

E SE IL PROGETTO “MOSE” FOSSE GIÀ OBSOLETO ?

IS THE “MOSE” PROJECT ALREADY OBSOLETE ?

Paolo Antonio Pirazzoli e Georg Umgiesser

Technical Report n. 256

Gennaio 2003

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse

S. Polo, 1364
30125 Venezia
Italy

E SE IL PROGETTO “MOSE” FOSSE GIÀ OBSOLETO ?

Paolo Antonio Pirazzoli¹ e Georg Umgiesser²

¹ CNRS-UMR 8591, Laboratoire de Géographie Physique, 1 Place Aristide Briand,
92190 Meudon-Bellevue, France (e-mail : pirazzol@cnrs-bellevue.fr)

² ISDGM-CNR, Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, S. Polo 1364,
30125 Venezia, Italia (e-mail: georg@isdgm.ve.cnr.it)

*Venice is a great treasure for the whole of (wo)mankind and it is indeed
a great shame if the latest knowledge is not applied to saving Venice.*

(Roger J. Braithwaite, comunicazione privata, agosto 2002)

Riassunto

Vengono analizzati cinque casi di rialzi marini di origine meteorologica avvenuti negli ultimi decenni, supponendo che abbiano coinciso con un livello relativo del mare superiore all'attuale di 0,5 m (previsione media dell'IPCC per l'anno 2100 + subsidenza locale) e che le paratoie del MOSE (progetto di protezione mobile contro l'"acqua alta" a Venezia) fossero funzionanti. In tutti i casi considerati le parti più basse di Venezia sarebbero state allagate per decine di ore (Tabella 1), malgrado il rialzo del piano stradale alla quota di +100 cm, o anche di +110 cm, rispetto allo zero locale. I problemi inizierebbero per un innalzamento del livello marino dell'ordine di 25 o 30 cm, o anche solo di 10 cm nel caso di una ripetizione dell'evento del 1966.

Ciò è dovuto sia al fatto che le paratoie non costituirebbero una chiusura impermeabile, che alla pioggia e alla portata dei fiumi che contribuirebbero ad innalzare il livello medio della laguna a paratoie chiuse. Il MOSE sarebbe dunque inadeguato per proteggere Venezia nel caso dell'aumento del livello marino previsto dai modelli climatici per questo secolo. Esso potrebbe contribuire ad attenuare i picchi dei rialzi marini, ma non riuscirebbe ad impedire allagamenti progressivi allorché le durate di chiusura aumenteranno a causa dell'innalzamento del livello marino.

Temporanei interventi “diffusi” sembrano preferibili alle paratoie del MOSE, dato che avrebbero meno impatto sull'ambiente e dato che potrebbero riportare la frequenza dell'"acqua alta" alla situazione più che sopportabile di circa un secolo fa, permettendo così di guadagnare alcuni decenni. Ciò darebbe il tempo di verificare l'evolversi delle situazioni reali e probabilmente di diminuire i margini di incertezza attuali. È solo con una stima più precisa dell'innalzamento futuro del livello marino che sarà possibile definire che tipo di opere di

difesa sia più idoneo per la salvaguardia di Venezia e della sua laguna. In ogni caso, una priorità urgente resta quella del disinquinamento della laguna.

Abstract

“Is the MOSE project already obsolete?”

Five meteorological and surge events that occurred during the last decades are analysed, simulating that a relative sea-level rise of 50 cm (average IPCC prediction for the year 2100 + local subsidence) has taken place and that the MOSE gates (the planned mobile protection against flooding of Venice) could have been in operation during the events. In all cases considered, flooding would have occurred in the lowest parts of Venice, lasting for dozens of hours (Table 1), in spite of raising the street level to the +100 cm, or even to the +110 cm levels above the local datum. Problems would start for a sea-level rise of about 25-30 cm, or even of only 10 cm for a repetition of the 1966 event.

This is both because the projected gates are not watertight, and rainfall and river discharge contribute to raise the average water level in the lagoon. Therefore, the MOSE would be inadequate to protect Venice in the case of the near-future sea-level rise predicted by climatic models for this century. This project might be useful to attenuate surge peaks, but would not prevent gradual floods when the closure durations implied by a sea-level rise will increase.

Temporary “diffuse” interventions seem preferable to the MOSE gates because they would be safer for the environment and bring back the frequency of flooding to the very acceptable level of about one century ago, thus making it possible to gain a few decades. This would give time to verify the ongoing evolution and probably to narrow the large uncertainty ranges of present-day estimations. Only with a closer assessment of near-future sea-level rise will it be possible to decide which type of “hard” defence would be eventually necessary to save Venice and its lagoon. Anyway, a stricter control of water pollution should be a priority intervention.

Introduzione

In una precedente nota (Pirazzoli, 1989) era stata segnalata la possibilità di un innalzamento del livello marino di origine climatica nel corso del XXI° secolo e si era accennato, per la prima volta a Venezia, alle possibili conseguenze di questo innalzamento per la città e per l'area lagunare. Nelle conclusioni si era allora auspicato, tra l'altro, un riesame dei criteri di progettazione elaborati per eventuali opere di difesa mobili alle bocche di porto, al fine di prevedere le modalità di un loro adattamento a opere definitivamente fisse.

