



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

A.A. 2014-2015

Tesi di laurea

Simulazione operativa della chiusura delle bocche di porto

Relatore: Prof. Luca Carniello

Correlatore: Ing. Riccardo Mel

Laureando: Davide Lo Nigro

Matricola: 1056952

Sommario

Premessa 5

1	Introduzione	7
1.1	Gli eventi di alta marea	7
1.2	Marea astronomica e marea meteorologica.....	9
1.3	Distribuzione dei livelli nella laguna.....	15
1.4	Morfologia del sistema lagunare.....	16
1.5	L'interazione tra la laguna e il mare.....	19
1.6	Interventi alle bocche di porto in caso di acqua alta.....	23
1.6.1	La progettazione e la realizzazione del MO.S.E.	23
1.6.2	La bocca di porto di Lido.....	27
1.6.3	La bocca di porto di Malamocco.....	28
1.6.4	La bocca di porto di Chioggia.....	29
1.7	Registrazione dei dati di livello.....	30
1.7.1	Cenni storici.....	30
1.7.2	Organi preposti alla raccolta dei dati.....	32
1.7.3	Stazioni di rilevamento utilizzate	33
2	Problematiche della gestione delle barriere mobili alle bocche di porto	39
2.1	Sovralzi durante la chiusura.....	39
2.1.1	Sovralzi dovuti al vento.....	39
2.1.2	Sovralzi dovuti alle precipitazioni e al bacino scolante.....	47
2.1.3	Sovralzi dovuti alla filtrazione dell'acqua tra le paratoie..	48
2.2	Livello equivalente.....	49
3	Oggetto dello studio.....	53
3.1	Obiettivo.....	53

3.2	Dati utilizzati	54
3.3	Modello implementato.....	60
3.3.1	Vento.....	62
3.3.2	Precipitazioni e bacino scolante.....	63
3.3.3	Filtrazioni tra le paratoie.....	63
3.3.4	Incremento del medio mare.....	63
3.3.5	Algoritmo di calcolo.....	64
3.3.6	Esempio.....	65
3.4	Modello idrodinamico.....	70
4	Risultati	77
4.1	Simulazioni.....	77
4.2	Analisi di sensibilità dei parametri	93
4.3	Esempio di confronto con il modello idrodinamico.....	108
5	Conclusioni.....	113
	Bibliografia.....	115

Premessa

Il presente lavoro si propone di implementare un codice di calcolo automatico in grado di simulare la procedura operativa di gestione delle bocche di porto della laguna di Venezia. A partire da una serie di dati di livello e meteorologici, l'algoritmo deve individuare le modalità e i tempi di chiusura del bacino lagunare necessari a garantire il rispetto delle condizioni imposte, analizzando tutti i fattori e parametri che possono influenzare la risposta del bacino lagunare alle sollecitazioni meteorologiche.

L'utilizzo di tale strumento non è limitato all'analisi di dati storici, ma può estendersi sia alla proiezione dell'operatività del sistema M.O.S.E. negli anni a venire, in funzione dell'incremento del medio mare, sia alla previsione in tempo reale del funzionamento delle paratoie.

1 Introduzione

1.1 Gli eventi di alta marea

La Laguna di Venezia è un bacino costiero affacciato al mare Adriatico e da esso separato per mezzo di un cordone di terra litoraneo, interrotto in sole tre bocche di porto. Esse prendono il nome dai centri abitati posti nelle vicinanze, ovvero Chioggia, Malamocco e Lido. Tali connessioni costituiscono gli unici punti di scambio dei flussi d'acqua e sedimenti tra laguna e mare, permettendo il necessario ricambio di acqua all'interno della laguna, ma allo stesso tempo minacciando la sommersione di Venezia e delle altre cittadine lagunari durante gli eventi di alta marea più intensi.

L'onda di marea in arrivo dall' Adriatico una volta giunta all'interno della Laguna si propaga in maniera quasi indisturbata, se non per l'effetto di un possibile vento che, se di intensità notevole, assume un'importanza fondamentale a causa dell'attrito che sviluppa sulla superficie: le sue variazioni di intensità e direzione possono portare alle più svariate configurazioni di sovralti differenziati diffusi all'interno della laguna. Sommandosi all'onda di marea, tali sopraelevazioni possono comportare il raggiungimento di livelli superiori alle soglie di tolleranza dei vari centri abitati, implicando un rischio alle strutture e alle attività.

Gli eventi di marea che raggiungono al livello di colmo 110 cm sopra lo zero mareografico di Punta della Salute sono denominati convenzionalmente eventi di *acqua alta*; a questa soglia sorgono problemi di trasporto e di viabilità pedonale nei punti altimetricamente più depressi della città di Venezia (es. Piazza San Marco). Si classificano invece come *acque alte eccezionali* le maree il cui colmo supera il livello di 140 cm rispetto allo zero mareografico.

È bene precisare alcuni aspetti riguardanti il riferimento mareografico utilizzato comunemente per la laguna. 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 ancheggiano 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 abbassato a 1,50 m al di sotto del Comune Marino, al fine di evitare di 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 26 cm a causa di fenomeni di subsidenza ed eustatismo.

La convenzione dello zero mareografico consente facilmente di verificare come eventi mareali del medesimo livello, anche distanti molti decenni, determinino approssimativamente 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.

Si riporta di seguito la relazione che intercorre tra livello di marea raggiunto rispetto a Punta della Salute e grado di allagamento della città di Venezia.

Altezza maree	Allagamento
90 cm	2 %
100 cm	5 %
110 cm	12 %
120 cm	28 %
130 cm	46 %
140 cm	59 %
150 cm	70 %
160 cm	77 %
170 cm	82 %
180 cm	85 %
190 cm	88 %
200 cm	91 %

Tabella 1.1 - Superfici di Venezia allagate in funzione del livello della marea

Si è notato nel corso degli ultimi decenni un progressivo aumento della frequenza degli eventi di acqua alta a Venezia; a ciò 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 strati per depressurizzazione delle falde, a causa di un eccessivo sfruttamento delle loro acque da parte dell'uomo (subsidenza di origine antropica). E' quanto si è verificato a Venezia nel secolo scorso, 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.

1.2 Marea astronomica e marea meteorologica

I livelli di marea osservati nella laguna di Venezia sono dati dalla combinazione 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.

La forza dominante è il campo gravitazionale generato dal sistema Terra-Sole-Luna, ma oscillazioni della pressione atmosferica e i piccoli movimenti della superficie solida terrestre possono assumere un carattere non trascurabile.

A Venezia la marea astronomica assume un comportamento di tipo prevalentemente semidiurno, raggiungendo due massimi e due minimi in 24 ore. Nella fasi di Luna nuova e Luna piena gli effetti del Sole si sommano a quelli lunari (fasi di sизigia) per l'allineamento Terra-Sole-Luna, dando le massime oscillazioni di marea; nei periodi di primo ed ultimo quarto lunare (fasi di quadratura) le oscillazioni sono meno marcate, al punto di raggiungere un solo minimo e un solo massimo nelle 24 ore.

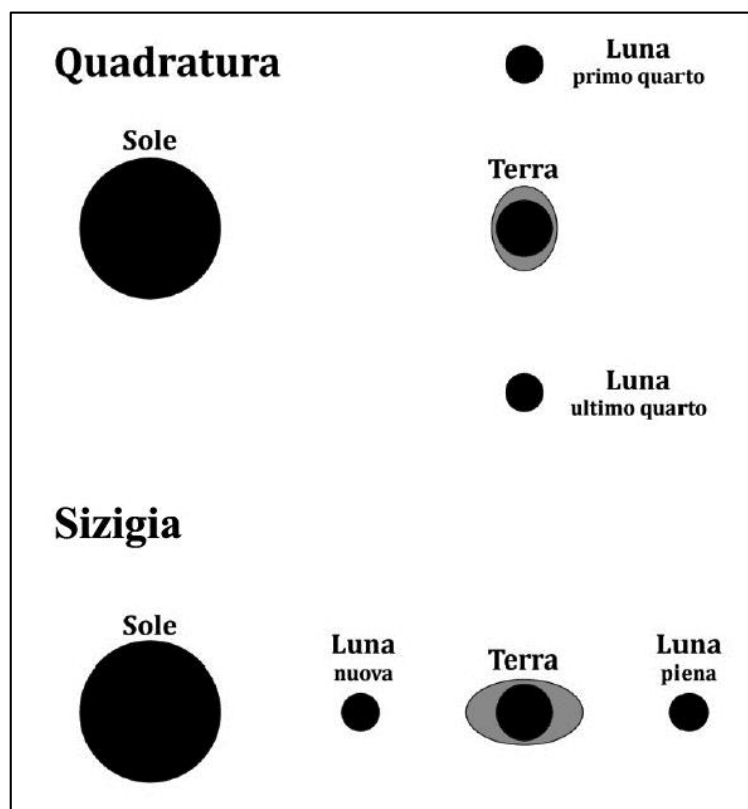


Figura 1.1 - Fasi lunari di quadratura e sизigia

Uno dei metodi maggiormente usati per la previsione della marea astronomica in una determinata località è l'analisi per componenti armoniche. Ci si basa sull'assunzione che $y(t)$, altezza di marea al tempo t , possa essere rappresentata dalla somma dei valori assunti in quell'istante da particolari curve sinusoidali:

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

dove A_n è l'ampiezza, ω_n rappresenta la pulsazione o velocità angolare e φ_n il ritardo di fase della componente n -esima. A_0 è il livello medio di riferimento osservato, che per Venezia, nel periodo 1999-2008, vale 26 cm.

Per il mare Adriatico sono sufficienti sette componenti armoniche per il calcolo della marea astronomica: tre diurne (K1, O1, P1) e quattro semidiurne (M2, S2, N2, K2). Un'ulteriore componente diurna (S1), con ampiezza di poco superiore al centimetro, può essere inclusa per determinare al meglio la marea a Venezia. Come è evidente, gli indici 1 e 2 sono usati per indicare rispettivamente le periodicità diurna e semidiurna di ciascuna componente. Un maggior numero di componenti armoniche significherebbe aumentare la precisione della stima oltre la precisione che contraddistingue le misurazioni sul campo (circa 1 cm). Le velocità angolari ω_n calcolate a partire dai periodi dei moti celesti, sono assunte come costanti note, mentre le ampiezze A_n e i ritardi di fase φ_n sono da determinare per ogni località analizzando, ad esempio con il metodo dei minimi quadrati, estese serie storiche di dati del 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 κ 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 agevole: i valori di fase rappresentano ritardi rispetto ad uno zero temporale fissato (ad esempio inizio dell'anno 2014). La tabella che segue fornisce i valori del ritardo di fase φ legati all'anno 2014, in modo che t sia espresso in ore e $t = 1$ corrisponda all'una di notte del 1 gennaio 2013 (ora italiana), $t = 2$ alle ore 2, e di seguito così fino ad raggiungere $t = 8760$ ore alla mezzanotte del 31 dicembre 2014. I valori riportati tengono conto anche delle leggere variazioni di A e φ , che si verificano annualmente attorno ai valori medi secondo leggi precise, ma che costringono all'utilizzo di tabelle. Se si esegue il calcolo anche per anni diversi dal 2014 ma ragionevolmente vicini, o si tollerano errori del 5%, questi esiti sono comunque soddisfacenti.

Grandezze	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	S1
A (cm)	25,6	14,5	4,2	3,3	16,0	4,3	5,9	1,5
φ (°)	302.0	323.0	283.6	107.6	74.6	83.6	96.0	267.0
ω (°/ora)	28,98	30,00	28,44	30,08	15,04	13,94	14,96	15,00

Tabella 1.2 - Principali componenti per il calcolo della marea astronomica

Il contributo meteorologico alla marea ha origini di natura ben diversa e ha lo svantaggio, rispetto alla marea astronomica, di essere di minor prevedibilità. Mentre la marea astronomica è prevedibile con buona approssimazione con largo anticipo, la marea meteorologica è caratterizzata dalla dipendenza di molti fattori (es. vento e pressione atmosferica) la cui previsione è limitata a brevi archi di tempo.

Vista la conformazione del "bacino" dell'Adriatico, stretto ed allungato, un vento che lo percorre longitudinalmente da Sud-Est e Nord-Ovest (sciocco) causa l'accumulo di un grande volume d'acqua a ridosso del limite Nord, ossia in corrispondenza della Laguna di Venezia. Il vento sfrutta l'ampio fetch, cioè la lunghezza di mare libero investita dal vento senza ostacoli, fornito dall'Adriatico,

e raggiunge in vicinanza della laguna fondali con bassa profondità del mare. Conseguentemente a tutto ciò è possibile raggiungere un set-up con incrementi di livello anche superiori al metro, causando fenomeni di inondazione per la sola azione ventosa.

Internamente alla laguna, un vento di bora può mettere in crisi la laguna sud: la bora, spirando da Nord-Est con intensità elevate e nonostante il ridotto fetch lagunare, può portare all'innalzamento dei livelli a Chioggia e zone limitrofe.

La combinazione più sfavorevole che si può verificare in laguna e che spesso ha fatto registrare maree eccezionali è la cosiddetta scontratura, ossia la convergenza di correnti marine generate da scirocco nel basso Adriatico e bora nell'alto Adriatico e laguna. Questo fenomeno, chiamato anche bora scura se verificato in presenza di bassa pressione, è fautore di alcuni dei massimi storici registrati nel tempo, quali il secondo assoluto (+166 cm, 22 Dicembre 1979) e il terzo assoluto (+158 cm, 1° Febbraio 1986).

Se la stessa situazione si presenta in condizioni di alta pressione, si definisce bora chiara e il suo contributo sulla marea è poco rilevante. Il valore della pressione funge da discriminante tra una situazione di normale marea ed una marea critica: le sue variazioni producono campi di vento con la diretta conseguenza già nota. In corrispondenza dell'alta pressione il mare tende ad abbassarsi, mentre dove è minore si rileva un incremento del livello; associando queste due situazioni rispettivamente al basso e all'alto Adriatico la massa d'acqua subirà uno spostamento in direzione della pressione atmosferica minore e, quindi, verso la laguna. Numericamente si può indicare che ad una variazione di pressione di un millibar equivale all'incirca 1 cm di dislivello e di conseguenza al passaggio di una normale perturbazione il dislivello può arrivare fino a 30 cm.

Lo scenario su larga scala che risulta spesso verificarsi precedentemente ad un evento di alta marea segue indicativamente il profilo che sarà in seguito descritto. Una condizione di marcata bassa pressione sull'Italia Centro-

Settentrionale provoca l'insorgere di venti molto forti che si incanalano lungo l'asse longitudinale dell'Adriatico, confinati dall'Appennino e dalle Alpi Dinariche. La somma dei sovralti legati alla pressione e quelli generati dal vento portano a rialzi marini notevoli. Questa situazione è maggiormente verificata nei periodi autunnale e invernale, quando appunto proprio a Venezia si manifestano frequentemente maree sostenute.

Un ulteriore fenomeno legato alla meteorologia è quello delle sesse, oscillazioni libere caratteristiche dei bacini chiusi, come ad esempio i laghi, che rappresentano la risposta di grandi masse d'acqua sollecitate dal vento o eventi meteorici, quali temporali e bufere. Nel caso in questione, il passaggio di una perturbazione agisce sulla marea come uno stimolo impulsivo 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 compie una serie di oscillazioni sia longitudinali che trasversali, dette appunto sesse, la cui ampiezza si smorza nel tempo per effetto delle dissipazioni, per giungere infine alla situazione di equilibrio. L'oscillazione fondamentale, data la conformazione del bacino, è quella trasversale ed ha un periodo approssimativamente di 22 ore. 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 soggetti ad una rapida attenuazione.

È importante tenere conto della componente legata alle sesse nella previsione della marea poiché accade frequentemente che nei giorni successivi ad uno storm-surge, a causa allo sfasamento di quasi 2 ore tra la periodicità della marea astronomica (24 ore) e la sessa (22 ore circa), l'oscillazione possa trovarsi in fase con il massimo di marea astronomica e provocare l'innalzamento del livello nella laguna oltre le soglie critiche.

E' bene infine sottolineare che i due contributi alla marea (astronomico e meteorologico) sono indipendenti, pertanto è possibile applicare il principio di sovrapposizione degli effetti.

1.3 Distribuzione dei livelli nella laguna

Le profondità dello specchio lagunare sono caratterizzate da una elevata variabilità: si passa da zone emerse o semi emerse, fino ai canali artificiali o alle bocche di porto dove si raggiungono circa 15 metri di profondità. La profondità media si aggira intorno a 1,5 m. Tale variabilità comporta la necessità di un adeguato studio, preciso e mirato, delle modalità di propagazione della marea nella Laguna di Venezia.

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, con una sfasatura di pochi minuti. Dalle bocche di Lido, Malamocco e Chioggia si espande poi internamente, diffondendosi nei canali.

Il ricambio idrico dell'intera laguna è consentito dalle numerose diramazioni capillari che garantiscono quindi la sopravvivenza dell'intero ecosistema. La profondità dei canali è estremamente variegata, ma segue una progressiva diminuzione dalle bocche fino alla gronda lagunare, mentre la distribuzione delle lunghezze risulta ancor più diversificata, raggiungendo talvolta i 20 km. La previsione dell'onda di marea che investe il bacino di San Marco non è di facile individuazione, dal momento che risente di ritardi più o meno consistenti, maggiormente marcati allontanandosi dalle bocche, dettati dalla sua propagazione per effetto di ostacoli naturali e dalla conformazione del fondale. L'altezza dell'onda viene smorzata per l'attrito al fondo, per la sinuosità dei canali stessi e per la presenza delle barene, che fungono da sponde. Dai rilievi effettuati negli anni, emerge inoltre una marcata attenuazione dell'onda di marea astronomica nella laguna Nord, dove si registrano differenze fino al 20-30% rispetto alle misurazioni a Venezia.

Fermo restando che l'onda di marea presenta variazioni di ampiezza e forma, si possono individuare dei tempi medi di anticipo o ritardo per diverse

località di interesse con riferimento a Punta Salute (un valore negativo indica un anticipo di marea rispetto al capo saldo fissato):

Stazione	Anticipo/Ritardo
Malamocco Diga Nord	-50 min
Lido Diga Sud	-49 min
Chioggia Diga Sud	-47 min
Chioggia Vigo	-20 min
Sant'Erasmo Capannone	0 min
Murano Colonna	+14 min
Burano	+32 min
Saline	+78 min
Grassabò	+121 min
Cavallino	+148 min

Tabella 1.3 - Tempi medi di anticipo o ritardo di marea in laguna¹

1.4 Morfologia del sistema lagunare

La configurazione dell'ambiente lagunare entro cui si sviluppa l'onda di marea presenta delle particolarità che lo rendono un sistema unico ed estremamente interessante dal punto di vista paesaggistico ed idraulico. E' quindi utile approfondire l'assetto e il funzionamento di questo peculiare sistema. Esso può essere diviso in tre sottosistemi principali, la cui interconnessione e dipendenza reciproca determinano l'esistenza stessa della laguna, in particolare:

- il bacino scolante, ovvero la rete idraulica superficiale di tutti i sottobacini idrografici che consegnano, naturalmente o artificialmente, le loro acque in

¹ M. Ferla, M. Cordella, L. Michielli, A. Rusconi, *Long term variations on sea level and tidal regime in the lagoon of Venice*, Estuarine, Coastal and Shelf Science 75, 2007.

laguna e la rete dei grandi fiumi contermini alla laguna stessa e sfocianti in mare, ma in comunicazione con essa durante gli eventi estremi;

- 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, 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 bacino e le acque lagunari, contenute all'interno di quel perimetro già definito tra il 1600 e il 1800, ossia la parte lagunare oltre le bocche di porto.

L'interazione tra i tre sistemi è complesso e non lineare, al punto che un evento di acqua alta non solo innalza rapidamente i livelli idrici lagunari attraverso le bocche, quindi da mare, ma influenza anche i livelli 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 può essere causato dal realizzarsi di uno scenario eustatico, quindi di crescita del livello medio del mare Adriatico settentrionale.

Le bocche di porto sono l'elemento morfologico e strutturale che mette in comunicazione l'ambiente lagunare con quello marino, salmastro. Analogamente, la conterminazione lagunare, costituita dagli scoli e dalle foci in laguna, sono elementi morfologici e strutturali che mettono in comunicazione l'ambiente lagunare con quello terrestre, caratterizzato da acque dolci: la Laguna di Venezia è perciò un ambiente di transizione estremamente delicato dato il suo precario equilibrio.

A sua volta il bacino della Laguna può essere suddiviso in tre sottobacini generalmente identificati con i nomi di Lido, Malamocco e Chioggia e si estende

tra il corso terminale del Brenta a Sud (foce di Brondolo) al tratto finale del Sile a Nord (foce di Piave Vecchia), con lunghezza di circa 50 km e larghezza compresa tra gli 11 e i 12 km, racchiudendo una superficie di 550 km², suddivisi nel seguente modo:

- 420 km² circa occupati dagli specchi d'acqua e dalle barene; queste ultime sono aree di terreno tipiche della Laguna di Venezia la cui quota superiore, generalmente a 20-40 cm sopra il medio mare, le rende sommergibili periodicamente durante le fasi di alta marea pronunciata;
- 90 km² dalle valli da pesca, zone umide a regime idraulico artificialmente controllato, separate dalla laguna da argini impermeabili e quindi non sottoposte al regime delle maree;
- 40 km² dalle terre emerse.

Tra le barene si distingue una fitta rete di canali principali e meandriformi, i ghebi, che termina negli specchi piovani o salmastri racchiusi tra stesse barene. Ai lati dei canali si estendono i bassifondi, vaste aree poco profonde comprendenti le velme (indicate comunemente come paludi), che sono emerse solo in particolari condizioni di bassa marea.

La distribuzione delle superfici risulta al giorno d'oggi pari a: 6,4% di isole, 1,6% di argini, 11,9% di canali e 80,1% di velme e barene. Alcune mappe storiche ci 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 più recente, del 2003, copre tutta la laguna ed è stato realizzato dal Magistrato alle Acque, mentre l'elaborazione è stata curata del CNR-ISMAR. Le caratteristiche morfologiche della Laguna di Venezia sono fondamentali per la realizzazione di modelli matematici, i quali vanno continuamente aggiornati per adeguarsi ai mutamenti a cui il sistema è perennemente sottoposto.

Osservando e confrontando i vari rilievi intercorsi negli anni si evidenziano facilmente le importanti variazioni morfologiche che si sono realizzate nel corso

degli ultimi due secoli, ma soprattutto è possibile studiare mediante una accurata modellazione matematica delle rispettive configurazioni, come si sia modificato nel tempo il comportamento idraulico lagunare e in quale misura gli interventi antropici, sovrapponendosi a quelli naturali da sempre in atto, abbiano singolarmente ma anche complessivamente inciso sui processi morfodinamici. Si riscontra una drastica riduzione delle superfici occupate dalle barene che passano da 182 km² della carta Denaix (1810), ai 104 km² del 1930, a 64 km² del 1970, per finire con i 48 km² rilevati nel 2003. È evidente inoltre un diffuso appiattimento ed approfondimento dei canali, a causa di un intenso processo erosivo ed un crescente scambio solido tra mare e laguna. Gli effetti riscontrati hanno permesso una più agevole propagazione dell'onda di marea, soggetta in misura minore a processi dissipativi in favore di quelli di tipo inerziale.

1.5 L'interazione tra la laguna e il mare

I sottosistemi lagunari esplicitati non rappresentano entità indipendenti bensì posseggono una connessione reciproca molto forte. Per esempio è di fondamentale rilievo lo scambio di flussi idrici tra il mare e la laguna che avviene attraverso le bocche di porto. Uno studio sull'attività della circolazione costiera fornisce risultati utili per indagare in maniera più completa sugli aspetti della propagazione delle marea nel sistema lagunare.

I flussi d'acqua stimati dalla corrente assiale mediata sulla verticale dimostrano che il deflusso/afflusso totale (riferito alla somma delle tre bocche) raggiunge al massimo i valori di oltre 2000 m³/s. Il flusso medio attraverso le tre bocche è caratterizzato dall'afflusso nella bocca di Lido e deflusso in quella di Chioggia, bilanciandosi tra loro fornendo un valore di circa 50 m³/s. La bocca di Malamocco mostra un deflusso medio annuale di circa 100 m³/s, che equivale alla quantità dell'afflusso di acque dolci nella laguna per opera dello scarico dei fiumi e delle acque industriali. Occorre infine evidenziare che lo scambio idrico dipende anche dall'intensità e dalla struttura spaziale della corrente costiera esistente fuori dalle bocche, nel mare Adriatico.

Per analizzare gli effetti del vento sugli scambi idrici si fa riferimento ai risultati delle misurazioni della corrente nelle tre bocche di porto effettuate tra il 2000 e il 2003, effettuate durante il programma di ricerca svolto del Co.Ri.La.². Per le misure dei flussi sono stati utilizzati profilatori verticali di velocità ad ultrasuoni (ADCP) posizionati sul fondo dei canali, uno per ciascuna bocca, in maniera da ottenere 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 registrate ed è stato dimostrato che più del 90% della varianza delle correnti nelle bocche è associata alla variabilità mareale. Le forzanti meteorologiche diventano importanti solo durante episodi isolati, associati ai fenomeni particolarmente ventosi e/o caratterizzati da acqua alta. Si è verificato che l'asse della maggior varianza corrisponde all'asse lungo il quale soffia la bora, mentre l'asse di minor varianza è correlato allo scirocco.

Dalla correlazione tra il vento, con una velocità maggiore di 5 m/s per le varie direzioni, e la corrente assiale nelle bocche si è ottenuta la conferma che i venti spiranti da Est e Nord-Est se considerati come forzante locale, giocano un ruolo fondamentale nella generazione di correnti a bassa frequenza attraverso le bocche di Chioggia e Lido; il flusso da Malamocco appare invece indipendente dal vento. In particolare, si nota che il vento lungo l'asse della bora rafforza l'afflusso d'acqua a Lido e il deflusso a Chioggia: questo fenomeno lo si può spiegare in termini di pendenza del livello del mare durante gli episodi di bora, con il livello del mare più alto a Sud rispetto a Nord della Laguna. La bora localmente soffia in direzione parallela all'asse longitudinale creando una differenza di livello del mare fino anche a 80 cm. Allo stesso tempo, fuori dalla laguna la pendenza del livello del mare Nord-Sud è molto minore e quindi nella zona Nord della laguna il livello idrometrico è più basso di quello del mare aperto, inducendo una chiamata di

² 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.

portata alla bocca di Lido. A Chioggia invece il livello è più alto di quello misurato in mare, generando una corrente in uscita. Il fenomeno descritto è di circolazione secondaria indotta dal vento, o più semplicemente di "ricircolo", inteso come possibile causa del notevole rialzo che si può formare nella laguna Sud in presenza di forte bora e bocche di porto chiuse.

Si nota invece dalla correlazione tra vento e correnti nelle bocche che lo scirocco è assai meno efficiente nel generare lo scambio idrico tra mare e laguna. La direzione del vento di scirocco è all'incirca perpendicolare alla linea di costa, generando quindi un afflusso contemporaneo nelle tre bocche, che però resta sempre inferiore rispetto a quello generato dalla presenza di bora quando le bocche di Chioggia e Lido si compensano. La corrente di afflusso indotta dallo scirocco può perdurare solo finché il livello lagunare non supera quello marino. In tale situazione la pendenza del livello marino innesca una corrente contraria, di fuoriuscita.

Sono stati analizzati a titolo esemplificativo due eventi di marea eccezionale, quelli del 6 Novembre 2000 e del 10 Novembre 2004, dai quali si evidenzia il fenomeno dei sovralti differenziati in diverse stazioni sparse nella Laguna. Nel primo evento lo scirocco si presentava anche con velocità superiori a 18 m/s: ci si attende quindi una tendenza allo svuotamento della laguna meridionale e un innalzamento dell'area settentrionale. Tale comportamento è perfettamente verificabile osservando i livelli registrati nelle due stazioni limite, Grassabò a Nord e Brondolo a Sud, con riferimento alla Figura 1.2 - Andamento dei livelli tra Brondolo e Grassabò durante la fase di crescita della marea del 6 Novembre 2000:

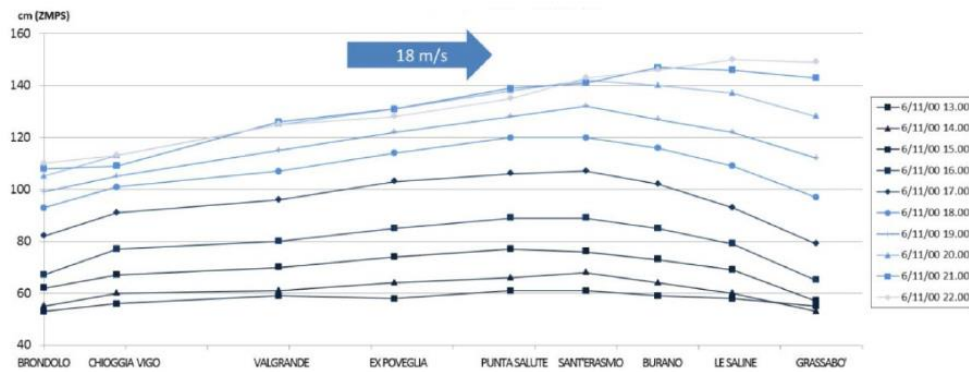


Figura 1.2 - Andamento dei livelli tra Brondolo e Grassabò durante la fase di crescita della marea del 6 Novembre 2000³

Nel secondo evento considerato, durante il quale insiste un vento di bora di intensità pari a 16 m/s si ottiene il comportamento opposto, illustrato in Figura 1.3 - Andamento dei livelli tra Brondolo e Grassabò durante la fase di crescita della marea del 10 Novembre 2004⁴ Figura 1.2 - Andamento dei livelli tra Brondolo e Grassabò durante la fase di crescita della marea del 6 Novembre 2000:

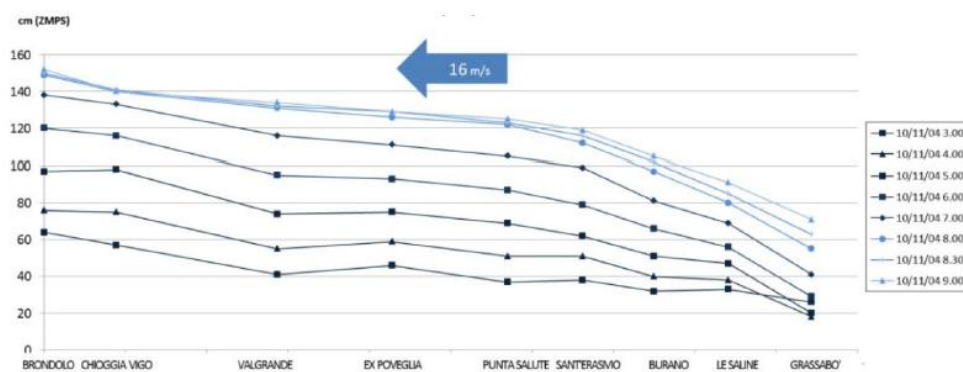


Figura 1.3 - Andamento dei livelli tra Brondolo e Grassabò durante la fase di crescita della marea del 10 Novembre 2004⁴

³ C. Martignon, Tesi di laurea: *Impatto della chiusura delle bocche di porto sui livelli di marea all'interno della laguna di Venezia in presenza di vento intenso*, 2012, p. 63.

⁴ C. Martignon, Tesi di laurea: "Impatto della chiusura delle bocche di porto sui livelli di marea all'interno della laguna di Venezia in presenza di vento intenso", 2012, p. 61.

