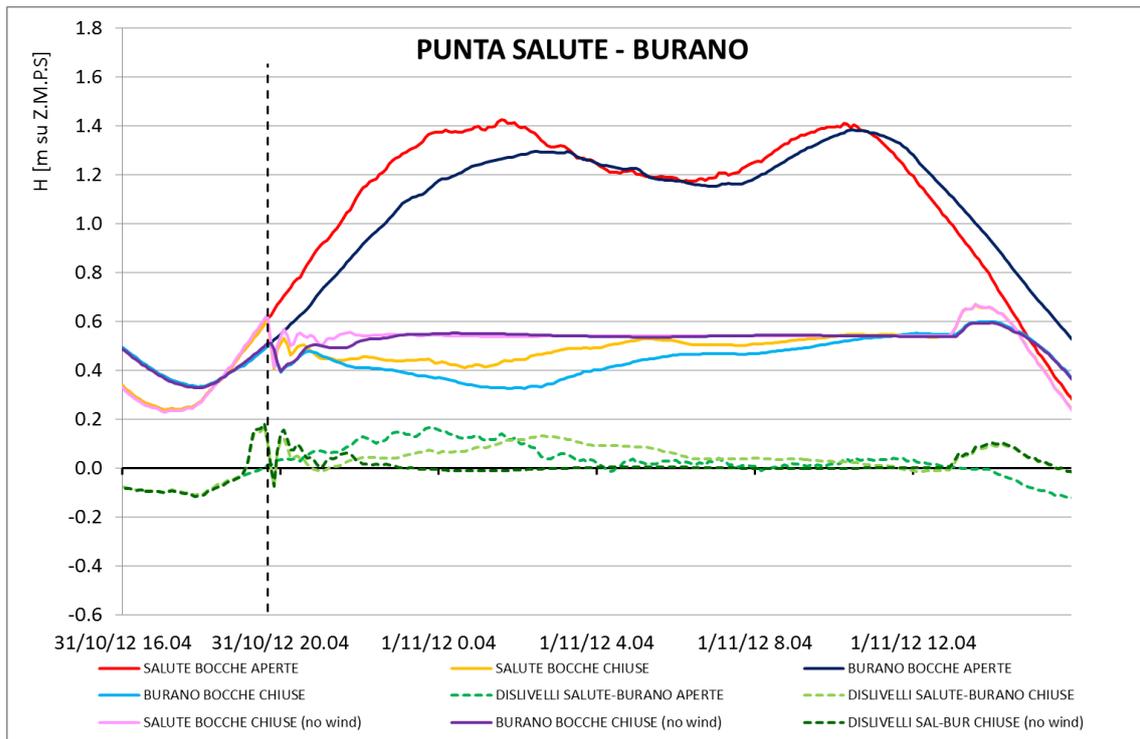
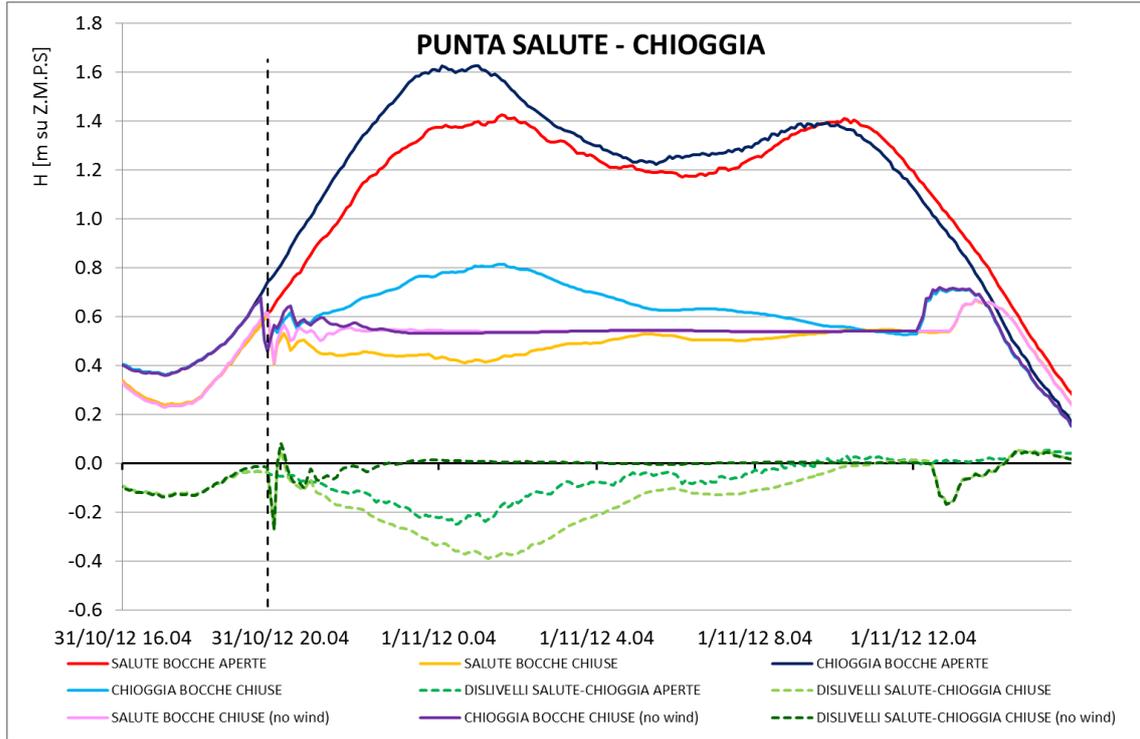
L'evento del 1 novembre 2012 riveste un ruolo molto rilevante nella casistica degli eventi di bora. L'alta marea, verificatasi nella notte tra il 31 ottobre e il 1 novembre 2012, in seguito ai forti venti di bora ha raggiunto un picco di +143 cm alle ore 1.40 del 1 novembre a Venezia. L'evento è stato seguito nella mattinata del 1 novembre 2012 da una marea molto sostenuta che ha raggiunto un picco di +138 cm alle 10.20, sfiorando la soglia dell'alta marea eccezionale.

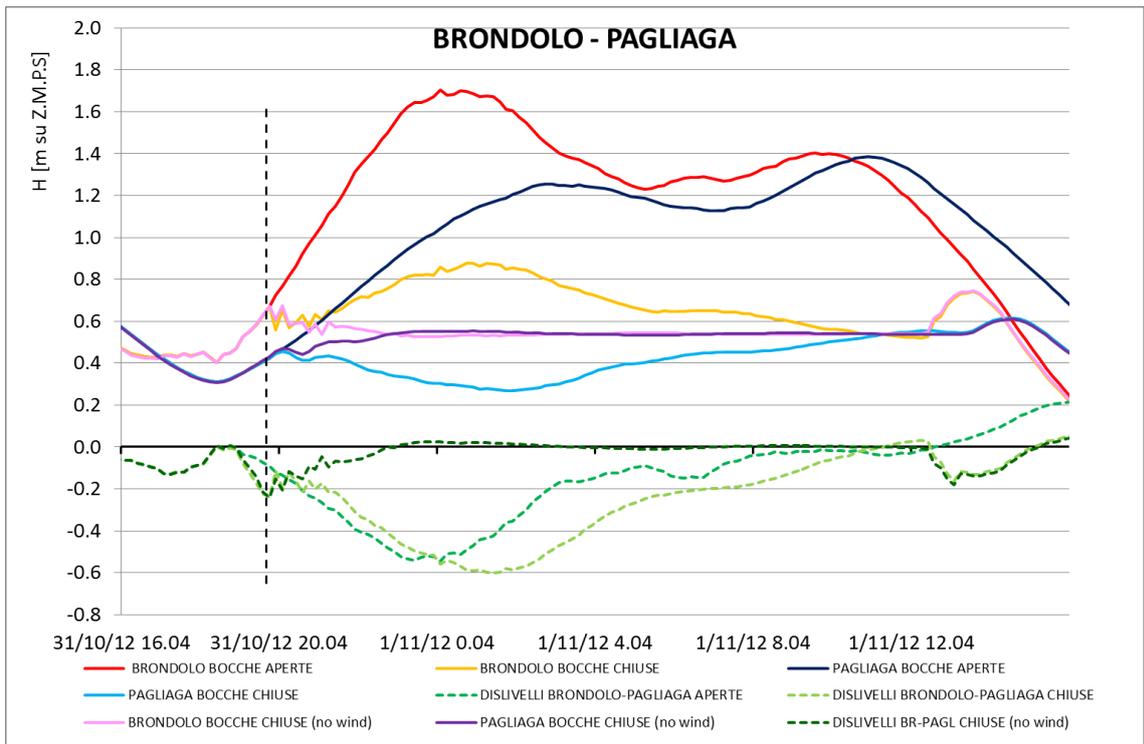
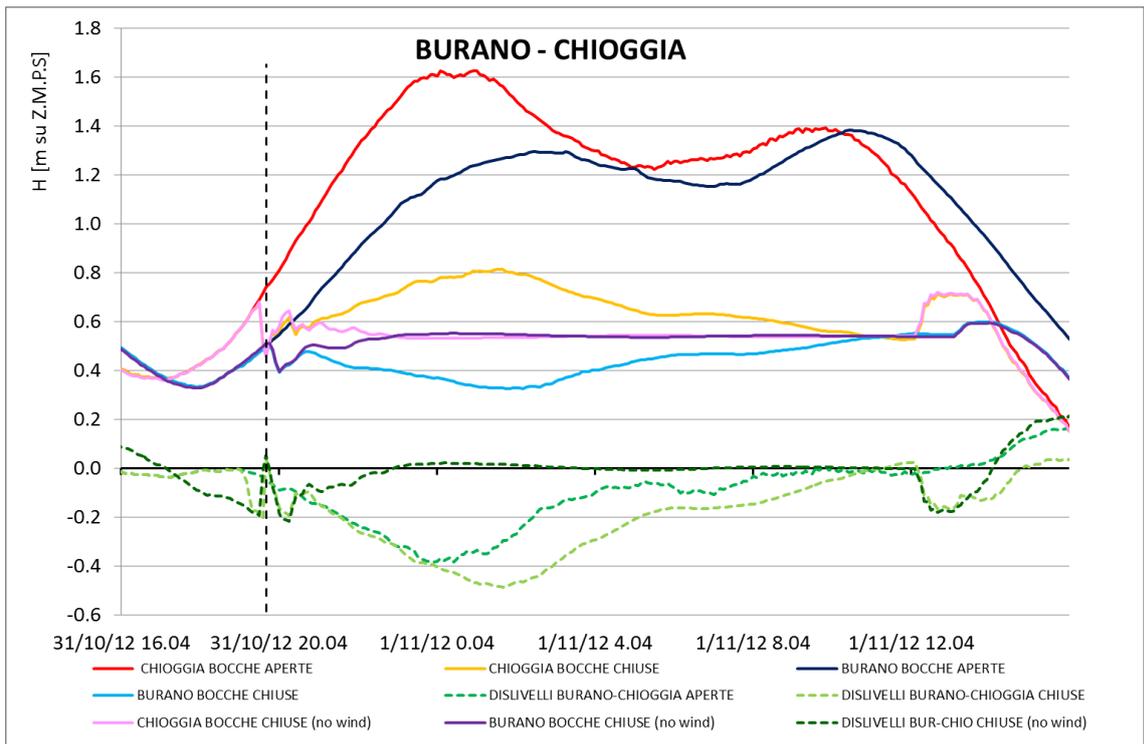
A causa della natura dell'evento, a Chioggia esso ha assunto proporzioni ancora più importanti, con un valore di picco di +164 cm registrato alle 1.10 del 1 novembre. L'alta marea eccezionale ha causato un black out dell'illuminazione pubblica durato alcune decine di minuti e l'allagamento di ampie zone del centro cittadino.

Poiché la marea tra i due colmi (di mezzanotte e delle 9.30), sia a Chioggia che a Punta Salute, non è mai scesa sotto i 110 cm, la chiusura che abbiamo simulato è molto prolungata pari a 17 ore e mezza. Tuttavia la maggiore intensità di vento si registra in relazione al primo picco dove appunto si sono ottenuti i maggiori dislivelli tra laguna nord e laguna sud. In questo primo periodo il vento registrato a Chioggia ha una media di circa 15 m/s. La direzione si mantiene costante nella parte di evento che più interessa la nostra trattazione, poi, nella tarda mattinata dell'1 la bora gira in libeccio diminuendo la sua intensità.

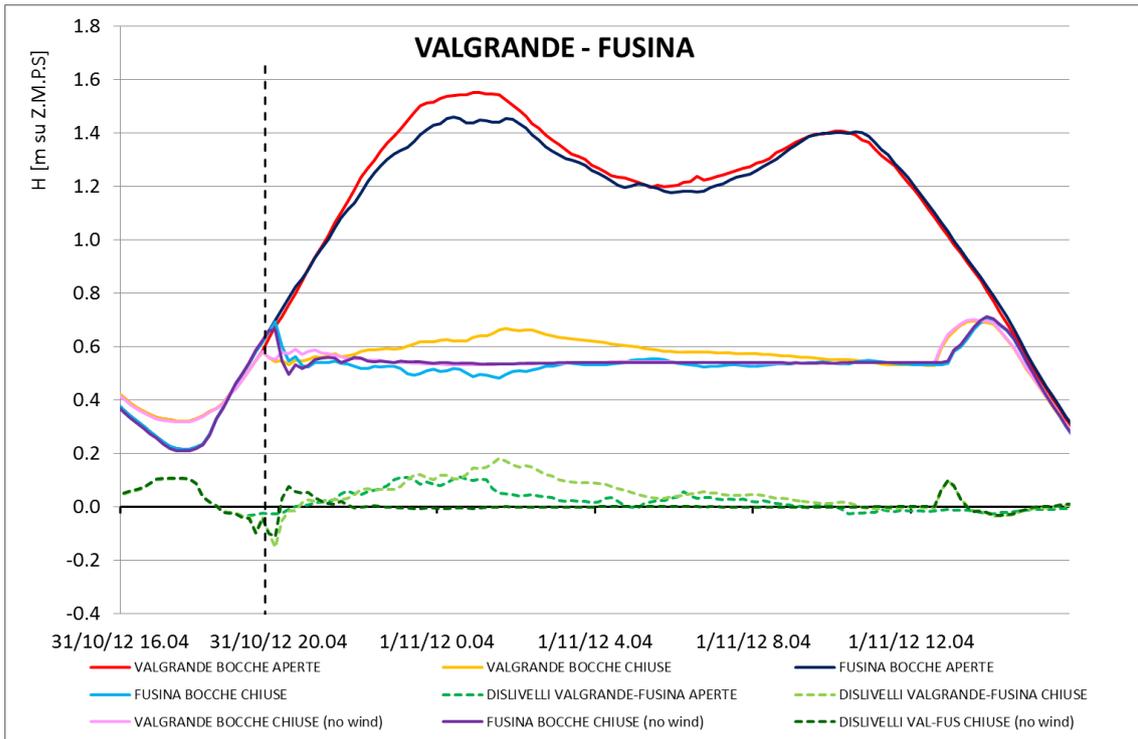
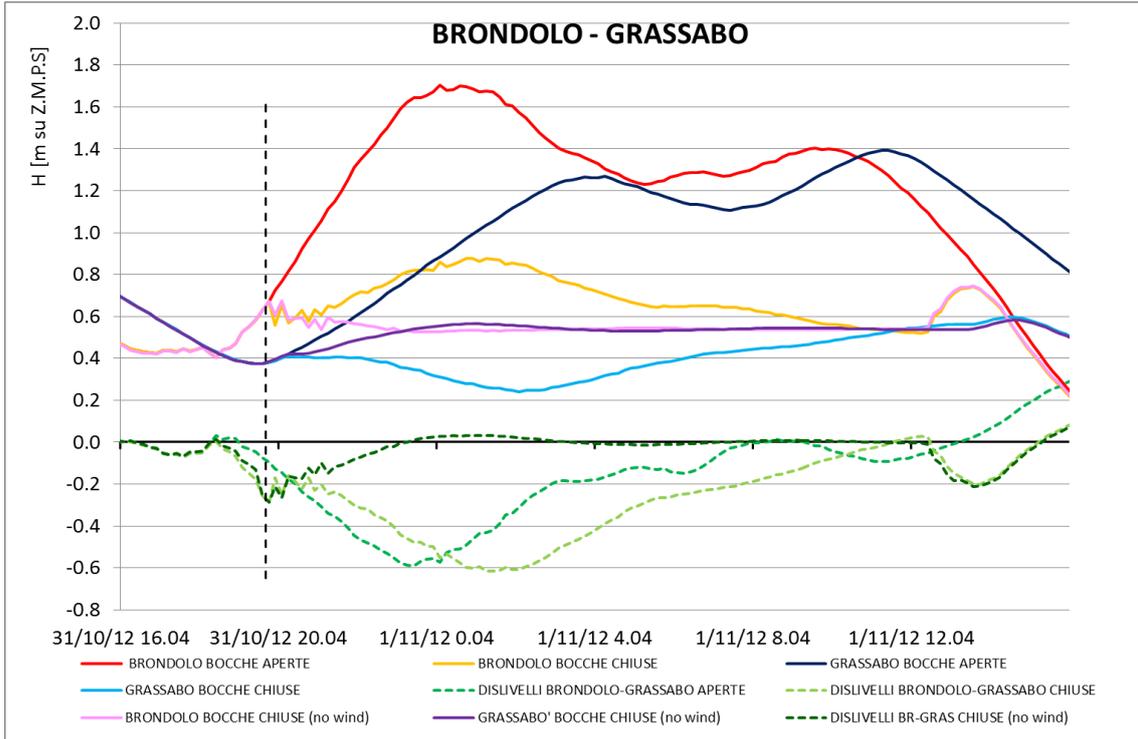