Nel frattempo, numerosi studi hanno permesso di ridimensionare le stime sulla crescita del livello marino prevista per l'anno 2100 (che, ancora nel 1986, oscillavano tra 10 e 368 cm). In particolare, l'*Intergovernmental Panel on Climate Change*, al quale partecipano i maggiori specialisti mondiali, ha pubblicato tre rapporti. Nel primo rapporto (IPCC, 1990) l'innalzamento più probabile per il 2100 era stimato a 66 cm. Fondandosi su una revisione delle ipotesi sull'emissione dei gas a effetto serra, Wigley e Raper (1992) proponevano come più probabile una stima dell'innalzamento globale per il 2100 di 48 cm, compresa tra una stima bassa di 15 cm ed una stima alta di 90 cm. Nel secondo rapporto dell'IPCC (1996) le previsioni erano di 20 cm (7-39 cm, tenendo conto dei margini di incertezza) per il 2050 e di 49 cm (20-86 cm con l'incertezza) per il 2100. Nel terzo rapporto, infine (IPCC, 2001), si confermava la previsione di un innalzamento globale del livello marino dell'ordine di mezzo metro (48 cm, 9-88 cm con i margini d'incertezza) tra il 1990 ed il 2100. Quanto alla probabilità delle varie stime, di cui Schneider (2001) lamenta la pericolosa assenza nei rapporti IPCC, sia Wigley e Raper (2001) per il riscaldamento climatico, che Forest et al. (2002) per l'insieme del sistema climatico, considerano che essa sia particolarmente bassa per i valori limite dei margini di incertezza, sia elevati che bassi, il che aumenta la probabilità dei valori nella parte mediana degli stessi intervalli. Insomma, la stima ritenuta più probabile, di un innalzamento marino dell'ordine di mezzo metro, resiste praticamente immutata da ormai un decennio, malgrado numerosi progressi nella comprensione dei fenomeni, mentre i margini di incertezza stentano a diminuire.

Durante lo stesso decennio, il satellite franco-americano Topex/Poseidon ha osservato la superficie degli oceani ripassando ogni dieci giorni al disopra delle stesse zone. La sua precisione altimetrica, dell'ordine di 2 cm per misure puntuali, è però del millimetro se si calcolano medie su vaste zone. Diventa così possibile osservare come varia il livello degli oceani sia a scala regionale che a scala globale. Considerando l'insieme dei dati disponibili, la

tendenza globale dall'inizio del 1993 all'aprile del 2001 mostra un innalzamento di circa 2,6 mm/anno (Do Minh et al., 2001; oppure, su internet¹), ossia nettamente più rapido che nel secolo precedente, il che è conforme alle previsioni dei modelli climatici. Vari altri anni di osservazioni rischiano però di essere necessari prima che si possa quantificare con precisione la tendenza eustatica a lungo termine attualmente in corso.

Secondo i modelli climatici, l'innalzamento del livello marino non sarà lineare, ma progressivo, con un'accelerazione nella seconda parte del secolo. La causa dell'innalzamento globale è attribuita essenzialmente alla dilatazione termica delle acque oceaniche ed alla fusione dei ghiacciai di montagna (con esclusione, per il momento, delle calotte polari), in seguito all'aumento della temperatura atmosferica. Tutti e sei gli scenari elaborati dall'IPCC (2001) prevedono mediamente, per il 2100, un innalzamento del livello marino globale superiore a 31 cm.

Da notare che, secondo l'IPCC, l'innalzamento non sarà uniforme nel mondo, ma affetto da forti variazioni regionali, con una crescita superiore alla media nell'Emisfero Nord, in particolare alle alte latitudini. Inoltre, eventuali movimenti del suolo (subsidenza, ...) si sovrapporranno in ogni regione costiera a quelli relativi al livello marino. L'IPCC prevede infine che anche se si riuscisse a stabilizzare le concentrazioni atmosferiche dei gas che contribuiscono all'effetto serra, la temperatura media continuerebbe ad aumentare ancora per vari secoli, seppure più lentamente che in assenza di stabilizzazione, continuando a far dilatare termicamente le acque oceaniche e provocando ulteriori innalzamenti del livello marino.

Per la regione di Venezia le previsioni a lungo termine sono dunque nettamente sfavorevoli al mantenimento della situazione lagunare attuale e una separazione del bacino lagunare dal mare potrebbe rendersi necessaria anche durante questo secolo. I limiti di incertezza sono però considerabili e sufficientemente elevati da non permettere per il momento conclusioni sicure a medio termine. Ciò rende particolarmente difficile la presa di decisioni politiche per la salvaguardia di Venezia contro l'acqua alta, dato che soluzioni inadeguate potrebbero compromettere irrevocabilmente la possibilità di adattamenti futuri, allorché il peggioramento di situazione previsto dovesse essere confermato.

In questo contesto, l'atteggiamento più razionale per cercare di rimediare ai problemi di acqua alta dovrebbe tendere a trovare qualche adattamento reversibile che permetta di attenuare gli inconvenienti attuali, ma consenta soprattutto di guadagnare due o tre decenni,

¹ www.obs-mip.fr/omp/gos/resultats/vari_nivmer.htm

che sarebbero necessari per avere il tempo di verificare l'evolversi delle situazioni reali e delle tecnologie disponibili. Si può sperare infatti che in un paio di decenni le osservazioni da satellite ed i progressi della modellistica climatica renderanno possibile una diminuzione sensibile dei margini di incertezza attuali e che ciò permetterà di definire con più sicurezza che tipo di opere di difesa sia più idoneo per la salvaguardia a lungo termine di Venezia e della sua laguna.