Il dislivello misurato in questo evento tra Brondolo e Grassabò è di circa 81 cm, che tuttavia non è da attribuirsi completamente all'effetto del vento, ma anche al contributo del ritardo di fase dell'onda di marea nelle zone della laguna settentrionale rispetto alle zone centrali. Le stesse considerazioni sui processi fisici ed idrodinamici sono valide anche per l'evento del 6 Novembre 2000.

1.6 Interventi alle bocche di porto in caso di acqua alta

Sin dal XVI secolo la laguna veneta è stata soggetta all'azione dell'uomo, che ha tentato di sfruttarla, adattandola alle proprie necessità e influenzando pesantemente sulla sua evoluzione naturale, attraverso interventi sempre più poderosi e impattanti.

L'ultimo intervento in ordine temporale è la grande opera progettata per difendere la città di Venezia dalle acque alte. Il sistema progettato viene comunemente chiamato MO.S.E., acronimo di MOdulo Sperimentale Elettromeccanico, prendendo il nome dal sistema di paratoie mobili galleggianti 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 e per finire il rialzo di rive e pavimentazioni.

Il progetto, ormai in corso di ultimazione, è stato oggetto di molti contrasti e numerose polemiche, che si vuole tuttavia evitare di trattare, rimandando alla corposa documentazione e bibliografia a riguardo. Si presenterà invece, brevemente, la cronologia del progetto, gli intenti che lo hanno ispirato e le caratteristiche principali delle opere di chiusura delle bocche di porto.

1.6.1 La progettazione e la realizzazione del MO.S.E.

Tra il 4 e il 5 Novembre del 1966 una marea eccezionale allagò Venezia e i centri abitati della laguna, facendo registrare a Punta Salute il valore massimo storico di +194 cm sullo zero mareografico. Questo evento straordinario pose in evidenza il

problema di come poter salvare da circostanze così invasive una città unica e fragile quale è Venezia, in un ambiente altrettanto singolare come la Laguna di Venezia. Il 13 Aprile 1973 fu approvata la 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 statale, il Ministero dei Lavori Pubblici indisse nel 1975 un 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 destinata a valutare i progetti bocciò tutti i 5 progetti presentati, ritenendoli non idonei. Tuttavia il Ministero dispose l'acquisizione di tutti gli elaborati al fine di portene accingere gli eventuali singoli accorgimenti che potevano ritenersi utili per un progetto futuro.

Nel 1980 lo stesso Ministero dei Lavori Pubblici affidò ad un gruppo di eminenti studiosi⁵, formato da esperti del settore, l'incarico dello studio delle opere di difesa. L'anno successivo, trasmisero al Ministero dell'Ambiente lo studio-progetto maturato dalla sinergia, il cosiddetto "Progettone". La soluzione prevedeva di accoppiare a paratoie mobili una serie di opere fisse, allo scopo di incrementare la resistenza idraulica delle bocche stesse e quindi ridurre i colmi di marea nel centro storico. Gli esperti raccomandarono di procedere per gradi successivi, realizzando in un primo tempo le opere fisse e solo secondariamente quelle mobili alle bocche, esigendo un adeguato periodo di sperimentazione in accordo al concetto di base espresso nella Legge Speciale, ossia di individuare soluzioni sperimentali, graduali e reversibili.

⁵ Gruppo formato dai professori A. Ghetti, E. Marchi, P. Matildi, R. Passino, G. Pezzoli, ai quali si aggiunsero l'ingegner J. Agema e il dott. R. Frassetto

Una seconda Legge Speciale (798/1984) sottolineò la necessità di affrontare in maniera unitaria gli interventi di salvaguardia, istituendo il Comitato di indirizzo, coordinamento e controllo degli interventi (il cosiddetto “Comitatone”) e affidando la progettazione ed esecuzione delle opere ad un unico soggetto, il Consorzio Venezia Nuova.

Nel 1989 il Magistrato alle Acque e il Consorzio Venezia Nuova presentarono un articolato sistema di interventi per la salvaguardia di Venezia, il progetto REA, che prevedeva opere mobili alle bocche di porto per la regolazione della marea affluente. Nel 1992 il Magistrato alle Acque approvò il progetto preliminare, e nel 1994 giunse l'approvazione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Sottoposto alla valutazione per l'impatto ambientale (1998) e a ulteriori approfondimenti richiesti dal Comitatone (2001), nel Novembre del 2002 venne approvato dal Magistrato alle Acque la sua versione definitiva. Era ancora mancante il progetto esecutivo, al quale si rimediò con "stralci esecutivi". Il 3 Aprile 2003, il Comitatone approvò all'unanimità il passaggio agli esecutivi e la realizzazione del sistema MOSE per la difesa della Laguna di Venezia dalle acque alte. A questo punto furono aperti i cantieri alle tre bocche di porto.

L'idea basilare su cui si fonda il progetto MOSE è quella di isolare la Laguna dal mare per il tempo necessario a tenere il livello interno entro i limiti di salvaguardia, attraverso il sollevamento di tre schiere di paratoie mobili poste alle tre bocche. Gli elementi mobili sono costituiti da strutture scatolari metalliche (di larghezza 20 metri, lunghezza variabile da 18,5 a 29 metri e spessore da 3,6 a 5 metri) connessi ai cassoni di ancoraggio in calcestruzzo armato per mezzo di cerniere. In condizioni di normale marea le paratoie sono adagiate sul fondo e riempite d'acqua; quando viene prevista una marea con colmo superiore a +110 m rispetto allo ZMPS, le paratoie vengono alzate con opportuno anticipo immettendo aria compressa per poter svuotare i cassoni e sfruttare la spinta di galleggiamento, fino all'emersione. Al termine dell'evento di alta marea, le paratoie vengono abbassate riempiendole nuovamente d'acqua, rientrando infine nel loro

alloggiamento. Per ogni bocca è previsto un molo esterno con la funzione di incrementare le resistenze idrauliche al flusso delle correnti di marea attraverso i passi navigabili. Il Consorzio Venezia Nuova indica come tempo di sollevamento delle paratoie un valore di circa 30 minuti mentre l'abbassamento richiede circa 15 minuti.

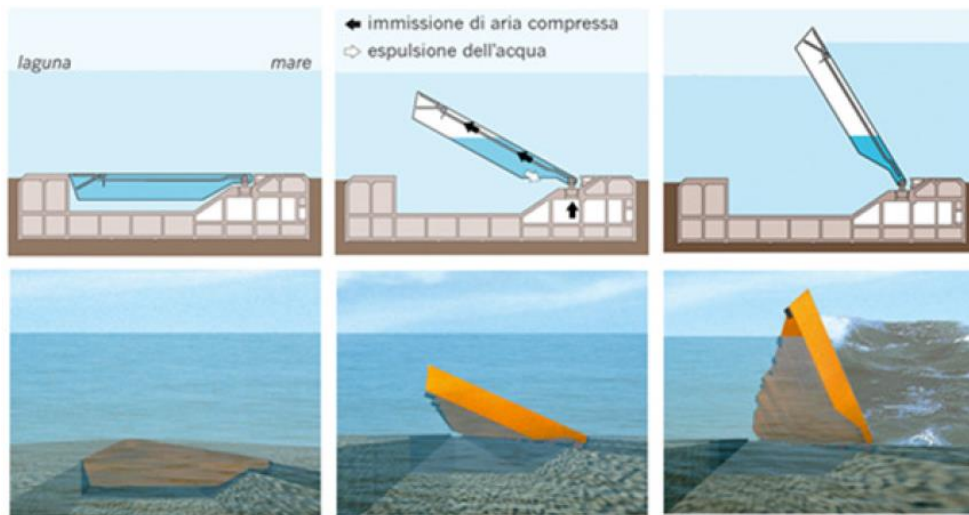


Figura 1.4 - Fasi di sollevamento delle paratoie del MO.S.E.



Figura 1.5 - Paratoie emerse durante la fase del collaudo

1.6.2 La bocca di porto di Lido

Tra le tre bocche, la bocca di Lido è morfologicamente la più complessa, poiché da essa dipartono direttamente, verso l'interno della laguna i canali di San Nicolò, di Sant'Erasmus e di Treporti ed inoltre presenza una larghezza notevole. La sua particolarità ed estensione hanno dunque richiesto la suddivisione della bocca stessa in due tratti. Il progetto prevede la collocazione di un'isola centrale in calcestruzzo, arretrata rispetto alle testate delle attuali dighe foranee, che funge da struttura di appoggio per la suddivisione in due parti dello sbarramento. In questo modo l'ingresso nella bocca viene diviso in due varchi: quello a Sud che permette l'accesso diretto al bacino di San Marco attraverso il canale di San Nicolò, mentre l'entrata a Nord consentirà di raggiungere la laguna Nord tramite il canale di Treporti.

Il canale di San Nicolò presenta una luce libera dello sbarramento di 400 m ed una profondità di 12 m, mentre il canale di Treporti, sebbene con una larghezza di 420 m, possiede una profondità media di soli 6 m che ne vieta il transito a natanti con pescaggio superiore. Per gli sbarramenti sono previste due serie di paratoie, rispettivamente di 20 e 21 elementi.

A protezione contro l'attrito da parte delle correnti di marea sono previsti opportuni provvedimenti antierosione a cavallo delle due schiere, con estensione di 400 m per il canale di San Nicolò e 350 per quello di Treporti.

La configurazione delle rive sul canale di Treporti è stata inoltre modificata, sia lungo il litorale di Punta Sabbioni sia lungo la sponda opposta, per dare spazio al piccolo porto destinato ad accogliere le imbarcazioni minori nei periodi di chiusura della bocca. Le curvature più accentuate del nuovo andamento planimetrico comportano incrementi locali delle velocità con effetti erosivi sui fondali, ove non siano presenti provvedimenti contro il fenomeno.



Figura 1.6 - Configurazione della bocca di porto di Lido a lavori ultimati

1.6.3 La bocca di porto di Malamocco

La bocca centrale presenta un varco con larghezza di 380 m e una profondità di 14 m, per la quale è previsto un rialzo dei fondali della bocche per una lunghezza complessiva di 1100 m.

La modifica di profondità dei fondali, che interessa prevalentemente il lato a mare del canale portuale, è necessaria per riportare il canale stesso a quote più ragionevoli di quelle che si erano raggiunte nel tempo, soprattutto dopo la costruzione del canale Malamocco-Marghera. Lo sbarramento della bocca è presidiato da una schiera di 19 paratoie.

Il progetto prevede inoltre la costruzione di una conca di navigazione adiacente al molo Sud, per permettere anche alle grandi navi dirette verso i porti interni di accedere alla laguna anche in caso di chiusura delle bocche. Il molo, che

si sviluppa per 1400 m, è chiaramente orientato in maniera da difendere l'accesso alla conca dall'azione del moto ondoso.

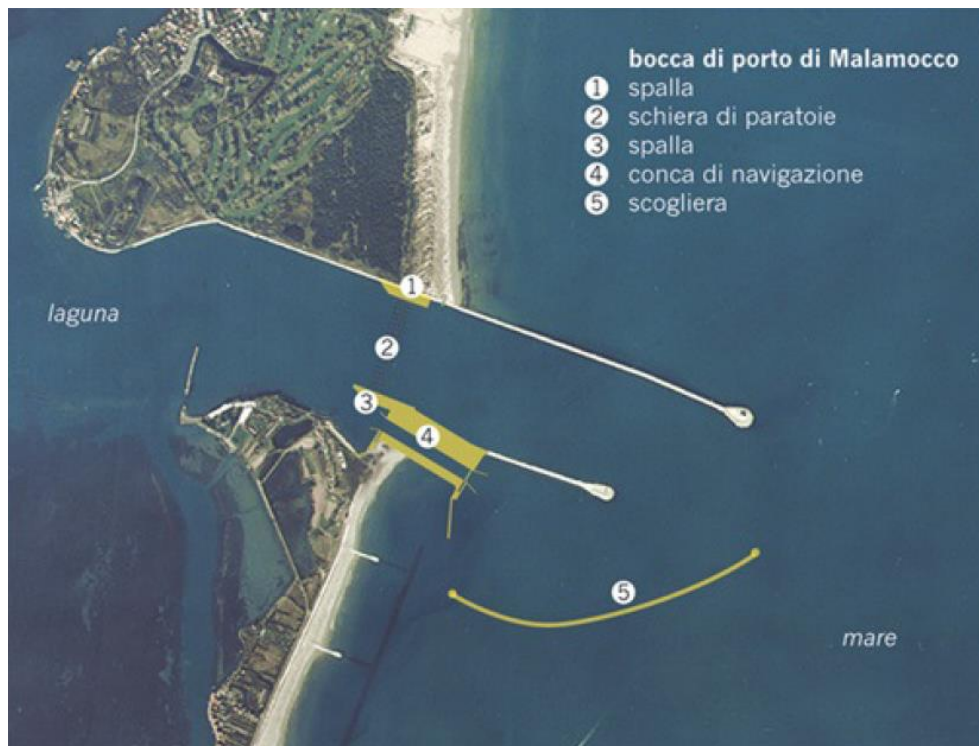


Figura 1.7 - Configurazione della bocca di porto di Malamocco a lavori ultimati

1.6.4 La bocca di porto di Chioggia

La terza bocca controlla una luce di 360 m e una profondità di 11 m, presidiata da uno sbarramento mobile che è posto quasi al limite interno della bocca ed è costituito da 18 elementi. Il fondale è portato alla quota di base dello sbarramento sfruttando l'ingombro delle opere di protezione contro l'erosione, che si snodano per 400 m.

Trova spazio, in adiacenza al molo Nord, un piccolo porto che permette alle imbarcazioni di modesto pescaggio di sostare in zona protetta in attesa che venga ripristinato l'accesso principale. Il molo esterno di fronte all'opera previsto

per la protezione dal moto ondoso si estende per circa 700 m, a breve distanza dalla testata della precedente diga Sud.



Figura 1.8 - Configurazione della bocca di porto di Chioggia a lavori ultimati

1.7 Registrazione dei dati di livello

L'analisi del comportamento idraulico del sistema lagunare, della sua evoluzione, dei suoi problemi e la ricerca di possibili soluzioni devono essere fondate necessariamente anche su rilevamenti e raccolta di dati sul campo, con particolare focalizzazione sui livelli raggiunti.

1.7.1 Cenni storici

Le prime misurazioni sistematiche dei livelli di marea in laguna risalgono al 1871 quando l'ingegner 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, grazie all'introduzione

di un piano di riferimento di misura dei livelli, rilevati in orari precisi. Prima del 1871 non si hanno a disposizione dati quantitativi sulle quote raggiunte della marea, ma solo stime qualitative attraverso cronache che fin dal VI secolo venivano redatte in caso di eventi di marea eccezionali.

Nel 1888 venne istituito dall'Istituto Geografico Militare (IGM) un nuovo mareografo presso l'Arsenale di Venezia e nel 1906 venne installata la stazione mareografica di Punta Salute, nel bacino di San Marco. Inizialmente posta sul Canal Grande, viene spostata nel 1923 nel Canale della Giudecca e fino da allora è stata il riferimento locale per l'intera Laguna di Venezia.

Per il mareografo in Campo Santo Stefano, l'ingegner Mati considerò un livello di riferimento fissato a 1,5 m al di sotto del Comune Marino, descritto in precedenza. Successivamente si sostituì al Comune Marino lo Zero Mareografico di Punta Salute (ZMPS), a 127,54 cm sopra il piano di riferimento precedente e di conseguenza 22,46 cm al di sotto del Comune Marino. Tale riferimento ha ormai perso di significato in seguito alle rilevazioni geodetiche e topografiche dei giorni nostri; tuttavia tale consuetudine ha un suo valore particolare per Venezia. La pratica di utilizzare lo ZMPS è utile per svincolare le misure dei livelli dai movimenti relativi del suolo per effetto della subsidenza e dell'eustatismo e inoltre fornisce un'ulteriore libertà dal livello medio del mareografo di Genova del 1942. In questo modo è possibile un facile confronto tra eventi di marea distanti nel tempo, ma che hanno provocato l'allagamento delle medesime zone di Venezia.

Nel 1984 l'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque, ha fissato come riferimento definitivo per la misura delle maree il piano posto a 1,81 m 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.

1.7.2 Organi preposti alla raccolta dei dati

Le misurazioni ufficiali furono in origine competenza esclusiva del Genio Civile e dell'Istituto Geografico Militare (IGM). Grazie alla legge istitutiva n° 257 del 24 Maggio del 1907 divennero quindi mansione del Magistrato alle Acque, appena ricostituito dallo Stato Italiano come autorità idraulica preposta al buon governo delle acque nei bacini idrografici, nelle lagune e lungo i litorali dell'area adriatica nordorientale. Tra i compiti assegnati vi era l'onere di provvedere alla raccolta metodica ed ordinata delle osservazioni idrografiche riguardanti lagune, litorali, mare, fiumi e bacini montani. Per assolvere a tali funzioni, all'interno del Magistrato alle Acque si costituì l'Ufficio Mareografico con il relativo Servizio Mareografico, che acquisì il patrimonio di dati e osservazioni iniziate nel 1871.

Alla fine del 1908 l'Ufficio Idrografico, insieme alle altre 400 stazioni destinate all'attività di 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, salendo a 23 stazioni nel 1911.

Dopo l'eccezionale evento alluvionale del 4 Novembre 1966 seguì l'emanazione della Legge Speciale per Venezia che diede l'avvio, nei primi anni Settanta del secolo scorso, alla realizzazione di un progetto di ampliamento della rete mareografica nella Laguna di Venezia da parte dell'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque. Fu portato a 40 il numero delle stazioni fisse della rete, a cui vennero aggiunte le preesistenti 5 stazioni della 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.

Al giorno dopo si contano 50 stazioni di rilevamento, di cui più della metà attrezzate per la trasmissione in tempo reale dei dati e la restante parte in grado

di trasmettere in tempo differito via GSM. Alcune sono in grado di registrare anche l'ampiezza ed il periodo del moto ondoso, nonché alcuni parametri climatici quali pressione atmosferica, intensità e direzione del vento, temperatura, umidità, precipitazione e radiazione solare (ISPRA, 2012).

L'Ufficio Idrografico svolse le sue mansioni fino al 2002, quando l'attività venne affidata all'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT), dal 2008 confluita nell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). Tra i propri compiti, 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 dell'ISPRA si dispone anche dei livelli di marea provenienti dall'Istituzione Centro Previsioni e Segnalazioni Maree (ICPSM), comunemente noto come Centro Maree.

All'inizio degli anni Settanta, il Comune di Venezia creò il primo servizio di osservazione delle maree, per segnalare mediante il suono di una sirena posta sul campanile di San Marco l'avvicinarsi di eventi di marea sostenuta. In seguito all'inondazione del 1979, istituì il Centro Previsioni e Segnalazioni Maree nel 1980, al fine di garantire alla cittadinanza la massima informazione sulla marea ed un efficace e tempestivo sistema di allarme in caso di acqua alta eccezionale. È compito dell'IPSCM effettuare la previsione della marea, generalmente per le 48 ore successive, sulla base dei livelli osservati e dell'analisi delle previsioni meteo-marine.

1.7.3 Stazioni di rilevamento utilizzate

La rete telemareografica del Centro Maree è costituita da 15 stazioni automatiche, per la maggior parte collegate via radio ad una centrale, per mezzo di una ulteriore stazione che funge da ripetitore. Verranno in seguito riportate le principali postazioni meteo-marine utilizzate per la raccolta dei dati impiegati nello studio. In particolare, utilizzando le schede delle stazioni dell'ISPRA e del Centro

Maree, si possono descrivere le caratteristiche e le dotazioni di ogni singola stazione.

Le stazioni dell'ISPRA e del Centro Maree sono indicate rispettivamente nelle mappe in Figura 1.9 - Stazioni di misurazione ISPRA e Figura 1.10 - Stazioni di misurazione del Centro Maree:



Figura 1.9 - Stazioni di misurazione ISPRA



Figura 1.10 - Stazioni di misurazione del Centro Maree

In seguito si presentano le specifiche tecniche di ogni singola stazione utilizzata per l'analisi degli eventi:

Chioggia Vigo	
Stazione meteo-mareografica n° 42 (ISPRA)	
<i>Bacino di appartenenza:</i>	Laguna Meridionale
<i>Anno di inizio delle registrazioni:</i>	1954
<i>Latitudine:</i>	45° 13' 40,4848" N
<i>Longitudine:</i>	12° 18' 86,6245" E
<i>Quota piastrina mareografica:</i>	169,00 cm sopra ZMPS
<i>Specifiche tecniche delle strumentazioni:</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Mareografo a galleggiante con trasmissione in tempo reale e registrazione locale dei dati • Mareografo a galleggiante con trasmissione giornaliera via GSM e registrazione locale dei dati • Mareometro a galleggiante con trasmissione in tempo reale e registrazione locale dei dati su memory card da 4 Mbyte (Mod. SIAP-SM 3840). 	

Punta Salute (Canal Grande)			
(Centro Maree)			
<i>Latitudine:</i>		45° 25' 51,45309" N	
<i>Longitudine:</i>		12° 20' 13,38616" E	
<i>Altezza del caposaldo:</i>		2,560 m	
<i>Stazione e sensori</i>	<i>Parametro</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Altezza sensore</i>
Centralina DA9000			
Idrometro a galleggiante T039 TIDROM	Livello marea	m	+3 m s.m.m.
Termometro T020-TTA	Temperatura acqua	°C	-1,5 m s.m.m.

Diga Sud Lido			
(Centro Maree)			
<i>Latitudine:</i>		45° 25' 05,62622" N	
<i>Longitudine:</i>		12° 25' 35,59146" E	
<i>Altezza del caposaldo:</i>		2,425 m	
<i>Stazione e sensori</i>	<i>Parametro</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Altezza sensore</i>
Centralina DA9000			
Idrometro a galleggiante T039 TIDROM	Livello marea	m	+3 m s.m.m.

Diga Nord Malamocco			
(Centro Maree)			
<i>Latitudine:</i>		45° 26' 43,19" N	
<i>Longitudine:</i>		12° 20' 10,34" E	
<i>Altezza del caposaldo:</i>		2,055 m	
<i>Stazione e sensori</i>	<i>Parametro</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Altezza sensore</i>
Centralina DA9000			
Idrometro a galleggiante T039 TIDROM	Livello marea	m	+3 m s.m.m.

Diga Sud Chioggia			
(Centro Maree)			
<i>Latitudine:</i>		45° 13' 44,32420" N	
<i>Longitudine:</i>		12° 18' 32,81828" E	
<i>Altezza del caposaldo:</i>		2,555 m	
<i>Stazione e sensori</i>	<i>Parametro</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Altezza sensore</i>
Centralina DA9000			
Idrometro a galleggiante T039 TIDROM	Livello marea	m	+3 m s.m.m.
Anemometro VT0705B	Direzione vento	gradi	+9 m s.m.m.
	Velocità vento	m/s	+9 m s.m.m.

Malamocco porto			
(Centro Maree)			
<i>Latitudine:</i>		45° 20' 23,28" N	
<i>Longitudine:</i>		12° 17' 31,08" E	
<i>Altezza del caposaldo:</i>		2,800 m	
<i>Stazione e sensori</i>	<i>Parametro</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Altezza sensore</i>
Centralina DA9000			
Idrometro a galleggiante T039 TIDROM	Livello marea	m	+3 m s.m.m.
Anemometro T031	Direzione vento	gradi	+9 m s.m.m.
	Velocità vento	m/s	+9 m s.m.m.

2 Problematiche della gestione delle barriere mobili alle bocche di porto

Dopo aver introdotto la soluzione adottata per difendere la laguna dalle acque alte, nel presente capitolo si esamineranno alcune problematiche tecniche di cui bisognerà necessariamente tener conto nella gestione della chiusura delle barriere mobili alle bocche di porto.

2.1 Sovralzi durante la chiusura

Il criterio di avvio delle procedure di chiusura delle paratoie alle bocche si basa sostanzialmente sulla previsione di superamento di un certa soglia di allarme (generalmente nella stazione di Punta della Salute). La previsione di superamento di tale soglia comporta l'attuazione delle manovre di chiusura delle barriere mobili, al fine di proteggere Venezia e gli altri centri abitati lagunari.

Una volta completata la chiusura, il livello interno alla laguna non assumerà carattere stazionario ma potrà subire delle variazioni, anche locali, derivanti dall'effetto di alcuni fattori di cui è fondamentale studiarne il comportamento.

2.1.1 Sovralzi dovuti al vento

La variazione del livello, durante la chiusura delle bocche, è determinata principalmente dall'effetto delle vento, in grado di ridistribuire le masse idriche non più influenzate dalla marea e generare dislivelli anche considerevoli all'interno del bacino lagunare.

Come si è visto brevemente in precedenza, tale fenomeno è osservabile anche durante i periodi di apertura delle paratoie, ma in tal caso esso assume rilievo differente. Per confrontare le differenze tra le due configurazioni di bocche aperte e chiuse, si fa riferimento ai risultati presenti nell'elaborato di tesi *“Impatto*

della chiusura delle bocche di porto sui livelli di marea all'interno della Laguna di Venezia in presenza di vento intenso” di Carlo Martignon (2013).

Come primo dato da tener conto, nel documento sono riportate alcune considerazioni sui tempi di chiusura delle paratoie: risulta che essi non influiscono sul livello interno lagunare, se non inizialmente in fase di stabilizzazione, e per questo motivo la velocità di chiusura è supposta costante, impiegando 30 minuti per il suo completamento, come riportato nello studio di Impatto Ambientale redatto dal Magistrato alle Acque.

È stato inoltre dimostrato un fatto molto importante: i sopralzi indotti da vento possono produrre allagamenti inattesi rispetto alle previsioni dei documenti ufficiali. Nonostante le bocche di porto vengano chiuse, realizzando il mantenimento del livello al di sotto del limite di salvaguardia per Venezia (+110 cm), è possibile registrare a Chioggia durante alcuni eventi con vento di bora, livelli superiori al limite di salvaguardia della città (+130 cm grazie al sistema di paratoie dedicate che la proteggono, chiamato "piccolo MOSE"). La situazione risulta sfavorevole anche per Burano, dove la soglia di 110 cm viene superata in presenza di scirocco, pur garantendo a Venezia il livello di salvaguardia.

Come esempio viene riportato l'andamento dei livelli durante l'evento del 10 Novembre 2004, seguito qualora venissero seguite le procedure di chiusura indicate nei documenti ufficiali.

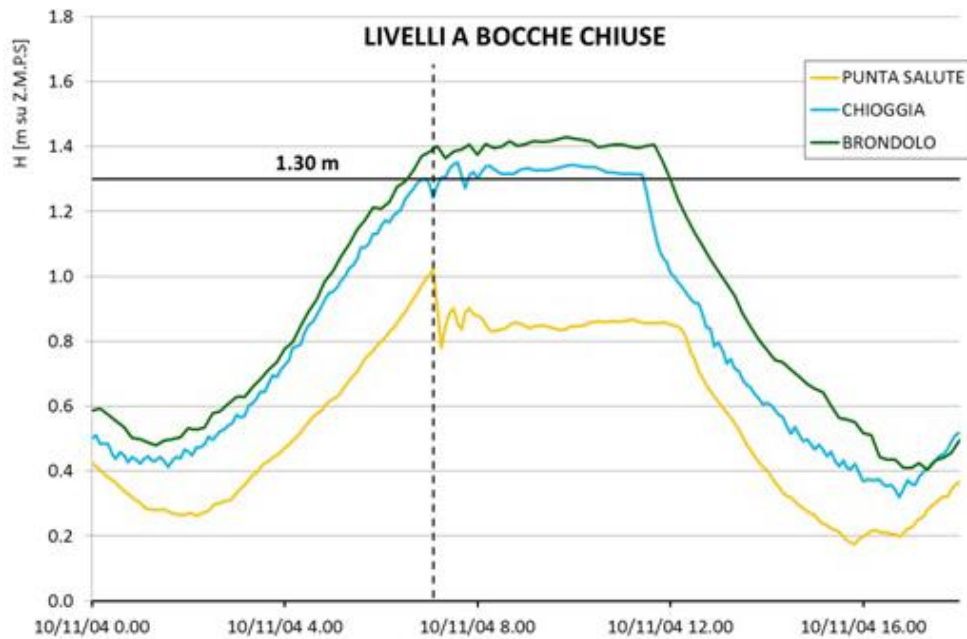


Figura 2.1 - Sopralzi tra Punta della Salute e Chioggia durante l'evento del 10/11/2004.⁶

Nel caso di una eventuale assenza di vento, grazie anche al ritardo di fase che fa fluire l'acqua verso la laguna Nord e quindi diminuire il livello, si osserva che la chiusura delle bocche di porto realizza un valore a Punta Salute di 100 cm (sceso poi a 85 cm a causa dell'azione del vento), al di sotto del limite di salvaguardia per Venezia, determinando a Chioggia il superamento dei 130 cm per più di 4 ore.

Analogamente, durante l'evento del 6 Novembre 2000, dove si è imposta la chiusura delle paratoie al raggiungimento del livello limite alla stazione di Lido Diga Sud e tenuto conto che all'interno della laguna il livello medio sarà inferiore per effetto del ritardo di fase, si ottiene un livello massimo a bocche chiuse che raggiunge il valore di 108 cm a Punta Salute, ancora entro il limite di salvaguardia, mentre a Burano si verifica per oltre 2 ore il superamento dei 110 cm, con un piccolo

⁶ L. Parolin, Tesi di laurea *Analisi dei dislivelli all'interno della laguna di Venezia durante il funzionamento del MO.SE.*, 2013 p. 37.

di 116 cm. Gli andamenti sono riportati nella Figura 2.2 - Sopralzi tra Punta della Salute e Chioggia durante l'evento del 6/11/2000:

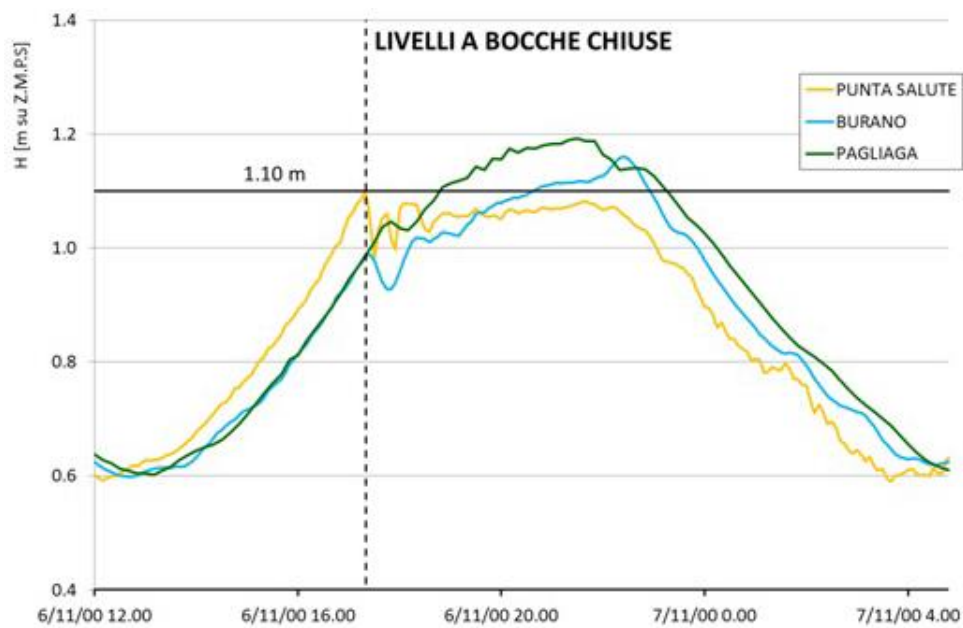


Figura 2.2 - Sopralzi tra Punta della Salute e Chioggia durante l'evento del 6/11/2000⁷

Un successivo studio (*“Analisi dei dislivelli all'interno della laguna di Venezia durante il funzionamento del MOSE”*, tesi di Parolin Loris, 2013) ha dimostrato come i livelli di partenza presenti in laguna alla chiusura non influiscano significativamente sul sopralzo indotto dal vento.