6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHHE SUI SOPRALZI





6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHHE SUI SOPRALZI

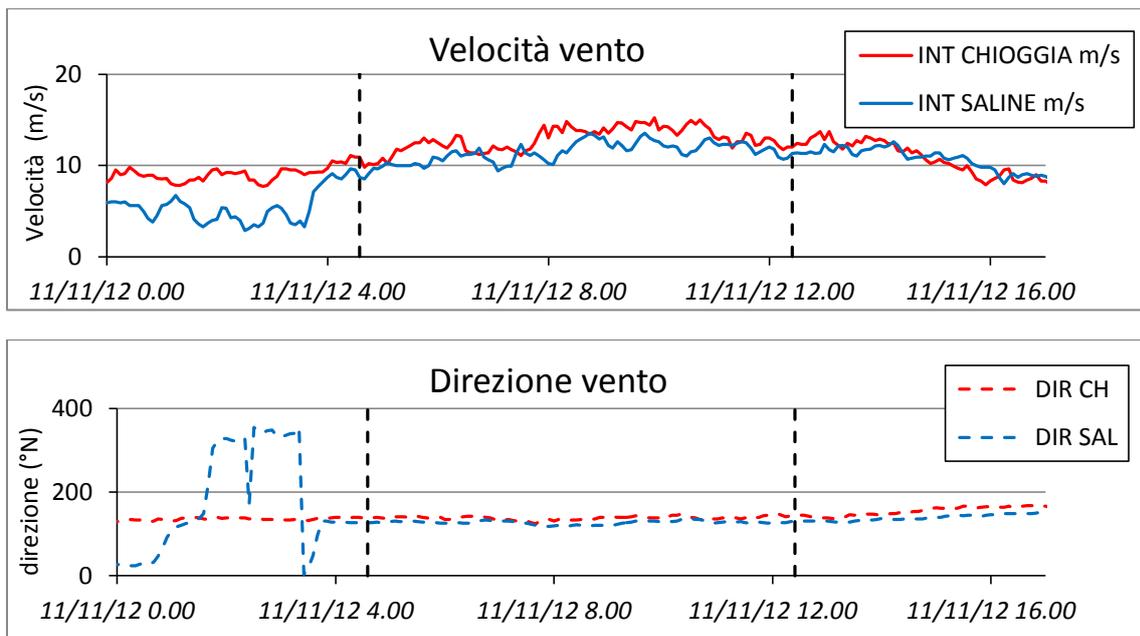


## Evento del 11 novembre 2012

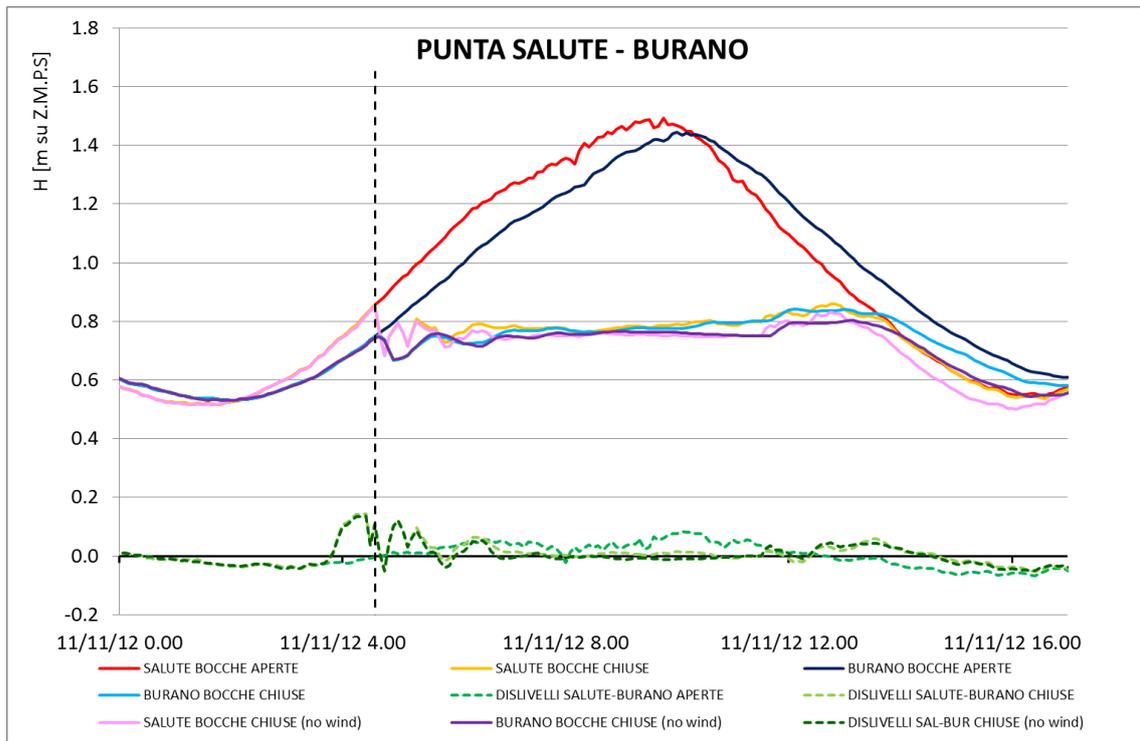
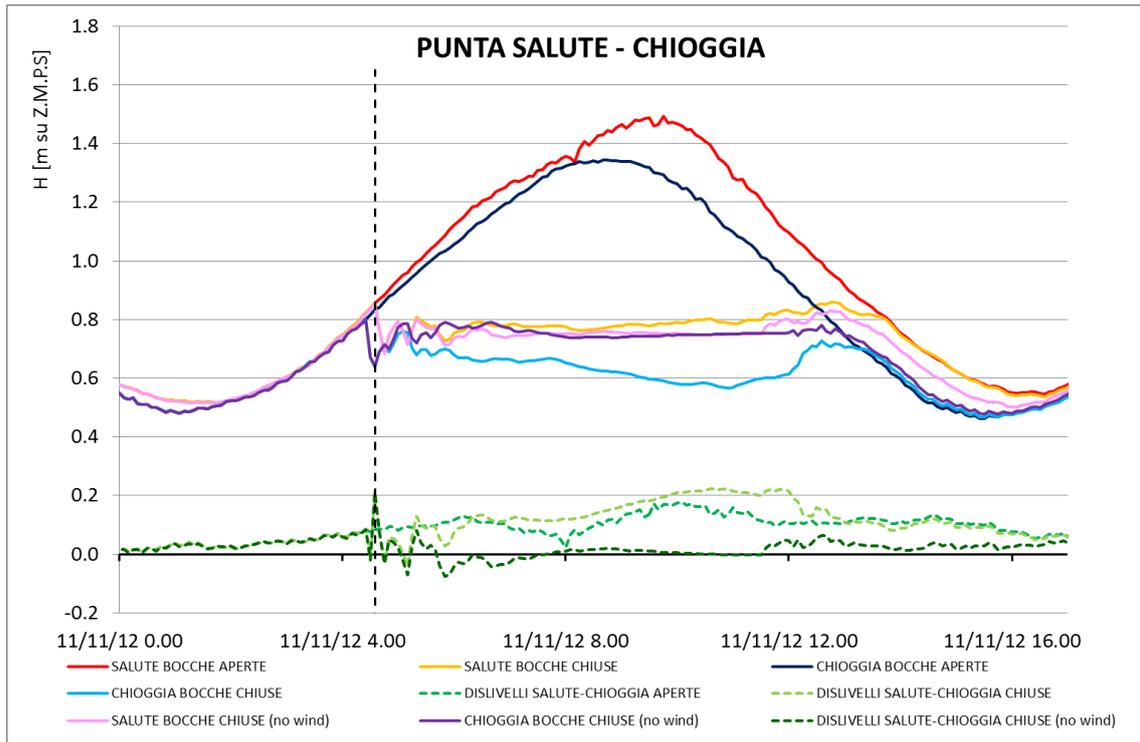
E' il secondo evento di acqua alta in ordine di importanza dal 2000 oggi, dopo quello del 1 dicembre 2008. Forti e costanti venti di scirocco con punte di 15 m/s hanno dato un grosso contributo alla marea che, la mattina dell'11 novembre alle 9.25, ha raggiunto il livello di picco di +149 cm, il sesto più alto dall'inizio delle rilevazioni sistematiche delle alte maree. Durante la fase di chiusura, prevista di 8 ore, si assiste a un progressivo abbassamento dei livelli nella laguna sud e ad un aumento in quella nord. Se prendiamo come livello di equilibrio quello ottenuto facendo calare il vento, notiamo che l'abbassamento del livello a sud è molto più pronunciato dell'innalzamento a nord.

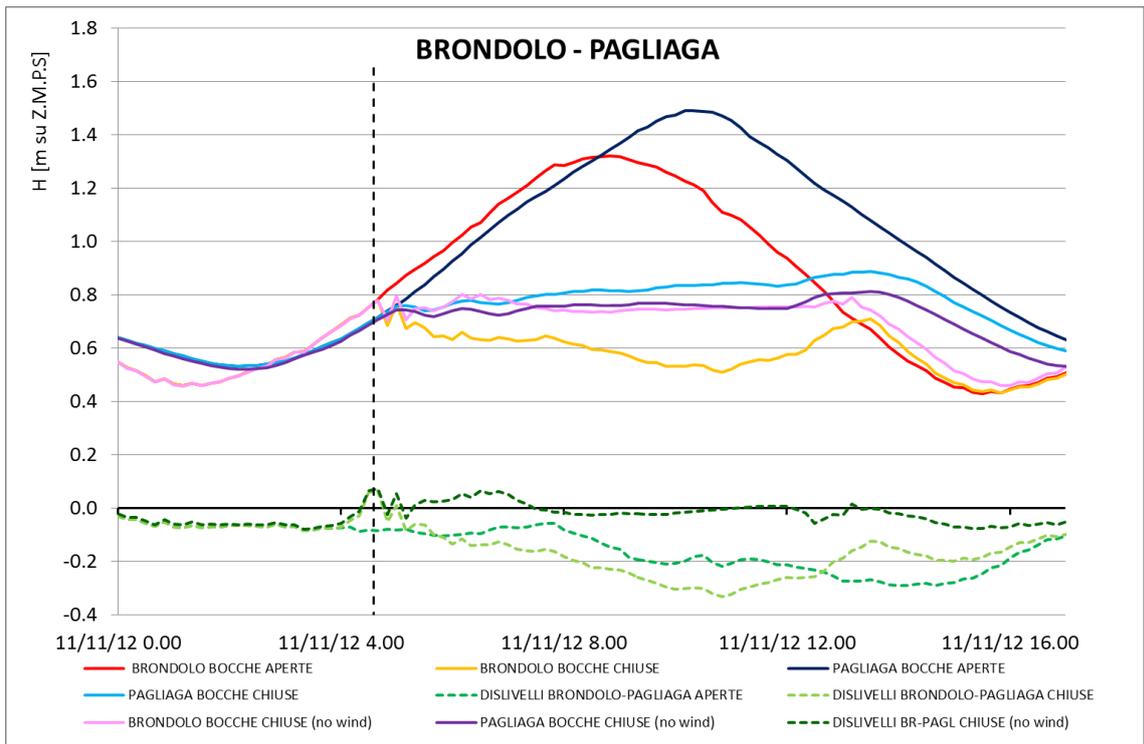
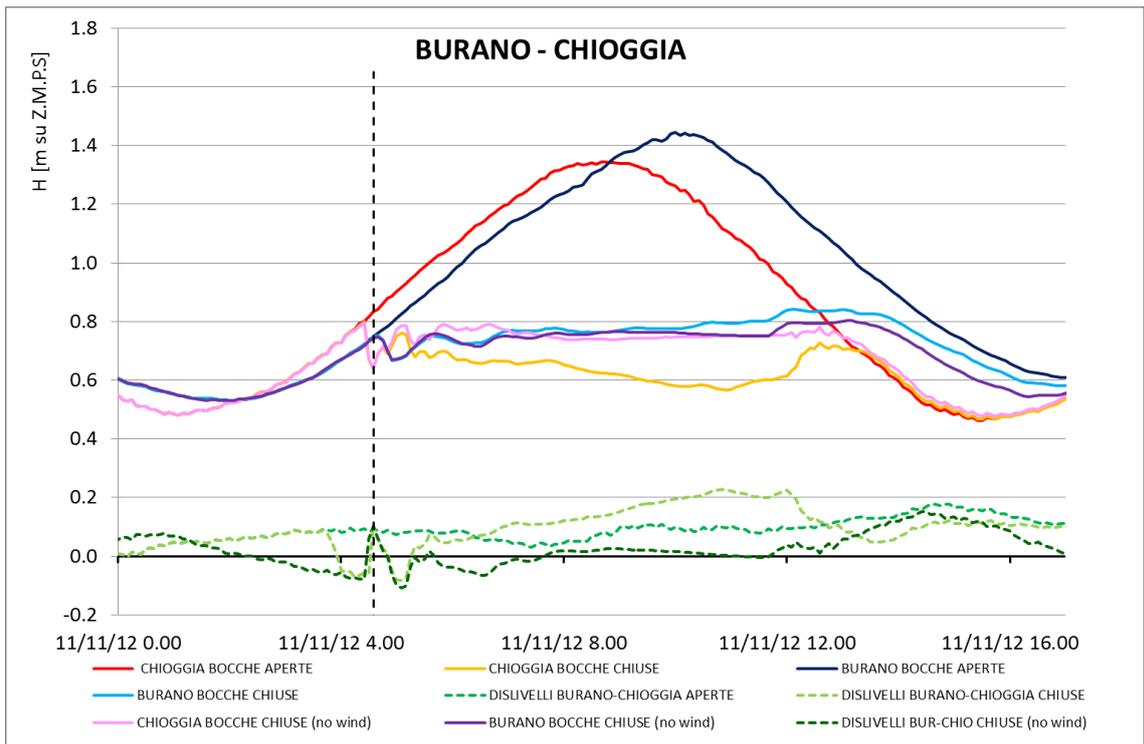
Questo accade per tutti gli eventi di scirocco ed è la conseguenza della direzione del vento rispetto alla laguna.