Attualmente si sta di nuovo discutendo dell'opportunità di completare il progetto MOSE (MODulo Sperimentale Elettromeccanico), proposto dal Consorzio Venezia Nuova. Come è noto, questo progetto prevede la creazione di un sistema di paratoie mobili, incernierate al fondo delle bocche di porto e normalmente piene di acqua. Quando il livello dell'acqua in laguna minaccia di superare la quota di +100 o +110 cm (rispetto allo zero del 1897) le paratoie verrebbero sollevate mediante iniezione di aria compressa che farebbe uscire l'acqua, permettendo alle paratoie di innalzarsi, per formare una barriera mobile che si opporrebbe temporaneamente alla penetrazione della marea in laguna. Il sistema prevede che le paratoie mobili, incernierate sul fondo, siano separate l'una dall'altra, in modo di poter oscillare indipendentemente sotto l'azione delle onde. Ossia il MOSE non costituirebbe una barriera impermeabile, dato che l'acqua potrebbe passare nello spazio libero di larghezza di 10-15 cm (Collegio di Esperti di Livello Internazionale, 1998, p. 16) che è previsto tra una paratoia e l'altra. Quindi una chiusura delle paratoie non implica che il livello dell'acqua in laguna resterà stabile, ma che tenderà, dovuto anche ad altri fattori come lo scarico dei fiumi e la pioggia, ad innalzarsi lentamente. Il che costituisce un inconveniente se i periodi di chiusura dovessero prolungarsi.

In questa nota si sono selezionati alcuni casi, tra le registrazioni di marea degli ultimi decenni, che mostrano che, se avvenisse un innalzamento del livello marino, anche moderato, il MOSE non sarebbe più in grado di evitare del tutto gli allagamenti. Gli eventi considerati comprendono, oltre al caso estremo del novembre 1966, tre acque alte moderate (avvenute nell'ottobre 1976, nell'ottobre 1980 e nel dicembre 1981) ed anche un caso (febbraio 1951) nel quale non c'è stata acqua alta.

Metodologia utilizzata

Per i casi considerati sono stati utilizzati i valori orari di marea registrati dal mareografo di Punta della Salute, che sono stati arbitrariamente aumentati di 50 cm per simulare un aumento del livello relativo del mare dello stesso ordine di grandezza. Si tratta del valore

medio previsto dall'IPCC, ma non bisogna dimenticare che valori più o meno elevati sono possibili. Si è supposto che, anche con un livello marino più elevato, le principali caratteristiche della marea non cambino. Ciò sembra ammissibile, almeno in prima approssimazione. Infatti, se uno studio precedente (Bondesan et al., 1995) ha mostrato che in un mare Adriatico più profondo (a causa dell'innalzamento eustatico) e con un clima immutato la marea ed i rialzi marini potrebbero diminuire leggermente, un altro studio (Pirazzoli e Tomasin, 1999) ha mostrato che l'evoluzione attuale del clima è favorevole ad un aumento dei rialzi marini di origine meteorologica. I due fattori precedenti producono, dunque, effetti contrari che tendono a compensarsi.

Si è anche supposto che l'insieme delle paratoie funzioni normalmente e che, in previsione di un periodo critico, la loro chiusura possa anche cominciare non appena la marea si rimetta a salire dopo una bassa marea, tenuto conto dei tempi necessari per il loro azionamento (30 minuti). Ciò implica necessariamente l'interruzione del ricambio d'acqua in laguna, ma si può constatare facilmente dai diagrammi che seguono che una chiusura più tardiva avrebbe aggravato e prolungato gli allagamenti, senza tener conto comunque del problema della riduzione del ricambio idrico con il mare Adriatico.

Per stimare i sovralti in laguna durante i periodi di chiusura si sono considerate le condizioni meteorologiche effettive (precipitazioni, vento) misurate durante i periodi in esame. Per l'afflusso d'acqua in laguna dal bacino scolante, si è stimato che potesse essere almeno equivalente a quello delle precipitazioni avvenute direttamente in laguna. Per le perdite tra le paratoie si sono utilizzati i valori riportati nella tabella 3 del rapporto del Collegio di Esperti di Livello Internazionale (1998), che prevedono un innalzamento del livello della laguna, per 11 ore di chiusura, di 3 cm (ossia 0,27 cm/ora) se le paratoie chiuse non oscillassero con le onde, di 5 cm (0,45 cm/ora) se oscillassero di 10° (valore ritenuto "possibile") e di 23 cm (2,1 cm/ora) se oscillassero di 15° (valore ritenuto "improbabile"). In questa nota, le possibilità di oscillazione sono state stimate caso per caso, in funzione della velocità e della durata del vento registrate a Venezia e sull'Adriatico e dell'intensità della mareggiata che se ne può dedurre.

Dopo la riapertura delle paratoie, si è supposto che il livello medio della laguna possa diminuire, in funzione della differenza di livello tra la laguna ed il mare, secondo il grafico della Fig. 1, che mostra che dislivelli laguna-mare inferiori a 15 cm potranno essere colmati in un'ora, mentre dislivelli più grandi richiederanno un tempo leggermente più elevato. Per esempio, se il mare fosse più basso della laguna di 20 cm, dopo un'ora dall'apertura il livello della laguna tenderebbe ad abbassarsi di 17 cm (di 14-22 cm, con probabilità 2/3). Per un

dislivello iniziale di 30 cm, l'aggiustamento sarebbe generalmente inferiore a 25 cm e ciò può implicare, in certi casi, un allungamento della durata degli allagamenti.

Quanto al livello raggiunto in laguna, che figura nei diagrammi delle Fig. 2-6, si tratta di un livello medio che non tiene conto né degli effetti locali del vento né di quelli del moto ondoso. Per esempio, se si volesse evitare l'allagamento di quote situate a 110 cm, il MOSE dovrebbe essere azionato in modo tale da limitare la quota media dell'acqua in laguna non alla quota limite di 110 cm, ma ad un livello più basso, che tenga conto sia dell'altezza delle onde (dell'ordine di 15-20 cm per l'onda significativa nella zona di Punta della Salute, soprattutto se in presenza di vento (Canestrelli e Cossutta, 2001) e di 7-8 cm in Canal Grande a prossimità del Palazzo Cavalli (Canestrelli e Cossutta, 2000)), che degli importanti dislivelli (anche di 20-30 cm sopra il livello medio) che il vento può provocare fra diverse parti della laguna. Questi ultimi dislivelli sono comunque più importanti per le isole situate nelle estremità della laguna come Chioggia e Burano, e di meno per Venezia che si trova pressoché al centro della laguna (Zecchetto et al., 1997).