Il medesimo lavoro ha potuto dimostrare come basti un piccolo intervallo temporale, al massimo di circa 3 ore, per poter in ogni situazione, in intensità e direzione, creare i sopralzi sopracitati. Analogamente la redistribuzione delle masse conseguente al cessare del vento impiega tempi dello stesso ordine di grandezza.

⁷ L. Parolin, Tesi di laurea *Analisi dei dislivelli all'interno della laguna di Venezia durante il funzionamento del MO.SE.*, 2013, p. 38.

Di seguito l'andamento dei sovralti al variare dei tempi di soffiata per due configurazioni di vento di esempio⁸.

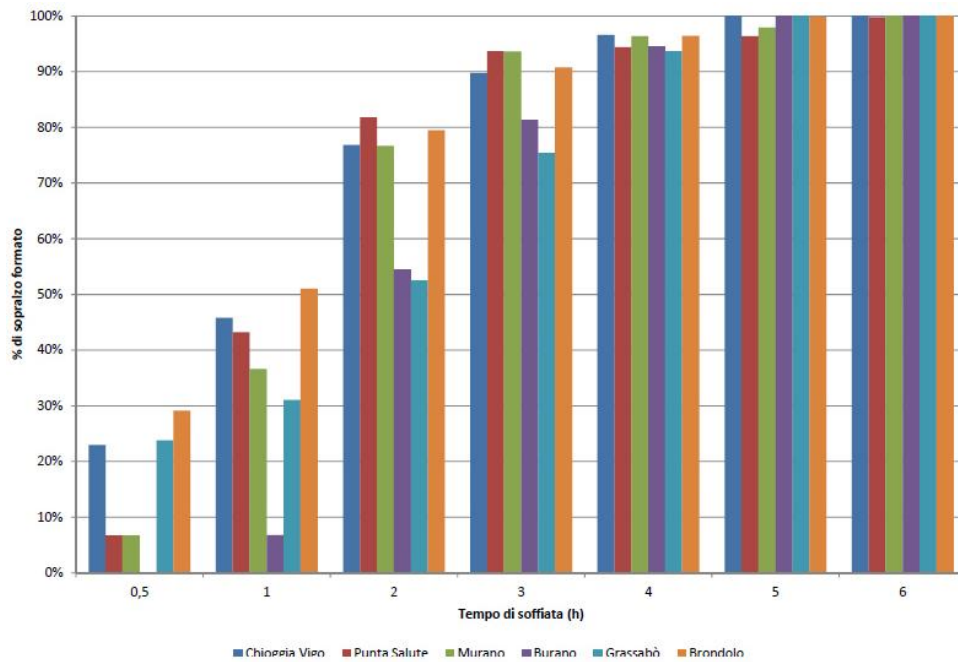


Figura 2.3 - Andamento nel tempo dei sovralti con vento di Scirocco

⁸ Per l'analisi completa si confronti L. Parolin, Tesi di laurea: *Analisi dei dislivelli all'interno della laguna di Venezia durante il funzionamento del MO.SE.*, 2013 pp. 120-132.

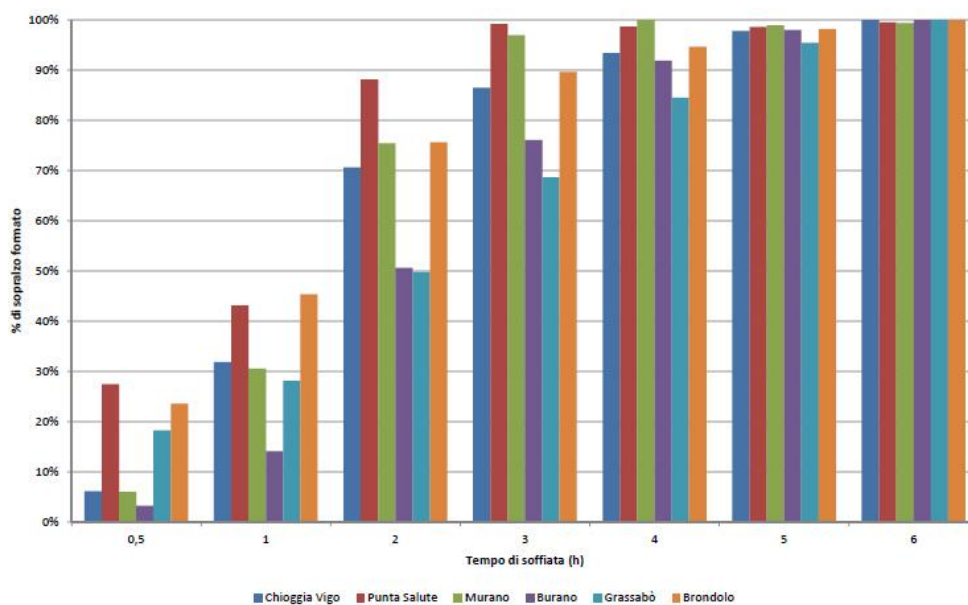


Figura 2.4 - Andamento nel tempo dei sovrizzi con vento di Bora

Poste queste considerazioni, è stata determinata, tramite modello numerico, l'entità dei sovrizzi massimi al variare di intensità e direzione del vento insistente in laguna. A titolo esemplificativo si riportano i grafici relativi ai sovrizzi generati da venti di bora e di scirocco, le due direzioni che maggiormente mettono in crisi le cittadine lagunari.

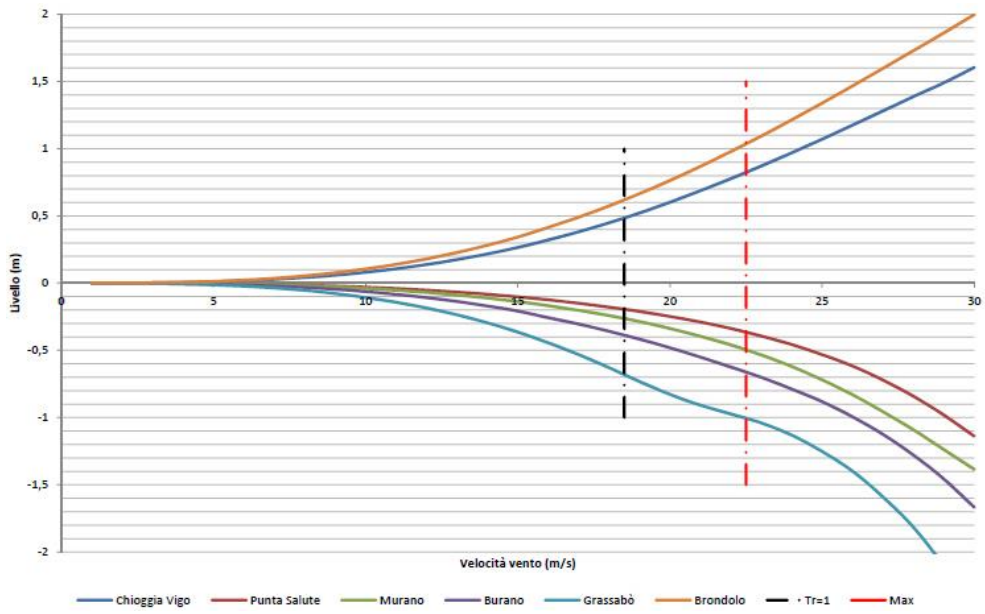


Figura 2.5 - Entità dei sovralti con vento di Bora

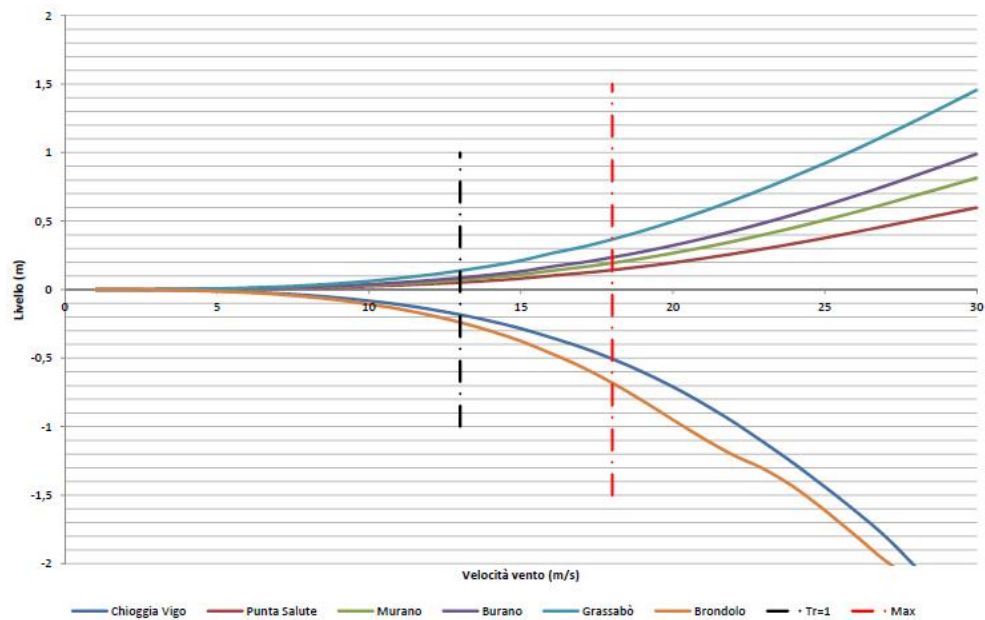


Figura 2.6 - Entità dei sovralti con vento di Scirocco

Si osserva come i sovralti generati siano di rilievo non indifferente, raggiungendo anche per modeste intensità importanti valori che possono provocare, sebbene le bocche siano chiuse, allagamenti inattesi rispetto alle previsioni dei documenti ufficiali a Chioggia o Burano, rispettivamente per vento di Bora o di Scirocco.

Santini Tommaso, nella tesi dal titolo “*Calcolo dei sovralti differenziali nella Laguna di Venezia durante il funzionamento delle opere mobili alle bocche*”, ha confrontato i diversi effetti del vento sui sovralti in laguna in condizioni di bocche chiuse e bocche aperte. A seguire un paio di esempi.

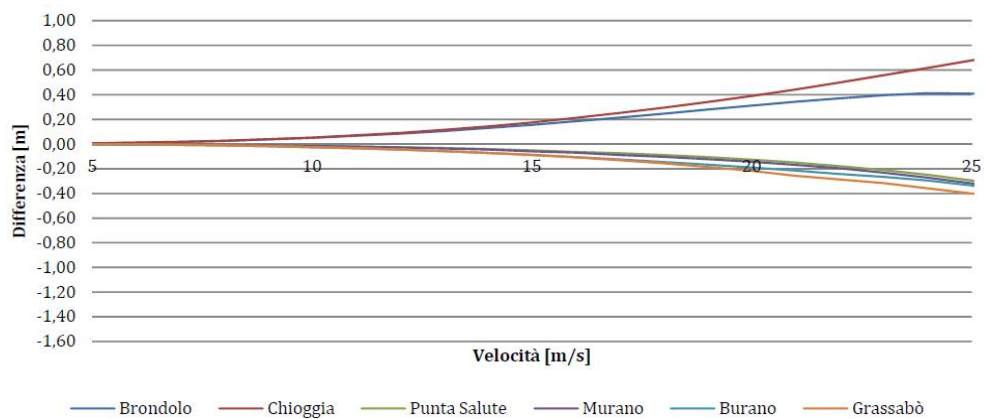


Figura 2.7 - Differenza tra sovralti da vento di Bora in configurazione a bocche chiuse e aperte

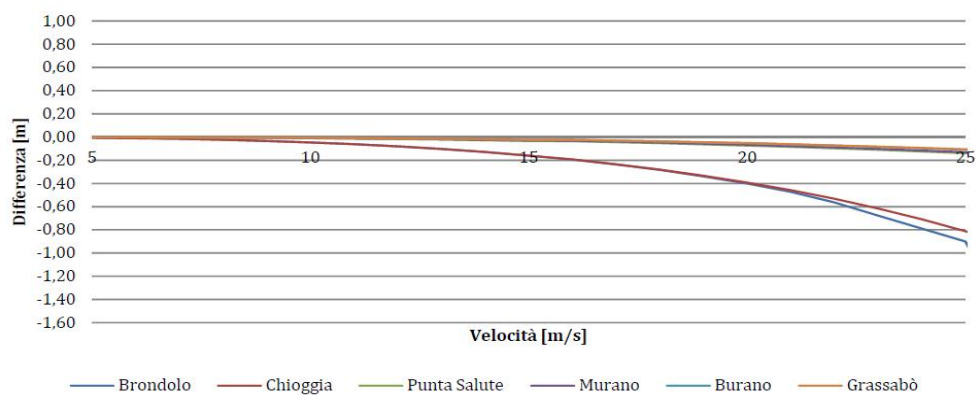


Figura 2.8 - Differenza tra sovralti da vento di Scirocco in configurazione a bocche chiuse e aperte

Si osserva in generale un'esaltazione del sovrizzo nelle condizioni di laguna isolata, che varia a seconda dell'intensità e della direzione del vento. In particolare l'esaltazione aumenta esponenzialmente all'aumentare della velocità del vento. Il fenomeno più importante che si evince da questi risultati è come le maggiori differenze si concentrino proprio in corrispondenza del tratto compreso tra le bocche di Lido e di Chioggia.

Tale fenomeno si può spiegare con il fatto che proprio in queste zone viene a mancare la circolazione secondaria indotta dal vento: a bocche aperte infatti è permesso un deflusso attraverso la bocca sopravento verso il mare, fenomeno che tende a limitare i dislivelli, mentre a bocche chiuse tale massa d'acqua è costretta a insaccarsi senza via d'uscita nelle estremità sud e nord della laguna, a seconda della direzione del vento.

2.1.2 Sovralzi dovuti alle precipitazioni e al bacino scolante

L'eventuale apporto delle precipitazioni, durante la chiusura delle bocche, potrà generare dei ulteriori sovralsi di livello in tutta la laguna.

Un contributo aggiuntivo, legato alla componente piovosa, è quello relativo alla risposta idrologica del bacino scolante. Secondo Pirazzoli (2002) e Pirazzoli e Umgiesser (2003, 2006) il deflusso proveniente dal bacino scolante è equivalente al volume delle precipitazioni che insistono direttamente nella superficie della laguna⁹.

La componente idrologica totale è quindi valutabile come il doppio dell'altezza di pioggia media. Complessivamente tale contributo congiunto assume

⁹ Cfr. Pirazzoli, P. A., *Did the Italian government approve an obsolete project to save Venice?*, Eos Trans. AGU, 83(20), 2002, p. 217; Pirazzoli, P., and G. Umgiesser, *E se il progetto MOSE fosse già obsoleto?*, Tech. Rep. 11-2003, 2003, p. 55, Ist. di Sci. Mar., Cons. Naz. Delle Ric., Venice, Italy; Pirazzoli P. A., and G. Umgiesser, *The projected MOSE barriers against flooding in Venice (Italy) and the expected global sea-level rise*, J. Mar. Environ. Eng., 8(3), 2006, pp. 247-261.

rilevanza relativamente modesta durante gli eventi che implicano l'attivazione delle opere mobili, ferma restando una chiusura di durata limitata. È inoltre frequente che le maree più gravose si manifestino con tempi differiti rispetto ad eventuali manifestazioni piovose.

2.1.3 Sovralzi dovuti alla filtrazione dell'acqua tra le paratoie

Un ulteriore contributo alla variazione di livello in laguna a bocche chiuse è costituito dai volumi d'acqua filtrati attraverso le paratoie mobili. La corretta movimentazione degli organi mobili necessita infatti la dotazione di un minimo gioco tra le paratie stesse, garantendo autonomia per ciascun elemento. Questa stessa autonomia implica la possibilità di un'oscillazione differenziale delle paratoie con la conseguente filtrazione di acqua attraverso esse.

Tale deflusso può essere espresso, in termini di incremento medio di livello all'interno della laguna (Δh), in funzione della durata della chiusura delle bocche secondo la seguente relazione proposta da Rinaldo et al. (2008):

$$\Delta h = 0.0042 d^2 + 0.1955 d$$

con Δh espresso in cm e d in ore¹⁰.

Similmente a quanto detto riguardo la componente di precipitazione, anche l'apporto dovuto alla filtrazione alle bocche assume importanza modesta confrontato ai sopralzi generati dall'azione ventosa, sempre qualora la durata di ogni singola chiusura sia limitata all'ordine delle ore.

¹⁰ A. Rinaldo, L. Nicotina, E. Alessi Celegon, F. Beraldin, G. Botter, L. Carniello, G. Cecconi, A. Defina, T. Settin, A. Uccelli, L. D'Alpaos, M. Marani, *Sea level rise, hydrologic runoff, and the flooding of Venice*, Water Resour. Res., 44, W12434, doi:10.1029/2008WR007195, 2008.

2.2 Livello equivalente

Riprendendo quanto specificato nel Capitolo 2.1.1, è stato dimostrato come i sovralti indotti dal vento non sia influenzati in maniera significativa dai livelli di partenza presenti in laguna alla chiusura.

La determinazione di un livello uniforme che viene a formarsi in laguna in totale assenza di vento, una volta chiuse le bocche di porto è fondamentale per il calcolo dei sovralti a bocche chiuse in qualsiasi configurazione meteorologica. Tale livello "a riposo" che si raggiunge viene chiamato livello equivalente. Il livelli locali realizzati in presenza di vento saranno quindi determinati sommando al livello equivalente i sovralti del vento calcolati a bocche chiuse ed eventuali altri contributi come pioggia o filtrazioni tra le paratoie.

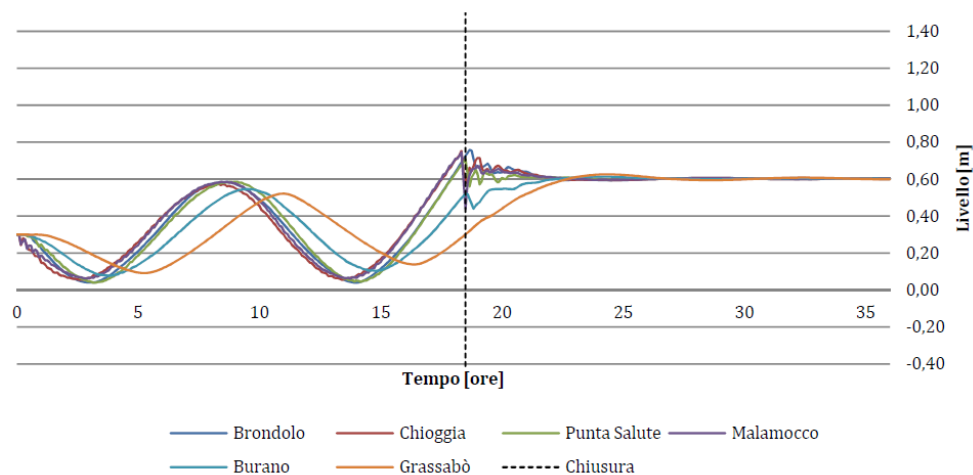


Figura 2.9 - Esempio esplicativo del raggiungimento del livello equivalente in tutte le stazioni interne alla laguna dopo la chiusura delle paratoie

Attraverso un complesso lavoro di modellazione ed analisi, è stata individuata una relazione che consente di determinare livello equivalente in funzione dei valori di livello registrati in alcune stazioni lagunari all'istante della chiusura delle bocche. In particolare il metodo opera una combinazione lineare tra le registrazioni di livello nella stazione di Malamocco Porto alla chiusura, un'ora prima e due ore prima della chiusura stessa. In questo modo è considerata la forma

dell'onda di marea entrante, che influisce sui volumi invasati nelle zone più remote della Laguna. La scelta della stazione di riferimento è strettamente legata alla sua posizione, baricentrica per ogni tipo di vento e quindi non influenzata dallo stesso.¹¹

L'espressione del livello equivalente risulta:

$$0,78 \cdot h_{chius} + 0,10 \cdot h_{-1ora} + 0,12 \cdot h_{-2ore} = h_{equiv}$$

dove h_{chius} , h_{-1ora} , h_{-2ore} rappresentano i livelli registrati alla stazione di Malamocco Porto rispettivamente all'istante di chiusura, un'ora prima e due ore prima.

Tale livello indica quindi l'altezza di marea che viene raggiunta, in breve tempo, dopo la chiusura delle bocche in tutta laguna in completa assenza di forzanti meteorologiche.

Data la mancanza di dati rilevati presso la stazione di Malamocco Porto negli anni precedenti al 2007, e far eventualmente fronte ad un guasto della stazione, si è rivelato necessario trovare una modalità per estrapolare il suo livello tramite un legame con altre stazioni lagunari.

La soluzione è fornita dalla combinazione lineare delle altezze a Chioggia e Punta Salute, poiché esse rappresentano il comportamento generale che si manifesta rispettivamente nella laguna Sud e nella laguna Nord.

$$0.54 \cdot h_{punta\ Salute} + 0.46 \cdot h_{Chioggia} = h_{Malamocco}$$

Si riportano di seguito alcuni esempi di confronto dei valori di livello equivalente riscontrati in laguna dopo la chiusura delle paratoie, calcolati tramite modello e tramite la relazione precedentemente esposta. Il completamento della

¹¹ Cfr. T. Santini, tesi di laurea: *Calcolo dei sovralti differenziali nella Laguna di Venezia durante il funzionamento delle opere mobili alle bocche*, 2014

chiusura delle bocche viene fatto coincidere col manifestarsi, a Punta Salute, di un valore di 20 cm inferiore al picco. Gli eventi scelti sono qui riassunti:

Simulazione	Data
1	18 Aprile 2012
2	20 Aprile 2012
3	15 Ottobre 2012
4	27 Ottobre 2012
5	31 Ottobre 2012
6	28 Novembre 2012
7	29 Novembre 2012
8	1 Dicembre 2012
9	2 Dicembre 2012
10	15 Dicembre 2012

Tabella 2.1 - Eventi prescelti per il confronto nel calcolo del livello equivalente

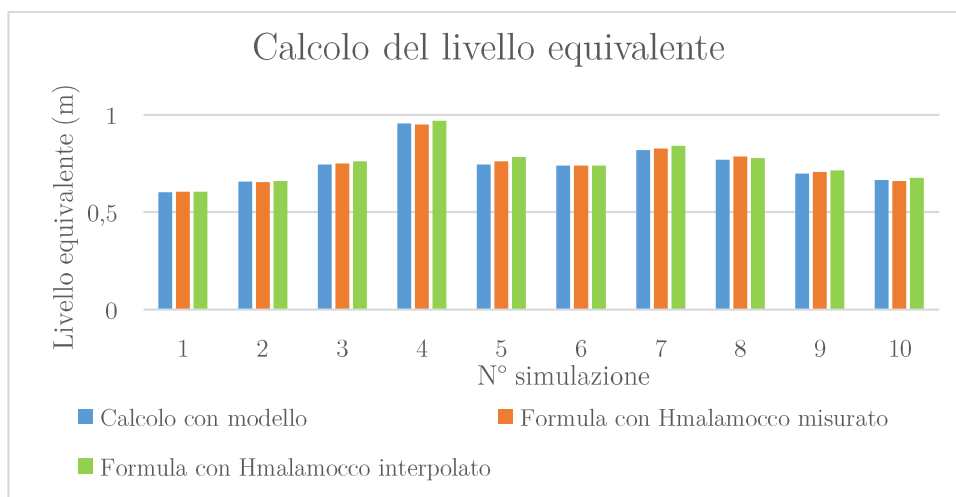


Figura 2.10 - Confronto metodi di calcolo del livello equivalente

Come si può vedere dall'istogramma, le differenze riscontrate tra le diverse modalità di calcolo sono minime, a conferma della buona taratura della formula utilizzata. Il grafico riporta inoltre i risultati ottenuti nel calcolo del livello

equivalente tramite l'utilizzo del livello a Malamocco interpolato con la relazione appena introdotta. Anche in questo caso la buona taratura dell'interpolazione è confermata da minime discrepanze.

3 Oggetto dello studio

3.1 Obiettivo

Viste le premesse necessarie a contestualizzare il presente lavoro, si procede quindi descrivendo i propositi che si intende perseguire in questo studio. Scopo primario è quello di determinare come varino il numero di chiusure delle bocche, e soprattutto la loro durata, in funzione di un ipotetico incremento del medio mare, applicando tutte le conoscenze dei fenomeni illustrate in precedenza.

Attualmente il numero di eventi di alta marea per cui si rivela necessaria la movimentazione delle paratoie è previsto in circa 5-6 chiusure annuali della durata di poche ore. Le previsioni di innalzamento del livello del medio mare implicano necessariamente un incremento notevole di tale valore e specialmente un'estensione in durata degli eventi. Si riportano di seguito le aspettative di innalzamento del medio mare fornite dall'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)¹² secondo i cinque diversi scenari che l'ente propone:

Year	SRES A1B	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
2007	0.03 [0.02 to 0.04]	0.03 [0.02 to 0.04]	0.03 [0.02 to 0.04]	0.03 [0.02 to 0.04]	0.03 [0.02 to 0.04]
2010	0.04 [0.03 to 0.05]	0.04 [0.03 to 0.05]	0.04 [0.03 to 0.05]	0.04 [0.03 to 0.05]	0.04 [0.03 to 0.05]
2020	0.08 [0.06 to 0.10]	0.08 [0.06 to 0.10]	0.08 [0.06 to 0.10]	0.08 [0.06 to 0.10]	0.08 [0.06 to 0.11]
2030	0.12 [0.09 to 0.16]	0.13 [0.09 to 0.16]	0.13 [0.09 to 0.16]	0.12 [0.09 to 0.16]	0.13 [0.10 to 0.17]
2040	0.17 [0.13 to 0.22]	0.17 [0.13 to 0.22]	0.17 [0.13 to 0.22]	0.17 [0.12 to 0.21]	0.19 [0.14 to 0.24]
2050	0.23 [0.17 to 0.30]	0.22 [0.16 to 0.28]	0.23 [0.17 to 0.29]	0.22 [0.16 to 0.28]	0.25 [0.19 to 0.32]
2060	0.30 [0.21 to 0.38]	0.26 [0.18 to 0.35]	0.28 [0.21 to 0.37]	0.27 [0.19 to 0.35]	0.33 [0.24 to 0.42]
2070	0.37 [0.26 to 0.48]	0.31 [0.21 to 0.41]	0.35 [0.25 to 0.45]	0.33 [0.24 to 0.43]	0.42 [0.31 to 0.54]
2080	0.44 [0.31 to 0.58]	0.35 [0.24 to 0.48]	0.41 [0.28 to 0.54]	0.40 [0.28 to 0.53]	0.51 [0.37 to 0.67]
2090	0.52 [0.36 to 0.69]	0.40 [0.26 to 0.54]	0.47 [0.32 to 0.62]	0.47 [0.33 to 0.63]	0.62 [0.45 to 0.81]
2100	0.60 [0.42 to 0.80]	0.44 [0.28 to 0.61]	0.53 [0.36 to 0.71]	0.55 [0.38 to 0.73]	0.74 [0.53 to 0.98]

Tabella 3.1 - Previsioni di innalzamento del medio mare (m) al 1° gennaio dell'anno indicato. Valori indicati come mediana e likely range.

¹² IPCC, Annex II: Climate System Scenario Tables [Prather, M., G. Flato, P. Friedlingstein, C. Jones, J.-F. Lamarque, H. Liao and P. Rasch (eds.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

Negli scenari peggiori è previsto un incremento del medio mare di 75 cm entro la fine del secolo: è inevitabile attendersi un apprezzabile aumento delle maree che superano i livelli di soglia per i quali viene attivato il sistema di paratoie mobili.

Garantire la protezione di Venezia e delle altre cittadine lagunari dalla minaccia dell'acqua alta è la priorità che ha ispirato la progettazione del sistema MOSE, ma in un'ottica futura si presentano alcune problematiche collaterali: ogni chiusura della laguna implica gravi ripercussioni negative all'economia legata al transito di navi turistiche e commerciali, che, a lungo andare, potrebbero scegliere nuovi porti per fare scalo. Altra questione di parimenti importanza è il mancato ricircolo d'acqua che verrebbe a crearsi nel caso di lunghe chiusure alle bocche; in tali circostanze ne risentirebbe sicuramente l'intero ecosistema lagunare.

Il presente studio si pone quindi come obiettivo realizzare un metodo di calcolo automatico in grado di processare i dati di marea e vento al fine di poter determinare quando risulti necessaria l'attivazione delle opere mobili per isolare il bacino lagunare dal mare.

3.2 Dati utilizzati

Il modello di calcolo implementato, esplicito nel dettaglio nel capitolo seguente, ha validità generale, ma per poterne validare il corretto funzionamento si è ricorso ad alcune serie storiche di dati di livello, intensità e direzione del vento e pressione atmosferica relativi ad alcune stazioni in laguna. I dati, come introdotto nel capitolo 1.7, provengono dagli archivi dell'ISPRA e del Centro Maree. Le registrazioni, con passo di 5 minuti sono confinate tra il 1 gennaio 2000 e il 31 dicembre 2012.

Una questione che si è fin da subito riscontrata è stata la presenza di parecchie lacune di dati causate da malfunzionamenti temporanei dei dispositivi di misura in dotazione nelle stazioni, di durata variabile da pochi minuti ad interi giorni.

È quindi fondamentale per il successivo lavoro ovviare a tutte le carenze di dati; l'elevato numero delle misure (circa 103000 rilevazioni per anno per tipologia di misura) e il grande numero di "buchi" nei dati, soprattutto nei primi anni, ha imposto la necessità di implementare un codice automatico per individuare e correggere i record mancanti.

Il codice di calcolo opera nel seguente modo:

- Individua i record senza dato
- Determina l'estensione temporale del "buco"
- Se l'estensione è limitata (massimo mezz'ora) si procede ad un'interpolazione dei dati per correggere la mancanza di dati
- Se l'estensione è rilevante (oltre mezz'ora) si procede ad una ricostruzione pseudo-manuale del dato a partire dalle misurazioni di altre stazioni (la procedura sarà descritta in seguito)

In particolare le misurazioni sono caratterizzate in questo modo:

Stazione di misura	Disponibilità dati	Grandezza	Unità di misura
Punta della Salute Giudecca	2000-2012	Livello	m
Punta della Salute Canal Grande	2000-2012	Livello	m
Diga Sud Lido	2000-2012	Livello	m
	Dal 12/04/2011 al 2012	Direzione vento	gradi
	Dal 12/04/2011 al 2012	Velocità media vento	nodi
	Dal 12/04/2011 al 2012	Velocità massima vento	nodi

Stazione di misura	Disponibilità dati	Grandezza	Unità di misura
Diga Nord Malamocco	2000-2012	Livello	m
Diga Sud Chioggia	2000-2012	Livello	m
	2000-2012	Direzione vento	gradi
	2000-2012	Velocità media vento	nodi
	Dal 01/01/2009 al 2012	Velocità massima vento	nodi
Chioggia Vigo	2000-2012	Livello	m
Palazzo Cavalli	2000-2012	Pressione	hPa
Piattaforma CNR	2000-2012	Livello	m
	2000-2012	Direzione vento	gradi
	2000-2012	Velocità media vento	nodi
	2000-2012	Velocità massima vento	nodi
Saline	2000-2012	Livello	m
	2000-2012	Direzione vento	gradi
	2000-2012	Velocità media vento	nodi
	Dal 01/01/2009 al 2012	Velocità massima vento	nodi
Darsena Misericordia	Dal 01/01/2003 al 2012	Livello	m
Burano	Dal 01/01/2003 al 2012	Livello	m
Murano	Dal 17/01/2003 al 16/04/2009	Livello	m
Malamocco Porto	Dal 01/01/2007 al 2012	Livello	m
	Dal 01/01/2007 al 2012	Direzione vento	gradi

Stazione di misura	Disponibilità dati	Grandezza	Unità di misura
	Dal 01/01/2007 al 2012	Velocità media vento	nodi
	Dal 01/01/2007 al 2012	Velocità massima vento	nodi
Chioggia Porto	Dal 01/01/2007 al 2012	Livello	m
	Dal 01/01/2007 al 2012	Direzione vento	gradi
	Dal 01/01/2007 al 2012	Velocità media vento	nodi
	Dal 01/01/2007 al 2012	Velocità massima vento	nodi
Fusina	Dal 07/08/2009 al 31/12/2009	Livello	m

Tabella 3.2 - Disponibilità dei dati di misurazione delle stazioni lagunari

I criteri di interpolazione dei dati, nei “buchi” di dimensioni ridotte, variano a seconda della grandezza misurata. In particolare:

- Per i livelli si è optato per un'interpolazione con un polinomio di 2° grado per meglio simulare l'andamento dell'onda di marea;
- Per misure di pressione, direzione e velocità del vento, l'interpolazione ha assunto carattere lineare.