Di questo, e di altri aspetti, si parlerà più dettagliatamente nelle osservazioni finali.

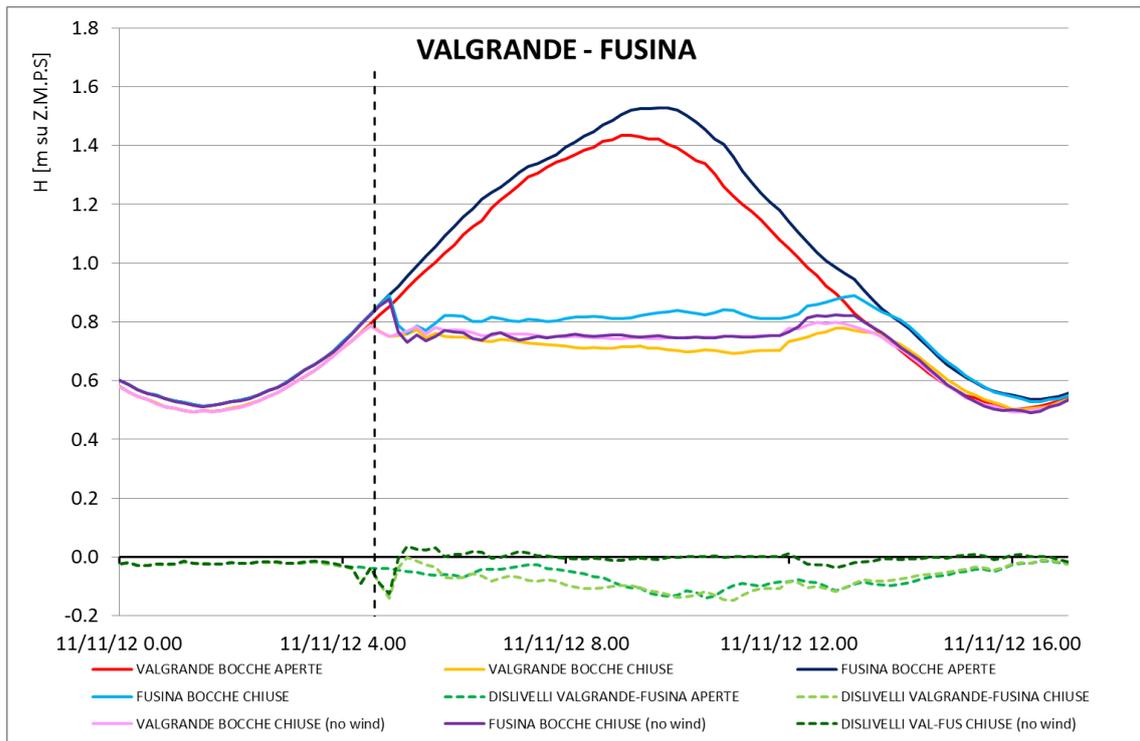
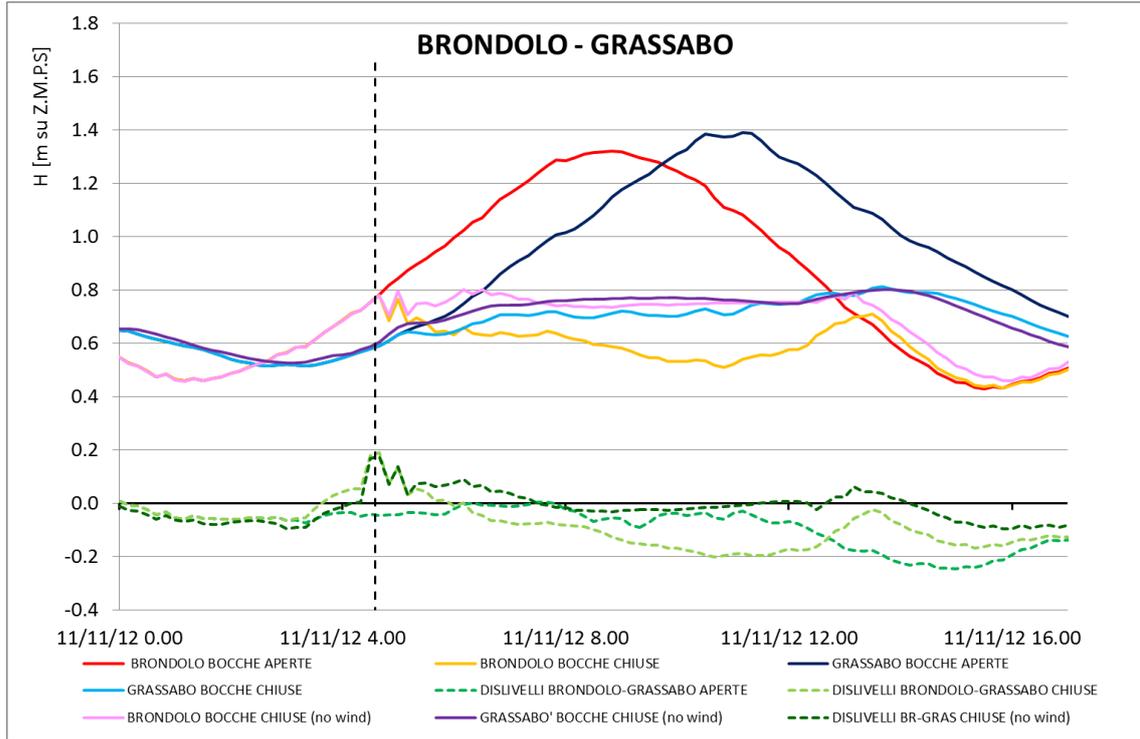


6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI





6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHHE SUI SOPRALZI



### 6.3 Analisi e commento dei risultati

I grafici possono essere riassunti in una semplice tabella che indica i valori dei dislivelli medi tra le coppie di stazioni considerate: per ogni coppia di stazione e per ogni evento si riportano tre valori. Il primo rappresenta il dislivello medio durante il periodo di chiusura delle bocche, il secondo il dislivello a bocche aperte come nella situazione attuale mentre il terzo valore è il coefficiente moltiplicativo dato dal rapporto tra i due dislivelli. Tale rapporto indica di quante volte il dislivello a bocche chiuse aumenta rispetto a quello che si ha attualmente non chiudendo le paratoie.

I dislivelli sono stati calcolati prendendo come periodo di riferimento quello compreso tra l'ora successiva alla chiusura delle bocche e l'ora precedente alla riapertura in modo da trascurare le fasi di transizione che come è ben visibile dai grafici presentavano alcune oscillazioni. Poiché siamo interessati a osservare i dislivelli nella fase in cui il vento è più intenso, nella loro scelta si è seguito un procedimento atto a scartare il periodo dove il vento si attenua, pur restando ancora chiuse le bocche. Il procedimento è il seguente: è stata eseguita la media mobile su tredici valori, cioè un'ora, avendo i risultati ogni 5 minuti, durante tutto il periodo di chiusura, poi è stato considerato come periodo utile per calcolare i dislivelli quello in cui il valore di tale media mobile non fosse sceso al di sotto del 75 % del valore massimo della media stessa.

I risultati ottenuti sono piuttosto significativi. L'ipotesi per cui la chiusura della laguna comporta un aumento dei dislivelli è confermata. Stupisce, tuttavia, l'entità di tale aumento. Nella prima colonna per esempio, che rappresenta i dislivelli tra Punta Salute e Chioggia, si osserva che il coefficiente moltiplicativo si mantiene maggiore di 1,4 arrivando ad un massimo di 2,4 in corrispondenza dell'evento del 10 novembre 2004.

Si notano tuttavia dei risultati che all'apparenza appaiono discordanti con quanto appena detto, ovvero casi in cui il dislivello a bocche chiuse è minore di quello a bocche aperte. Si può notare che ciò accade nella coppia di stazioni Punta Salute-Burano e in quella Brondolo-Grassabò. Questo comportamento si spiega col fatto che l'ordine di grandezza della differenza di ampiezza d'onda tra le due stazioni, dovuto alla sola propagazione, indipendente quindi dall'effetto del vento, è maggiore del dislivello indotto dall'attrito del vento a bocche chiuse. In questo senso dunque, non è possibile fare un vero confronto

## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

tra i due dislivelli pertanto i casi in cui ciò avviene possono essere considerati non significativi. Questo aspetto verrà chiarito nell'ultimo paragrafo.

ISTANTE DI CHIUSURA*: T <sub>110</sub> -1 ORA				DISLIVELLI MEDI TRA STAZIONI PER EFFETTO DEL VENTO (cm)																	
EVENTO	CARATTERISTICHE VENTO			SALUTE CHIOGGIA			SALUTE BURANO			BURANO CHIOGGIA			BRONDOLO PAGLIAGA			BRONDOLO GRASSARO'			VALGRANDE FUSINA		
	DIR (°N)	VEL (m/s)	TIPO DI VENTO	BOCCH CHIUSE	BOCCH APERTE	λ**	BOCCH CHIUSE	BOCCH APERTE	λ	BOCCH CHIUSE	BOCCH APERTE	λ	BOCCH CHIUSE	BOCCH APERTE	λ	BOCCH CHIUSE	BOCCH APERTE	λ	BOCCH CHIUSE	BOCCH APERTE	λ
06/11/2000	150	18	SCIROCCO	41	25	1.6	5	3	1.7	45	24	1.9	61	41	1.5	54	35	1.5	23	14	1.6
13/11/2001	70	15	BORA	34	19	1.8	2	9	0.2	33	27	1.2	40	36	1.1	41	43	1.0	8	4	2.0
16/11/2002	135	10	SCIROCCO	6	4	1.5	1	4	0.3	6	3	2.2	10	4	2.7	5	6	0.8	5	5	1.0
10/11/2004	40	18	BORA	51	21	2.4	12	19	0.7	63	40	1.6	77	55	1.4	89	70	1.3	19	9	2.1
03/12/2005	165	12	SCIROCCO	13	7	1.8	4	2	2.0	15	6	2.4	20	10	2.0	17	11	1.5	6	3	2.1
01/12/2008	175	16	SCIROCCO	20	10	2.0	5	3	1.4	23	11	2.2	30	21	1.4	29	21	1.4	10	3	2.8
01/11/2012	20	16	BORA	36	22	1.6	12	14	0.9	44	36	1.2	56	48	1.2	56	51	1.1	13	9	1.5
11/11/2012	120	15	SCIROCCO	21	15	1.4	1	6	0.2	20	9	2.1	30	20	1.5	18	6	3.2	13	12	1.1

\*Istante di chiusura: 1 ora prima dell'istante (T<sub>110</sub>) in cui si raggiungono i 110 cm a Chioggia o Punta Salute

\*\*λ è un coefficiente dato dal rapporto tra il dislivello a bocche chiuse e quello a bocche aperte

Si può osservare come il coefficiente moltiplicativo  $\lambda$  sia in generale maggiore tra Punta Salute e Chioggia che tra Punta Salute e Burano, in particolare per eventi di bora.

Questo risultato trova spiegazione nelle considerazioni riguardo ai flussi di ricircolo lagunare trattati in precedenza.

Quando soffia vento di bora l'acqua si insacca nella laguna sud producendo livelli interni presso la bocca di Chioggia non solo maggiori rispetto a quelli della laguna nord, ma anche rispetto a quelli del mare, nonostante la fase di marea crescente. Per questo motivo l'acqua continua a defluire dalla bocca di Chioggia verso il mare, con movimento contrario a quello delle altre bocche, fino a che il vento la mantiene internamente sostenuta.

Nelle bocche di Malamocco e soprattutto del Lido invece, l'acqua continua ad entrare con una portata maggiore rispetto a quanto accadrebbe senza vento per compensare il dislivello tra mare e laguna creato dal vento trasversale che tende a deprimere il livello nella laguna nord. Si configura quindi una corrente di circolazione lagunare antioraria dalle bocche di Lido e Malamocco verso la laguna Sud da dove l'acqua fuoriesce dalla bocca di Chioggia.

Nel momento in cui vengono chiuse le bocche, il ricircolo viene meno e la massa d'acqua che sarebbe dovuta uscire dalla bocca di Chioggia per riflusso non può che

insaccarsi nella zona sud e aumentare ulteriormente il dislivello tra Chioggia e Venezia. Per quanto riguarda i dislivelli tra Punta Salute e Burano si nota facilmente come essi siano comandati dal comportamento di una sola bocca, quella di Lido, attraverso la quale la marea entra e si propaga verso le due stazioni: la presenza o meno del ricircolo ha quindi effetto su entrambe le stazioni, fornendo loro lo stesso contributo in termini di livello. I dislivelli non vengono quindi influenzati, al contrario di quanto avviene tra Punta Salute e Chioggia il cui livello è governato da diverse bocche di porto, ove il ricircolo ha effetti opposti tra di esse.

Andando nel dettaglio si ha quindi che mentre le bocche sono aperte il ricircolo attenua i dislivelli tra Punta Salute e Chioggia, avendo un'azione compensatrice dei dislivelli tra le due stazioni poiché, prendendo come esempio la situazione in cui soffia bora, la portata che viene richiamata nella bocca di Lido tende ad innalzare il livello alla Salute mentre quella che esce da Chioggia tende ad abbassare il livello della zona sud. Questo riequilibrio dei livelli cessa nel momento in cui vengono chiuse le bocche.

Tra Punta Salute e Burano invece, poiché le stazioni ricevono apporto liquido dalla stessa bocca, è ininfluenza per i loro dislivelli che le bocche siano chiuse o aperte.