Si è infine supposto che le parti più basse della città e l'insula di Piazza S. Marco possano essere difese dagli allagamenti fino alla quota di 110 cm. Se invece le difese definitive dovessero limitarsi ad una quota più bassa (per esempio a 100 cm) l'aggravamento delle situazioni discusse sarebbe ovvio. Le durate di allagamento nei vari casi sono sintetizzate nella Tabella 1.

Risultati

Febbraio 1951 (Fig. 2)

Il periodo compreso tra l'11 ed il 14 febbraio 1951 è finora passato inosservato. Non c'è stata nessuna acqua alta (massimo livello orario registrato: 94 cm). Un rapido abbassamento della pressione atmosferica il 13 febbraio, accompagnato da una sciroccata, ha causato un rialzo di 68 cm poco dopo una bassa marea di morto d'acqua. Il rialzo si è mantenuto allo stesso livello per circa cinque ore, mentre la marea osservata culminava a 81 cm. Il fatto più notevole da osservare è che la marea osservata è rimasta al disopra della quota 40 cm per ben 61 ore consecutive. È in casi come questo che, nel caso di un innalzamento del livello marino, il MOSE rischia di avere le maggiori difficoltà, se non l'impossibilità, di evitare allagamenti.

All'inizio degli anni '50 il livello medio marino era inferiore all'attuale di circa 10 cm (Pirazzoli e Tomasin, 1999, Fig. 1). Per simulare un innalzamento di 50 cm del livello marino attuale, occorre dunque aumentare i livelli di marea osservati nel 1951 di 60 cm.

Si nota immediatamente, nella Fig. 2, il forte effetto sul livello medio lagunare del lungo periodo di chiusura delle paratoie, durante il quale si è supposto che, in assenza di eventi meteorologici estremi, il livello aumenti (per pioggia, afflusso dal bacino scolante e perdite tra le paratoie) di 0,5 cm/ora il 12 e 13 febbraio.

Le conoscenze attuali non permettono di prevedere in modo affidabile le condizioni meteorologiche con un anticipo dell'ordine di 60 ore. Infatti, il margine di errore nella previsione del livello marino con 3 ore di anticipo è, con fascia di fiducia di 95%, di ± 10 cm e con 24 ore di anticipo, di ± 15 cm (Canestrelli et al., 1998 ; Canestrelli, 1999). Il problema principale sarà quindi quello della scelta del momento più opportuno per chiudere le paratoie. Se si desiderasse ottenere un ricambio almeno parziale delle acque lagunari, nei rari momenti resi possibili dall'innalzamento del livello marino, è probabile che, se le condizioni meteorologiche del momento lo permettessero, si tenderebbe a ritardare il momento di chiusura delle paratoie dopo il minimo di marea. Si è quindi supposto nella Fig. 2, seguendo la strategia di chiusura della Classe 1A elaborata nello studio di impatto ambientale (Magistrato alle Acque, 1997) di cominciare a chiudere le paratoie alla quota di circa +90 cm, analogamente alla marea precedente. Il massimo livello medio che ne risulta in laguna è di 116 cm. Il periodo di allagamento, con permanenza del livello medio lagunare al disopra della quota di 110 cm sarebbe stato di 13 ore consecutive. Però, tenendo conto del moto ondoso (± 8 cm per l'onda significativa), la sommersione delle zone situate a 110 cm sarebbe iniziata per una quota media in laguna di circa 102 cm, prolungando la durata dell'allagamento fino a 29 ore consecutive. Le zone difese a 100 cm, sarebbero state allagate per ben 49 ore tenendo conto delle onde (Tabella 1). Sarebbe solo anticipando la chiusura delle paratoie ad un momento più vicino alla bassa marea dell'11 febbraio, tenendo conto, per esempio, dei valori registrati in mare (che non esistevano nel 1951), che l'allagamento avrebbe forse potuto essere attenuato.

Novembre 1966 (Fig. 3)

L'acqua alta del 4 novembre è spesso citata come la principale giustificazione del MOSE, il caso tipico di grave allagamento che avrebbe potuto essere evitato soltanto con la sua costruzione. Il tempo di ritorno di quest'acqua alta è stato stimato tra 165 e 288 anni

(Pirazzoli, 1989, Tabella 5). Ossia un evento analogo potrebbe ripetersi l'anno prossimo, ma anche soltanto tra qualche secolo, quando il livello marino rischia di essere nettamente superiore all'attuale.