Il “riempimento dei buchi” di elevata estensione temporale ha richiesto un approccio pseudo-manuale, sfruttando la correlazione che esiste tra alcune stazioni di misura. È noto infatti come la marea si propaghi all'interno della laguna e conseguentemente è possibile determinare con buona precisione i livelli di marea di tutte le stazioni conoscendo i corrispondenti ritardi.

Come si vede nella Tabella 3.2 - Disponibilità dei dati di misurazione delle stazioni lagunari, alcune misure hanno avuto il loro avvio in anni successivi al 2000, rivelando quindi la mancanza di dato per lunghissimi periodi. In questo caso si è deciso di non procedere con alcun tipo di interpolazione/riempimento del dato mancante.

Unica eccezione le misure di livello relative alla stazione di Malamocco Porto: tali dati sono indispensabili per la determinazione del livello equivalente e dunque si è proceduto alla ricostruzione delle rilevazioni negli anni dal 2000 al 2006 utilizzando la relazione introdotta al capitolo 2.2, che lega i livelli di Malamocco a quelli di Chioggia e Punta della Salute.

E' riportato di seguito un riepilogo del numero di dati mancanti e dei dati ripristinati.

Anno	Semestre	Dati totali	Dati mancanti	Dati non ricostruiti	Dati ricostruiti	% ricostruiti sul totale	% ricostruiti sui mancanti
2000	1	838656	206589	104559	102030	12,17%	49,39%
	2	847872	48272	0	48272	5,69%	100,00%
2001	1	834048	90112	0	90112	10,80%	100,00%
	2	847872	69359	5871	63488	7,49%	91,54%
2002	1	834048	117476	10227	107249	12,86%	91,29%
	2	847872	113837	24353	89484	10,55%	78,61%
2003	1	990432	20922	0	20922	2,11%	100,00%
	2	1006848	8735	0	8735	0,87%	100,00%
2004	1	995904	6179	0	6179	0,62%	100,00%
	2	1006848	6512	0	6512	0,65%	100,00%
2005	1	990432	36420	35136	1284	0,13%	3,53%
	2	1006905	37260	11644	25616	2,54%	68,75%
2006	1	990432	10725	5997	4728	0,48%	44,08%
	2	1006848	2184	0	2184	0,22%	100,00%
2007	1	1407456	15075	0	15075	1,07%	100,00%
	2	1430784	21618	0	21618	1,51%	100,00%
2008	1	1415232	4110	0	4110	0,29%	100,00%
	2	1430784	7219	0	7219	0,50%	100,00%
2009	1	1511712	29845	21779	8066	0,53%	27,03%
	2	1536768	21487	10786	10701	0,70%	49,80%
2010	1	1459584	26518	0	26518	1,82%	100,00%
	2	1483776	12331	0	12331	0,83%	100,00%
2011	1	1615968	130247	87756	42491	2,63%	32,62%
	2	1642752	11679	0	11679	0,71%	100,00%
2012	1	1624896	41034	0	41034	2,53%	100,00%
	2	1642752	13497	0	13497	0,82%	100,00%
TOTALE		31247481	1109242	318108	791134	2,53%	71,32%

Tabella 3.3 – Riepilogo dei dati di misurazione mancanti e ripristinati

Il processo di interpolazione/ricostruzione dei dati mancanti è stato attuato per la totalità delle misure a disposizione, ma per il funzionamento del codice di calcolo automatico è sufficiente un numero inferiore di rilevazioni, del cui singolo contributo si andrà a parlare a breve. In particolare sono necessarie:

- Misure di livello nelle stazioni di:
 - Punta della Salute Canal Grande
 - Diga Sud Lido
 - Diga Nord Malamocco
 - Diga Sud Chioggia
 - Chioggia Vigo
 - Malamocco Porto
- Misure di direzione e velocità media del vento relative alla stazione di Diga Sud Chioggia

In aggiunta a tali informazioni sono state utilizzate le rilevazioni di altezza di pioggia, dal 2000 al 2012, fornite dall'ISPRA relativamente alla stazione di Lido.

3.3 Modello implementato

Prima di descrivere nel dettaglio il funzionamento del modello di calcolo, è necessario precisare i principali criteri di operatività delle paratoie mobili alle bocche di porto.

La chiusura delle bocche deve garantire che il livello interno alla laguna non superi mai una certa quota “sostenibile” per evitare l'allagamento delle cittadine lagunari: tale quota è denominata quota di tolleranza. In particolare sono stati selezionati degli specifici riferimenti quali i livelli alla stazione di Punta della Salute Canal Grande, alla stazione di Chioggia Vigo e infine a Burano. Mentre per le stazioni di Punta della Salute e Burano è assegnato il medesimo livello di

tolleranza (tipicamente +1.00 m sullo ZMPS), Chioggia è soggetta ad allagamenti solo una volta superate quote superiori, grazie alla presenza del sistema denominato comunemente “Mini-MOSE”, in grado di garantire la protezione della città fino a +1.30 m sullo ZMPS. A Chioggia la quota di tolleranza da rispettare è comunque limitata per sicurezza a +1.20 m sullo ZMPS. E’ ovvia la considerazione di come i livelli di tolleranza debbano essere inferiori a quelli di allarme: tralasciando il caso di Chioggia, ove le ragioni sono di sicurezza, si noti come il livello durante i periodi di chiusura permanga per un tempo di un ordine di grandezza superiore a quello di un normale picco senza chiusura. Se è quindi ammesso far propagare un picco di 1.06 – 1.07 m a Venezia non può essere tollerato fissare questo come livello di tolleranza, sia per ragioni di sicurezza (basterebbe un piccolo errore gestionale per far raggiungere la soglia di allarme) sia per i disagi che tale livello comunque provocherebbe qualora permanesse per 5 – 6 ore.

È necessario quindi prevedere quale saranno i livelli che si verranno a verificare in queste stazioni, tenendo conto di tutte le possibili forzanti in grado di alterare il livello stesso durante la chiusura, come vento, pioggia, filtrazione attraverso le paratoie, così come descritte nel capitolo 392.1, e verificare che durante i periodi di chiusura tali livelli non vengano mai superati.

L’istante di chiusura delle paratoie non coinciderà dunque con il momento di raggiungimento delle soglie di tolleranza bensì potrebbe essere anticipato anche di parecchio tempo in funzione dei sovralti previsti durante la successiva chiusura.

L’individuazione degli eventi in cui sia necessaria la movimentazione delle opere mobili non è però controllata dal superamento delle soglie di tolleranza, bensì il raggiungimento di un ulteriore quota, di entità superiore, definita di allarme. Questa soglia ammette la possibilità di superare solo per brevi periodi i livelli di tolleranza, fintanto che non si superino le quote limite che sono assunte generalmente +1.10 m sullo ZMPS per Punta della Salute e Burano e +1.30 m sullo ZMPS per Chioggia.

La riapertura delle paratoie, una volta passato il colmo di marea, avviene quando il livello a mare si è ridotto ed ha eguagliato il livello medio interno. Per livello a mare è assunta la media dei livelli alle tre bocche di porto.

Il programma di computo sviluppato implementa tutte queste condizioni e, analizzando i dati presentati al capitolo precedente, fornisce in risposta tutti gli istanti in cui è necessario isolare la laguna.

Di seguito sono riportate alcune assunzioni ed ipotesi adottate nell'implementazione dell'algoritmo.

3.3.1 Vento

Per il calcolo dei sovralti dovuti al vento si è fatto riferimento, in favore di sicurezza, al vento misurato presso la stazione di Diga Sud Chioggia, considerando intensità e direzione uniformi in tutta la laguna. Per evitare grosse variazioni istantanee della velocità del vento, è stata effettuata una media mobile in un quarto d'ora (3 step temporali). Sulla base di questi valori sono stati determinati i corrispondenti sovralti nelle stazioni di Punta della Saluta, Chioggia e Burano attraverso le tabelle introdotte al capitolo 2.1.1.

Per tenere conto del non istantaneo conseguimento del massimo sovralto e per evitare brusche variazioni del livello, è stata effettuata un'ulteriore media mobile sui sovralti in un intervallo di 15 minuti.

Ulteriore accorgimento è stato quello di non considerare i sovralti negativi, ponendoli di entità nulla. Questa scelta è motivata dal fatto che non è ammissibile considerare che un particolare vento possa indurre un abbassamento di livello tale da poter garantire il non superamento dei livelli di sicurezza. La natura previsionale dei dati meteorologici non garantisce la presenza effettiva di tali condizioni ventose e quindi, in via cautelativa, è consigliato non considerare i dislivelli negativi imposti dal vento.

3.3.2 Precipitazioni e bacino scolante

In favore di sicurezza la pioggia è considerata uniforme in tutto il bacino lagunare con riferimento ai dati rilevati alla stazione di Lido. Come suggerito nel capitolo 2.1.2, il contributo fornito dal bacino scolante è assunto della stessa intensità delle precipitazioni incidenti la laguna.

3.3.3 Filtrazioni tra le paratoie

Come visto nel capitolo 2.1.3, le paratoie in azione non garantiscono una tenuta stagna, bensì consentono il passaggio di una certa portata d'acqua attraverso le fessure tra un elemento ed il successivo. Tale fenomeno è inoltre proporzionale alle oscillazioni a cui sono soggette le paratoie stesse sotto l'azione del moto ondoso.

Il contributo di filtrazione è stato assunto nell'algoritmo in entità dipendente dalla durata della chiusura:

- Per durata inferiore alle 9 ore $\Delta h = 0.0042 d^2 + 0.1955 d$ (Δh in m e d in ore);
- Per una durata compresa tra 9 ore e 21 ore l'incremento è considerato costante e pari a $\Delta h(9h)$, con Δh determinato con la precedente relazione;
- Per durata oltre le 21 h è assunto un incremento di 1 mm all'ora.

3.3.4 Incremento del medio mare

Al fine di utilizzare tale strumento in modalità predittiva, è stata implementata la possibilità di incrementare i livelli di una fissata quantità, simulando quindi l'aumento del medio mare, per osservare i relativi effetti sul numero e sulla durata delle chiusure alle bocche.

3.3.5 Algoritmo di calcolo

L'algoritmo principale di calcolo consiste una procedura ciclica in cui per ogni istante di tempo è valutato innanzitutto il rispetto dei limiti di allarme alle stazioni di Punta della Salute e Chioggia. Nel caso in cui tale limite sia superato è individuato l'inizio di un evento di chiusura delle paratoie. Il livello che viene assunto all'interno della laguna è il livello equivalente, così come definito precedentemente. A questo punto viene determinato quale sarà il massimo livello che è possibile osservare nelle tre stazioni di Punta Salute, Chioggia e Burano durante la chiusura, calcolato come somma del livello equivalente e dei sovralti dovuti all'effetto del vento.

Per tutti gli step temporali compresi tra l'istante di chiusura e quello di "picco", ovvero dove realizzo il massimo livello in una delle tre stazioni, sicuramente devo mantenere chiuse la paratoie. Superato il picco, manterrò chiuse le bocche fintanto che il livello interno è inferiore al livello a mare (dato dalla media dei livelli alle tre bocche). Gli istanti precedenti il picco sono identificati come fase di "livello crescente", mentre i successivi di "livello decrescente".

Per tutti gli step di chiusura viene quindi calcolato il corrispondente livello nelle tre stazioni, come somma del livello equivalente al momento della chiusura e dei contributi in sovralto di vento, pioggia e filtrazioni attraverso le paratoie. Se per un qualche step tali livelli non rispettano i corrispondenti limiti di tolleranza viene anticipato l'istante di chiusura di uno step temporale. A questo punto si ripete il computo dei livelli aggiornando il livello equivalente. La procedura viene quindi ripetuta iterativamente finché non è rispettato il mantenimento dei livelli al di sotto delle soglie di accettabilità.

L'identificazione delle fasi di livello "crescente" e "decrescente" sono necessarie per evitare che possano avvenire delle riaperture delle bocche negli istanti antecedenti il picco. È plausibile infatti che si debba ricorrere ad una chiusura anticipata ad istanti in cui i livelli rispettano pienamente tutti i limiti

imposti, ma la chiusura sia comunque necessaria per garantire un livello equivalente di partenza sufficiente ad assicurare il rispetto delle tolleranze in tempi successivi.

Può accadere che un particolare evento richieda, per rispettare i limiti di tolleranza, di anticipare la chiusura fino ad avvicinarsi o addirittura raggiungere e superare la riapertura dell'evento precedente. In tal caso è sconveniente aprire le bocche e poi richiuderle per un tempo ridotto (nella procedura è stato considerato un tempo minimo di apertura tra due eventi non inferiore a 2 ore), oppure l'evento stesso richiede livelli equivalenti ancora più bassi. In entrambi i casi i due eventi andranno a “unirsi” in un'unica chiusura. Il livello equivalente di riferimento per entrambi gli eventi diverrà il livello del primo evento, sul quale verrà quindi ricalcolato l'andamento dei livelli nel tempo nelle tre stazioni.

3.3.6 Esempio

Per dimostrare il funzionamento del codice di calcolo si illustreranno i risultati ottenuti applicando l'algoritmo durante l'evento di alta marea verificatosi durante le giornate del 5 e 6 febbraio 2015.

L'evento è caratterizzato da forte vento di bora, con velocità che hanno superato i 20 m/s. Tali condizioni meteorologiche hanno causato un abbondante superamento dei limiti di livello sia a Punta a Salute, sia a Chioggia. Si osserva però che il superamento dei livelli di tolleranza è avvenuto in tre distinte e successive fasi di marea. La prima fase ha avuto il suo picco attorno alle 11.00 del 5 febbraio, la seconda alle 2.00 del 6 febbraio, mentre la terza verso le 11.00 dello stesso giorno. In particolare i massimi livelli si sono raggiunti a Chioggia (1,48 m sullo ZMPS) alle ore 2.00 del 6 febbraio, mentre a Punta Salute il picco si è attestato su 1.23 m sullo ZMPS verso le 11.00 dello stesso giorno.

Tra le fasi sono intercorse alcune ore in cui i livelli si sono ristabiliti al di sotto dei limiti di tolleranza, come si può vedere nel grafico seguente.

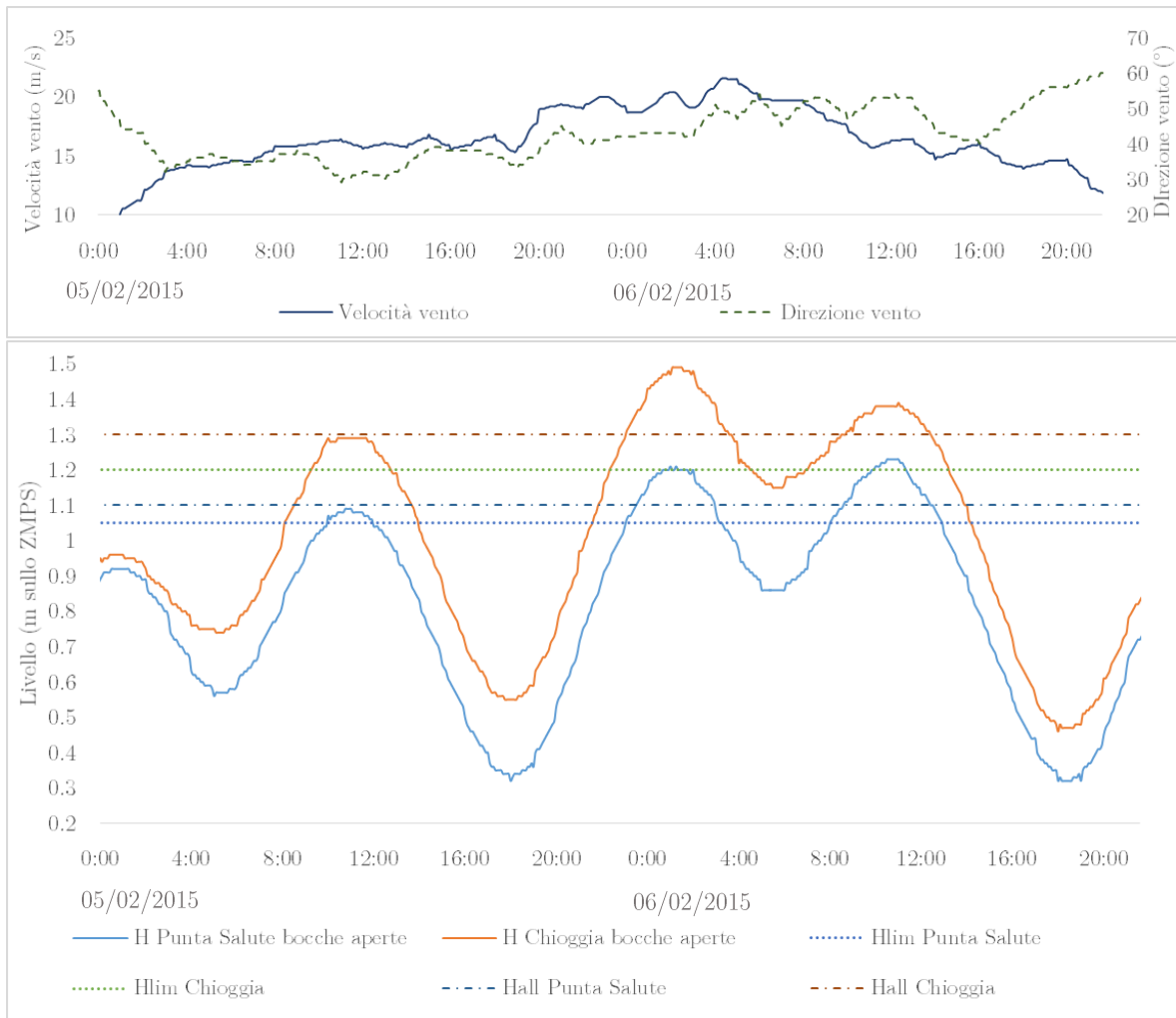


Figura 3.1 - Livelli di marea durante l'evento del 5-6 febbraio 2015

Il primo picco di marea, in data 5 febbraio, giunge a livelli superiori alle tolleranze di 1,05 m a Punta Salute e 1,20 a Chioggia ma non supera mai i livelli di allarme prestabiliti (1,10 m a PS e 1,30 a Chioggia). Questo dunque è un perfetto esempio di un evento in cui non avverrebbe l'attivazione dei dispositivi di chiusura delle bocche, ritenendo accettabile il superamento dei livelli limite per un breve periodo di tempo.

I successivi due picchi invece raggiungono e passano abbondantemente le quote di allarme sia a Punta Salute, sia a Chioggia. Ci si aspetterebbe dunque due

distinte chiusure delle paratoie per garantire la salvaguardia delle due città durante i due eventi di alta marea.

Utilizzando l'algoritmo di calcolo presentato, i risultati ottenuti sono i seguenti:

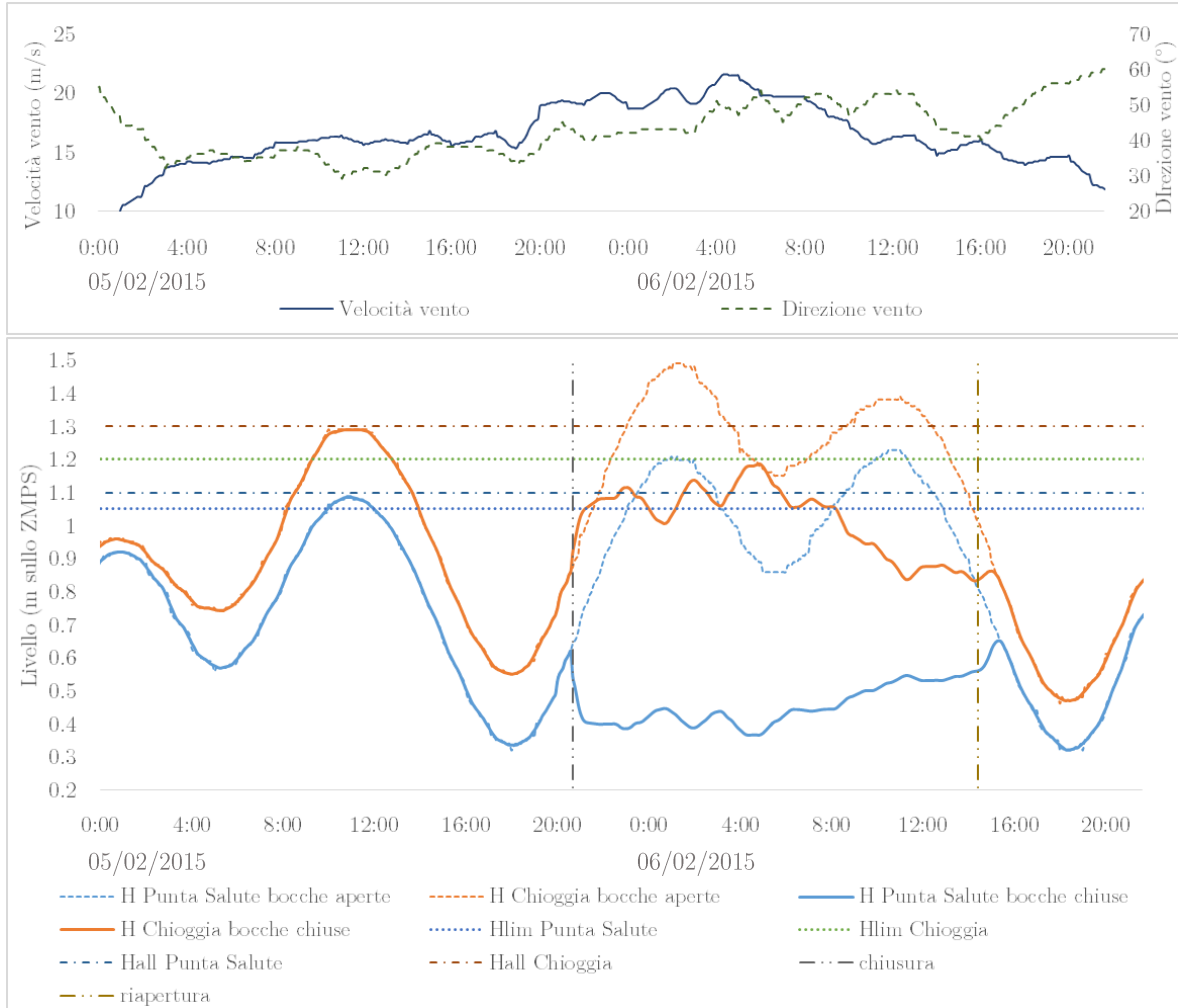


Figura 3.2 - Simulazione dell'attivazione del MO.S.E. durante l'evento del 5-6 febbraio 2015

Come previsto, il primo picco non necessita della movimentazione delle paratoie, vista la permanenza di livelli inferiori al livello di allarme. I successivi due eventi invece, a differenza di quanto si sarebbe potuto aspettare, interessano un'unica chiusura che ha inizio alle 20.40 del 5 febbraio e termina alle 14.25 del

giorno successivo. Questo sta a significare che per garantire il rispetto dei limiti nel secondo evento è stato necessario un livello equivalente di partenza sufficientemente basso, comportando quindi un anticipo della chiusura che si protrae a monte del primo evento.

Si nota molto chiaramente l'effetto dell'intenso vento di bora negli importanti sovralti che vengono a manifestarsi a Chioggia. Per conservare livelli al di sotto di 1,20 m a Chioggia, la chiusura è stata imposta in corrispondenza di un basso valore del livello equivalente. A Punta della Salute si è quindi mantenuto durante tutto l'evento un livello molto basso, inferiore ai 50 cm, grazie anche all'effetto del vento che ha sospinto la massa d'acqua verso Chioggia abbassandone il livello a Venezia.

Di seguito l'andamento durante la chiusura dei diversi contributi che sono andati a sommarsi nella formazione dei livelli.

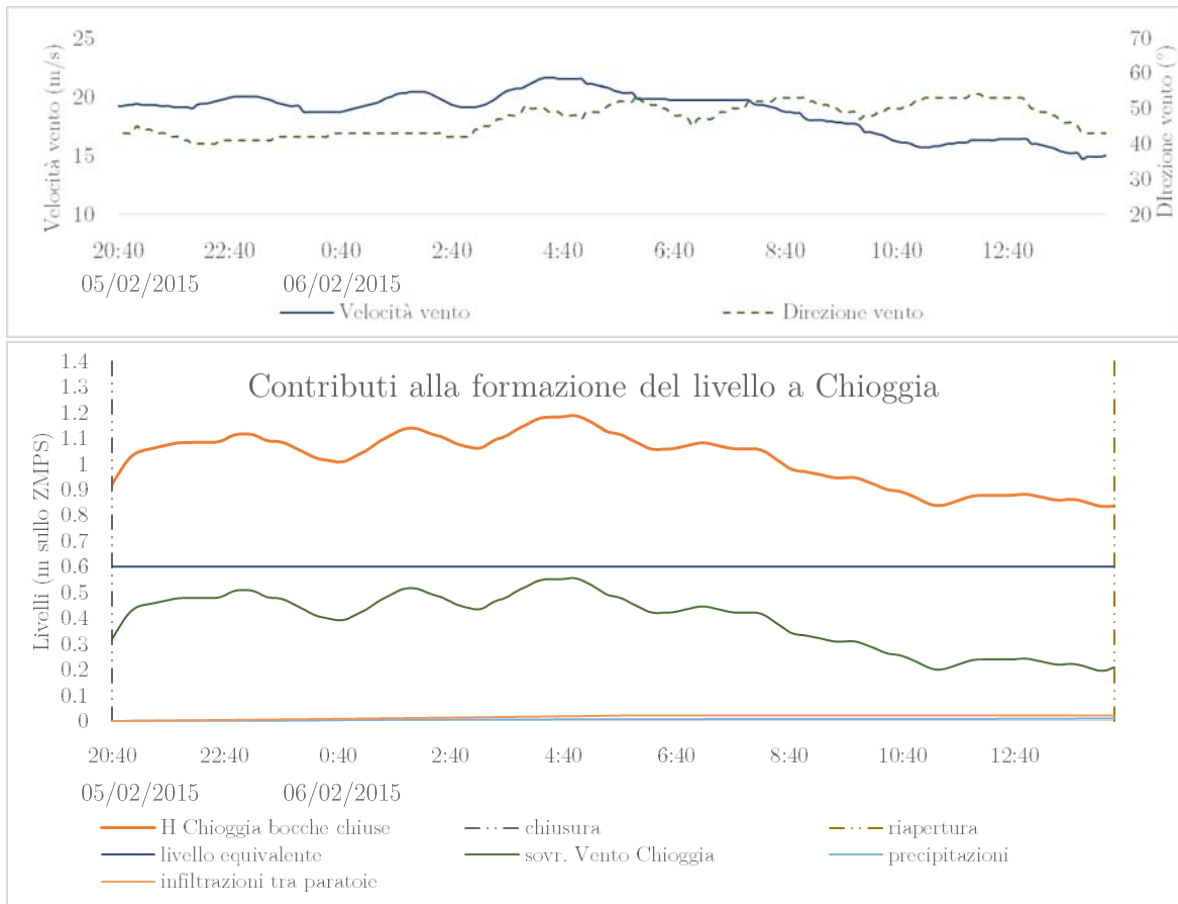


Figura 3.3 -Contributi alla formazione del livello durante la chiusura delle paratoie a Chioggia

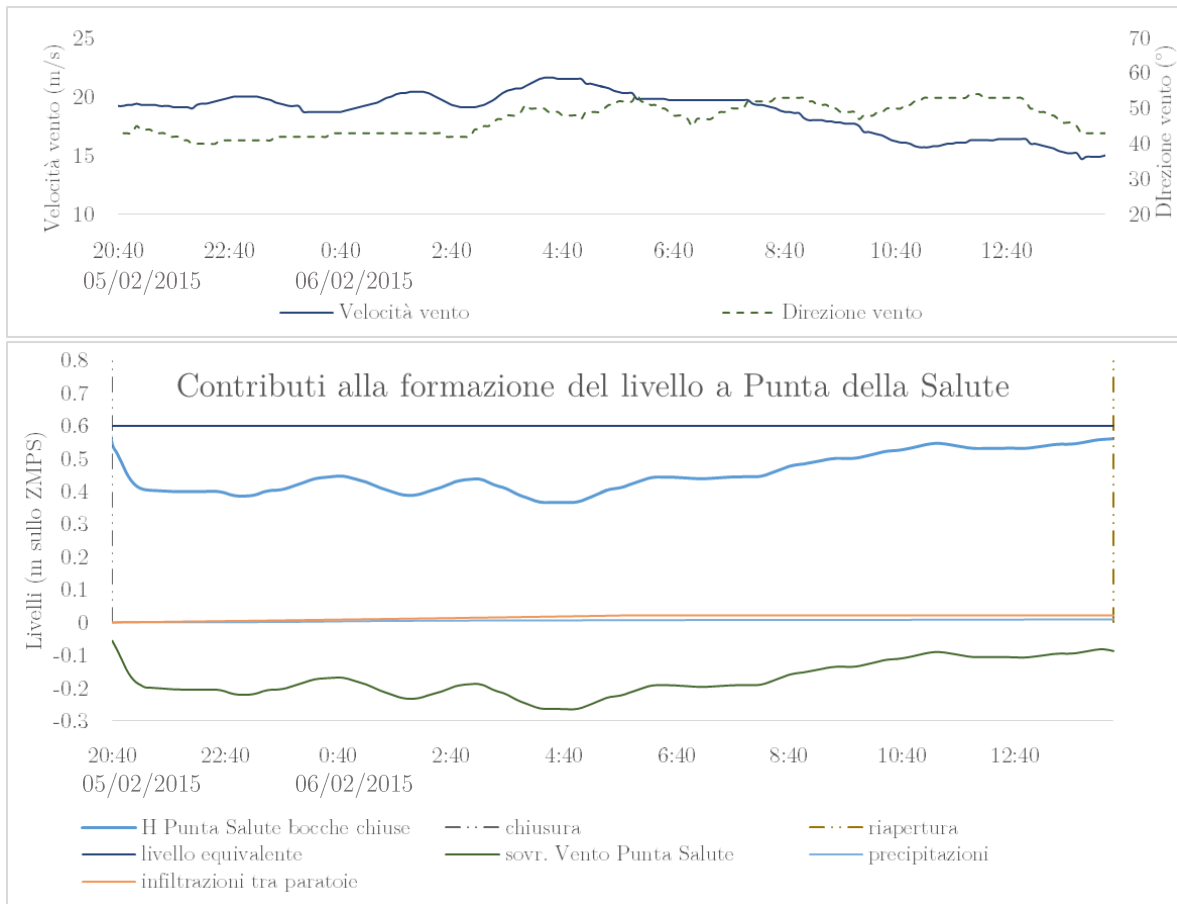


Figura 3.4 - Contributi alla formazione del livello durante la chiusura delle paratoie a Punta della Salute

Dai due grafici è evidente come per l'evento in questione i contributi di precipitazioni e filtrazioni tra le paratoie risultino di assoluta trascurabilità rispetto all'entità dei sovralti indotti dal vento.