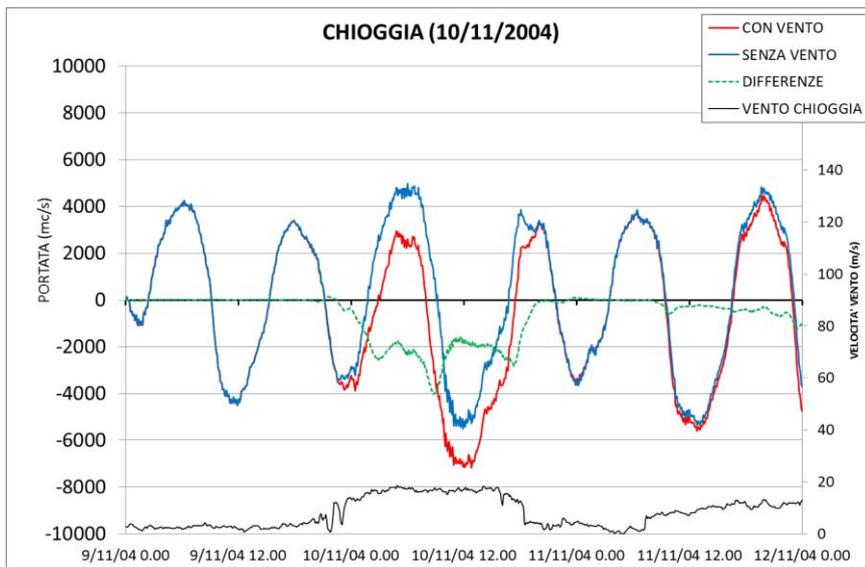
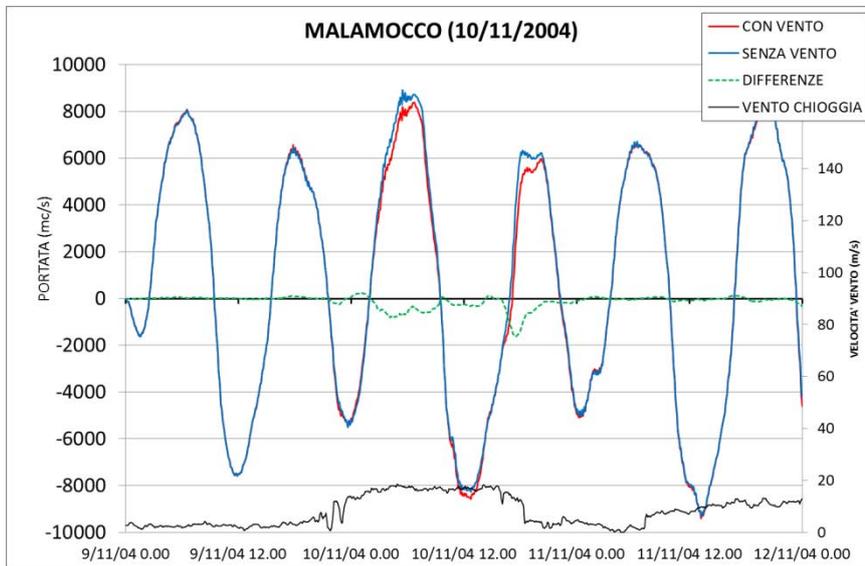
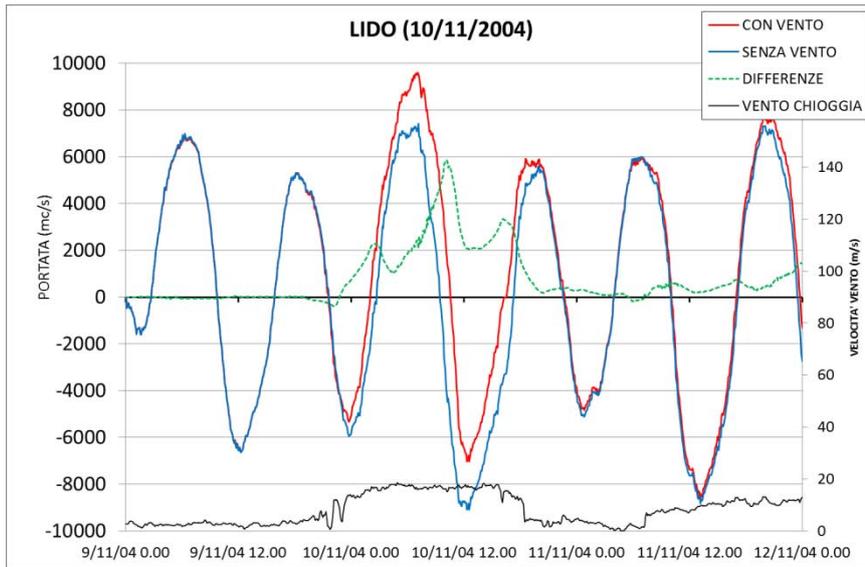
Riassumendo si è dimostrato come i dislivelli che si vengono a creare in caso di venti intensi tra laguna nord e sud vengano notevolmente influenzati dai flussi di scambio tra laguna e mare, scambio che qualora venisse interrotto, provocherebbe un sensibile incremento dell'entità del fenomeno.

Questo fenomeno è particolarmente evidente nel caso di venti di bora, i quali soffiano lungo l'asse longitudinale della laguna. Nel caso di eventi di scirocco la situazione è diversa. La direzione del vento di scirocco è infatti quasi perpendicolare alla linea di costa della laguna generando quindi un influsso contemporaneamente in tutte e tre le bocche, con un insaccamento dell'acqua nella parte nord occidentale della laguna. E' tuttavia necessario precisare come la definizione di "scirocco" e di "bora" non sia univoca in termini di direzione, in molti casi si sono registrati eventi di acqua alta associati a venti provenienti da Sud-Sudest in parte o in tutta la durata dell'evento, come nel 6 novembre 2000 o il 18 novembre 1996, direzione che provoca un notevole dislivello longitudinale ed un ricircolo alle bocche inverso rispetto a quanto accade per i venti di bora.

## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

Per spiegare in maniera più approfondita la correlazione tra dislivelli indotti dal vento e flussi di scambio alle bocche è bene quantificare quale sia la variazione di portata alle bocche in presenza di vento.

Per il caso di bora si è fatto riferimento all'evento del 10 novembre 2004, confrontando le portate alle tre bocche in presenza o in assenza di vento.



## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

Nel grafico sono indicate come positive le portate di flusso, entranti nella laguna e negative quelle di riflusso, uscenti.

Si può osservare come mentre soffia il vento la curva delle portate al Lido venga traslata verso l'alto con un aumento della portata di flusso e una diminuzione di quella di riflusso, in generale si ha un maggior apporto di acqua in laguna nord, conseguenza del fenomeno di riequilibrio dei livelli. La differenza può essere quantificata in circa 3000 m<sup>3</sup>/s.

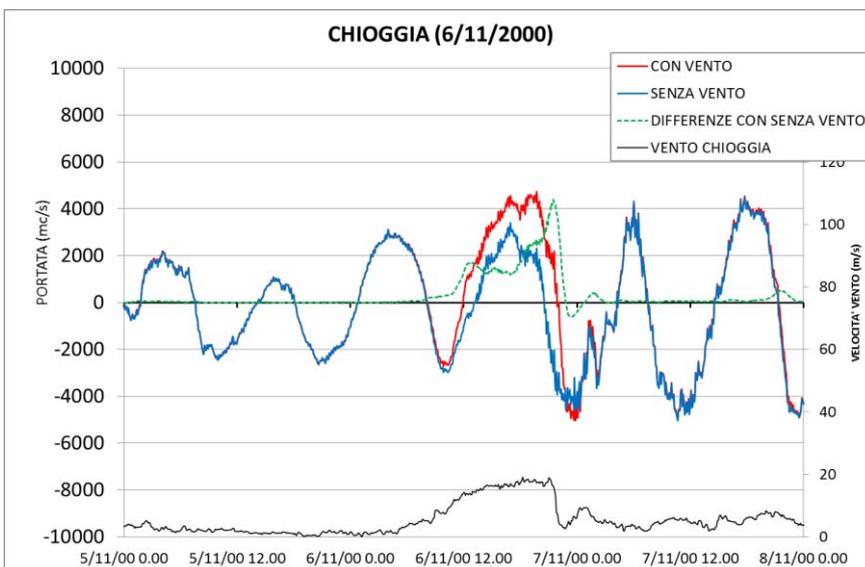
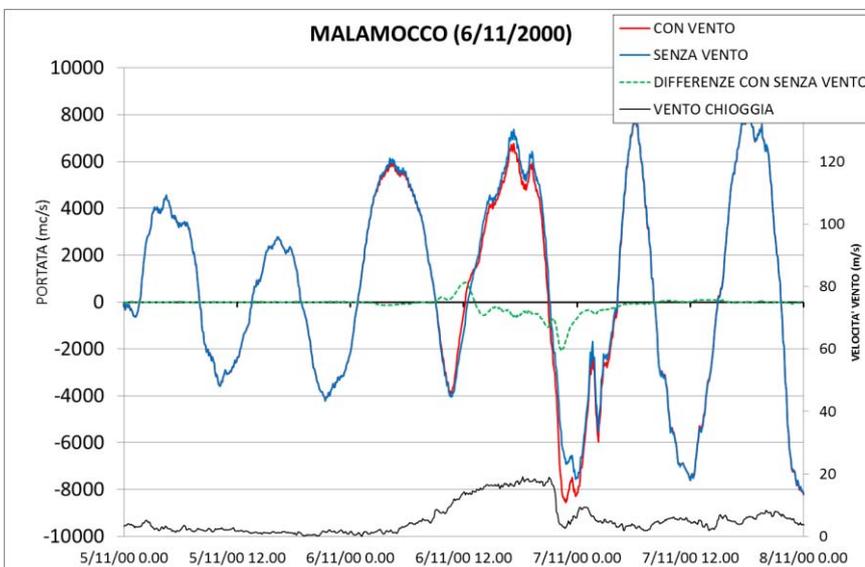
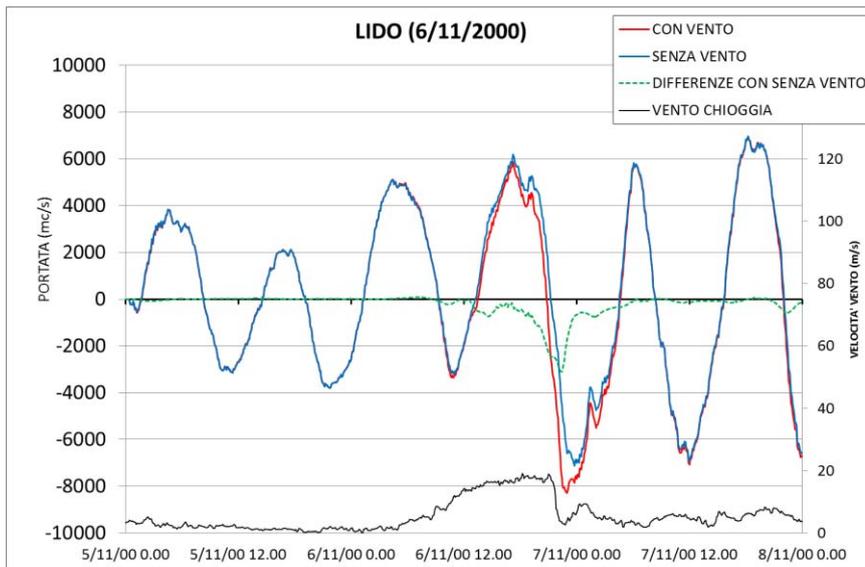
Per quanto riguarda la bocca di Malamocco, in virtù della sua posizione mediana rispetto all'asse della laguna, non si notano grosse differenze.

A Chioggia invece accade il fenomeno opposto rispetto al Lido, con una diminuzione della portata di flusso e un aumento di quella di riflusso. La differenza media si attesta anche in questo caso sui 3000 m<sup>3</sup>/s.

Quando vengono chiuse le bocche questa differenza di portata, dovuta solo all'effetto del vento, che non può più uscire dalla laguna, si tramuta in un aumento dei livelli nella laguna sud. Al contrario nelle zone poste più a nord si assiste ad una diminuzione dei livelli venendo a mancare l'apporto del flusso al Lido.

E' questo fatto a spiegare il forte aumento dei dislivelli nel confronto tra bocche aperte e bocche chiuse.

Per quanto riguarda invece il bilancio di portata alle bocche in caso di scirocco, ci riconduciamo all'evento del 6 novembre 2000.



## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

Come si può vedere dai grafici, finché soffia il vento le differenze di portata alle bocche di Lido e Malamocco si attestano sui 500 m<sup>3</sup>/s, mentre a Chioggia la differenza è di circa 2000 m<sup>3</sup>/s. Questo fatto può essere spiegato con l'insaccamento dell'acqua nella parte nord occidentale della laguna, che riduce la diminuzione di portata entrante dal Lido, poiché bisogna comunque fornire la portata necessaria. Il bilancio tra le differenze alle bocche è inoltre positivo, questo avviene poiché l'acqua invasata all'interno della laguna è maggiore rispetto alla condizione di assenza di vento per il notevole incremento di superficie barenale che deve essere allagata in laguna nord.

Questa situazione perdura finché il vento tiene sospesa la massa d'acqua a nord ovest, quando però esso si attenua bruscamente la massa d'acqua ridiscende verso sud e alimenta la corrente di riflusso. Si nota infatti un aumento della portata di riflusso a Lido e Malamocco.

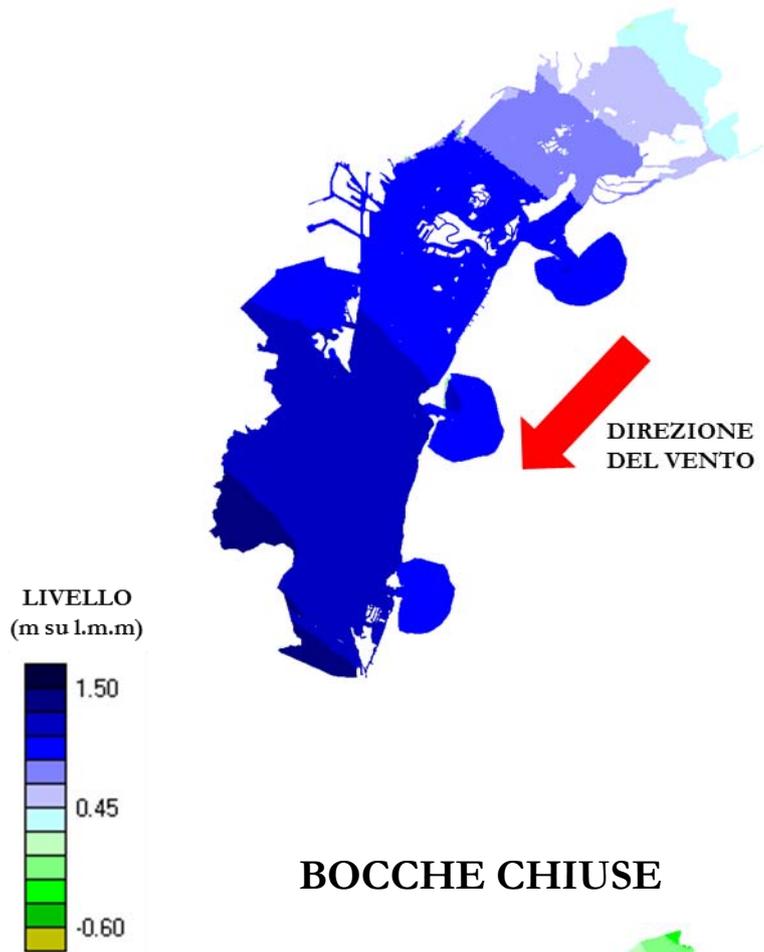
Si nota infine come nel caso di vento di scirocco la bocca di Chioggia abbia un'azione moderatrice sui dislivelli creati dal vento all'interno della laguna immettendo una notevole portata che innalza il livello a sud della laguna riducendone il dislivello con la parte nord occidentale. Quando le bocche sono chiuse questo processo viene a mancare provocando anche in questo caso ad una accentuazione delle differenze di livello.