Nella Fig. 3, con un livello marino relativo superiore all'attuale di 50 cm, si è dapprima supposto di scegliere il momento di chiusura delle paratoie in funzione delle informazioni meteorologiche disponibili. Ancora il 2 novembre, l'assenza di vento ed una pressione atmosferica crescente su tutto l'Adriatico (Canestrelli et al., 2001), con un rialzo marino pressoché stabile tra +20 e +40 cm, non lasciavano assolutamente prevedere l'imminenza di un evento eccezionale. Si è quindi simulato (caso A), come del resto previsto anche nello studio di impatto ambientale (Magistrato alle Acque, 1997) che le paratoie siano state chiuse al momento della bassa marea nella sera del 3 novembre. Si è anche supposto che il 4 novembre l'acqua passante attraverso le paratoie, le precipitazioni atmosferiche e l'acqua proveniente dal bacino scolante abbiano fatto aumentare il livello medio della laguna di 1,5 cm/ora. Questa stima minimizza probabilmente la realtà, dato che la fortissima mareggiata di scirocco con raffiche superiori a 40 nodi su tutto l'Adriatico (58 nodi a Brindisi, 52 a Tesserà), che ha gravemente danneggiato i Murazzi e distrutto la stazione mareografica di Diga Sud Lido, avrebbe necessariamente causato, come minimo, notevoli oscillazioni delle paratoie; inoltre, le forti precipitazioni (83 mm il 4 novembre all'Osservatorio dell'Istituto Cavanis), le portate provenienti dal bacino scolante e lo straripamento del Sile avrebbero probabilmente contribuito a far crescere il livello lagunare a paratoie chiuse di almeno 1 cm/ora. L'aumento più probabile del livello medio in laguna il 4 novembre sarebbe stato piuttosto dell'ordine di 2 cm/ora. Limitandosi però prudenzialmente a soltanto 1,5 cm/ora, se ne deduce (caso A) che nonostante l'esistenza del MOSE, Venezia e la sua laguna avrebbero subito mediamente un'acqua alta di 140 cm e che la durata dell'allagamento al disopra della quota di 110 cm sarebbe stata di 27 ore consecutive (di 34 ore tenendo conto del moto ondoso). A titolo di paragone (il caso non è illustrato nella Fig. 3) nell'ipotesi di un innalzamento più probabile del livello medio in laguna di 2,0 cm/ora il 4 novembre, l'acqua alta "media" avrebbe superato la quota 150 cm.

Solo nel caso B, con una chiusura delle paratoie all'inizio della marea crescente la sera del 2 novembre (ossia con un anticipo di ben 55 ore sul colmo del rialzo marino, il che è impensabile nello stato attuale delle capacità di previsione, ma che eventuali misure alla Piattaforma del CNR in mare (che non esisteva nel 1966) potrebbero forse permettere nel futuro), l'acqua alta avrebbe potuto essere limitata a poco oltre 120 cm, con una permanenza dell'allagamento delle quote a 110 cm di "sole" 9 ore (ma di almeno 15 ore consecutive

includendo il moto ondoso). Le permanenze di allagamento sarebbero state rispettivamente di 16 e di 21 ore per le quote a 100 cm.

Se ne può dedurre che il MOSE potrebbe forse evitare oggi un evento come quello del 1966, ma che basterebbe un innalzamento del livello medio marino anche di meno di 10 cm perché la sua protezione contro l'acqua alta diventi insufficiente.

Ottobre 1976 (Fig. 4)

Questo caso è stato già presentato in due convegni a Venezia e pubblicato negli Stati Uniti (Pirazzoli, 2002). Tenendo conto che si tratta di un lungo periodo piovoso e ventoso culminato, il 30 ottobre, con una forte mareggiata da scirocco su tutto l'Adriatico (54 nodi a Bari, 53 a Termoli, 45 a Tessaera) (Canestrelli et al., 2001), la stima di un innalzamento di 1 cm/ora del livello medio lagunare a paratoie chiuse sembra realista, se non modesta. Se ne ottiene, il 30 ottobre, una quota massima di 115 cm, ossia una durata di allagamento delle quote a 110 cm di 6 ore, oppure di 16 ore tenendo conto del moto ondoso significativo. Per le zone difese alla quota 100 cm, la permanenza dell'allagamento sarebbe di 18 ore (di 36 ore tenendo conto del moto ondoso). Basterebbe dunque in questo caso un innalzamento del livello marino di soli 23 cm perché la protezione del MOSE diventi insufficiente per le quote a 100 cm.

In un recente articolo Bras et al. (2002) argomentano che il caso studiato rappresenti una prova di successo per il MOSE e rimproverano a Pirazzoli (2002) di ignorare *“the ability to forecast the tides and the events, which is an essential element of the planned operation of the gates”*. Non precisano però quale sarebbe stato, secondo loro, il momento più adatto per chiudere le paratoie (la cui chiusura non avrebbe potuto in ogni caso essere prevista ad un livello più basso di quello della bassa marea utilizzata nella Fig. 4!). Bras et al. (2002) pensano anche che un innalzamento di 1 cm/ora della laguna (pioggia + flusso dal bacino scolante + perdite tra le paratoie) costituisca un valore eccessivo dato che *“the gates are engineered to prevent large oscillatory rotations”*. Si richiamano forse ad una raccomandazione del Collegio di Esperti di Livello Internazionale (1998), che suggeriva l'aggiunta di un sistema di bloccaggio degli elementi delle barriere per limitare le oscillazioni. Però, il dettaglio di questo sistema di bloccaggio non è stato ancora reso pubblico, né soprattutto sperimentato a scala reale. Si può certamente immaginare di rendere solidali le paratoie a due a due o anche a tre a tre (Adami, 2000). Ciò potrebbe forse limitare in parte le oscillazioni, ma ci si può chiedere quale sarebbe il loro comportamento reale con delle onde di tempesta.

Ottobre 1980 (Fig. 5)

Il 17 ottobre 1980, una mareggiata di forte scirocco ha causato a Venezia un rialzo marino di 79 cm ed un'acqua alta di 114 cm (111 cm secondo i dati orari). La marea osservata è rimasta per ben 39 ore superiore a 60 cm. Con un innalzamento di 50 cm del livello marino, e di 1 cm/ora di quello della laguna a paratoie chiuse il 13 e 14 ottobre, la quota media raggiunta dalla laguna sarebbe stata di 117 cm e le difese di Piazza S. Marco, supposte a 110 cm, sarebbero state superate per 9 ore consecutive (per 17 ore tenendo conto del moto ondoso). Ma per le difese rimaste alla quota 100 cm, la durata dell'allagamento sarebbe stata di 28 ore consecutive tenendo conto del moto ondoso. Con le ipotesi precedenti, l'allagamento delle quote a 100 cm avrebbe potuto essere evitato dal MOSE solo se l'innalzamento del livello medio marino non avesse superato 25 cm.