3.4 Modello idrodinamico

Per validare i risultati ottenuti con il precedente modello di calcolo, si effettuerà successivamente un confronto con quanto previsto dal modello matematico agli elementi finiti sviluppato dal Dipartimento di Idraulica dell'Università degli Studi di Padova.

Il modello matematico si fonda sulla soluzione numerica agli elementi finiti delle equazioni che governano la propagazione dell'onda di marea (onda lunga in acque basse) in ipotesi bidimensionale (D'Alpaos e Defina, 1993; Defina, 2000; D'Alpaos e Defina, 2006).

Il codice di calcolo è chiaramente improntato sul particolare ambiente della Laguna di Venezia, contraddistinto da tratti caratteristici molto rari, se non unici, a cui essa è soggetta che hanno ripercussioni più o meno intense sull'idrodinamica del sistema, andando a modificare le correnti in maniera differente a seconda del livello che viene raggiunto. Le due categorie principali su cui sono stati necessari interventi mirati sono:

- la ampie superfici destinate a una parziale o totale sommersione periodica (barene), per le quali è stato introdotto un modello di sottogriglia (D'Alpaos e Defina, 1993; Defina, 2000). Modificando opportunamente le equazioni bidimensionali si sono potuti considerare gli effetti sull'invaso e sulla resistenza al moto dovuti alle irregolarità del terreno (geometriche e di scabrezza);
- il fittissimo sistema di canali, fortemente eterogenei, per il quale è stato necessario accoppiare l'azione di elementi bidimensionali e monodimensionali. I primi utilizzati per rappresentare il moto bidimensionale tipico della propagazione dell'onda su bassifondi e barene; i secondi disposti per seguire il tracciato dei canali minori, in maniera da non trascurarne il loro apporto ai fini della propagazione della marea.

I risultati forniti dal codice di calcolo negli anni di sperimentazione con le convenienti modifiche apportate al codice, sono stati convalidati sulla base di numerose misurazioni eseguite sul campo, decretando l'ottima efficienza e precisione del modello che risulta in grado di rappresentare assai fedelmente le dinamiche propagative sia globali che locali della marea.

Le equazioni che stanno alla base sono relative alle onde lunghe in acqua basse, essendo la lunghezza dell'onda di marea di diversi ordini di grandezza maggiore rispetto all'altezza media del fondale lagunare. Integrandole sulla verticale e ponendo alcune modifiche per considerare le irregolarità del fondo, esse si possono riscrivere come:

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

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

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

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 turbolenti 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 (trascurato nel nostro caso), ρ 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, η è la frazione bagnata di area dell'elemento.

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 η e Y sono:

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

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

dove $erf()$ 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:

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

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

$$\frac{H}{a_r} \cong \frac{Y}{a_r} + 0.27 \sqrt{\frac{Y}{a_r}} e^{-2Y/a_r}$$

Lo sforzo di attrito sulla superficie per azione del vento è determinato secondo la formula:

$$\tau_w = \rho_a c_d U_w^2 (1 - e^{e_w U_w})$$

dove ρ_a è la densità dell'aria ($1,25 \text{ kg/m}^3$), c_d è il coefficiente di resistenza aerodinamica, U_w è la velocità del vento e e_w è un coefficiente pari a $1,62 \times 10^{-6}$. Quest'ultimo è assunto nel modello come un valore costante, ma nella realtà è dipendente dalle condizioni termo-igrometriche dell'aria e, soprattutto, dall'altezza delle onde. Si cela inoltre uno stretto legame con l'intensità, la direzione del vento e la sua durata, fattori cioè che determinano strettamente le caratteristiche delle onde, compresa appunto l'altezza.



Figura 3.5 - Geometria del modello della Laguna

La geometria su cui si basa il modello fa riferimento alla discretizzazione della laguna riprodotta per mezzo di 49771 nodi e 94162 maglie. Ad ogni maglia sono state assegnate:

- quote, sulla base della batimetria del 2003 (la più recente e completamente disponibile);
- altezza a_r , posta ovunque pari a 0,3 m;
- scabrezza secondo Strickler, a seguito di una articolata taratura del modello considerando le registrazioni di un elevato numero di stazioni. Ad ogni tipologia di fondo sono state assegnate determinati valori del coefficiente, come si deduce dalla tabella seguente:

Classe	$k_s [m^{1/3}/s]$
Mare	40
Canali e bocche	35
Bassifondi	30
Zone semi-emerse non vegetate	20
Barene	15

Figura 3.6 - Classi di scabrezza del fondo

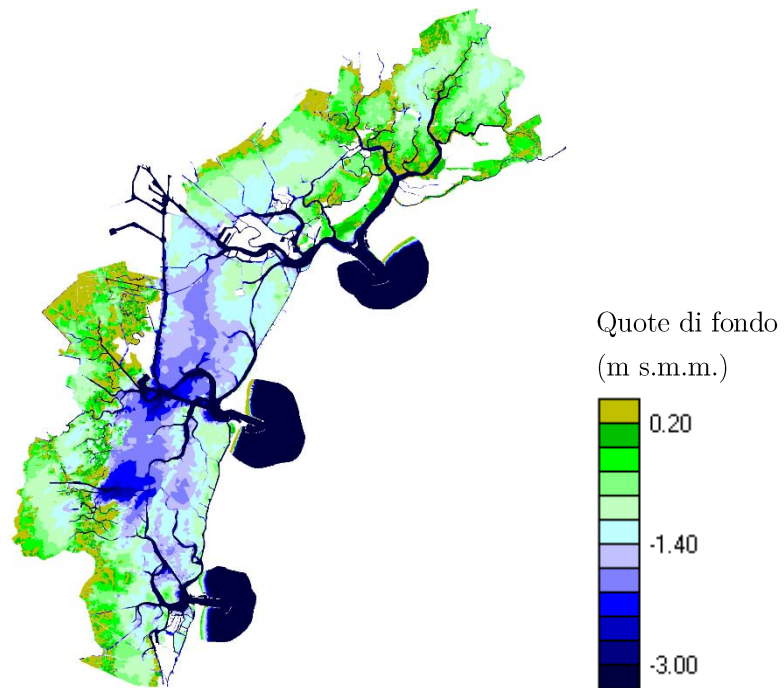
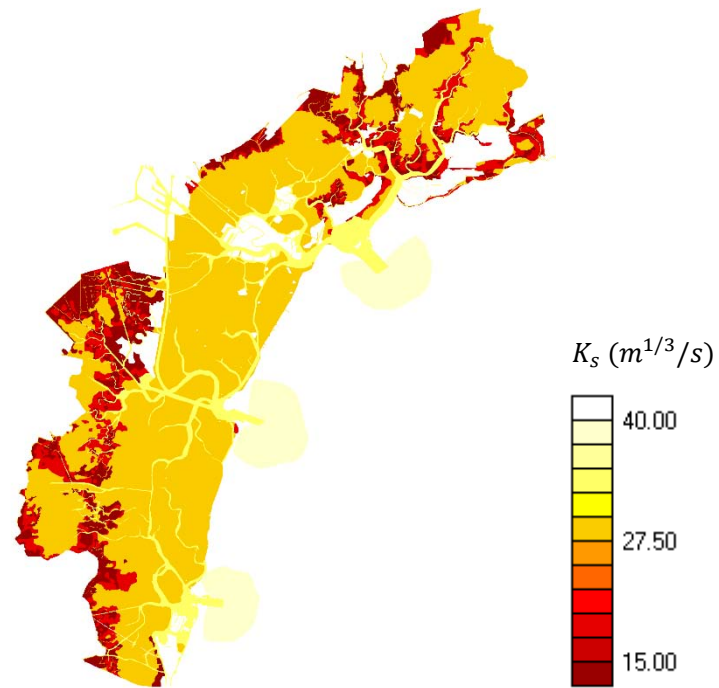


Figura 3.7 - Scabrezze e quote di fondo assegnate nel modello della Laguna

Le condizioni iniziali sono costituite da un livello costante di allagamento delle maglie; la loro precisione incide solo sul tempo che il modello impiega a raggiungere la condizione di regime, senza perciò introdurre errori nei risultati. Per ottenere degli esiti il più possibile precisi in un determinato periodo da considerare per la simulazione è necessario allungare opportunamente a monte la simulazione.

Le condizioni al contorno invece sono più delicate da trattare: le progressioni dei livelli registrate dalle stazioni vengono inserite in un file con estensione *.sim*. I valori avranno cadenza 5 minuti e saranno relativi alle centrali situate sulle bocche di porto: Lido, Malamocco e Chioggia. Analogo discorso per il vento, assegnando uniformemente per tutte le stazioni intensità e direzione rilevate a Chioggia.

Il coefficiente c_d di resistenza (o di drag), utilizzato nel calcolo dello sforzo di attrito sulla superficie per azione del vento, è stato oggetto di una accurata taratura che ha interessato più fasi¹³, portando come esito un valore $c_d = 0.08$.

¹³ R. Mel, *Tesi di Laurea*, 2009; C. Martignon, *Tesi di Laurea*, 2013

4 Risultati

Si analizzeranno di seguito i risultati ottenuti dall'algoritmo creato, al fine di validarne il funzionamento e osservare gli effetti indotti dalla modifica dei parametri utilizzati. In particolare i parametri oggetto di analisi sono:

- C_P : coefficiente moltiplicativo applicato al contributo di innalzamento del livello dovuto alle precipitazioni direttamente incidenti allo specchio lagunare e ai volumi scaricati in laguna dal bacino scolante, valutati pari a quelli precipitati;
- C_{inf} : coefficiente moltiplicativo applicato al contributo di innalzamento del livello per filtrazione attraverso le paratoie rispetto a quanto indicato in letteratura;
- $H_{allarmePS}$: livello di allarme a Punta della Salute;
- $H_{allarmeC}$: livello di allarme a Chioggia;
- $H_{limitePS}$: livello di tolleranza a Punta della Salute;
- $H_{limiteC}$: livello di tolleranza a Chioggia;
- $H_{limiteB}$: livello di tolleranza a Burano;
- Intervallo di tempo in cui è stata effettuata la media mobile sulla velocità del vento;

4.1 Simulazioni

Le osservazioni seguenti sono relative all'applicazione dell'algoritmo ad una particolare configurazione dei parametri definita "di base", così definita:

Parametro	Valore
C_p	1
C_{inf}	1
$H_{allarmePS}$	1.10 m
$H_{allarmeC}$	1.30 m
$H_{limitePS}$	1.00 m
$H_{limiteC}$	1.00 m
$H_{limiteB}$	1.10 m
Intervallo di tempo media mobile velocità vento	15 min

Tabella 4.1 - Parametri di base per l'analisi di sensibilità

Sarà successivamente dimostrato come una qualunque variazione dei parametri non alteri il corretto funzionamento dell'algoritmo e confermi il medesimo trend nelle analisi svolte.

I limiti di livello (di allarme e di tolleranza) in questo set sono quelli che ci pensa di scegliere, seppur non ancora definiti in maniera ufficiale, nella regolazione delle paratoie: per questo motivo sono stati assunti come riferimento.

Come obiettivo principale si è voluto calcolare l'incremento del numero di ore di chiusura delle bocche al variare dell'incremento del medio mare, da +0.00 m a +1.00 con passo di 1 cm.

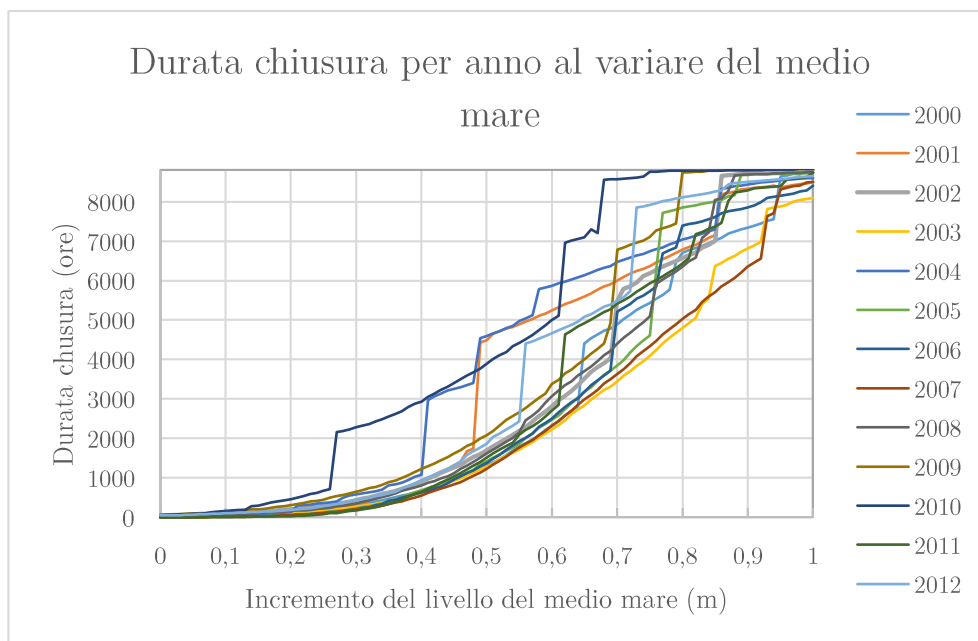


Figura 4.1 - Durata di chiusura per anno al variare del livello del medio mare

Nel grafico è riportato l'andamento della durata di chiusura, in funzione del livello del medio mare, relativo ad ogni singolo anno di misurazione. Si notano chiaramente dei bruschi "salti" con consistenti incrementi della durata di chiusura. Essi sono dovuti al fatto che un particolare evento abbia richiesto un notevole anticipo dell'istante di chiusura, raggiungendo nel tempo anche eventi precedenti che vanno quindi a "fondersi" con esso. Aumentando sempre più la durata dell'evento, risultano sempre più restrittive le richieste in termini di livello equivalente; in altre parole per garantire il rispetto dei limiti per tutto l'evento, è necessario un livello equivalente molto basso che ad esempio è raramente riscontrabile nella stagione invernale. Per questo motivo un singolo evento può presentare durate di chiusura di molti giorni.

Questo comportamento dimostra come, raggiunti determinati incrementi del livello del medio mare, il sistema MO.S.E. vada in totale crisi, restando attivo per durate annuali elevate. Risulta impensabile nella realtà dover ricorrere all'isolamento del bacino per tempi così lunghi ed è quindi necessaria una soluzione alternativa al problema.

Mediando i valori per tutti gli anni il risultato è il seguente:

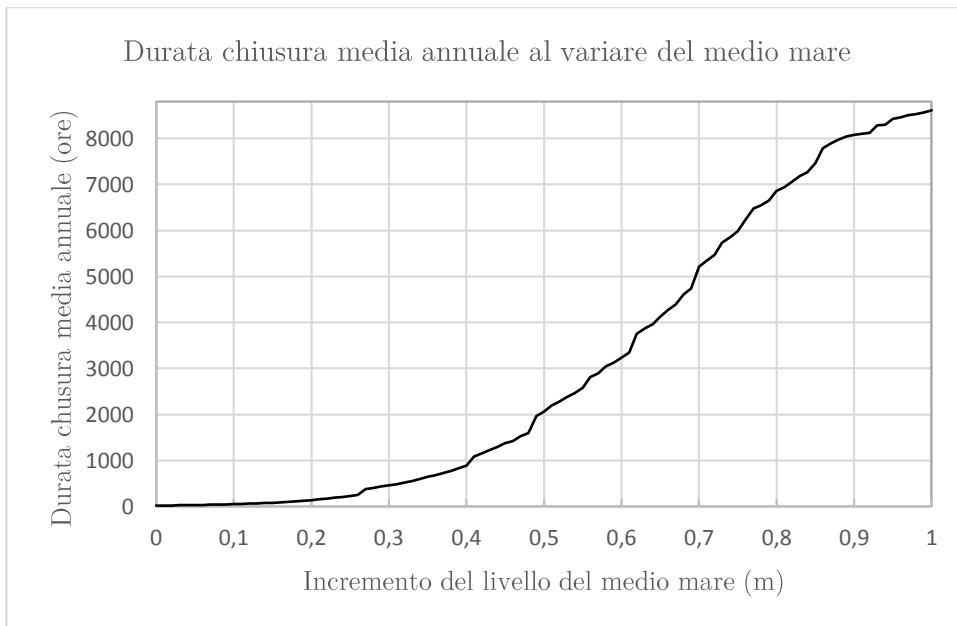


Figura 4.2 - Durata media annuale di chiusura al variare del livello del medio mare

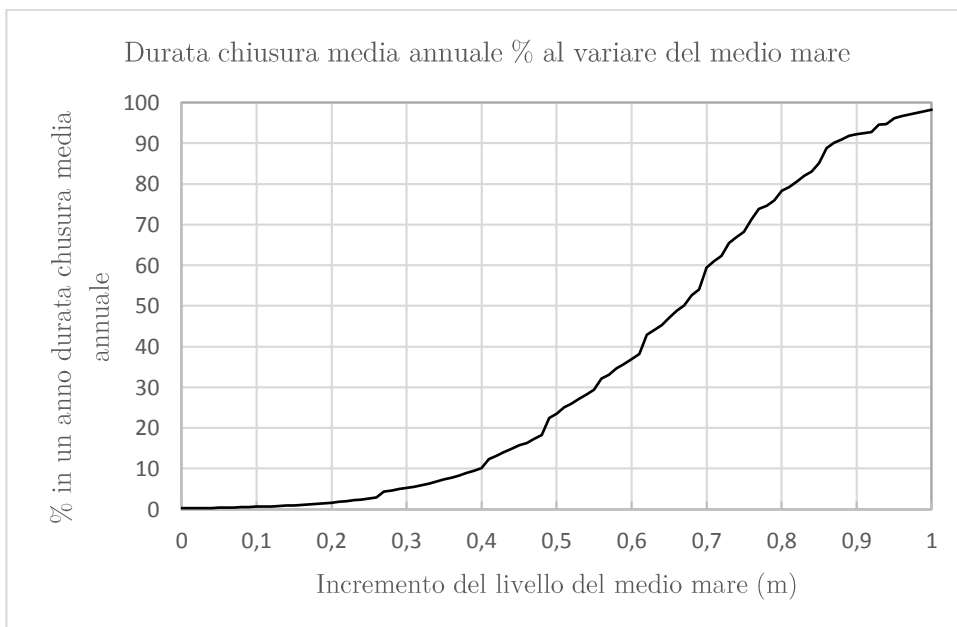


Figura 4.3 - Percentuale in un anno della durata media di chiusura annuale al variare del livello del medio mare

E' interessante sottolineare che ipotizzando un incremento del medio mare di 1.00 m, le bocche di porto rimarrebbero chiuse praticamente tutto l'anno.

Associando i dati precedenti alle tabelle di previsione dell'incremento del medio mare fornite dall'IPCC (capitolo 3.1) è possibile riportare le aspettative in termini di durate di chiusura annuali relative al prossimo secolo.

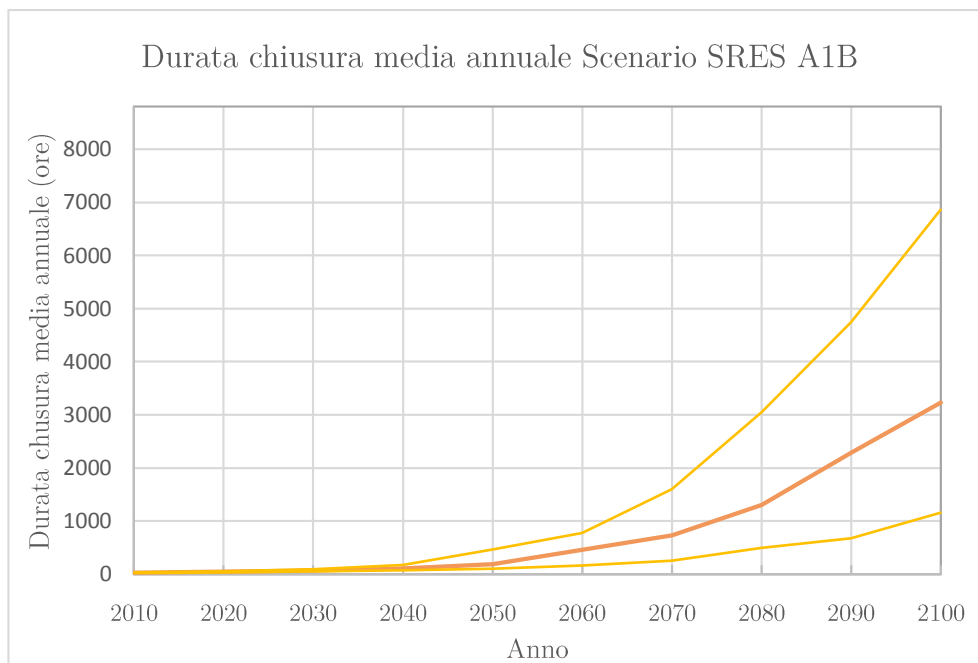


Figura 4.4 - Durata media annuale di chiusura prevista nello scenario SRES A1B dell'IPCC

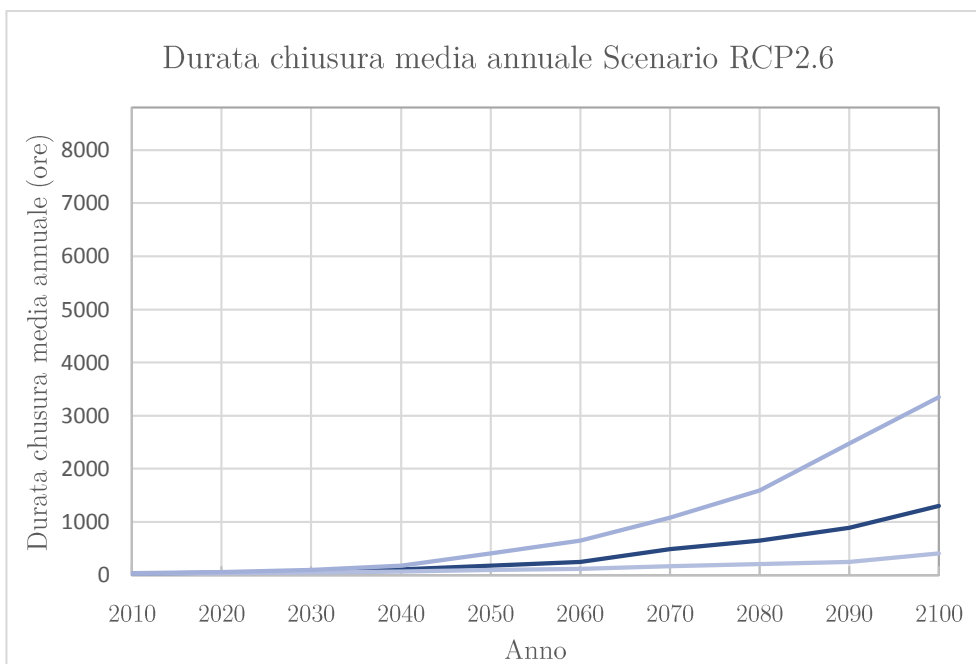


Figura 4.5 - Durata media annuale di chiusura prevista nello scenario RCP2.6 dell'IPCC

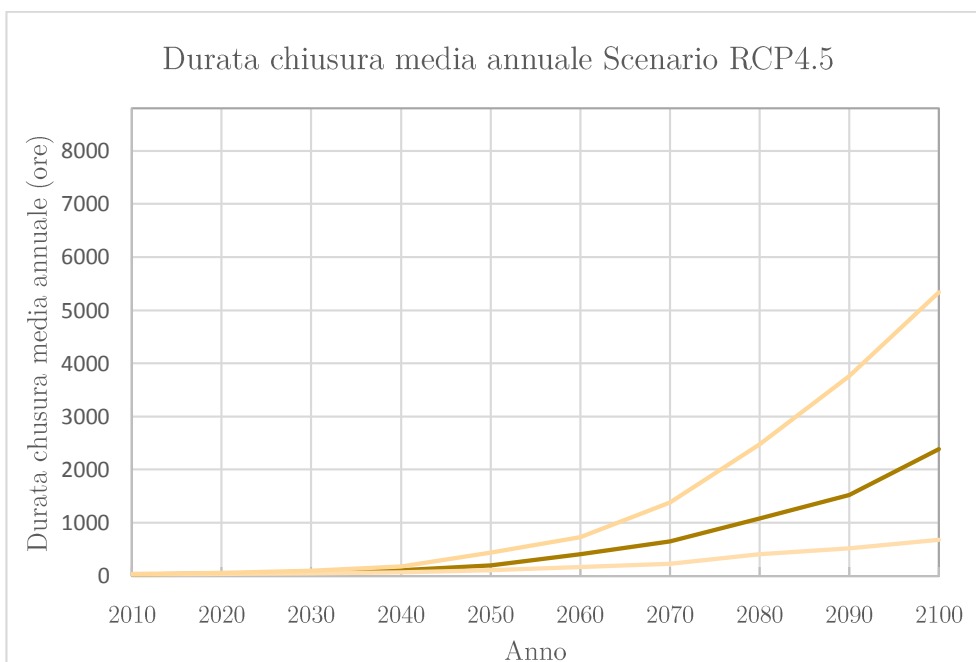


Figura 4.6 - Durata media annuale di chiusura prevista nello scenario RCP4.5 dell'IPCC

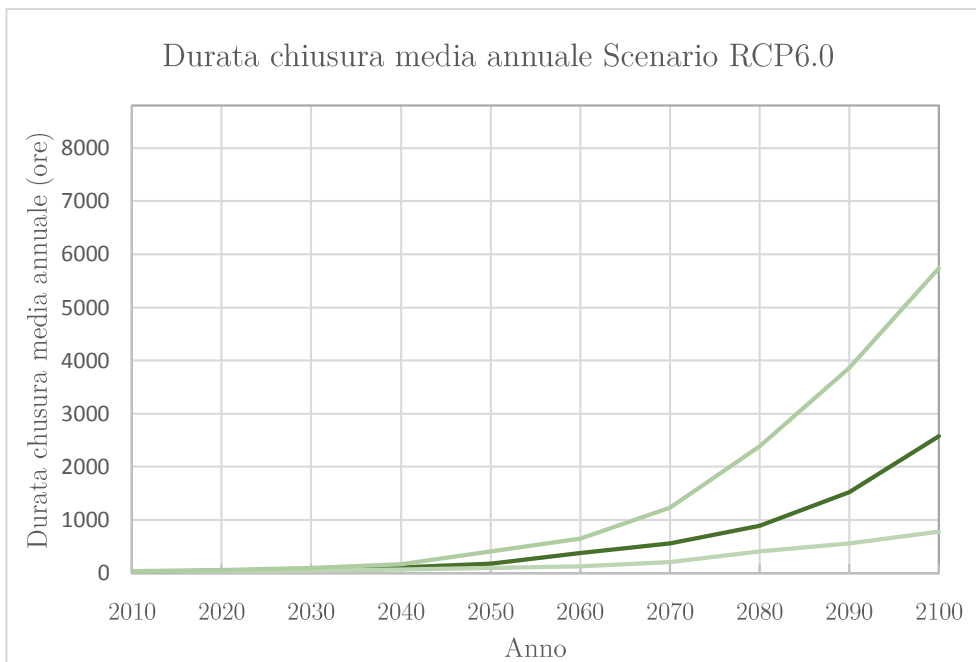


Figura 4.7 - Durata media annuale di chiusura prevista nello scenario RCP6.0 dell'IPCC

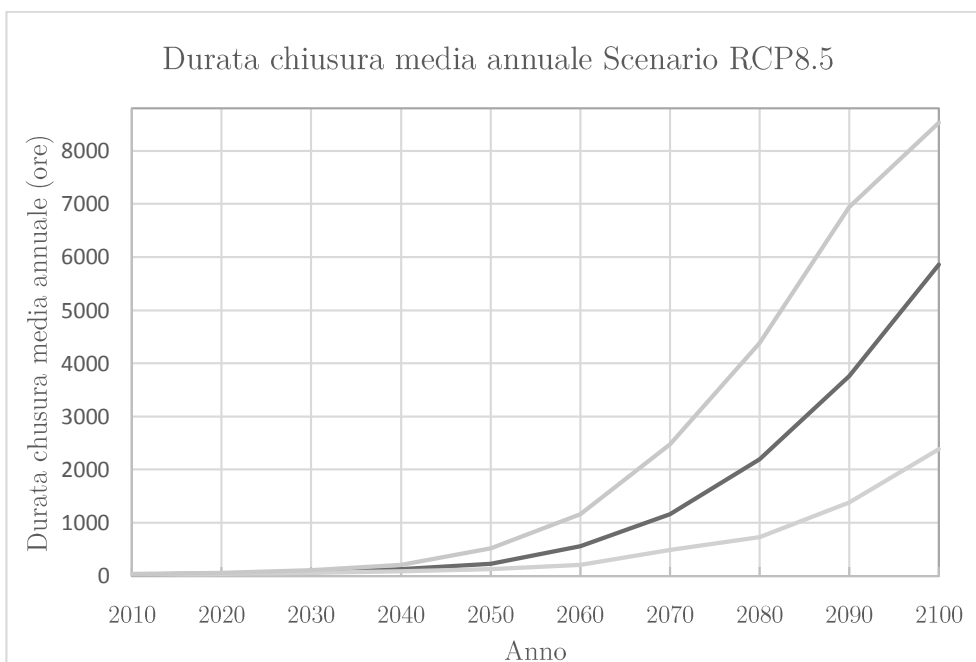


Figura 4.8 - Durata media annuale di chiusura prevista nello scenario RCP8.5 dell'IPCC

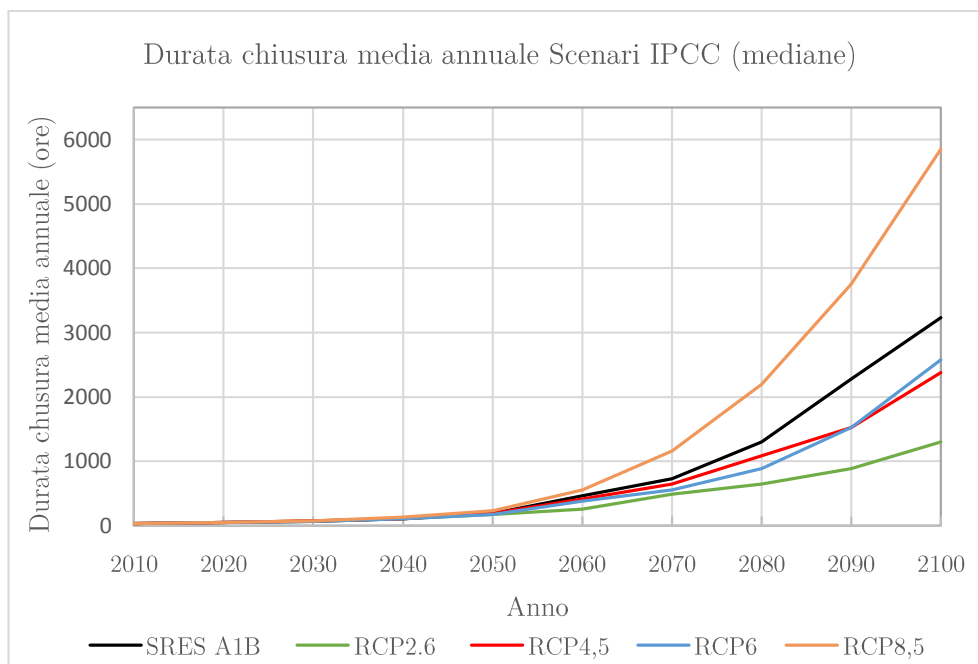


Figura 4.9 - Durata media annuale di chiusura prevista nello scenari dell'IPCC (valori mediani)

Se dovessero confermarsi le aspettative di innalzamento del medio mare proposte dall'IPCC, si prevede entro il 2050 un utilizzo ragionevole del sistema MO.S.E., raggiungendo una durata annuale complessiva che può variare da circa 190 a 230 ore (considerando la mediana degli incrementi del medio mare attesi). Avanzando negli anni, il maggior livello del mare impone chiusure ben più consistenti in termini di durata, interessando intere settimane, se non mesi.