Come ulteriore conferma di quanto esposto vengono presentati i risultati grafici ottenuti dal modello bidimensionale per i due eventi citati di bora e di scirocco, del 10/11/2004 e del 6/11/2000, caratterizzati entrambi da velocità pari a 18 m/s.

Essi mostrano chiaramente come, sebbene a bocche chiuse i livelli siano mediamente inferiori all'interno della laguna, i gradienti di livello tra le zone della stessa siano molto più accentuati.

10 novembre 2004 ore 9

## BOCCHE APERTE



## BOCCHE CHIUSE

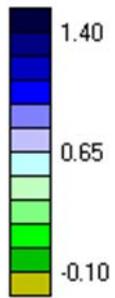


6 novembre 2000 ore 20

**BOCCHE APERTE**



LIVELLO  
(m su l.m.m.)



**BOCCHE CHIUSE**



Nella seguente tabella si mettono a confronto i dislivelli raggiunti dalle singole stazioni nel periodo di chiusura rispetto al livello equivalente, definito come livello ottenuto facendo cessare il vento negli istanti successivi alla chiusura delle bocche.

ISTANTE DI CHIUSURA: T <sub>110</sub> -1 ORA				LIVELLI A BOCHE CHIUSE E DIFFERENZE CON IL LIVELLO EQUIVALENTE (cm)																
EVENTO	CARATTERISTICHE VENTO			LIVELLO EQUIVALENTE (cm)	PUNTA SALUTE		CHIOGGIA		BURANO		GRASSABO'		PAGLIAGA		FUSINA		BRONDOLO		VALGRANDE	
	DIR (°N)	V (m/s)	TIPO DI VENTO		LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETTO A L.E.														
06/11/2000	150	18	SCIROCCO	<b>87.4</b>	95	+ 8	54	- 33	99	+ 12	99	+ 12	106	+ 19	100	+ 13	45	- 42	76	- 11
13/11/2001	70	15	BORA	<b>57.8</b>	42	- 16	76	+ 18	43	- 15	41	- 17	42	- 16	55	- 3	82	+ 24	63	+ 5
16/11/2002	135	10	SCIROCCO	<b>80.6</b>	81	+ 0	75	- 6	80	- 1	76	- 5	83	+ 2	84	+ 3	73	- 8	79	- 2
10/11/2004	40	18	BORA	<b>63.4</b>	48	- 15	99	+ 36	36	- 28	19	- 45	30	- 33	60	- 3	108	+ 44	79	+ 16
03/12/2005	165	12	SCIROCCO	<b>86.3</b>	91	+ 5	77	- 9	93	+ 7	97	+ 11	95	+ 9	90	+ 4	75	- 12	84	- 2
01/12/2008	175	16	SCIROCCO	<b>87.9</b>	93	+ 5	73	- 15	97	+ 9	98	+ 10	99	+ 11	92	+ 4	69	- 19	82	- 6
01/11/2012	20	16	BORA	<b>53.9</b>	43	- 11	79	+ 25	34	- 19	26	- 28	29	- 25	50	- 4	85	+ 31	65	+ 11
11/11/2012	120	15	SCIROCCO	<b>75.3</b>	79	+ 4	58	- 17	79	+ 3	70	- 5	83	+ 8	83	+ 8	53	- 22	70	- 5

Da essa si osserva come, prendendo ad esempio la coppia di stazioni Brondolo-Pagliaga in un evento di scirocco qualsiasi, rispetto al livello equivalente l'abbassamento che si ha nella stazione di Brondolo sia molto maggiore del rialzo relativo a Pagliaga.

Questo fatto si spiega analizzando la direzione del vento di scirocco all'interno della laguna: tra Brondolo e la costa interna il vento ha a disposizione un fetch molto più ampio rispetto a quello che possiede tra il cordone litoraneo e Pagliaga. Questo provoca un gradiente di livello molto maggiore nelle zone meridionali della laguna, come si evince chiaramente dalle figure che rappresentano in modo bidimensionale i risultati.

Al contrario nei casi di bora il vento soffia in direzione longitudinale alla laguna e per entrambe le stazioni il fetch a disposizione del vento è lo stesso: ciò provoca dei gradienti di livello uniformi all'interno della laguna. La conferma di questo fatto è data dai grafici dove si osserva che in caso di bora il livello a bocche chiuse si abbassa a Pagliaga della stessa entità di quanto si alzi a Brondolo (essendo le due stazioni equidistanti dalla mezzera lagunare).

#### **6.4 La variazione dei tempi di inizio della chiusura delle bocche**

Come già accennato in precedenza il livello a cui chiudere le bocche nel caso di eventi caratterizzati da vento intenso non è stato ancora definito in via ufficiale.

Per questo motivo sono state eseguite più simulazioni per ogni evento, cambiando il momento in cui le bocche vengono chiuse: si sono considerati 10 diversi tempi di chiusura, il primo nel momento in cui viene raggiunto il valore di 110 cm alla bocca di Lido ed i restanti anticipando tale momento di 20 minuti fino ad arrivare a tre ore prima dal raggiungimento di tale quota.

D'ora in poi indicheremo con  $T_{110}$  l'istante in cui viene raggiunto il livello di 110 cm alla bocca di Lido. I risultati fino a qua esposti si riferivano quindi al tempo  $T_{110-60}$  (min).

Vediamo ora le tabelle relative agli altri tre istanti principali:  $T_{110}$ ,  $T_{110-120}$ , e  $T_{110-180}$ , riguardanti il confronto tra i dislivelli medi raggiunti a bocche aperte e a bocche chiuse.

ISTANTE DI CHIUSURA*: T <sub>110</sub>				DISLIVELLI MEDI TRA STAZIONI PER EFFETTO DEL VENTO (cm)																	
EVENTO	CARATTERISTICHE VENTO			SALUTE CHIOGGIA			SALUTE BURANO			BURANO CHIOGGIA			BRONDOLO PAGLIAGA			BRONDOLO GRASSABO'			VALGRANDE FUSINA		
	DIR (°N)	VEL (m/s)	TIPO DI VENTO	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ**	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ
06/11/2000	150	18	SCIROCCO	38	25	1.5	4	2	2.5	42	24	1.8	58	41	1.4	50	35	1.4	21	14	1.4
13/11/2001	70	15	BORA	36	19	1.9	3	9	0.4	37	27	1.4	43	36	1.2	49	43	1.2	10	4	2.4
16/11/2002	135	10	SCIROCCO	6	4	1.5	3	4	0.8	6	3	2.3	10	4	2.8	6	6	1.0	5	5	1.0
10/11/2004	40	18	BORA	49	24	2.0	13	19	0.7	62	40	1.6	76	55	1.4	88	70	1.3	18	9	2.0
03/12/2005	165	12	SCIROCCO	11	7	1.5	4	2	1.8	10	6	1.6	15	10	1.5	14	11	1.2	5	3	1.7
01/12/2008	175	16	SCIROCCO	18	10	1.8	5	3	1.5	20	11	1.9	26	21	1.3	24	21	1.1	9	3	2.5
01/11/2012	20	16	BORA	36	22	1.6	12	14	0.9	45	36	1.3	58	48	1.2	59	51	1.2	14	9	1.5
11/11/2012	120	15	SCIROCCO	20	14	1.4	3	6	0.5	20	9	2.1	29	20	1.5	17	6	3.0	12	12	1.1

\*Istante di chiusura: 1 ora prima dell'istante (T<sub>110</sub>) in cui si raggiungono i 110 cm a Chioggia o Punta Salute

\*\*λ è un coefficiente dato dal rapporto tra il dislivello a bocche chiuse e quello a bocche aperte

ISTANTE DI CHIUSURA: T <sub>110</sub> - 2 ORE				DISLIVELLI MEDI TRA STAZIONI PER EFFETTO DEL VENTO (cm)																	
EVENTO	CARATTERISTICHE VENTO			SALUTE CHIOGGIA			SALUTE BURANO			BURANO CHIOGGIA			BRONDOLO PAGLIAGA			BRONDOLO GRASSABO'			VALGRANDE FUSINA		
	DIR (°N)	VEL (m/s)	TIPO DI VENTO	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ
06/11/2000	150	18	SCIROCCO	42	25	1.7	4	2	2.7	47	24	2.0	63	41	1.5	55	35	1.6	24	14	1.6
13/11/2001	70	15	BORA	30	19	1.6	2	9	0.3	28	27	1.0	35	36	1.0	36	43	0.8	6	4	1.5
16/11/2002	135	10	SCIROCCO	6	4	1.5	0	4	0.1	6	3	2.1	9	4	2.6	5	6	0.8	5	5	1.0
10/11/2004	40	18	BORA	53	24	2.2	12	19	0.6	65	40	1.6	79	55	1.4	90	70	1.3	19	9	2.1
03/12/2005	165	12	SCIROCCO	15	7	2.1	4	2	2.1	19	6	2.9	24	10	2.4	22	11	2.0	7	3	2.4
01/12/2008	175	16	SCIROCCO	20	10	2.0	5	3	1.4	24	11	2.2	31	21	1.5	29	21	1.4	10	3	2.8
01/11/2012	20	16	BORA	36	22	1.6	11	14	0.8	43	36	1.2	55	48	1.1	55	51	1.1	14	9	1.5
11/11/2012	120	15	SCIROCCO	21	14	1.5	1	6	0.2	21	9	2.2	30	20	1.5	18	6	3.2	13	12	1.1

ISTANTE DI CHIUSURA: T <sub>110</sub> -3 ORE				DISLIVELLI MEDI TRA STAZIONI PER EFFETTO DEL VENTO (cm)																	
EVENTO	CARATTERISTICHE VENTO			SALUTE CHIOGGIA			SALUTE BURANO			BURANO CHIOGGIA			BRONDOLO PAGLIAGA			BRONDOLO GRASSABO'			VALGRANDE FUSINA		
	DIR (°N)	VEL (m/s)	TIPO DI VENTO	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ
06/11/2000	150	18	SCIROCCO	44	25	1.7	4	2	2.6	48	24	2.0	65	41	1.6	56	35	1.6	24	14	1.7
13/11/2001	70	15	BORA	27	19	1.4	2	9	0.2	25	27	0.9	32	36	0.9	33	43	0.8	5	4	1.3
16/11/2002	135	10	SCIROCCO	6	4	1.5	1	4	0.2	6	3	2.1	9	4	2.6	5	6	0.8	5	5	1.0
10/11/2004	40	18	BORA	54	24	2.2	11	19	0.6	65	40	1.6	79	55	1.4	89	70	1.3	19	9	2.2
03/12/2005	165	12	SCIROCCO	16	7	2.2	4	2	2.0	20	6	3.1	25	10	2.6	24	11	2.1	7	3	2.5
01/12/2008	175	16	SCIROCCO	20	10	1.9	5	3	1.4	24	11	2.2	30	21	1.4	29	21	1.4	10	3	2.8
01/11/2012	20	16	BORA	36	22	1.6	11	14	0.8	43	36	1.2	55	48	1.1	55	51	1.1	14	9	1.5
11/11/2012	120	15	SCIROCCO	22	14	1.5	1	6	0.2	21	9	2.2	30	20	1.5	18	6	3.1	13	12	1.1

6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

Si osserva che i dislivelli e di conseguenza i coefficienti moltiplicativi non subiscono significative variazioni. Questo fatto ci fa intuire che la variazione del tempo di chiusura non influisca sui dislivelli a bocche chiuse.

Sotto invece sono presentate le tabelle che mettono a confronto i livelli raggiunti dalle varie stazioni nella fase di chiusura con quello che noi abbiamo definito come livello equivalente, ovvero il livello a bocche chiuse che raggiungerebbero tutte le stazioni se il contributo del vento fosse nullo.

ISTANTE DI CHIUSURA: T <sub>110</sub>				LIVELLI A BOCHE CHIUSE E DIFFERENZE CON IL LIVELLO EQUIVALENTE (cm)																
EVENTO	CARATTERISTICHE VENTO			LIVELLO EQUIVALENTE (cm)	PUNTA SALUTE		CHIOGGIA		BURANO		GRASSABO'		PAGLIAGA		FUSINA		BRONDOLO		VALGRANDE	
	DIR (°N)	V (m/s)	TIPO DI VENTO		LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.
06/11/2000	150	18	SCIROCCO	100.8	108	+7	70	-31	112	+12	112	+11	119	+18	114	+13	61	-39	91	-10
13/11/2001	70	15	BORA	77.5	63	-14	99	+21	62	-16	55	-22	61	-16	76	-1	104	+27	86	+8
16/11/2002	135	10	SCIROCCO	95.6	96	+0	90	-6	93	-3	87	-9	98	+2	99	+3	88	-8	94	-2
10/11/2004	40	18	BORA	82.1	66	-16	115	+33	53	-29	36	-46	48	-34	78	-4	124	+42	97	+14
03/12/2005	165	12	SCIROCCO	99.3	104	+5	93	-6	106	+7	109	+10	107	+8	104	+5	90	-9	98	-2
01/12/2008	175	16	SCIROCCO	98.3	103	+5	85	-13	106	+8	109	+10	109	+11	102	+4	81	-17	93	-5
01/11/2012	20	16	BORA	75.6	64	-11	101	+25	56	-20	47	-28	50	-26	72	-3	107	+32	86	+11
11/11/2012	120	15	SCIROCCO	91.9	96	+4	76	-16	95	+3	82	-10	100	+8	100	+8	71	-21	87	-5

ISTANTE DI CHIUSURA: T <sub>110</sub> - 2 ORE				LIVELLI A BOCHE CHIUSE E DIFFERENZE CON IL LIVELLO EQUIVALENTE (cm)																
EVENTO	CARATTERISTICHE VENTO			LIVELLO EQUIVALENTE (cm)	PUNTA SALUTE		CHIOGGIA		BURANO		GRASSABO'		PAGLIAGA		FUSINA		BRONDOLO		VALGRANDE	
	DIR (°N)	V (m/s)	TIPO DI VENTO		LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.
06/11/2000	150	18	SCIROCCO	76.3	84	+8	42	-34	89	+12	88	+12	96	+20	89	+13	32	-44	65	-11
13/11/2001	70	15	BORA	37.3	22	-15	53	+16	25	-13	23	-14	24	-13	34	-4	59	+22	40	+2
16/11/2002	135	10	SCIROCCO	69.0	69	+0	63	-6	69	-0	66	-3	71	+2	72	+3	61	-8	67	-2
10/11/2004	40	18	BORA	49.6	32	-17	85	+36	21	-29	4	-45	15	-34	45	-5	94	+44	64	+15
03/12/2005	165	12	SCIROCCO	74.5	79	+5	64	-10	83	+8	85	+11	85	+11	78	+4	61	-13	71	-4
01/12/2008	175	16	SCIROCCO	86.9	92	+5	72	-15	96	+9	97	+10	99	+12	91	+4	68	-19	81	-6
01/11/2012	20	16	BORA	37.5	27	-11	63	+25	18	-19	11	-27	13	-24	34	-4	69	+32	49	+11
11/11/2012	120	15	SCIROCCO	61.6	66	+4	44	-17	65	+3	57	-4	69	+8	70	+8	39	-22	57	-5