Dicembre 1981 (Fig. 6)

L'evento di marea del 18 dicembre 1981 (128 cm), caratterizzato da un rialzo marino di 116 cm, rapido e di breve durata, rappresenta un caso tipico con forte bora nell'Alto Adriatico (39 nodi a Trieste, 49 a Ronchi, 30 a Tesserà) e forte scirocco più a sud (35 nodi a Rimini, 49 a Termoli, 44 a Brindisi) (Canestrelli et al., 2001). Questi venti hanno provocato due treni di onde, provenienti da circa 60° e 150°, che hanno sovrapposto i loro effetti convergendo davanti alla laguna di Venezia, dove hanno animato una forte e pericolosa mareggiata di *scontraura*. Con la solita ipotesi di un innalzamento di 50 cm del livello marino, anche supponendo che le paratoie siano state chiuse subito dopo la bassa marea del giorno precedente, con perdite tra le paratoie di 1 cm/ora, si ottiene un picco del livello medio lagunare a 113 cm. Eventuali difese di Piazza S. Marco a 110 cm sarebbero state superate durante 4 ore (durante 12 ore tenendo conto del moto ondoso).

Discussione e conclusioni

Se il progetto MOSE rischia di diventare rapidamente obsoleto è perché è basato su un sistema di paratoie che era stato ideato prima che si cominciasse a parlare, nel mondo, di aumento dell'effetto serra e del livello marino globale. Le possibilità di adattamento del progetto all'innalzamento eustatico previsto dai modelli climatici sembrano essere state completamente trascurate.

Bras et al. (2002) dicono di aver partecipato alla verifica che le paratoie avrebbero in ogni caso impedito allagamenti nell'ipotesi di innalzamenti del livello marino di 30 e di 50

cm. La capacità del MOSE di poter contrastare efficacemente un innalzamento del livello marino di 50 cm è stata anche affermata a più riprese da rappresentanti del Consorzio Venezia Nuova in interviste e in documentari destinati a televisioni internazionali.

La presente nota mostra invece che il sistema MOSE sarebbe inadeguato per opporsi agli allagamenti nel caso di un innalzamento di 50 cm e che vi sarebbero problemi non appena l'innalzamento superasse 25-30 cm, o anche soltanto 10 cm nel caso di un evento estremo simile a quello del novembre 1966.

Il problema degli allagamenti non è però l'unico aspetto da considerare nel funzionamento del MOSE, dato che una difesa della laguna a quote medie di 100 o di 110 cm comporterebbe un'interruzione dello scambio idrico con il mare e quindi un deterioramento della qualità dell'acqua in laguna. La durata di quest'interruzione aumenterebbe se si volesse abbassare la quota di protezione. Perciò le due finalità di garantire sia un adeguato ricambio delle acque lagunari, sia una protezione di Venezia contro le acque alte sono in contraddizione fra di loro.

I maggiori specialisti mondiali (Wigley e Raper, 1992 ; IPCC, 1996, 2001), tenendo conto dei progressi più recenti nella modellistica climatica, confermano da ormai dieci anni, come stima più probabile, quella di un innalzamento del livello marino globale dell'ordine di mezzo metro entro la fine del secolo, con stime basse di 10-20 cm e stime alte di 85-90 cm. Ci si può chiedere per quali motivi queste previsioni sono state ignorate dai progettisti del MOSE e perché le verifiche di Bras et al. (2002), il cui esito appare contestabile, siano state limitate sulla parte medio-bassa dell'intervallo di incertezza (tra 30 e 50 cm) e non anche sulla parte medio-alta (tra 50 e 70 cm).

Sembra infatti ovvio che un progetto di salvaguardia dovrebbe essere basato su dati aggiornati e dovrebbe tener conto non solo dei rialzi locali dovuti al vento e al moto ondoso (almeno 10-30 cm) e della totalità dei margini di incertezza riguardanti il prevedibile innalzamento eustatico, ma anche (è un principio di base dell'ingegneria) di un adeguato coefficiente di sicurezza. Appare evidente, invece, che il sistema proposto sarebbe incompatibile con un innalzamento, anche moderato, del livello marino.

Da oltre vent'anni il sistema MOSE è stato l'unico intervento di protezione contro l'acqua alta che sia stato insistentemente proposto dal Consorzio Venezia Nuova. C'è ora un urgente bisogno di idee nuove e di alternative. Per cercare di rimediare, almeno temporaneamente, all'aumento di frequenza dell'acqua alta, si può cercare di affrontare separatamente con "interventi morbidi e diffusi" le due cause essenziali di questo aumento: 1) l'altitudine ormai insufficiente delle quote di una parte della città storica, dopo il recente

aumento del livello marino relativo (eustatismo e subsidenza); e 2) l'eccessiva profondità delle bocche di porto che troppo facilita la progressione in laguna dell'onda di marea e dei rialzi marini (Pirazzoli e Tomasin, 2002).