È impensabile considerare un utilizzo così intenso del sistema, dato che esso comporterebbe sicuramente gravi ripercussioni all'economia legata alla laguna ed inoltre non indifferenti danni all'ecosistema lagunare, dovuti alla mancanza di ricircolo d'acqua conseguente all'isolamento dal mare.

I documenti ufficiali riportano una vita utile dell'apparato meccanico di almeno 100 anni. Per quando appena detto è però evidente come già fra 50 anni sia necessario pensare ad una soluzione alternativa per garantire la salvaguardia di Venezia.

Si riportano di seguito le caratteristiche di alcune grandezze di complemento al numero di ore di chiusura: il numero totale di chiusure, le precipitazioni, le filtrazioni attraverso le paratoie e i livelli medi durante le chiusure.

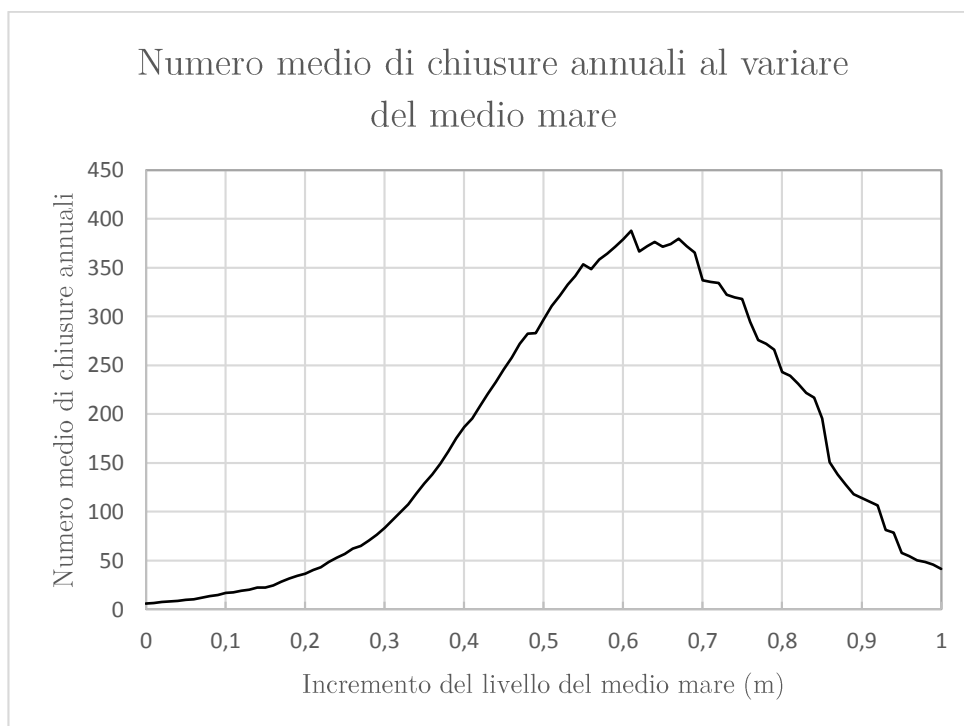


Figura 4.10 - Numero medio di chiusure annuali al variare del livello del medio mare

Per quanto riguarda il numero medio di chiusure annue, è possibile riscontrare un andamento inizialmente crescente, fino a raggiungere, in corrispondenza di un incremento del medio mare di circa 60 cm, un massimo. A seguire il numero di eventi cala tendendo a uno (la laguna è chiusa tutto l'anno).

Il motivo della riduzione del numero di chiusure è legato all'aumentare della durata delle chiusure stesse. Ciò che avviene è la "fusione" di più eventi consecutivi ravvicinati, con conseguente riduzione del numero delle singole chiusure.

È utile esaminare poi quanto sia l'incidenza delle precipitazioni direttamente incidenti in laguna (il volume proveniente dal bacino scolante è di pari entità) durante le chiusure in termini di pioggia media oraria.

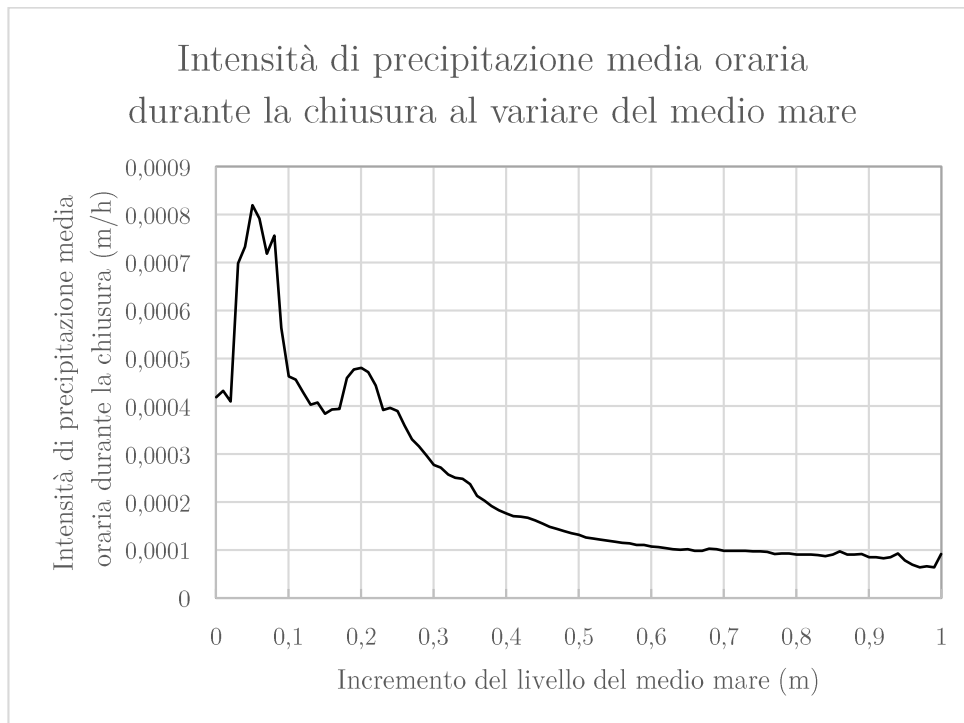


Figura 4.11 - Precipitazione media oraria durante le chiusure al variare del livello del medio mare

È chiaro come l'aumento della durata degli eventi implichi una sempre minore presenza di eventi piovose durante le chiusure. Per brevi chiusure è molto probabile che l'alta marea si presenti al manifestarsi di sfavorevoli condizioni meteorologiche, mentre all'aumentare della durata di chiusura gli eventi di pioggia occupino frazioni sempre più piccole del tempo di chiusura.

Si riporta ora il contributo delle filtrazioni tra le paratoie durante gli eventi di chiusura.

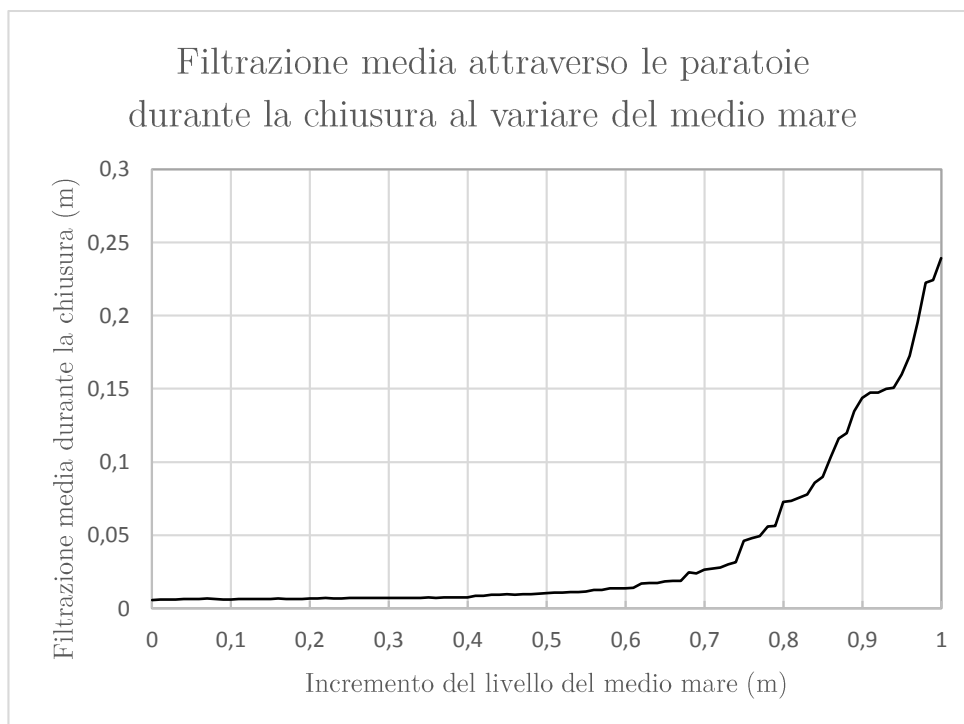


Figura 4.12 - Filtrazione media tra le paratoie durante la chiusura al variare del livello del medio mare

La risposta del modello riporta un incremento graduale del contributo dovuto alle filtrazioni tra le paratie all'aumentare del medio mare. In questo caso a maggiori durate di chiusura conseguono ovviamente maggiori apporti liquidi attraverso le paratoie che raggiungono quasi 25 cm per livello del medio mare a +1.00 metro.

Si esamina infine il comportamento dei livelli nelle diverse stazioni di controllo durante le chiusure.

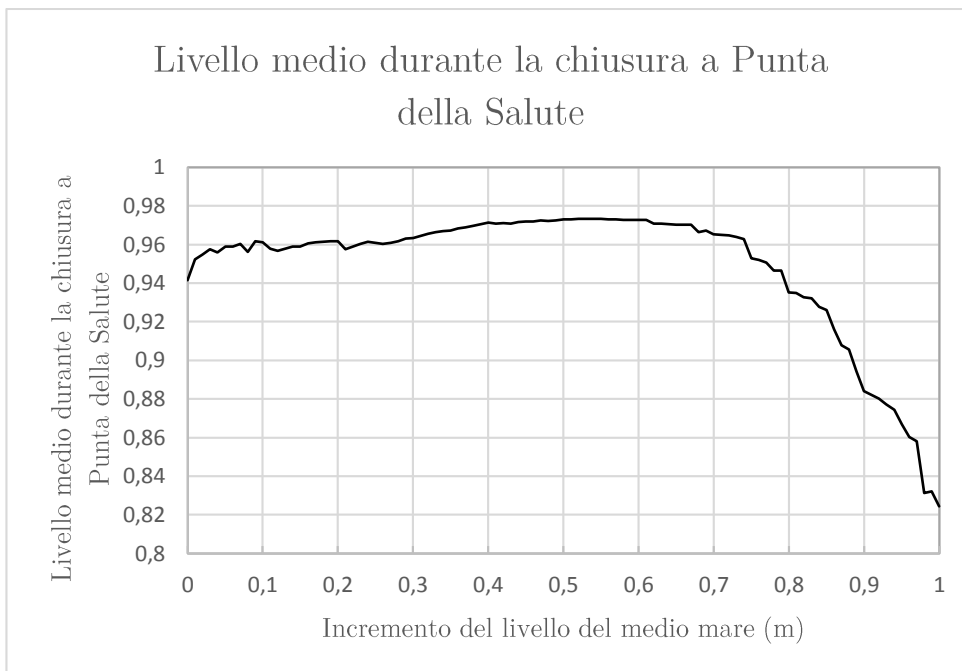


Figura 4.13 - Livello medio durante la chiusura a Punta della Salute al variare del livello del medio mare

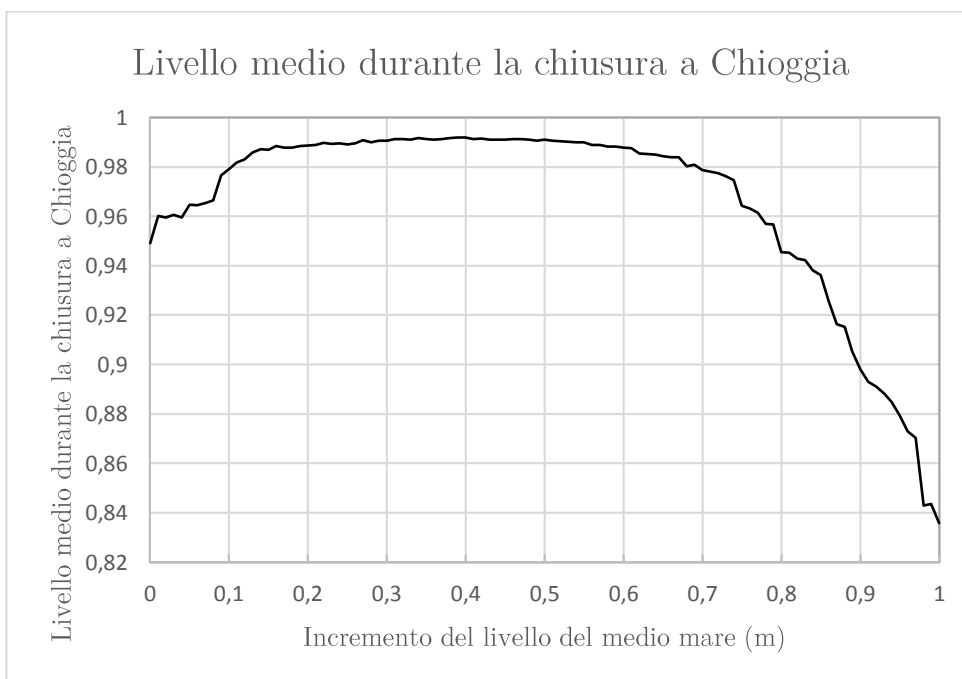


Figura 4.14 - Livello medio durante la chiusura a Chioggia al variare del livello del medio mare

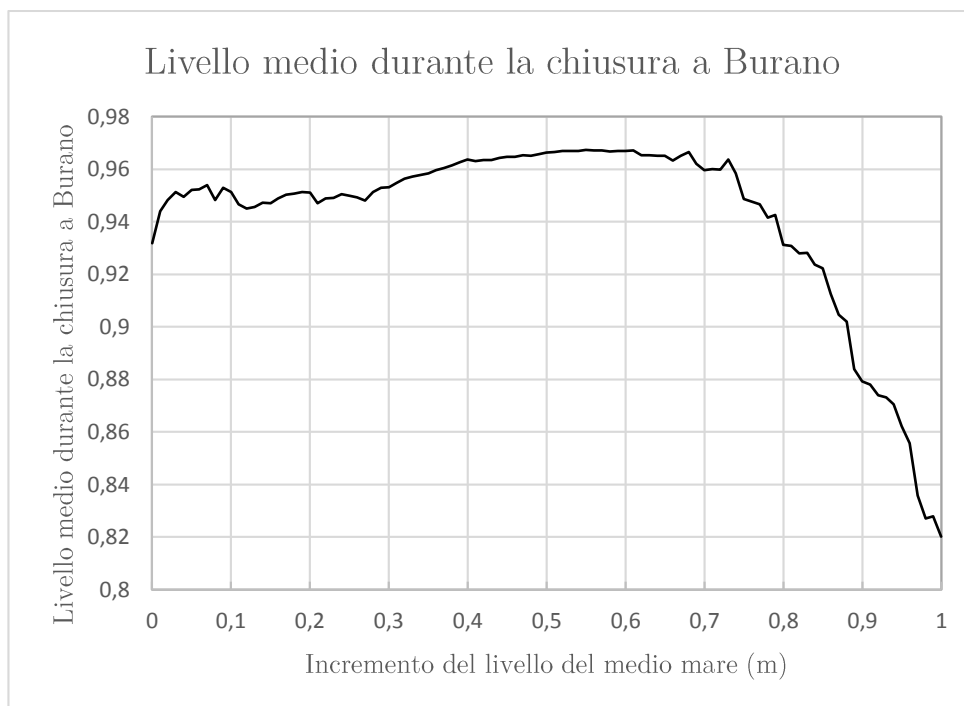


Figura 4.15 - Livello medio durante la chiusura a Burano al variare del livello del medio mare

In tutte le stazioni l'andamento è molto simile; per bassi incrementi del medio mare il livello medio si attesta a valori di pochi centimetri al di sotto delle soglie di tolleranza. Questo sta a significare che le chiusure sono di breve durata e tollerano livelli equivalenti relativamente alti. Il livello in laguna si mantiene così vicino alle soglie durante tutto l'evento. All'aumentare della durata della chiusura il livello medio si discosta invece dai limiti di tolleranza data la richiesta di bassi livelli equivalenti in grado di garantire il rispetto dei limiti stessi. Gli istanti in cui si raggiungono livelli prossimi alle soglie risultano quindi una frazione irrisoria del tempo totale di chiusura.

A conferma del corretto funzionamento dell'algoritmo, si riportano i livelli massimi riscontrati nelle stazioni di controllo durante le chiusure. Si può vedere chiaramente come risultino praticamente coincidenti con i limiti di tolleranza fissati (1.00 m a Punta della Salute e Burano e 1.20 m a Chioggia).

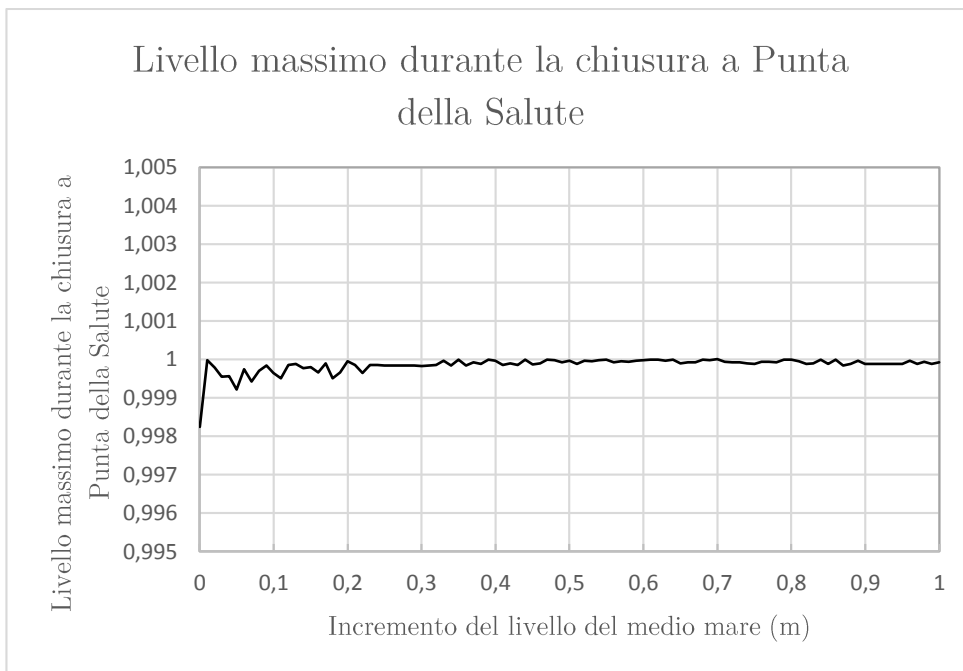


Figura 4.16 - Livello massimo durante la chiusura a Punta della Salute al variare del livello del medio mare

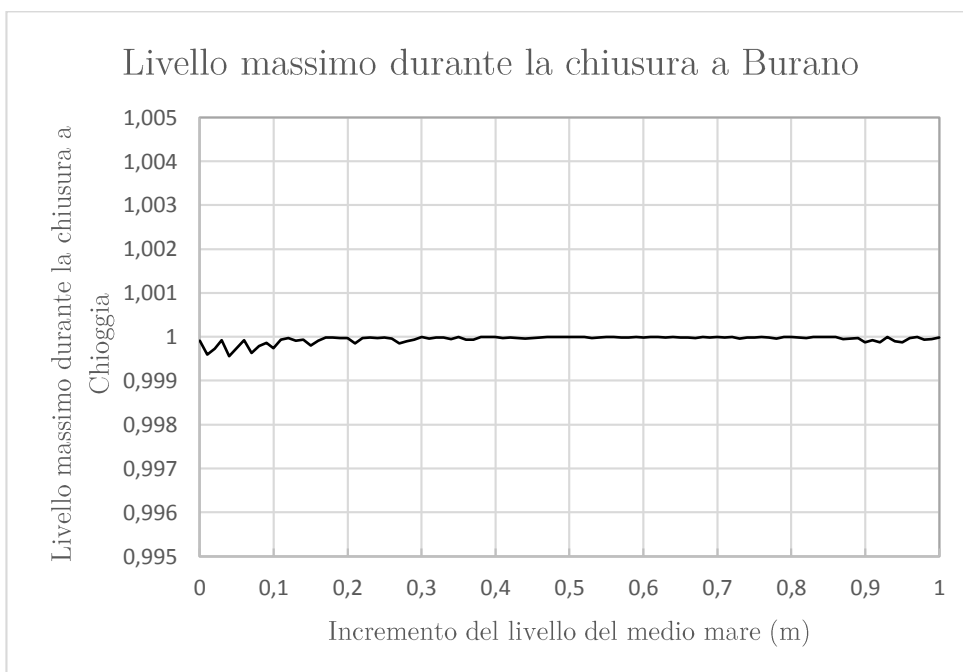


Figura 4.17 - Livello massimo durante la chiusura a Chioggia al variare del livello del medio mare

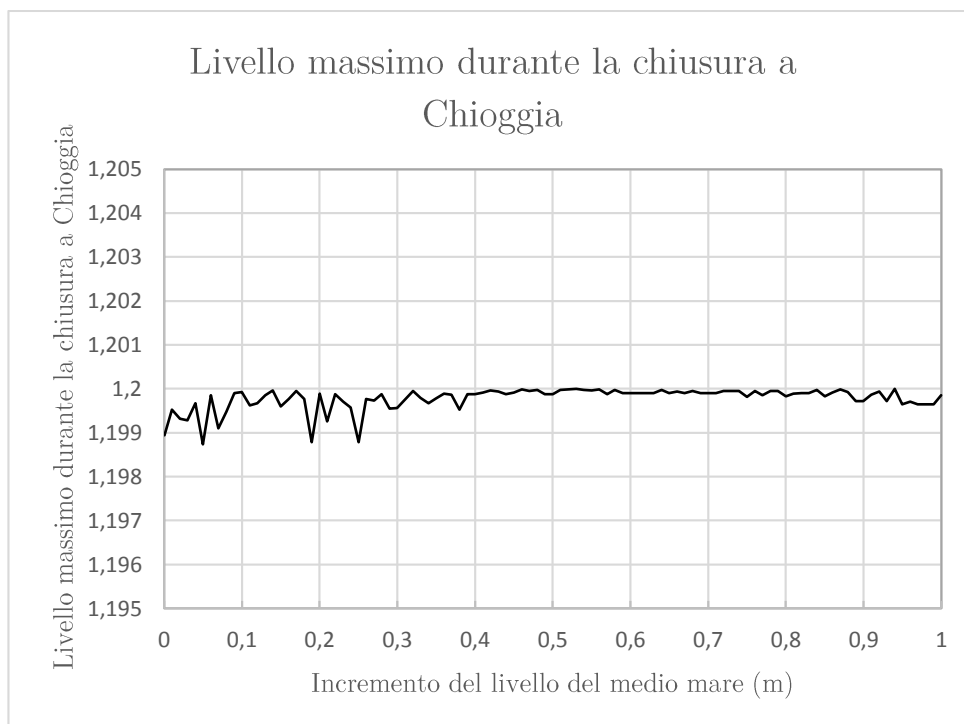


Figura 4.18 - Livello massimo durante la chiusura a Burano al variare del livello del medio mare

Un'ulteriore analisi è stata effettuata utilizzando, per il calcolo dei livelli, i sovralzati dovuti al vento in condizioni di bocche aperte, per valutare le differenze riscontrabili nelle due configurazioni.

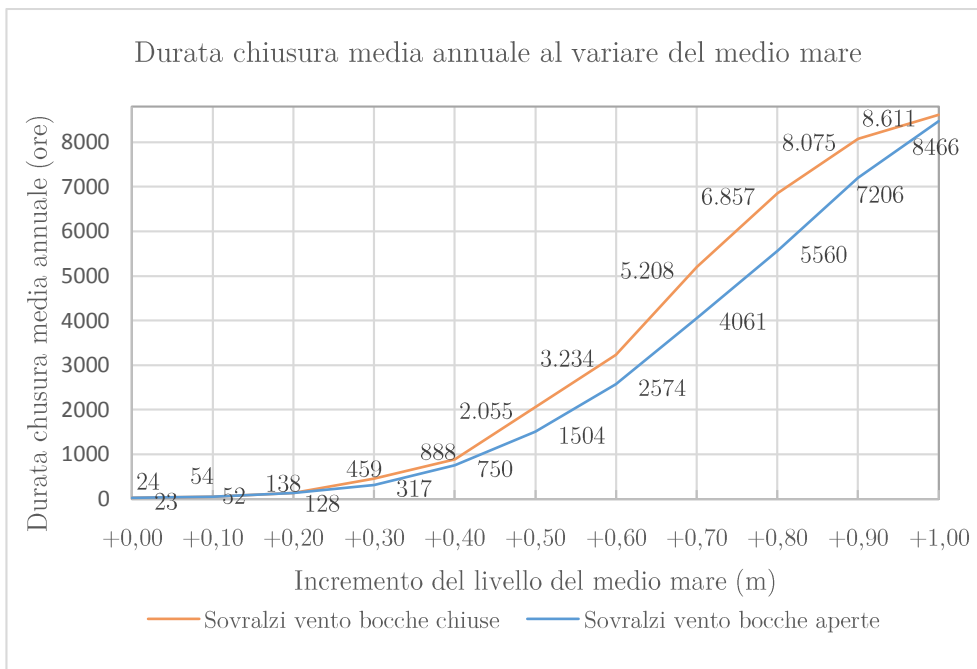


Figura 4.19 - Durata media annuale di chiusura al variare del medio mare con sovralti da vento calcolati a bocche chiuse ed aperte

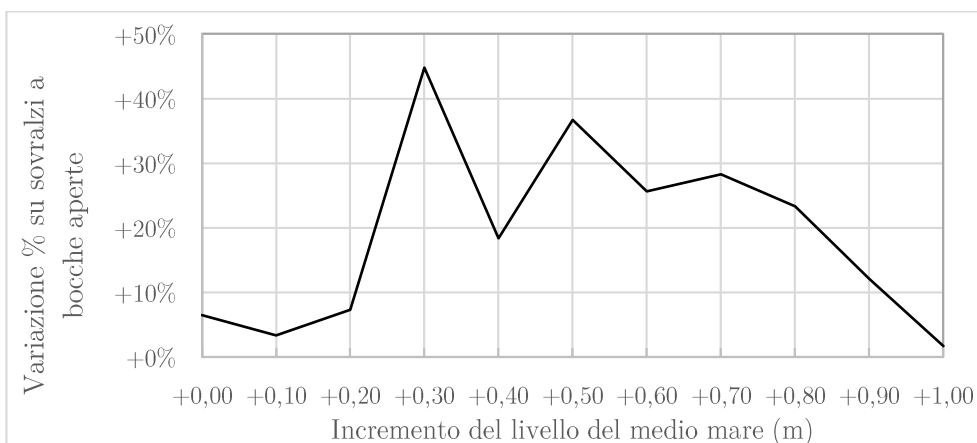


Figura 4.20 - Variazione della durata media annuale di chiusura al variare del medio mare con sovralti da vento calcolati a bocche chiuse rispetto ai sovralti calcolati a bocche aperte

È evidente come sia un grave errore considerare i sovralti da vento in condizioni di bocche aperte anziché chiuse. Nella fascia di operatività che più probabilmente si verrà a manifestare entro i prossimi 50 anni e che risulta essere determinante nel calcolo della vita utile, (20-30 cm di incremento del medio mare)

si sottostimerebbe la risposta del 30-40%. Infatti mentre l'incremento stimato nella condizione attuale non pregiudica la funzionalità del sistema MOSE (si tratta infatti di una percentuale su qualche decina di ore), l'aumento del numero di ore di chiusura di circa un terzo in corrispondenza di incrementi di 30 – 50 cm del livello medio del mare accorcia di una decina d'anni la stima della vita utile dell'opera.

4.2 Analisi di sensibilità dei parametri

Come precedentemente detto, è stata eseguita un'analisi di sensibilità sull'effetto dei principali parametri in gioco, al fine di rendere generali i risultati. I parametri scelti sono:

- C_p : coefficiente moltiplicativo applicato al contributo di innalzamento del livello dovuto alle precipitazioni direttamente incidenti allo specchio lagunare e ai volumi scaricati in laguna dal bacino scolante;
- C_{inf} : coefficiente moltiplicativo applicato al contributo di innalzamento del livello per filtrazione attraverso le paratoie;
- $H_{allarmePS}$: livello di allarme a Punta della Salute;
- $H_{allarmeC}$: livello di allarme a Chioggia;
- $H_{limitePS}$: livello di tolleranza a Punta della Salute;
- $H_{limiteC}$: livello di tolleranza a Chioggia;
- $H_{limiteB}$: livello di tolleranza a Burano;
- Intervallo di tempo in cui è stata effettuata la media mobile sulla velocità del vento;

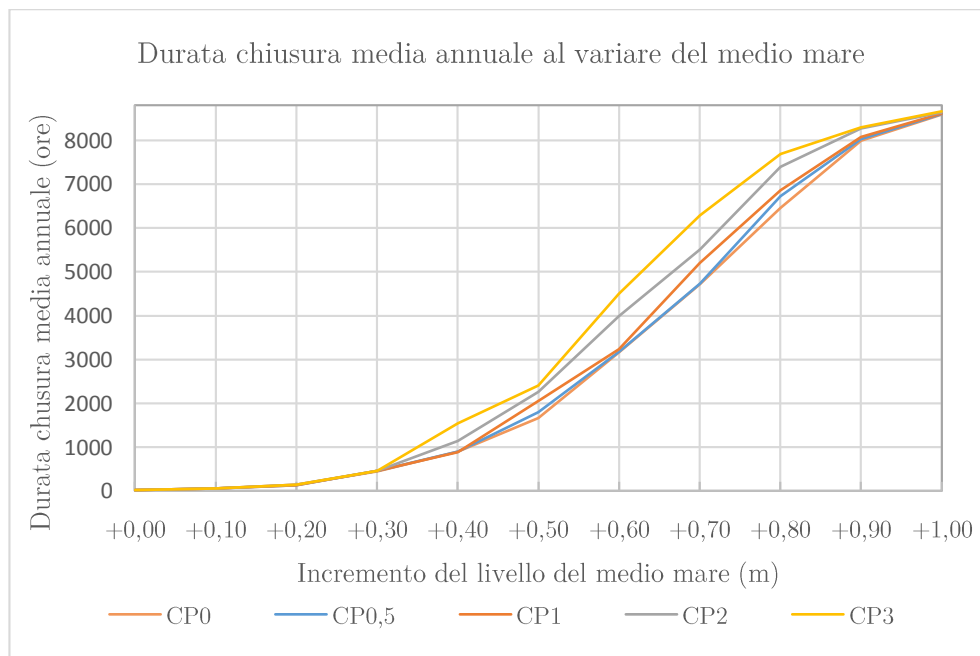
Ogni parametro è stato variato in uno specifico range mantenendo fissi le restanti variabili in una configurazione definita “di base”, come definita nel capitolo precedente.