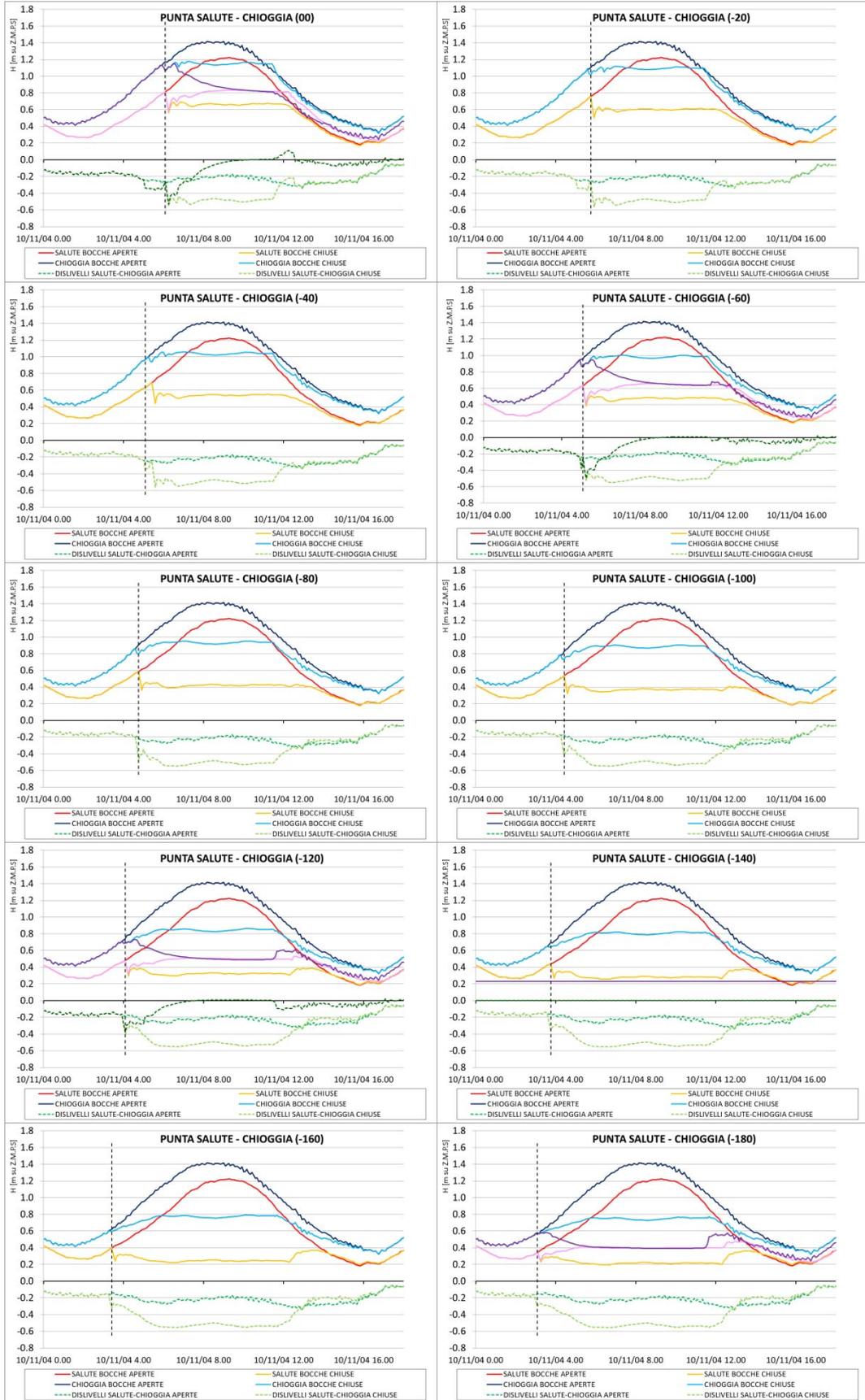
ISTANTE DI CHIUSURA: T <sub>110</sub> - 3 ORE				LIVELLI A BOCHE CHIUSE E DIFFERENZE CON IL LIVELLO EQUIVALENTE (cm)																
EVENTO	CARATTERISTICHE VENTO			LIVELLO EQUIVALENTE (cm)	PUNTA SALUTE		CHIOGGIA		BURANO		GRASSABO'		PAGLIAGA		FUSINA		BRONDOLO		VALGRANDE	
	DIR (°N)	V (m/s)	TIPO DI VENTO		LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.	LIVELLO MEDIO	DISLIVELLO RISPETT O A L.E.
06/11/2000	150	18	SCIROCCO	67.4	76	+8	32	-35	80	+13	79	+11	87	+20	81	+13	22	-45	56	-12
13/11/2001	70	15	BORA	19.0	6	-13	33	+14	7	-12	6	-13	7	-12	16	-3	39	+20	20	+1
16/11/2002	135	10	SCIROCCO	60.8	61	+0	55	-6	60	-1	57	-4	63	+2	64	+3	53	-8	59	-2
10/11/2004	40	18	BORA	39.9	22	-18	75	+36	11	-29	-4	-44	6	-34	35	-5	85	+45	54	+14
03/12/2005	165	12	SCIROCCO	66.7	72	+5	56	-11	75	+8	77	+11	78	+11	70	+3	53	-14	63	-4
01/12/2008	175	16	SCIROCCO	92.3	97	+5	78	-15	101	+9	103	+11	104	+12	96	+4	74	-19	86	-6
01/11/2012	20	16	BORA	33.5	23	-11	59	+25	15	-19	8	-26	10	-23	30	-3	66	+32	45	+12
11/11/2012	120	15	SCIROCCO	53.6	58	+4	36	-18	57	+3	49	-5	61	+7	62	+8	31	-23	49	-5

Dalla lettura dei grafici si può notare che le differenze tra i valori al variare dei tempi di sollevamento delle paratoie sono minime. Le differenze maggiori si notano tra le chiusure effettuate 2 e 3 ore prima di T<sub>110</sub> e quelle effettuate in tempi successivi, ciò si spiega col fatto che se il tempo di chiusura delle bocche è troppo breve non c'è il tempo

necessario affinché il fenomeno di inclinazione della superficie lagunare per effetto del vento vada a regime e quindi i dislivelli relativi a  $T_{110}$  e  $(T_{110}-60)$  risultano per alcuni eventi inferiori a quelli simulati per  $(T_{110}-120)$  e  $(T_{110}-180)$ .

Per comprendere meglio questo aspetto vediamo i grafici relativi all'evento di bora 10/11/2004 che rappresentano i dislivelli tra Punta Salute e Chioggia per i 10 diversi tempi di chiusura delle paratoie presi ad intervalli di 20 minuti a partire dall'istante 0 coincidente con il  $T_{110}$ .

## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI



La tabella seguente riassume per ogni coppia di stazioni e per ogni evento la media dei dislivelli effettuata sui 10 tempi di chiusura delle bocche. Viene indicata anche la deviazione standard e la percentuale di quest'ultima sul livello medio.

In conclusione dai risultati riassunti in questa e nelle precedenti tabelle possiamo dire che la variazione dei tempi di chiusura, e quindi del livello equivalente, non influisce, se non in termini minimi, sui dislivelli che si realizzano tra le stazioni.

MEDIA E DEVIAZIONE STANDARD DEI DISLIVELLI SUI 10 DIVERSI TEMPI DI CHIUSURA DELLE BOCCHE																					
EVENTO	CARATTERISTICHE VENTO			SALUTE CHIOGGIA			SALUTE BURANO			BURANO CHIOGGIA			BRONDOLO PAGLIAGA			BRONDOLO GRASSABO'			VALGRANDE FUSINA		
	DIR (°N)	V (m/s)	TIPO DI VENTO	MEDIA (cm)	DEV. ST. (cm)	%	MEDIA (cm)	DEV. ST. (cm)	%	MEDIA (cm)	DEV. ST. (cm)	%	MEDIA (cm)	DEV. ST. (cm)	%	MEDIA (cm)	DEV. ST. (cm)	%	MEDIA (cm)	DEV. ST. (cm)	%
06/11/2000	150	18	SCIROCCO	41.5	1.7	<b>4.2</b>	4.5	0.1	<b>2.2</b>	45.9	1.8	<b>3.9</b>	62.0	2.2	<b>3.6</b>	54.2	1.9	<b>3.5</b>	22.8	1.1	<b>4.9</b>
13/11/2001	70	15	BORA	36.0	1.7	<b>4.7</b>	<4	/	/	37.5	3.6	<b>9.5</b>	43.7	4.3	<b>9.8</b>	44.8	4.2	<b>9.3</b>	9.5	1.2	<b>12.6</b>
16/11/2002	135	10	SCIROCCO	6.0	0.0	<b>0.4</b>	<4	/	/	6.0	0.2	<b>2.7</b>	9.6	0.2	<b>2.3</b>	5.2	0.4	<b>7.5</b>	4.9	0.1	<b>1.4</b>
10/11/2004	40	18	BORA	51.7	1.8	<b>3.4</b>	12.0	0.8	<b>6.3</b>	63.6	1.1	<b>1.7</b>	77.8	1.1	<b>1.5</b>	89.0	0.6	<b>0.7</b>	18.9	0.4	<b>2.3</b>
03/12/2005	165	12	SCIROCCO	14.2	1.6	<b>11.6</b>	4.2	0.2	<b>3.9</b>	16.1	3.2	<b>19.7</b>	21.4	3.6	<b>16.6</b>	19.6	3.7	<b>18.7</b>	6.5	0.9	<b>13.1</b>
01/12/2008	175	16	SCIROCCO	19.6	0.7	<b>3.5</b>	4.7	0.2	<b>4.1</b>	23.0	1.1	<b>5.0</b>	29.7	1.3	<b>4.4</b>	28.2	1.8	<b>6.5</b>	9.6	0.3	<b>3.0</b>
01/11/2012	20	16	BORA	36.2	0.2	<b>0.5</b>	11.5	0.6	<b>5.6</b>	43.7	0.7	<b>1.7</b>	55.8	1.0	<b>1.9</b>	56.1	1.4	<b>2.4</b>	13.5	0.3	<b>2.1</b>
11/11/2012	120	15	SCIROCCO	21.0	0.5	<b>2.4</b>	<4	/	/	20.5	0.4	<b>2.0</b>	29.9	0.3	<b>0.9</b>	17.9	0.2	<b>1.4</b>	12.9	0.3	<b>2.3</b>

### 6.5 Il contributo della riduzione di livello al colmo e delle differenti condizioni al contorno sui dislivelli a bocche aperte

Si è visto precedentemente come prendendo ad esempio le stazioni di Punta Salute e Burano si registrassero in alcuni casi dislivelli maggiori nella situazione a bocche aperte piuttosto che nella situazione a bocche chiuse.

Ciò si verifica perché l'onda di marea che attraversa la bocca di Lido e entra in laguna subisce nella sua propagazione un processo di attenuazione. Il risultato è una differenza di livello tra le quasi tutte le coppie di stazioni considerate, nella fase di colmo dell'onda, indipendente dall'effetto del vento.

In linea teorica volendo studiare come il vento modifichi l'entità del dislivello tra stazioni nelle situazioni di bocche aperte e bocche chiuse, filtrando la differenza di ampiezza dell'onda, occorre eliminare tale contributo.

Un secondo contributo che tende ad amplificare i dislivelli a bocche aperte è dato dalla differenza di livello che si ha alle bocche mentre soffia il vento: le condizioni al contorno sono quindi diverse da bocca a bocca e influiscono sui livelli interni venendosi così a sommare all'effetto del vento all'interno della laguna.

Questo è ciò che si è fatto nella parte finale del lavoro.

Dai dislivelli tra due stazioni calcolati a bocche aperte con passo di 5 minuti si è sottratto istante per istante la differenza tra i livelli d'onda calcolati senza vento, dovuta pertanto solo alla diversa attenuazione dell'altezza dell'onda di marea nella sua propagazione e dalle diverse condizioni al contorno.

Ciò che si ottiene quindi dal rapporto tra i dislivelli calcolati a bocche chiuse e i dislivelli così ottenuti è un coefficiente  $\lambda_2$  dipendente solamente dall'effetto del vento, diverso da quello calcolato precedentemente, il quale risentiva anche degli effetti propagatori e dei diversi livelli alle bocche.

Si applica quindi al fenomeno dei dislivelli all'interno della laguna indotti da vento una maggiore generalizzazione. È bene però ricordare che questa operazione ha significato solamente ai fini teorici perché nella realtà i due effetti sono presenti ed inscindibili dall'effetto di sopraelevazione del vento.

La tabella seguente integra quella presentata nel paragrafo 6.3 qui infatti vengono confrontati i dislivelli calcolati a bocche chiuse (univocamente definiti) con i dislivelli a

bocche aperte calcolati nei due modi differenti: il primo è il dislivello reale il secondo è quello teorico ottenuto filtrando i due contributi.

Dal rapporto tra il dislivello a bocche chiuse e il dislivello a bocche aperte reale e teorico, rispettivamente, si ottengono i due coefficienti (già calcolato in precedenza) e  $\lambda_2$ .

Si osserva che il nuovo coefficiente risulta più uniforme del precedente e non presenta mai valori inferiori all'unità, in virtù della maggiore generalizzazione conferitagli rispetto a  $\lambda_1$ .