Per l'altitudine, il lavoro già intrapreso da Insula (2000), rialzando nei limiti del possibile il piano viario, è essenziale (Boato 2000). Nell'insieme, entro un paio di decenni, oltre il 95% del suolo cittadino potrebbe essere posto ad una quota di almeno +120 cm e 1,7% a quote comprese tra +110 e +120 cm, mentre soluzioni particolari (sistemi a vasca, o difesa verticale perimetrale a insula) dovrebbero essere trovate soltanto per il 2,7% restante. Però rimarranno delle zone di Venezia dove il livello di difesa rischia di rimanere inferiore a 110 cm o anche di non poter superare la quota 100 cm, tra cui una zona dei Tolentini (prevista inizialmente a 100 cm, poi pare portata a 105 cm in sede di esecuzione), la zona di Rialto a prossimità del Palazzo dei Camerlenghi e soprattutto l'insula di Piazza S. Marco. Per quest'ultima, la quota finale di difesa lato bacino, prevista a circa 105 cm lungo la riva, potrebbe essere innalzata a 110 o 115 cm parallelamente alla riva stessa, all'altezza delle due colonne; però la quota di risvolto di una eventuale impermeabilizzazione orizzontale sarebbe necessariamente più bassa e non risulta ancora chiara la quota di difesa della Piazza lato Procuratie Vecchie e quella dell'insula di S. Marco nel suo complesso. A Malamocco e a Pellestrina, invece, i lavori di rialzo urbano o di costruzione di paratoie mobili locali sono già ultimati. A Burano, il progetto Insula (2002) prevede una quota di difesa dell'ordine di 130-140 cm.

Per aumentare le resistenze idrodinamiche nelle bocche di porto, G. Umgiesser (1999) ha dimostrato che un'aumento del coefficiente di scabrezza (o l'inserimento di ostacoli) permetterebbe di rallentare i flussi di marea e di diminuire di parecchi centimetri (tranne per casi estremi come quello del 1966) i livelli raggiunti dall'acqua alta all'interno della laguna. L'aumento di resistenze potrebbe essere ottenuto in vari modi: diminuendo la profondità delle bocche, diminuendo le sezioni trasversali, costruendo opere laterali che contribuiscano a disperdere una parte dell'energia delle correnti di marea, oppure modificando i materiali del fondo. Come indicato anche da Boato (2000), questi interventi potrebbero ridurre le punte di marea mediamente di una ventina di centimetri.

Abbinando l'aumento di resistenze alle bocche di porto ed i rialzi urbani, la frequenza delle acque alte a Venezia ed in laguna potrebbe essere drasticamente diminuita e riportata, col livello marino attuale, ad una situazione relativamente sopportabile, simile a quella che esisteva un secolo fa. Questo tipo di interventi permetterebbe di guadagnare qualche decennio e quindi di evitare errori che pregiudicherebbero scelte future.

Anche altre idee, come quella di estromettere dalla laguna il porto della Marittima, per poter diminuire ulteriormente la sezione della bocca di Lido, ed installarvi eventualmente una nave-porta durante la cattiva stagione, per limitare le acque alte, sarebbero benvenute se il loro progetto potesse rapidamente giungere ad un livello di quantificazione che permetta il paragone con altre soluzioni.

Sembra chiaro però che, se l'innalzamento eustatico ritenuto come più probabile dall'IPCC (2001) dovesse prodursi (anche supponendo che la subsidenza non superi 4-5 cm per secolo), i progetti di salvaguardia attuali (MOSE e/o "interventi diffusi") diverrebbero rapidamente insufficienti. Sia per il MOSE che per gli "interventi diffusi", basterebbe infatti un innalzamento del livello marino di una trentina di centimetri per mettere il sistema in crisi.

Ci si troverebbe allora, entro qualche decennio, davanti alla necessità di dover separare la laguna dal mare (oltre che dai corsi d'acqua che vi si immettono ancora più o meno liberamente) mediante opere che permettano alla superficie lagunare di restare ad un livello inferiore a quello del mare esterno durante periodi anche lunghi. In questo caso il MOSE, se fosse già stato costruito, darebbe solo una protezione illusoria, che non eviterebbe allagamenti parziali che si prolungherebbero anche durante intere giornate (Tabella 1). Sarebbe necessario demolirlo e rimpiazzarlo con nuove opere di chiusura che dovrebbero essere robuste e impermeabili (senza traferri che lascino entrare acqua), mentre le attività marittime avrebbero bisogno, per poter proseguire, di opportune conche di navigazione. L'ambiente tenderebbe allora a trasformarsi gradualmente da marino-salmastro a salmastro-d'acqua dolce, come è già stato recentemente il caso per l'Ijsselmeer (Zuiderzee) in Olanda, che fino a 70 anni fa era ancora il golfo del porto di Amsterdam. Ciò implicherebbe purtroppo, per molte attività lagunari attuali, importanti modifiche ed una trasformazione verso forme di attività diverse.

Tutti gli interventi temporanei considerati, MOSE, oppure riduzione delle sezioni alle bocche di porto, implicano una diminuzione degli scambi tra mare e laguna, diminuzione che diverrebbe rapidamente inesorabile nel caso di un'accelerazione dell'innalzamento del livello marino. Una priorità urgente resta quindi quella del disinquinamento della laguna che, tra l'altro, dovrà prevedere un adeguamento igienico-sanitario non soltanto a Burano, Mazzorbo e Sant'Erasmo (Insula, 2002) ma anche a Venezia. In caso di chiusura definitiva, infatti, il disinquinamento dovrà essere totale.

Ringraziamenti

Questo lavoro è un contributo al progetto Corila 3.1a. Si desiderano ringraziare il Dott. Paolo Cacciari, l'Ing. Afro Massaro ed il Prof. Alberto Tomasin per utili informazioni rese disponibili durante la preparazione della presente nota. I commenti, talvolta critici ma sempre costruttivi, di tre *Referees* hanno contribuito a migliorare questo lavoro e sono stati particolarmente apprezzati.