Ogni configurazione dei parametri ha inoltre visto variare l'incremento del medio mare sui dati di livello in modo da poter apprezzare gli eventuali differenti effetti.

Si riporta quindi il prodotto delle varie analisi di sensibilità effettuate, seguito da un breve commento esplicativo.

COEFFICIENTE PRECIPITAZIONI

L'analisi seguente ha interessato il coefficiente moltiplicativo C_p relativo all'incremento di livello dovuto al contributo congiunto delle precipitazioni in laguna e dei volumi provenienti dal bacino scolante. C_p ha assunto i valori di 0, 0.5, 1, 2, 3.



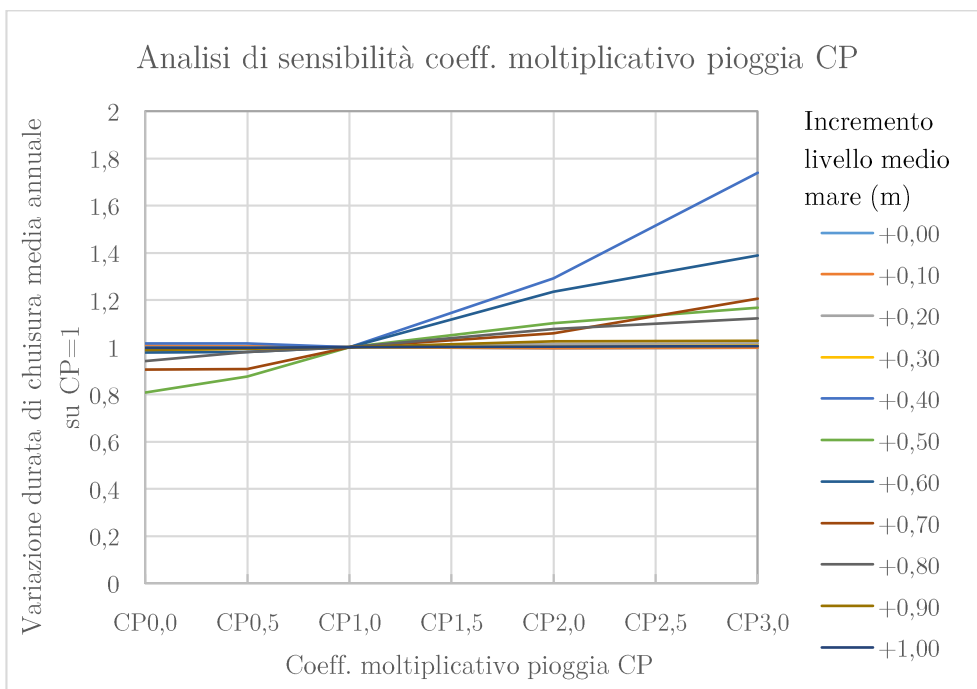
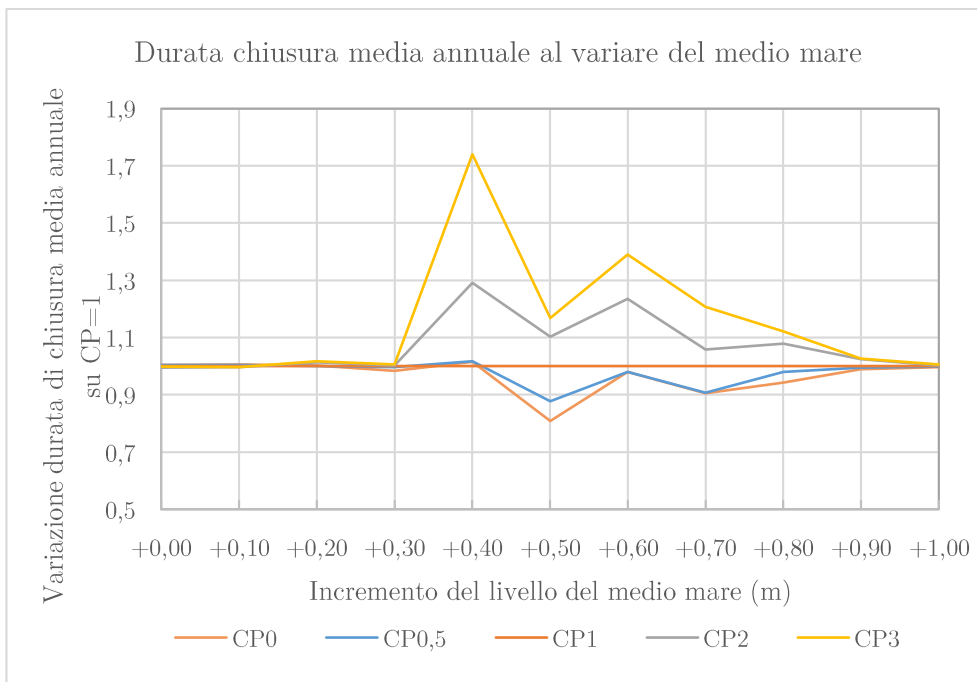


Figura 4.21 - Analisi di sensibilità del coefficiente moltiplicativo sulle precipitazioni C_p

È possibile notare ovviamente come un incremento del coefficiente moltiplicativo comporti un proporzionale incremento delle ore di chiusura annuali. È però riscontrabile chiaramente come tale incremento risulti di diversa entità a seconda dell'incremento di livello del medio mare. Per incrementi inferiori a 30 cm la variazione sulla durata delle chiusure è pressoché trascurabile. Questo sta ad indicare come, in questa situazione, la durata della chiusura sia governata da altre forzanti, mentre il contributo dovuto alle precipitazioni rivesta un ruolo ininfluente.

A partire da un incremento del medio mare di 40 cm coefficienti pari a 2 o 3 riportano un discostamento dalle condizioni di base ($C_P=1$) che raggiunge anche il 70 % in più. Incrementando ulteriormente il livello del medio mare la dipendenza dal contributo di pioggia sulla durata delle chiusure va a scemare progressivamente.

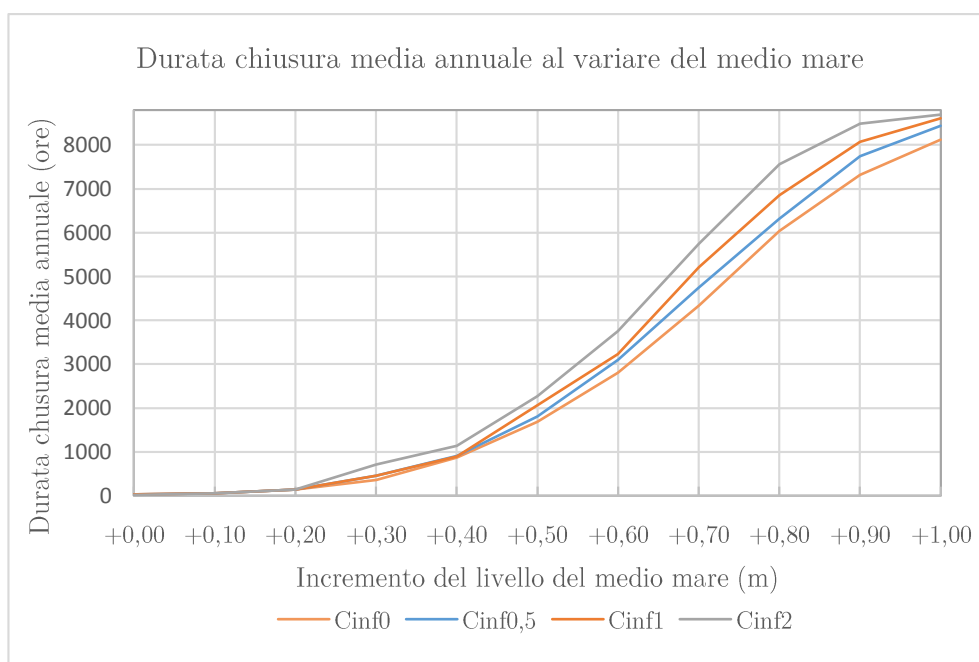
Sicuramente è consigliabile fissare tale parametro a valori non inferiori a 1, tenendo comunque conto che l'ipotesi di uniforme distribuzione delle precipitazioni garantisce un sufficiente grado di sicurezza. Il bacino lagunare si estende infatti in un'ampia superficie, in cui è probabile osservare una certa variabilità spaziale delle piogge, conseguente al movimento di varie celle di precipitazione. Per affinare il modello potrebbe essere conveniente utilizzare uno strumento di interpolazione geostatistica (come ad esempio il Kriging) che consenta di stimare in maniera più precisa la distribuzione spazio-temporale delle piogge a partire da almeno un paio di stazioni di misura distribuite all'interno del bacino.

Per quanto riguarda il contributo volumetrico del bacino scolante, l'approssimazione effettuata consente in egual modo un sufficiente grado di sicurezza. Eventuali più accurate indagini idrologiche consentirebbero un maggior dettaglio del problema migliorando ulteriormente il modello.

È tuttavia da sottolineare come tali contributi siano trascurabili nel problema in esame.

COEFFICIENTE FILTRAZIONI ATTRAVERSO LE PARATOIE

Si esamina ora la sensibilità dell'apporto fornito dalle filtrazioni tra le paratoie al formarsi del livello in laguna. Sono considerati i coefficienti moltiplicativi 0, 0.5, 1 e 2 rispetto a quanto indicato in letteratura.



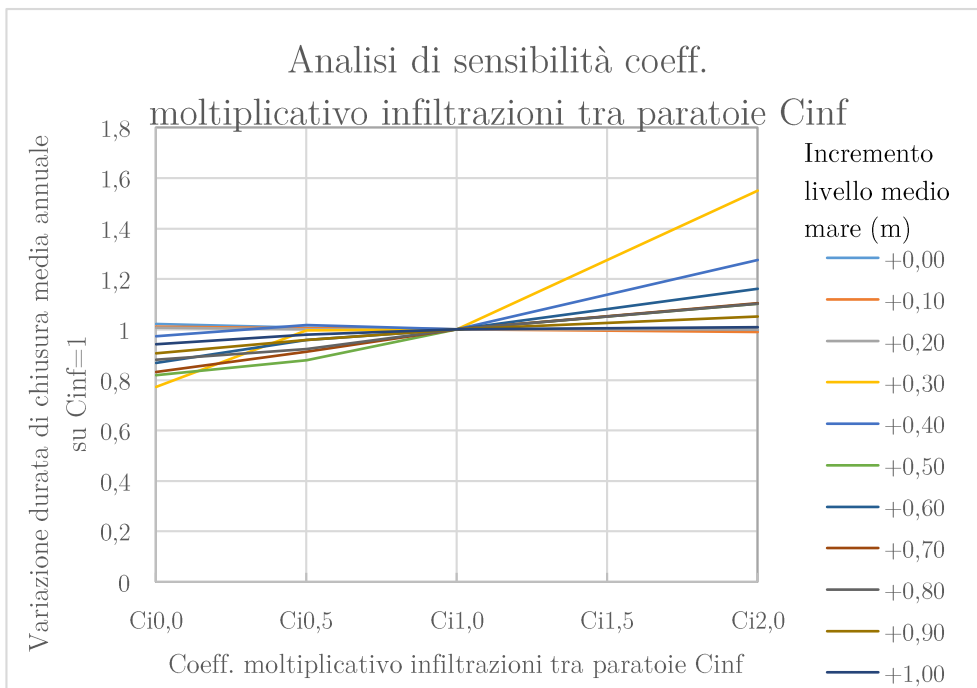
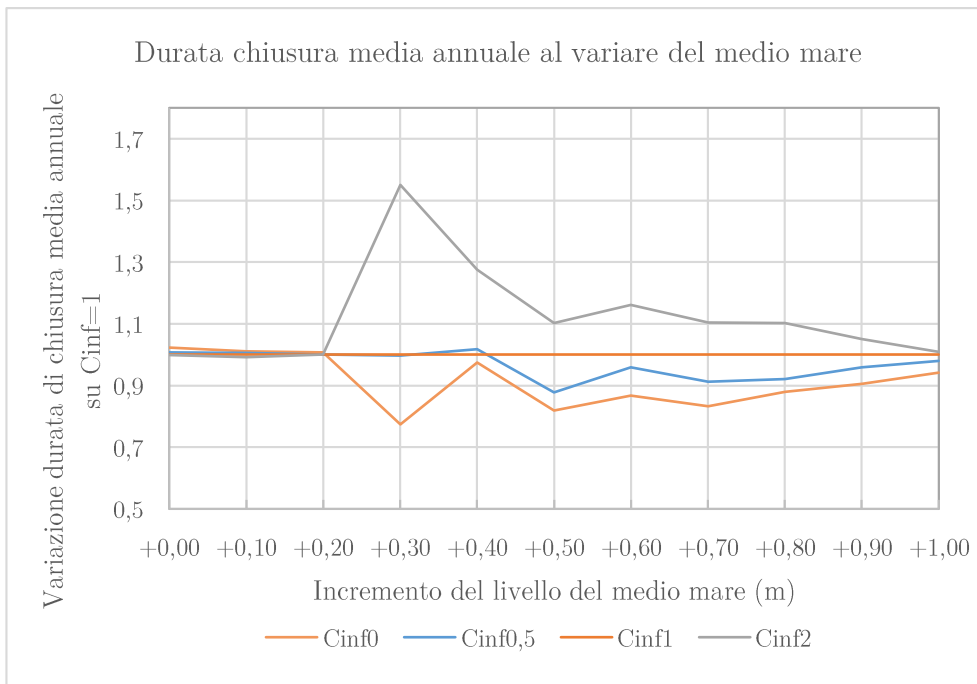


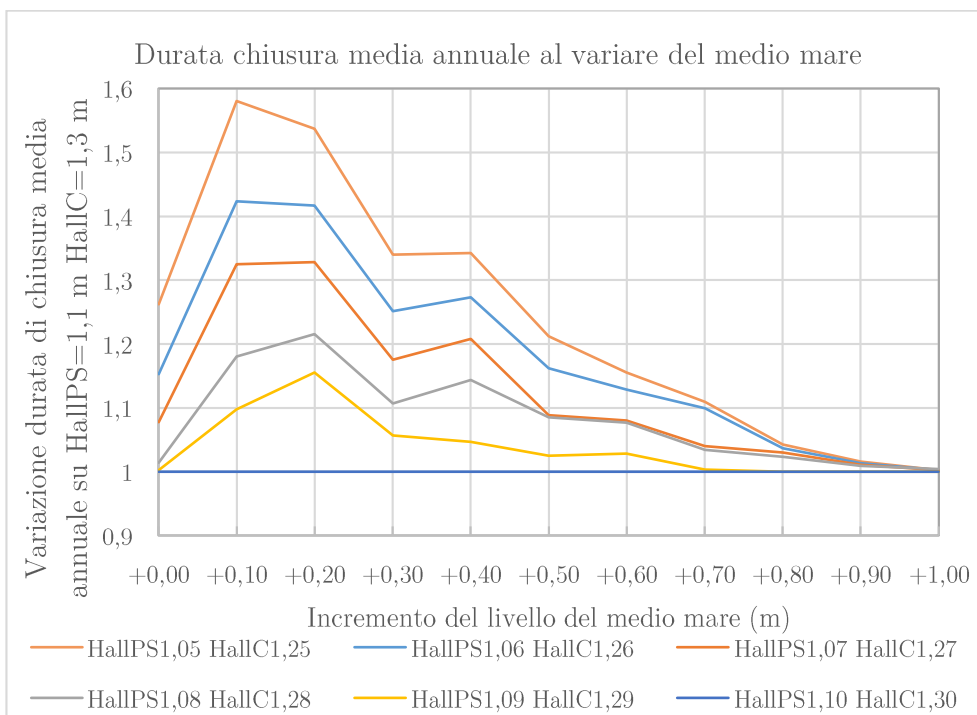
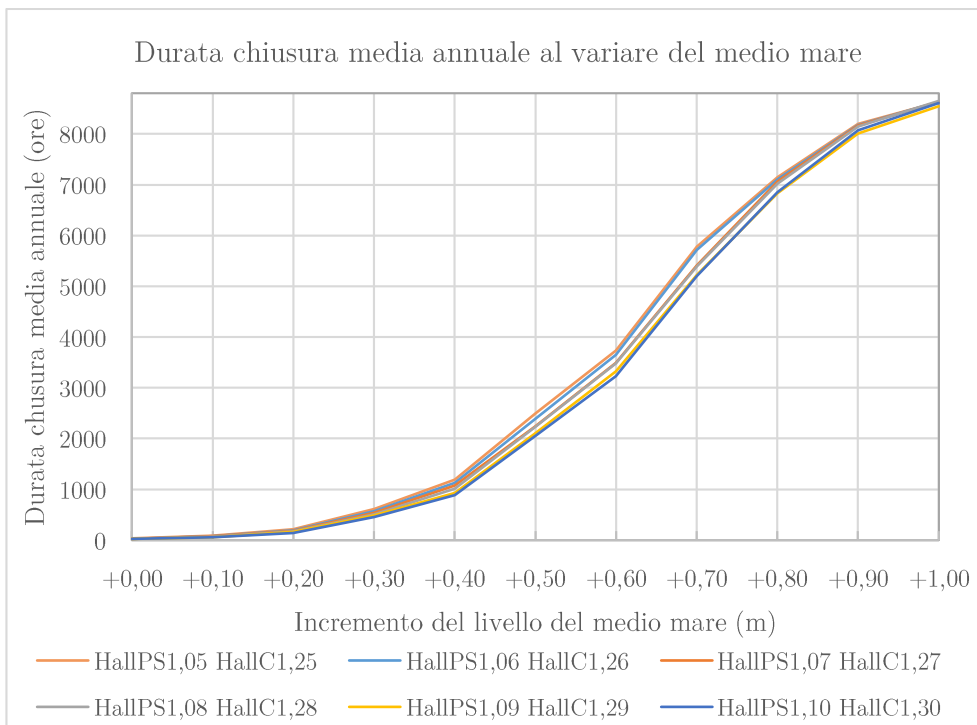
Figura 4.22 - Analisi di sensibilità del coefficiente moltiplicativo sulle filtrazioni tra paratoie C_{INF}

Analogamente a quanto visto per il coefficiente moltiplicativo delle precipitazioni, i contributi delle filtrazioni tra le paratoie, al variare del relativo coefficiente moltiplicativo, pongono una differenza poco significativa per incrementi del medio mare inferiori ai 30 cm. Da questo valore, a parità di tutti gli altri parametri, il differente contributo delle filtrazioni comporta una proporzionale variabilità della risposta in termini di durata annuale di chiusura, sempre meno pronunciata avvicinandosi ad alti incrementi del medio mare.

La selezione del coefficiente moltiplicativo al contributo delle filtrazione tra le paratoie deve essere proporzionata al grado di sicurezza di cui si vuole disporre. Sicuramente potrebbe essere utile un'indagine più approfondita che permetta di comprendere meglio il comportamento dei flussi d'acqua attraverso le paratoie durante il loro sollevamento, in particolare quando il singolo evento raggiunga durate importanti. In questi casi, in cui l'estensione dell'evento interesserebbe successive fasi mareali di flusso e riflusso, potrebbe verificarsi un'inversione della direzione del flusso d'acqua tra le paratoie, conseguentemente ad un opposto dislivello tra mare e laguna.

LIVELLI DI ALLARME A PUNTA DELLA SALUTE E CHIOGGIA

In questa analisi sono stati fatti variare i livelli di allarme contemporaneamente a Punta della Salute e a Chioggia, considerandone in quest'ultima stazione un valore di 20 cm superiore a quanto imposto a Punta della Salute. Il range di osservazione si estende da $H_{allPS}=1.05$ m ($H_{allC}=1.25$ m) a $H_{allPS}=1.10$ m ($H_{allC}=1.30$ m), con passo 1 cm.



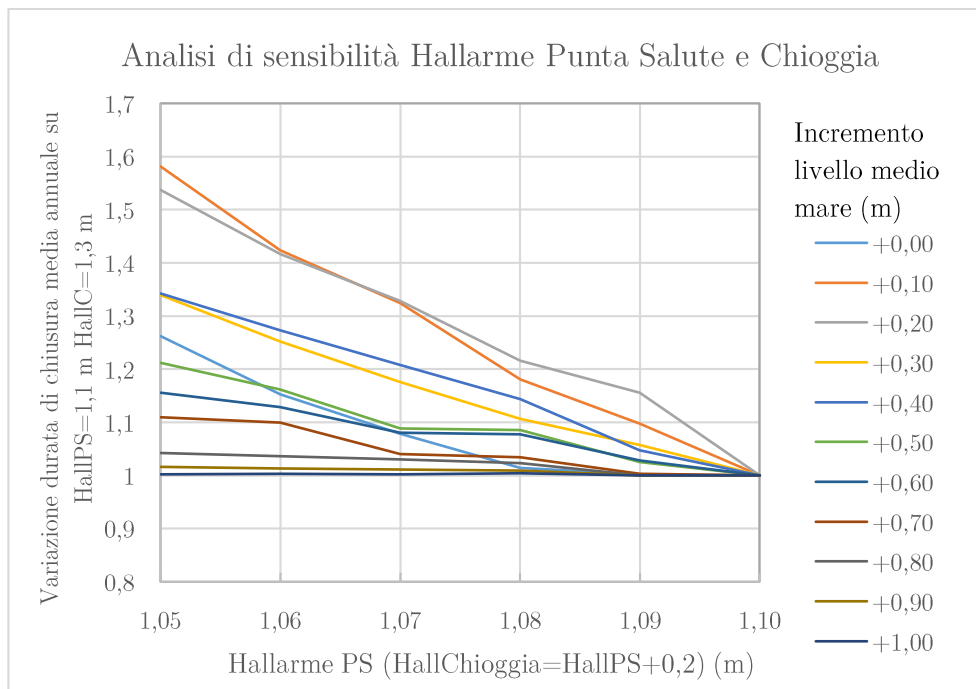


Figura 4.23 - Analisi di sensibilità sui livelli di allarme

Come ci si poteva aspettare, diminuendo le quote di allarme, un numero maggiore di eventi “critici” andrà ad interessare la movimentazione delle paratoie e la conseguente chiusura delle bocche. Tale incremento assume carattere quasi lineare fino a giungere per $H_{allPS}=1.05$ m durate annuali maggiori del 55 % rispetto al caso di base $H_{allPS}=1.10$ m.

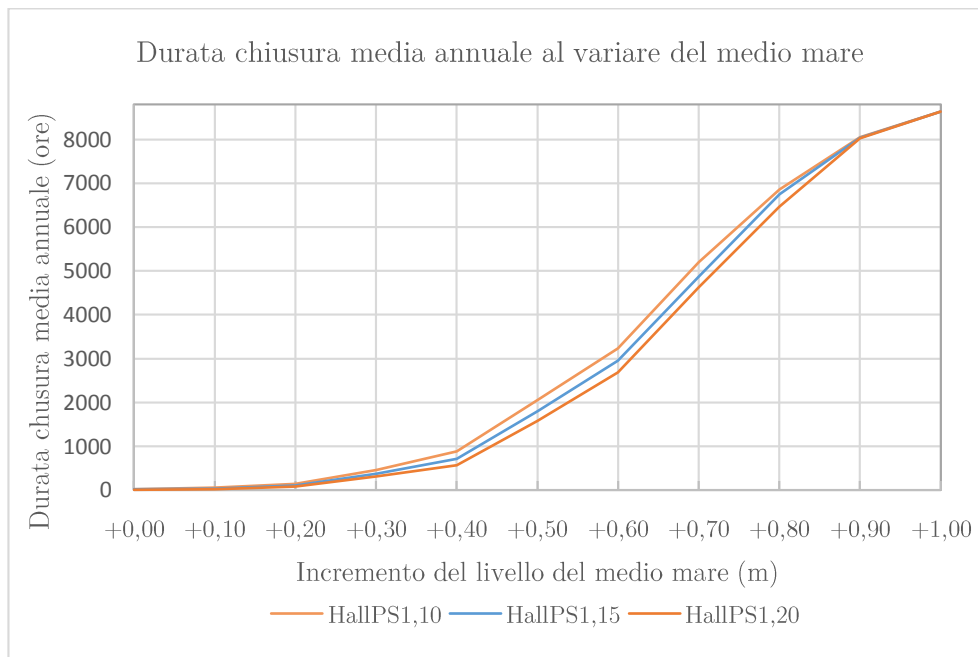
È interessante però osservare come la differenza vada a ridursi sempre più aumentando il livello del medio mare; il numero di eventi i cui livelli la tolleranza ($H_{limPS}=1.0$ m e $H_{limC}=1.2$ m) ma che rimangono al di sotto delle quote di allarme diventa sempre più irrisorio e di conseguenza la differenza riscontrabile al variare dei livelli di allarme è sempre più contenuta.

La scelta del valore da attribuire alla soglia di allarme alle due stazioni di Punta Salute e Chioggia sarà il risultato di un compromesso tra la convenienza di una minore durata annuale di chiusura e un più elevato livello ammesso, con

possibili brevi e ristretti allagamenti, ma continuati, nelle zone più depresse della città di Venezia.

LIVELLO DI ALLARME A PUNTA DELLA SALUTE

In questo caso si è mantenuto costante il livello di allarme a Chioggia (HallC=1.30 m) variando la quota di allarme a Punta Salute da 1.10 m a 1.20 m con passo 5 cm.



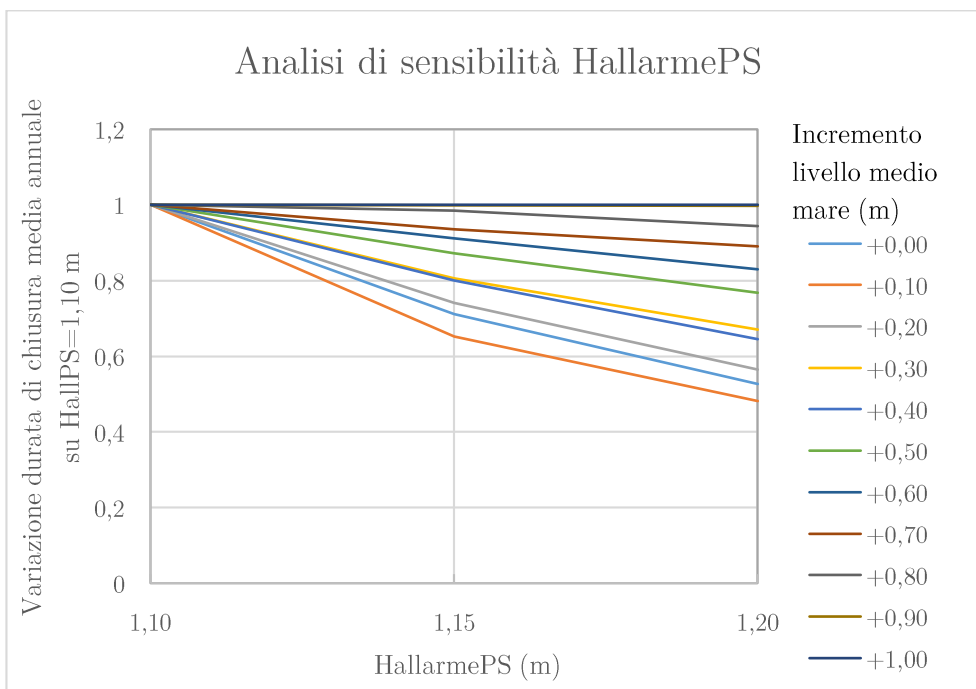
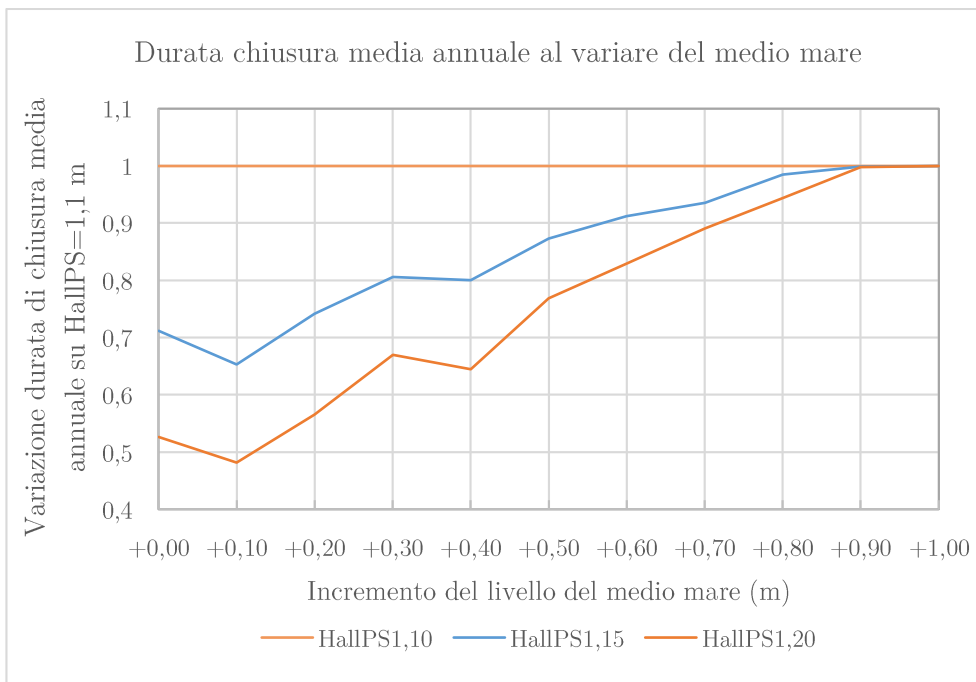


Figura 4.24 - Analisi di sensibilità sul livello di allarme a Punta della Salute

Questa analisi ha portato i livelli di allarme a valori superiori alla configurazione di base e di conseguenza, come prevedibile, si è riscontrato una riduzione della durata di chiusura annuale, tanto più accentuata quanto più alto è fissato il livello di allarme a Chioggia.

È giusto precisare che tutti gli eventi governati da alte maree a Chioggia (es. in presenza di forte bora) non hanno subito alcuna modificazione in termini di durata vista l'invarianza del livello di allarme a Chioggia.