ISTANTE DI CHIUSURA: T110-1 ORA				DISLIVELLI MEDI TRA STAZIONI PER EFFETTO DEL VENTO (cm)														
EVENTO	CARATTERISTICHE VENTO			SALUTE - CHIOGGIA					SALUTE - BURANO					BURANO - EMOGGIA				
	DIR (°N)	VEL (m/s)	TIPO DI VENTO	BOCCH CHIU SE	BOCCH APERTE (REALI)	BOCCH APERTE (TEORICI)	$\lambda_1$ (REALE)	$\lambda_2$ (TEORICO)	BOCCH CHIU SE	BOCCH APERTE (REALI)	BOCCH APERTE (TEORICI)	$\lambda_1$ (REALE)	$\lambda_2$ (TEORICO)	BOCCH CHIU SE	BOCCH APERTE (REALI)	BOCCH APERTE (TEORICI)	$\lambda_1$ (REALE)	$\lambda_2$ (TEORICO)
06/11/2000	150	18	SGIROCCO	41	25	21	1.6	2.0	5	3	2	1.7	2.5	45	24	22	1.9	2.0
13/11/2001	70	15	BORA	34	19	15	1.8	2.2	<4	/	/	/	/	33	27	14	1.2	2.3
16/11/2002	135	10	SGIROCCO	6	4	3	1.5	1.8	<4	/	/	/	/	6	3	3	2.2	1.7
10/11/2004	40	18	BORA	51	24	21	2.1	2.4	12	19	10	0.7	1.2	63	40	31	1.6	2.0
03/12/2005	165	12	SGIROCCO	13	7	8	1.8	1.8	4	2	3	2.0	1.7	15	6	10	2.4	1.5
01/12/2008	175	16	SGIROCCO	20	10	10	2.0	2.1	5	3	2	1.4	2.1	23	11	12	2.2	2.0
01/11/2012	20	16	BORA	36	22	17	1.6	2.1	12	14	8	0.9	1.5	44	36	25	1.2	1.8
11/11/2012	120	15	SGIROCCO	21	14	11	1.5	1.9	<4	/	/	/	/	20	9	9	2.1	2.3

ISTANTE DI CHIUSURA: T110-1 ORA				DISLIVELLI MEDI TRA STAZIONI PER EFFETTO DEL VENTO (cm)														
EVENTO	CARATTERISTICHE VENTO			BRONDOLO - BAGLIAGA					BRONDOLO - BRASSABO'					VALGRANDE - BUSINA				
	DIR (°N)	VEL (m/s)	TIPO DI VENTO	BOCCH CHIU SE	BOCCH APERTE (REALI)	BOCCH APERTE (TEORICI)	$\lambda_1$ (REALE)	$\lambda_2$ (TEORICO)	BOCCH CHIU SE	BOCCH APERTE (REALI)	BOCCH APERTE (TEORICI)	$\lambda_1$ (REALE)	$\lambda_2$ (TEORICO)	BOCCH CHIU SE	BOCCH APERTE (REALI)	BOCCH APERTE (TEORICI)	$\lambda_1$ (REALE)	$\lambda_2$ (TEORICO)
06/11/2000	150	18	SGIROCCO	61	41	41	1.5	1.5	54	35	33	1.5	1.6	23	14	16	1.6	1.4
13/11/2001	70	15	BORA	40	36	22	1.1	1.8	41	43	23	1.0	1.8	8	4	4	2.0	1.9
16/11/2002	135	10	SGIROCCO	10	4	7	2.7	1.3	5	6	4	0.8	1.5	5	5	4	1.0	1.1
10/11/2004	40	18	BORA	77	55	46	1.4	1.7	89	70	59	1.3	1.5	19	9	7	2.1	2.5
03/12/2005	165	12	SGIROCCO	20	10	14	2.0	1.5	17	11	14	1.5	1.3	6	3	4	2.1	1.7
01/12/2008	175	16	SGIROCCO	30	21	21	1.4	1.4	29	21	19	1.4	1.5	10	3	5	2.8	1.8
01/11/2012	20	16	BORA	56	48	37	1.2	1.5	56	51	39	1.1	1.5	13	9	7	1.5	1.8
11/11/2012	120	15	SGIROCCO	30	20	18	1.5	1.7	18	6	9	3.2	1.9	13	12	9	1.1	1.4

### **6.6 Alcuni esempi di superamento del livello di salvaguardia per opera dei sopralzi della superficie lagunare indotti dal vento**

La valutazione dei sopralzi dovuti all'effetto del vento sulla superficie lagunare durante la chiusura delle bocche riveste un ruolo importante nella scelta dell'istante a cui dare inizio alla manovra di sollevamento delle paratoie mobili. Tale istante è stabilito sulla base di un processo decisionale descritto nel documento del Magistrato alle Acque: "Interventi alle bocche lagunari per la regolazione dei flussi di marea- Studio di impatto ambientale del progetto di massima- Allegato 6 – Tema 5 (1997)".

Il processo decisionale di chiusura inizia nel momento in cui si prevede che entro 24 ore il livello di marea a Punta Salute superi il livello di salvaguardia.

Tale livello di salvaguardia è fissato nel citato documento del Magistrato alle Acque in 100 cm sullo ZMPS. Tuttavia secondo le recenti indicazioni in materia di difesa della città di Venezia dalle acque alte, è stato innalzato a 110 cm.

La procedura decisionale proposta si fonda su tre principali componenti:

- una successione di reiterate previsioni dell'andamento nel tempo della marea nel periodo da 24 a 3 ore precedenti la prevista chiusura;
- una serie di rilevazioni, effettuate fino a 3 ore prima della prevista chiusura, dei fattori meteorologici e idrologici che possono contribuire direttamente al sopralzo della marea interna;
- una classificazione in eventi mareali tipo, secondo prestabiliti criteri dimensionali dei fenomeni meteorologici, cui corrispondono prestabiliti livelli di chiusura.

La chiusura delle paratoie decisa con il procedimento sopra descritto dovrebbe garantire, secondo il proponente, che i livelli di marea all'interno della laguna risultino sempre inferiori al prescelto livello di salvaguardia +110 cm.

Le chiusure non dovranno avvenire con troppo anticipo rispetto all'effettivo andamento della marea e non dovranno comportare livelli troppo inferiori rispetto a quanto richiesto. Il sistema di previsione dovrebbe garantire la limitazione del numero e della durata degli interventi di chiusura allo stretto necessario, al fine di ridurre il loro impatto sulla portualità e sull'equilibrio ecologico-ambientale.

Nel sopracitato documento del Magistrato alle Acque, i sopralzi differenziali dovuti al vento tra zone diverse della laguna sono presi in considerazione prospettando un

anticipo temporale della chiusura rispetto al previsto raggiungimento della quota di salvaguardia a Punta Salute. Tale anticipo di chiusura non è, peraltro, ben precisato.

Nello Studio di Impatto Ambientale (SIA) è indicato un sopralzo a Punta della Salute dovuto a vento di scirocco di 2 cm e un sopralzo di 22 cm a Chioggia dovuto alla bora, sopralzi corrispondenti a venti con tempo di ritorno pari a 100 anni, che nello studio del Magistrato alle Acque corrispondono a intensità pari a 21 e 22 m/s.

Secondo quanto emerso dalle simulazioni che sono state condotte nel corso dello studio, invece si avrebbe un sopralzo a Punta Salute, in caso di vento di scirocco di 8 cm (evento 6/11/2000), superiore quindi ai 2 cm prospettati dal SIA.

Il sopralzo a Chioggia dovuto a vento di bora raggiunge i 36 cm (evento 10/11/2004), risultato molto diverso rispetto a quanto indicato dal SIA, pur presentando un vento di intensità minore (18 m/s) di quelli prospettati.

Inoltre, nello studio del SIA, non sembra sia data la giusta importanza all'entità dell'aumento dei dislivelli a bocche chiuse tra Punta Salute e Chioggia. Per limitarci ai due eventi più importanti del 6/11/2000 e 10/11/2004 l'incremento calcolato è rispettivamente 1,6 e 2 volte superiore ai dislivelli che si creano nella situazione attuale con bocche aperte.

I risultati delle simulazioni condotte oltre a convergere con alcune stime di esperti già citate (Ferla-Rusconi, 1994, Zecchetto-Ungiesser, 1998), danno conferma dei dubbi espressi dalla Commissione VIA (Valutazione di Impatto Ambientale) del Ministero dell'Ambiente affiancata da un collegio di esperti internazionali, la quale nella sezione II.4 del relativo documento scrive : "Il proponente non pare considerare con sufficiente prudenza le conseguenze di simili eventi (i sopralzi differenziati da vento) rispetto alla prospettata strategia di chiusura delle bocche." e ancora : "L'introduzione di coefficienti di correzione che tengono conto delle incertezze previsionali di alcuni contributi al sopralzo (pioggia e vento, entrambi in laguna) e gli ulteriori abbassamenti prudenziali dei livelli di chiusura per alcune classi di eventi a maggior rischio riducono in certa misura le incertezze previsionali dei livelli di chiusura. Tuttavia non sembra sufficiente a evitare il rischio di sottostima dei contributi effettivi al sopralzo di marea precedentemente definiti."

## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

Alla luce delle considerazioni esposte si è voluto pertanto esaminare se, nei casi considerati, fosse possibile il superamento della quota di salvaguardia nonostante il sollevamento delle paratoie.

Gli esempi al riguardo sono tre.

### 1) Evento del 6 novembre 2000. Sopralzo a Burano.

Avendo a disposizione i valori registrati alla bocca di Lido con cadenza di 5 minuti si è deciso di chiudere le paratoie al raggiungimento dei 110 cm alla stazione di Lido Diga Sud, considerando il fatto che all'interno della laguna i livelli saranno minori per effetto del ritardo di fase. Si ottiene un livello massimo a bocche chiuse che raggiunge a Punta Salute un valore pari a 108 cm, al di sotto del limite di salvaguardia, tuttavia a Burano si verifica per oltre 2 ore il superamento dei 110 cm con picco di 116 cm.

I risultati sono illustrati nei grafici di Figura 6.2 e Figura 6.3 dove sono messi a confronto anche i livelli raggiunti alla stazione di Pagliaga, ancora più a nord rispetto a Burano.

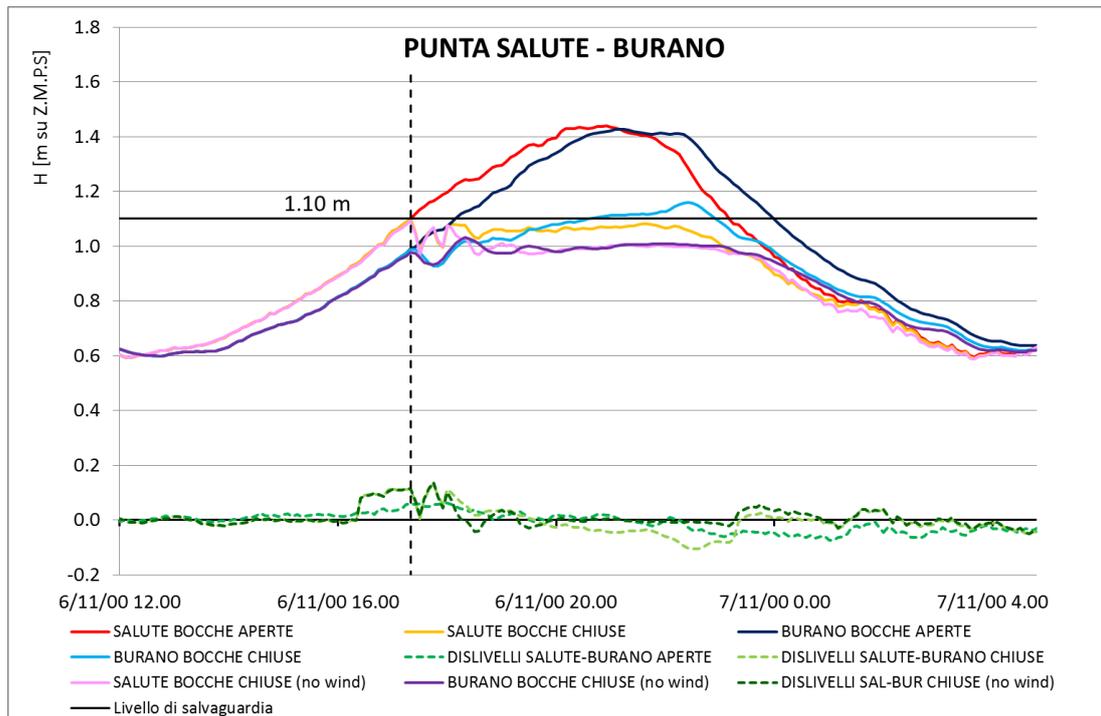


Figura 6.2

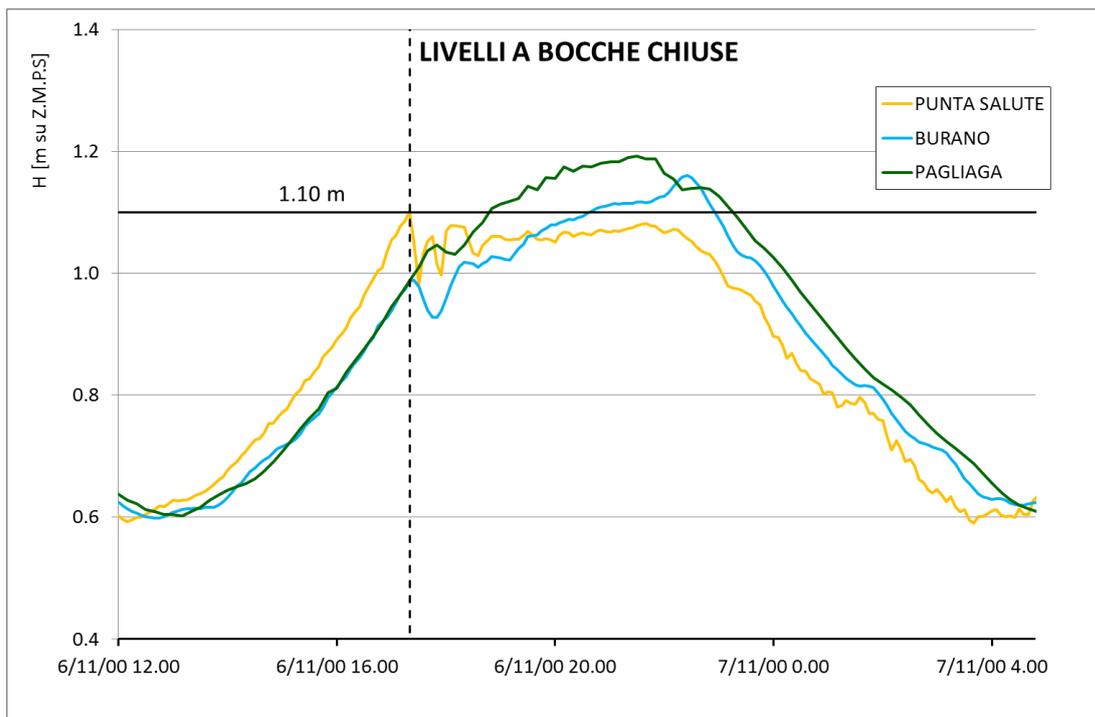


Figura 6.3

## 2) Evento del 10 novembre 2004. Sopralzo a Chioggia

Per quanto riguarda Chioggia il livello di salvaguardia non è più 110 cm ma 130 infatti sotto tale soglia la città dovrebbe essere protetta dal sistema di piccole paratoie detto “piccolo Mose” installate sul canal Vena in corrispondenza di porta Santa Maria e in prossimità di piazza Vigo.

Si osserva che una chiusura delle bocche di porto che realizzi (in eventuale assenza di vento e con l'aiuto del ritardo di fase che fa fluire acqua verso la laguna nord e quindi diminuire il livello) un valore a Punta Salute di 100 cm (sceso poi a 85 cm circa a causa dell'azione del vento stesso), livello ben al di sotto del limite di salvaguardia per Venezia, determina a Chioggia il superamento dei 130 cm per più di 4 ore (Figura 6.4 e Figura 6.5).

6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCCHE SUI SOPRALZI

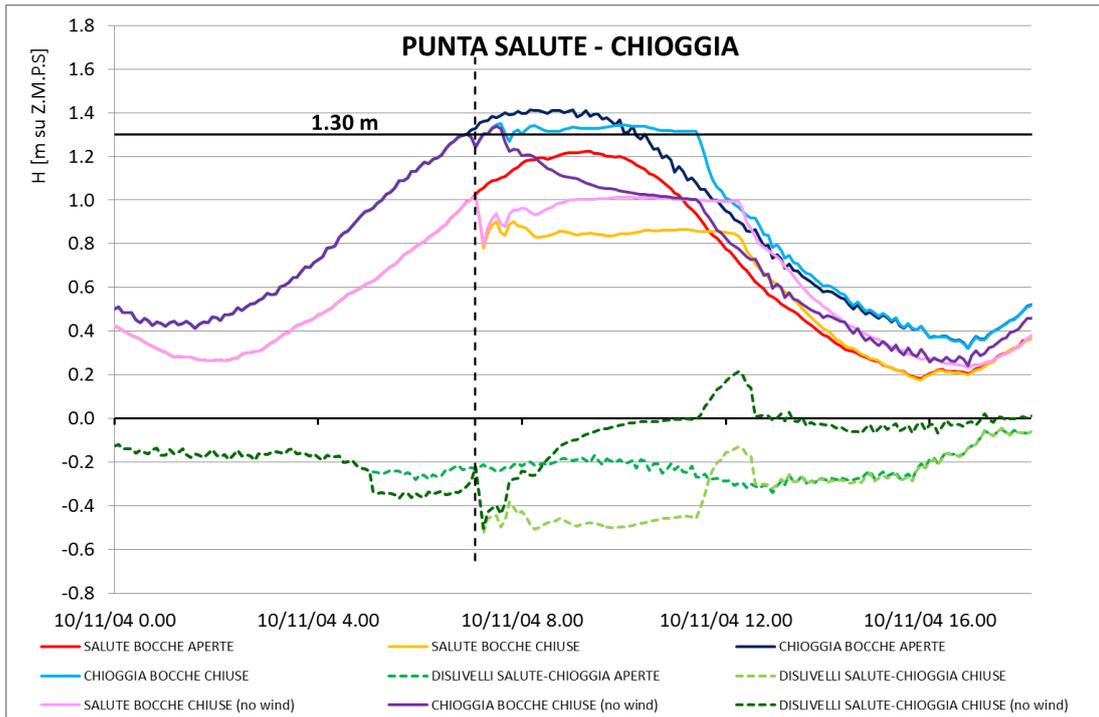


Figura 6.4

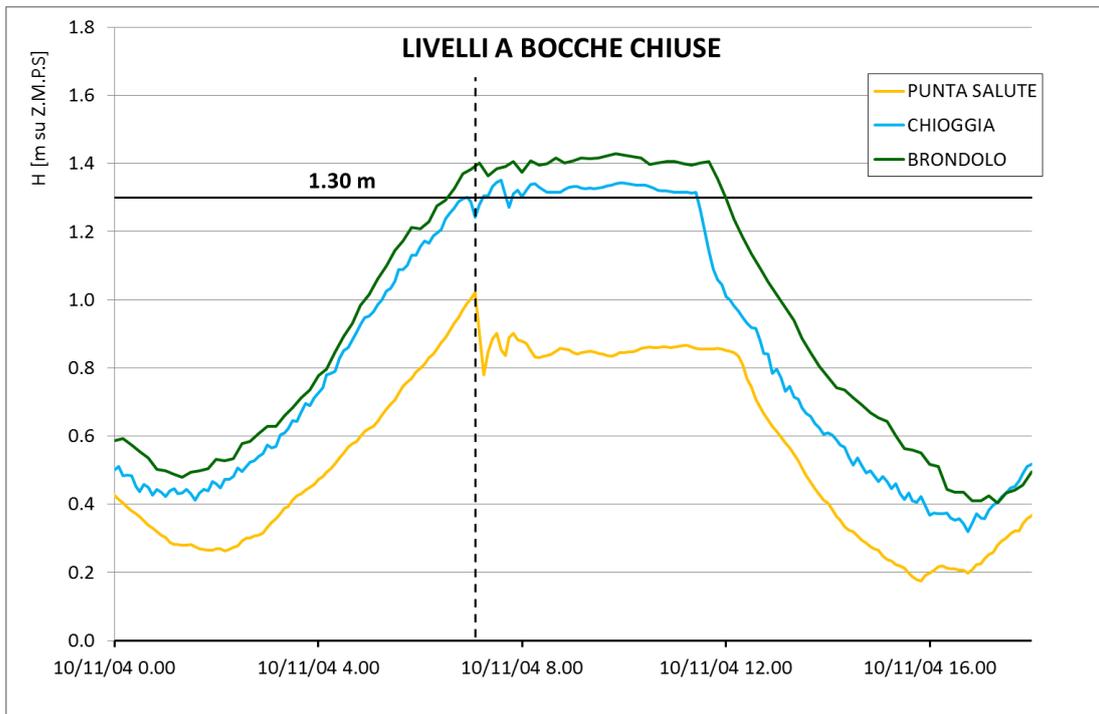


Figura 6.5

### 3) Evento del 1 novembre 2012. Sopralzo a Chioggia

Anche in questo caso il vento determina un sopralzo a Chioggia superiore al limite di salvaguardia indicato. Chiudendo in modo che il livello a Punta Salute non superi i 110 cm si ha un livello a Chioggia superiore ai 130 cm per circa due ore. In questo intervallo temporale, la città sarebbe soggetta ad allagamento nonostante la presenza del “piccolo Mose”. (Figura 6.6 e Figura 6.7)

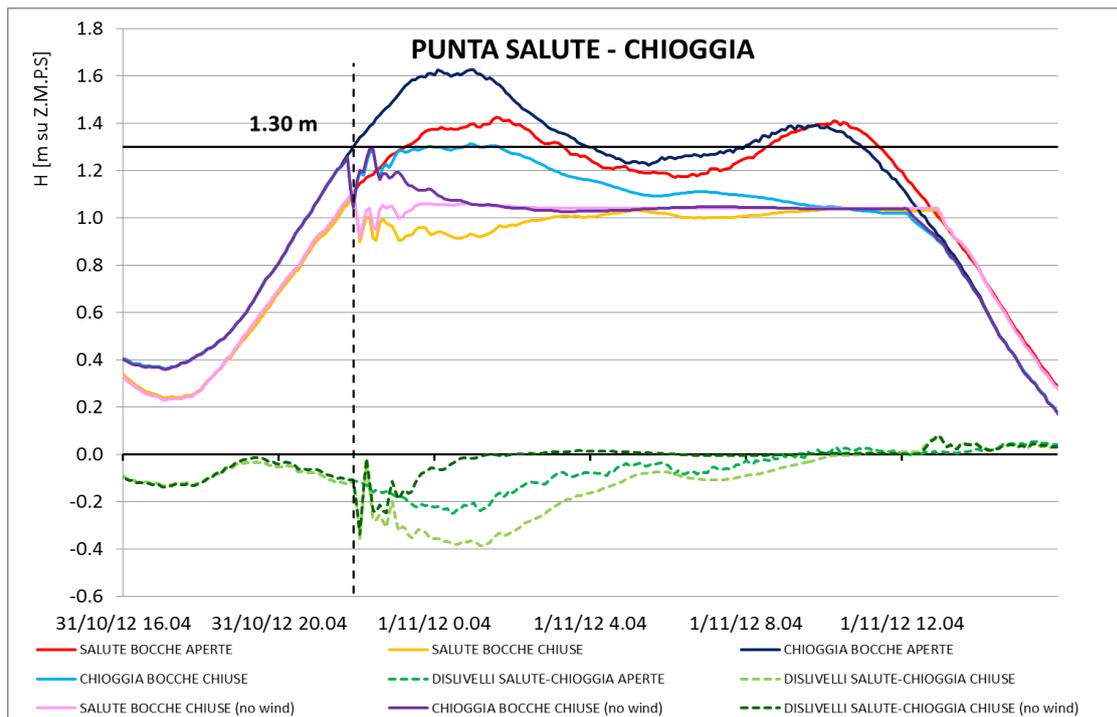


Figura 6.6

## 6. EFFETTI DELLA CHIUSURA DELLE BOCHE SUI SOPRALZI

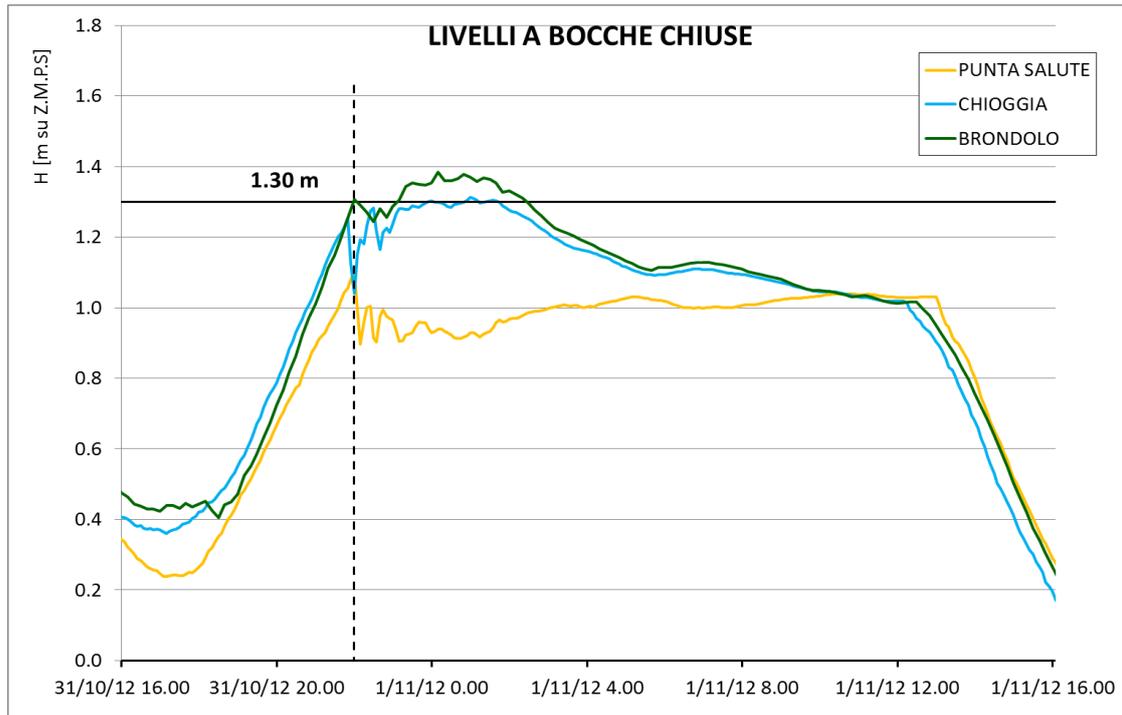


Figura 6.7

In conclusione è opportuno sottolineare tre punti fondamentali:

- i sopralzi indicati nel SIA sono sottostimati rispetto a quanto risulta dalle simulazioni condotte. In particolare i sopralzi a Chioggia arrivano a 36 cm, superiori quindi ai 21 cm indicati nello studio del Magistrato alle Acque, per un vento di intensità inferiore;
- in generale, quando vengono chiuse le bocche di porto, i dislivelli tra laguna nord e laguna sud sono molto più marcati rispetto a quanto si osserva a bocche aperte. Tra Chioggia e Punta Salute l'aumento è circa doppio;
- i sopralzi indotti da vento possono produrre allagamenti inattesi rispetto alle previsioni di documenti ufficiali. Infatti nonostante le bocche di porto vengano chiuse realizzando il mantenimento del livello al di sotto del limite di salvaguardia per Venezia, questo non accade sempre per Chioggia (durante gli eventi di bora), dove si possono registrare livelli superiori al limite di 130, e per Burano, dove si può superare la soglia di 110cm.



## BIBLIOGRAFIA

- APAT, *Stazioni di osservazione Meteo - Mareografiche nella laguna di Venezia e nell'arco costiero Nord Adriatico*, Rapporti 68/2006.
- Canesso D., Cordella M., Arena G., *Manuale di mareografia e linee guida per i processi di validazione dei dati mareografici*, ISPRA, Manuali e Linee guida 77/2012.
- Canestrelli P., Mandich M., Pirazzoli A.P., Tomasin A., *Venti, depressioni e sesse: perturbazioni delle maree a Venezia (1950-2000)*, Centro Previsioni e Segnalazione Maree, Città di Venezia, 2001.
- Cordella M., Zampato L., Pastore F., Tomasin A., Canestrelli P., Ferla M., *Le tavole annuali di marea per Venezia*, Atti dell'Istituto Veneto di SS.LL.AA, Tomo CLXIX (2010-2011)
- D'Alpaos L., Defina A.: *Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon*, Computers & Geosciences, 2006.
- D'Alpaos L.: *Fatti e misfatti di idraulica lagunare. La laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere alle bocche di porto*, Istituto Veneto di SS.LL.AA., Venezia 2010.
- Ferla M., Cordella M., Michielli L., *Aggiornamenti sulle osservazioni dei livelli di marea a Venezia*, APAT, Rapporti 69/2006.
- Mazzoldi A. *Quantità e qualità degli scambi tra Laguna e Mare*, CORILA, Programma di ricerca 2000-2003, Linea 3.5.
- Ministero dell'Ambiente: *Valutazione di impatto ambientale relativa agli interventi alle bocche lagunari per la regolazione dei flussi di marea. Studio di impatto ambientale del progetto di massima*, 1998, consultabile sul sito <http://www2.comune.venezia.it/mose-doc-prg/>
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Magistrato alle Acque di Venezia, *Quaderni Trimestrali Consorzio Venezia Nuova*, gennaio/marzo 2010.
- Umgiesser G. Matticchio B., *Simulazione delle chiusure delle barriere mobili per gli anni 2000, 2001 e 2002 nella situazione attuale e ipotizzando l'innalzamento del livello medio del mare*, consultabile sul sito <http://www2.comune.venezia.it/mose-doc-prg/>



## RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare il professor Luigi D'Alpaos per l'interesse verso l'idraulica che ha saputo trasmettermi nel corso delle sue lezioni.

Ringrazio altrettanto sentitamente l'ingegner Riccardo Mel per avermi guidato con costanza in tutte le fasi del lavoro di tesi e per essere sempre stato disponibile a dirimere i miei dubbi anche al di fuori del suo consueto orario di lavoro.

Desidero ringraziare con affetto la mia famiglia, mia mamma Nicoletta e mio fratello Matteo, la mia fidanzata Tania, tutti i miei amici e parenti stretti, ognuno per motivi diversi che sarebbe riduttivo elencare in poche righe di inchiostro avendo modo di riferirli loro di persona, in un contesto di intimità.

Un ultimo pensiero va infine a mio papà Enrico, il cui ricordo, nei momenti di difficoltà, frequenti in questi anni di studi, ha rafforzato il mio animo e, tramite l'esempio della sua intensa, seppur breve vita, mi ha ricordato che solo con l'impegno, il sacrificio e la dedizione si raggiungono i risultati che ci si è prefissati.