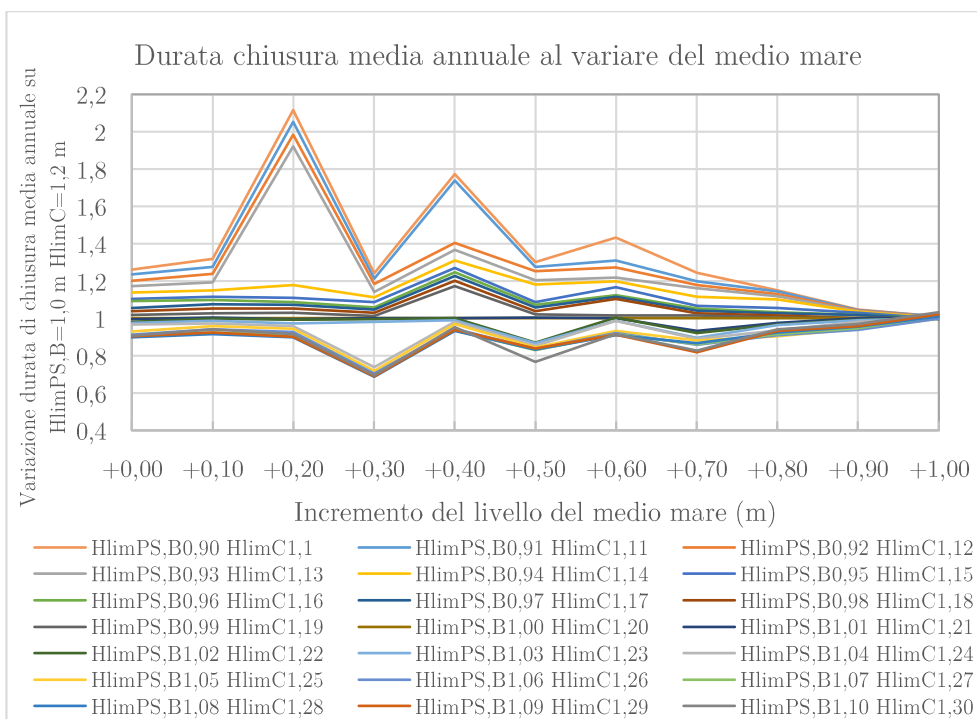
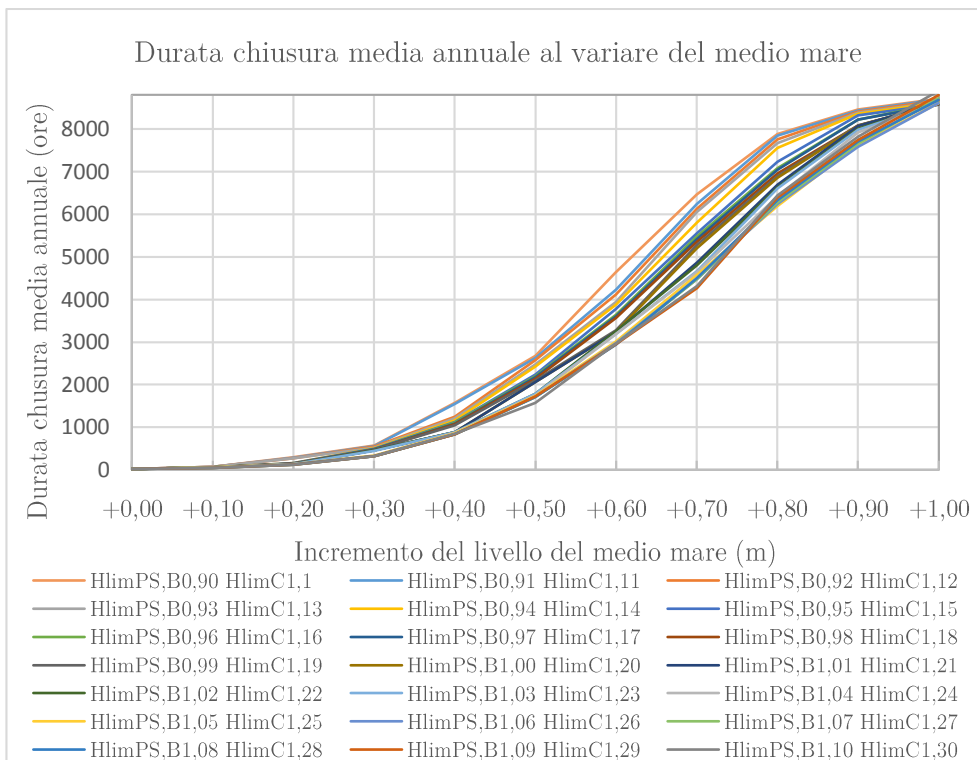
Anche in questo caso incrementando il medio mare le differenze tra le diverse quote di allarme vanno gradualmente a scemare, calando l'incidenza di tale parametro nell'individuazione degli eventi critici.

Come detto nella precedente indagine, un criterio per la determinazione del giusto livello di allarme è quello di cercare di garantire simultaneamente una ridotta durata di chiusura della laguna e la tutela di Venezia contro estesi allagamenti.

LIVELLO DI TOLLERANZA A PUNTA DELLA SALUTE, BURANO E CHIOGGIA

In questa ulteriore analisi di sensibilità, si è voluto osservare come influisca il livello di tolleranza fissato nelle tre stazioni di controllo. Tale limite è il medesimo a Punta della Salute e Burano, mentre a Chioggia è 20 cm più elevato.

Il range di osservazione spazia da 0.90 m a 1.10 m per Punta della Salute e Burano e da 1.10 m a 1.30 m per Chioggia, con passo 1 cm.



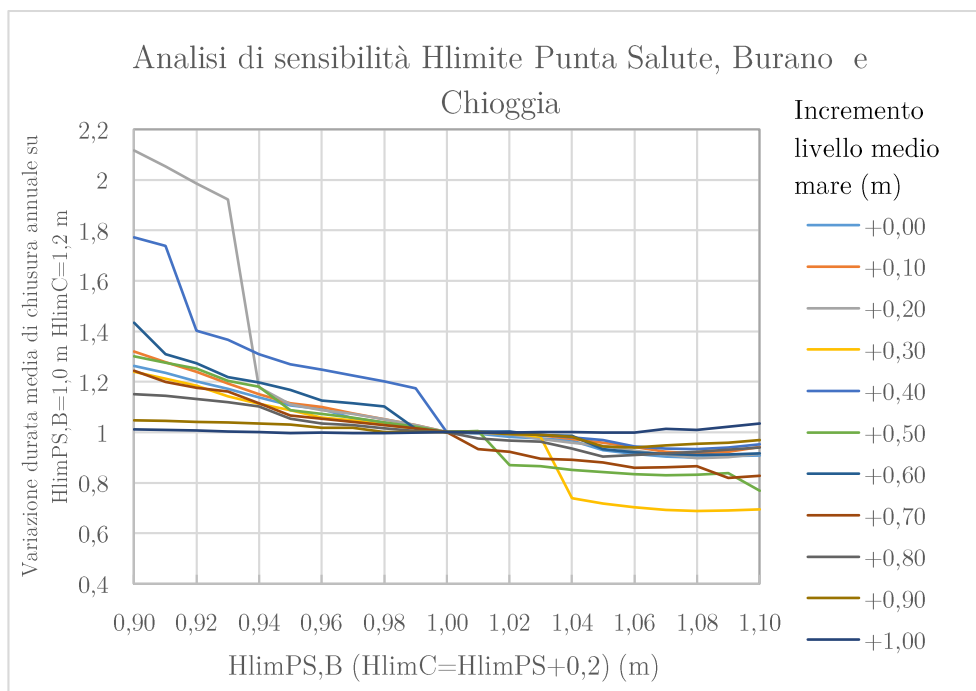


Figura 4.25 - Analisi di sensibilità sui livelli di tolleranza

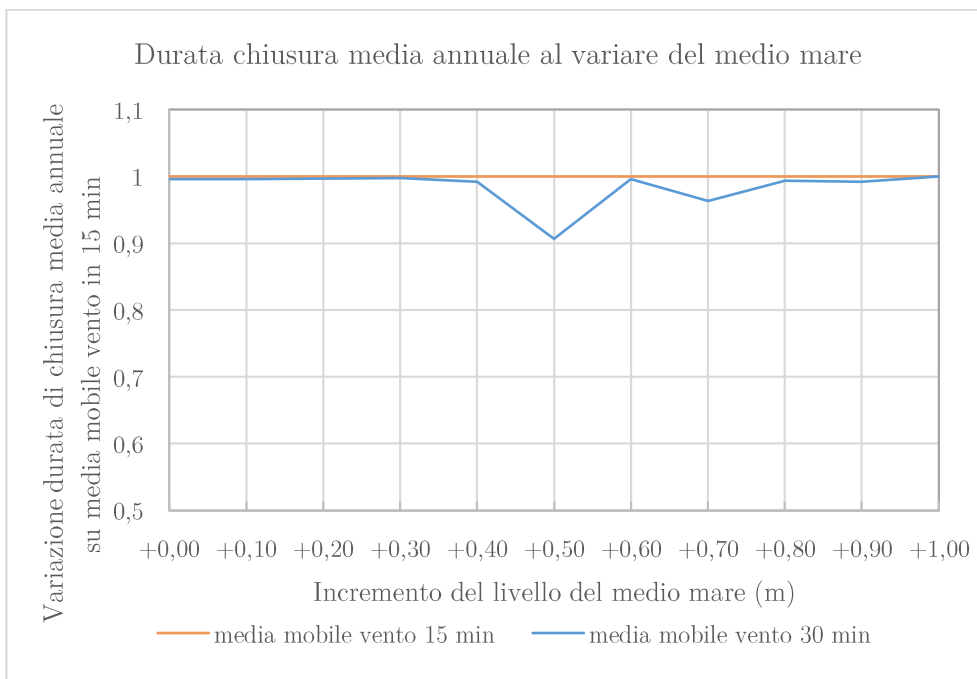
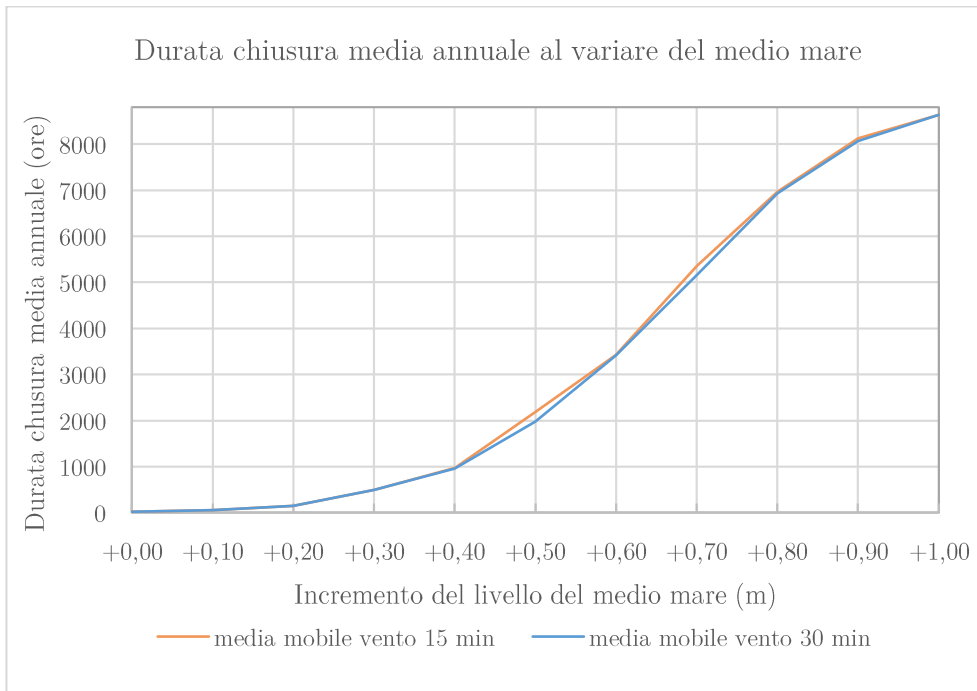
Le differenze che si riscontrano variando la soglia di accettabilità rispecchiano le aspettative: aumentando i livelli limite si nota una proporzionale riduzione della durata delle chiusure annuali.

Il valore assunto per tale parametro deve essere il giusto compromesso tra frequenza e intensità di allagamento delle città della laguna e tra il numero e la durata delle chiusure attese. A discapito della sommersione di qualche zona di Venezia può essere conveniente limitare la chiusura delle bocche per consentire i traffici commerciali in laguna.

INTERVALLO MEDIA MOBILE SULLA VELOCITA' DEL VENTO

I seguenti grafici riportano i risultati ottenuti variando la durata dell'intervallo in cui è stata eseguita la media mobile sulla velocità del vento, sulla

base di cui sono calcolati i sovralti differenziali in laguna. È considerata una media mobile su 15 minuti (caso base) e su 30 minuti.



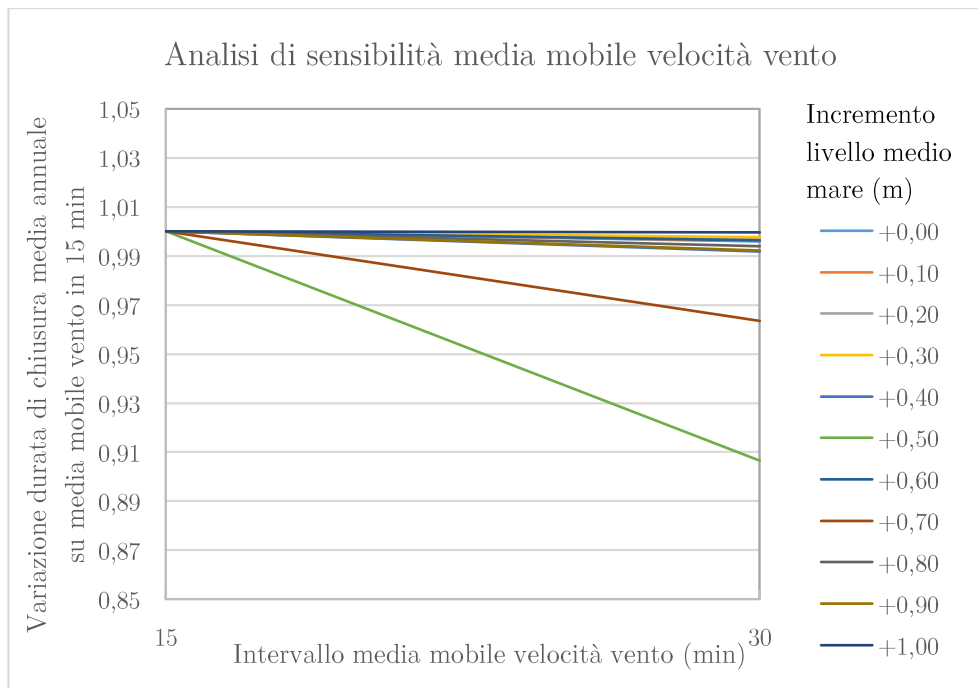


Figura 4.26 - Analisi di sensibilità sull'intervallo di tempo della media mobile sulla velocità del vento

I grafici illustrano chiaramente come la differenza tra le due configurazioni sia quasi nulla, eccetto un paio di casi dove ci si discosta di un 10%.

Risulta quindi indifferente adottare l'uno o l'altro intervallo, porgendo praticamente lo stesso risultato.

Si tenga comunque presente che i valori di velocità del vento sono una media all'interno di un periodo di 5 minuti di tempo quindi sono di per se' già filtrati dai picchi istantanei che possono verificarsi per pochi secondi, ma che per la breve durata non comportano ripercussioni sulla risposta.

4.3 Esempio di confronto con il modello idrodinamico

Per validare il codice di calcolo creato si è utilizzato il modello matematico agli elementi finiti, precedentemente introdotto al capitolo 3.4. Esso è servito per

determinare la risposta idrodinamica simulando l'attivazione delle opere mobili alle bocche durante il particolare evento del 5-6 febbraio 2015. In questo modo è stato possibile confrontare i risultati con quanto previsto dall'algoritmo di calcolo (si veda il capitolo 3.3).

Preliminarmente è stata effettuata una simulazione per verificare la corrispondenza fra le reali rilevazioni di livello e la ricostruzione fornita dal modello idrodinamico.

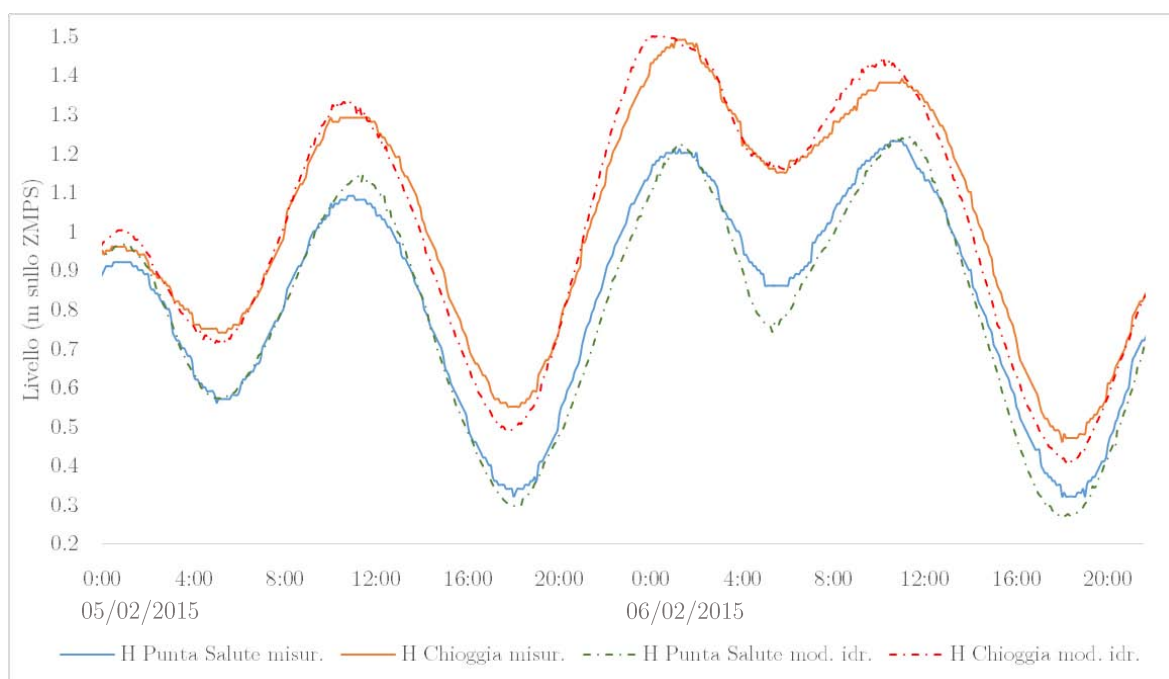


Figura 4.27 - Confronto livelli misurati e calcolati con il modello idrodinamico

Come si può vedere dal grafico vi è una buona corrispondenza tra quanto realmente misurato a Punta Salute e Chioggia e quanto determinato tramite il modello idrodinamico. Ciò sta a significare una buona taratura dei parametri del modello stesso. Si può quindi procedere alla simulazione della chiusura delle paratoie nei tempi determinati dall'algoritmo, per poter quindi confrontare i due risultati e valutare l'affidabilità del modello.

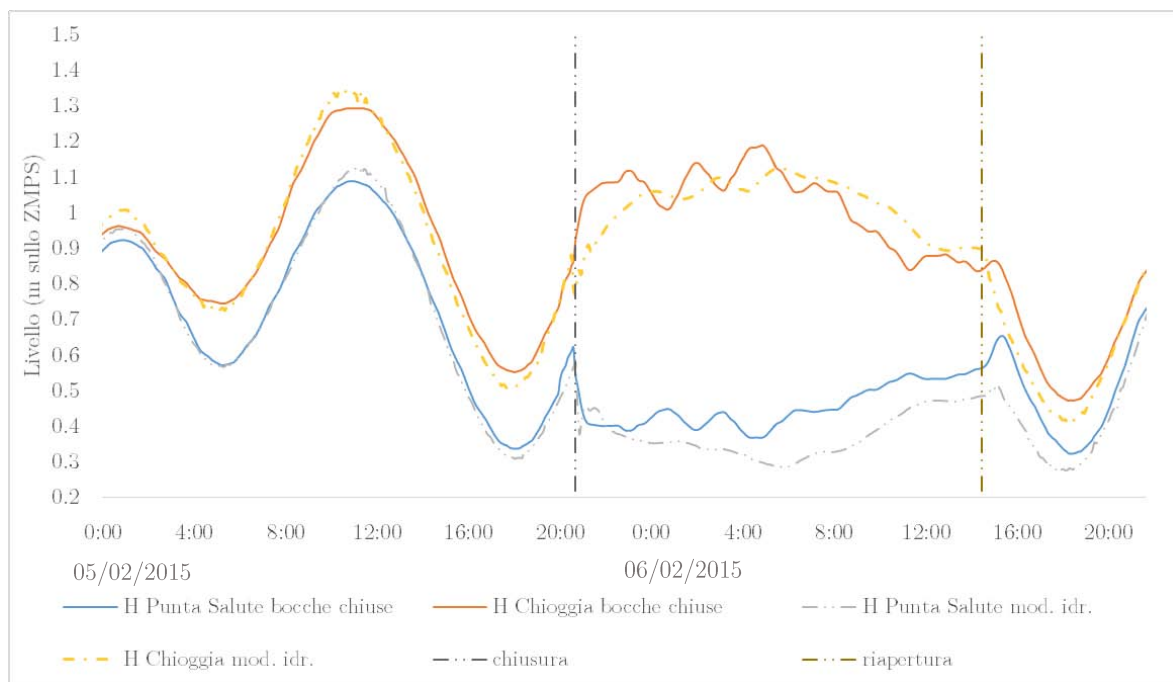


Figura 4.28 - Confronto tra la risposta prevista dall' algoritmo e dal modello idrodinamico

L'algoritmo di calcolo ben riproduce il comportamento del bacino durante la chiusura riportando lievi differenze dovute principalmente all'assunzione cautelativa che i sovralti generati dal vento si sviluppino in maniera pressoché istantanea.

Si può quindi affermare che il modello di calcolo creato è in grado di riprodurre con buona approssimazione la risposta del bacino lagunare sottoposto alla chiusura delle sue bocche di porto. L'algoritmo richiede tempi di computo molto ridotti, se confrontati con la completa implementazione del modello idrodinamico; è quindi molto conveniente il suo utilizzo anche in tempo reale o in modalità previsionale.

Si vuole ora osservare la risposta del sistema se i sovralti del vento fossero valutati in condizioni di bocche aperte (cfr. capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

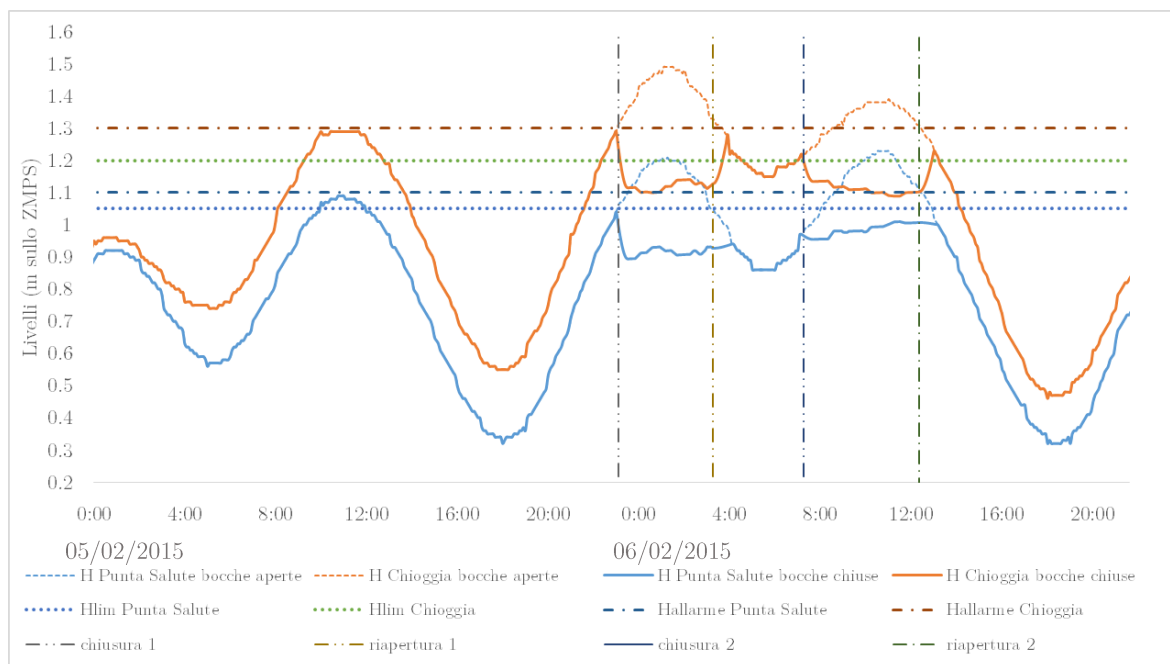
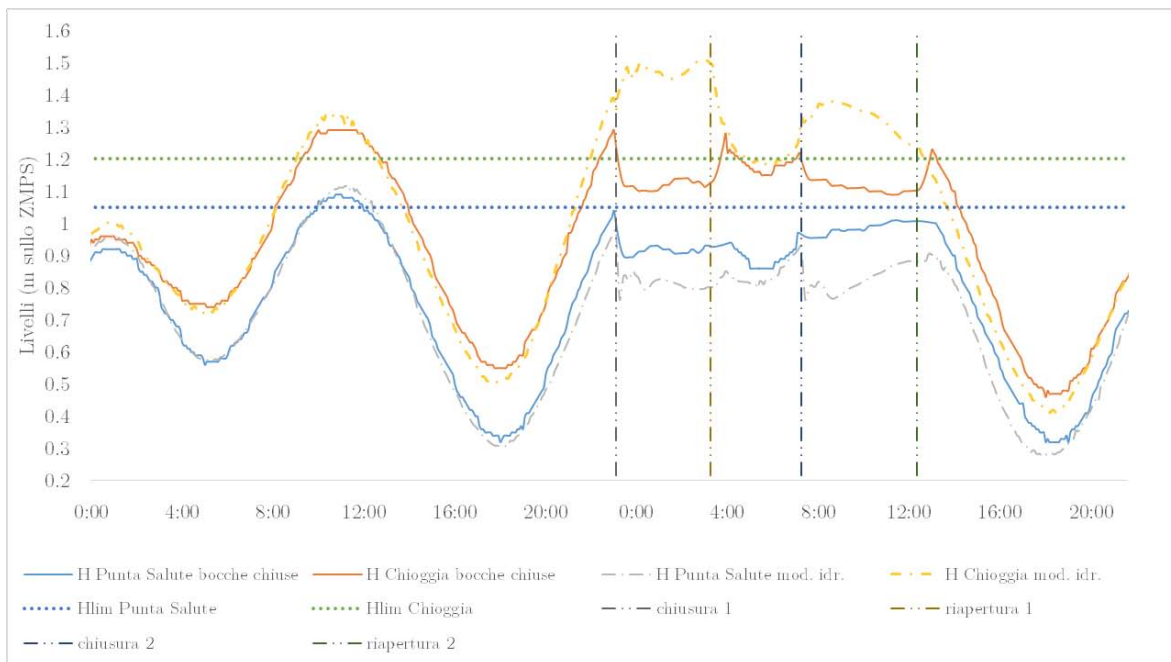


Figura 4.29 - Simulazione dell'attivazione del M.O.S.E. durante l'evento del 5-6 febbraio 2015 utilizzando sovralti da vento calcolati in condizioni di bocche aperte

È evidente come la risposta risultati piuttosto differente rispetto a quando valutato precedentemente utilizzando il corretto valore dei sovralti dovuti al vento. In questo caso il modello prevede una duplice chiusura in corrispondenza dei due picchi, che complessivamente interessa tempi inferiori rispetto all'unica chiusura ipotizzata inizialmente.

Tramite modello idrodinamico agli elementi finiti si è quindi simulata la risposta del modello imponendo la chiusura della laguna nei due momenti individuati dall'algoritmo.



Tali chiusure risultano evidentemente insufficienti a garantire il rispetto del limite di tolleranza di livello a Chioggia, in quanto l'intenso vento comporta sovralti ben più consistenti di quanto previsto, erratamente, dai documenti ufficiali. Si conferma ulteriormente come utilizzare la modalità di calcolo dei sovralti da vento in condizioni di bocche chiuse conduca a previsioni della risposta del bacino completamente errate e di conseguenza le chiusure previste condurranno al superamento dei limiti di accettabilità e all'allagamento delle cittadine lagunari.

5 Conclusioni

L'algoritmo creato ha risposto pienamente agli obiettivi inizialmente fissati, permettendo di simulare la gestione del sistema di paratoie mobili alle bocche di porto della laguna di Venezia in modo da garantire la salvaguardia di Venezia, Chioggia e Burano.

Tale procedura ha permesso inoltre l'analisi di serie storiche per valutare quale sarebbe stata la risposta del sistema in termini di chiusura delle bocche se fosse stato attivo il MO.S.E. La simulazione di un incremento del livello del medio mare ha inoltre permesso di prevedere quale possa essere l'operatività del sistema negli anni a seguire. Basandosi nelle proiezioni fornite dall'IPCC, è possibile affermare che entro il 2080 la durata di chiusura annuale andrà ad interessare un periodo complessivo di 3 mesi all'anno. La chiusura prolungata andrebbe a ripercuotersi negativamente all'intero sistema economico legato alla laguna, vedendosi interrotti tutti i traffici commerciali. Inoltre ne risentirebbe anche l'equilibrio dello stesso ecosistema lagunare, privato del naturale ricambio delle acque.

Il modello creato permette inoltre un suo utilizzo in tempo reale al fine di gestire in maniera ottimale il sistema MO.S.E., alla luce dei trascurabili tempi di processamento. Le previsioni meteorologiche e di marea possono essere infatti istantaneamente elaborate, fornendo gli esatti istanti in cui è necessaria l'attivazione del MO.S.E.

Bibliografia

APAT, *Stazioni di osservazione Meteo - Mareografiche nella Laguna di Venezia e nell'arco costiero Nord Adriatico*, Rapporti 68/2006

D. Canesso, M. Cordella, G. Arena, *Manuale di mareografia e linee guida per i processi di validazione dei dati mareografici*, ISPRA, Manuali e Linee guida 77/2012

P. Canestrelli, M. Mandich, A. P. Pirazzoli, A. Tomasin, *Venti, depressioni e sesse: perturbazioni delle maree a Venezia (1950-2000)*, Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, Città di Venezia, 2001

M. Cordella, L. Zampato, F. Pastore, A. Tomasin, P. Canestrelli, M. Ferla, *Le tavole annuali di marea per Venezia*, Atti dell'Istituto Veneto di SS.LL.AA., Tomo CLXIX (2010-2011)

L. D'Alpaos, A. Defina, *Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: a review of open issues and applications to the Venice lagoon*, Computers & Geosciences, 2006

L. D'Alpaos, *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

M. Ferla, M. Cordella, L. Michielli, *Aggiornamenti sulle osservazioni dei livelli di marea a Venezia*, APAT, Rapporti 69/2006

A. Mazzoldi, *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 www2.comune.venezia.it/mose-doc-prg/

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Magistrato alle Acque, *Quaderni Trimestrali Consorzio Venezia Nuova*, Gennaio/Marzo 2010

G. Umgiesser, B. Matticchio, *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 www2.comune.venezia.it/mose-doc-prg/

R. Mel, *Tesi di laurea*, 2009;

M. Ferla, M. Cordella, L. Michielli, A. Rusconi, *Long term variations on sea level and tidal regime in the lagoon of Venice*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 75, 2007

C. Martignon, *Tesi di laurea: Impatto della chiusura delle bocche di porto sui livelli di marea all'interno della laguna di Venezia in presenza di vento intenso*, 2012

L. Parolin, *Tesi di laurea: Analisi dei dislivelli all'interno della laguna di Venezia durante il funzionamento del MO.SE.*, 2013

Pirazzoli, P. A., *Did the Italian government approve an obsolete project to save Venice?*, *Eos Trans. AGU*, 83(20), 2002

Pirazzoli, P., and G. Umgiesser, *E se il progetto MOSE fosse già obsoleto?*, *Tech. Rep. 11 -2003*, 2003, p. 55, *Ist. di Sci. Mar., Cons. Naz. Delle Ric., Venice, Italy*;

Pirazzoli P. A., and G. Umgiesser, *The projected MOSE barriers against flooding in Venice (Italy) and the expected global sea-level rise*, *J. Mar. Environ. Eng.*, 8(3), 2006

A. Rinaldo, L. Nicotina, E. Alessi Celegon, F. Beraldin, G. Botter, L. Carniello, G. Cecconi, A. Defina, T. Settin, A. Uccelli, L. D'Alpaos, M. Marani, *Sea level rise, hydrologic runoff, and the flooding of Venice*, Water Resour. Res., 44, W12434, doi:10.1029/2008WR007195, 2008.

T. Santini, Tesi di laurea: *Calcolo dei sovralti differenziali nella Laguna di Venezia durante il funzionamento delle opere mobili alle bocche*, 2014

IPCC, *Annex II: Climate System Scenario Tables* [Prather, M., G. Flato, P. Friedlingstein, C. Jones, J.-F. Lamarque, H. Liao and P. Rasch (eds.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.