Bibliografia

- ADAMI A., 2000. I modelli impiegati per lo studio delle opere alle bocche. Atti Convegni Lincei 161, pp. 101-123.
- BOATO S., 2000. La manutenzione urbana e la difesa locale dalle acque alte, il riequilibrio idraulico e fisico della laguna, le prospettive. In: I "rialzi". Quaderni INSULA, 5, pp. 23-33.
- BONDESAN M., CASTIGLIONI G. B., ELMI C., GABBIANELLI G., MAROCCO R., PIRAZZOLI P. A. e TOMASIN A., 1995. Coastal areas at risk from storm surges and sea-level rise in northeastern Italy. *Journal of Coastal Research*, 11 (4), pp. 1354-1379.
- BRAS R. L., HARLEMAN D. R. F., RINALDO A. e RIZZOLI P., 2002. Obsolete? No. Necessary? Yes. The gates will save Venice. *Eos*, 83 (20), pp. 217-224.
- CANESTRELLI P., 1999. Il sistema statistico del Comune di Venezia per la previsione del livello della marea in città. Risultati teorici e in fase operativa. Centro Previsioni e Segnalazioni maree, Venezia, 17 p., 10 fig.
- CANESTRELLI P., CERASUOLO M., CORTE C. e PASTORE F., 1998. La marea a Venezia e l'impatto sulle attività umane. Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, Venezia, 16 p.
- CANESTRELLI P. e COSSUTTA L., 2000. Moto ondoso in Canal Grande. Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, Venezia, 105 p., appendice.
- CANESTRELLI P. e COSSUTTA L., 2001. Moto ondoso in Canal Grande a Punta della Salute nell'anno 2000. Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, Venezia, 82 p.

- CANESTRELLI P., MANDICH M., PIRAZZOLI P. A. e TOMASIN A., 2001. Venti, depressioni e sesse : perturbazioni delle maree a Venezia (1951-2000). Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, Venezia, 105 p.
- COLLEGIO DI ESPERTI DI LIVELLO INTERNAZIONALE, 1998. Report on the mobile gates project for the tidal flow regulation at the Venice lagoon inlets. June, 48 p.
- DO MINH K. e CAZENAVE A., 2001. Niveau moyen de la mer (Topex-Poseidon) & temperature de surgace de l'océan. Carta pubblicata in PIRAZZOLI, 2001, pp. 94-95.
- FOREST C. E., STONE P. H., SOKOLOV A. P., ALLEN M. R. e WEBSTER M. D., 2002. Quantifying uncertainties in climate system properties with the use of recent climate observations. *Science*, 295, pp. 113-117.
- INSULA, 2000. I "rialzi". Quaderni, 5, p. 97 p.
- INSULA, 2002. Progetto Burano. Quaderni, 10, 93 p.
- IPCC, 1990. *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, 365 p.
- IPCC, 1995. *Climate Change 1995 – The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 572 p.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001 – The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 881 p.
- MAGISTRATO ALLE ACQUE, 1997. Studio di impatto ambientale del progetto di massima, Allegato 6, 163 p.
- PIRAZZOLI P. A., 1989. « Effetto serra » e livello marino : quali prospettive per Venezia ? *Ateneo Veneto*, CLXXVI, pp. 7-24 + 9 figure.
- PIRAZZOLI P. A., 2001. L'élévation récente du niveau de la mer et les prévisions pour le XXI^e siècle. In: *Le changement climatique et les espaces côtiers*. Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, Paris, pp.10-13, 94-95.
- PIRAZZOLI P. A., 2002. Did the Italian government approve an obsolete project to save Venice? *Eos*, 83 (20), pp. 217, 223.
- PIRAZZOLI P. A. e TOMASIN A., 1999. L'evoluzione recente delle cause meteorologiche dell' « acqua alta ». *Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti*, CLVII, pp. 317-344.

- PIRAZZOLI P. A. e TOMASIN A., 2002. Recent evolution of surge-related events in the northern Adriatic area. *Journal of Coastal Research*, 18 (3), 537-554.
- SCHNEIDER S. H., 2001. What is 'dangerous' climate change? *Nature*, 411, pp. 17-19.
- UMGIESSER G., 1999. Valutazione degli effetti degli interventi morbidi e diffusi sulla riduzione delle punte di marea a Venezia, Chioggia e Burano. *Atti Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti*, 157, pp. 231-286.
- WIGLEY T. M. L. e RAPER S. C. B., 1992. Implications for climate and sea levels of revised IPCC emissions scenarios. *Nature*, 357, pp.293-300.
- WIGLEY T. M. L. e RAPER S. C. B., 2001. Interpretation of high projections for global mean-warming. *Science*, 293, pp. 451-454.
- ZECCHETTO S., UMGIESSER G. e BROCCINI M., 1997. Hindcast of a storm surge induced by local real wind fields in the Venice lagoon. *Continental Shelf Research*, 17 (12), pp. 1513-1538.

Tabella 1 – Durata degli allagamenti (in ore) in zone urbane di Venezia difese alle quote di +100 cm o di +110 cm, con e senza moto ondoso (± 8 cm di onda significativa), che sarebbero avvenuti ad alcune date del passato, supponendo che il livello marino fosse 50 cm più alto dell'attuale e che il MOSE fosse già stato costruito.

Date	Difese a +100 cm		Difese a +110 cm	
	Con moto ondoso (ore di permanenza ≥ 92 cm)	Senza moto ondoso (ore di permanenza ≥ 100 cm)	Con moto ondoso (ore di permanenza ≥ 102 cm)	Senza moto ondoso (ore di permanenza ≥ 110 cm)
Febbraio 1951 (Fig. 2)	49	33	29	13
Novembre 1966 (Fig. 3, caso A)	51	36	34	27
Novembre 1966 (Fig. 3, caso B)	21	16	15	9
Ottobre 1976 (Fig. 4)	36	18	16	6
Ottobre 1980 (Fig. 5)	28	19	17	9
Dicembre 1981 (Fig. 6)	23	14	12	4

Fig. 1 - Abbassamento in 1 ora del livello marino a Punta della Salute in funzione del dislivello con Diga Sud Lido

(media e intervallo di probabilità 2/3 su 135.607 casi orari dal 1-4-1968 al 31-12-1999)

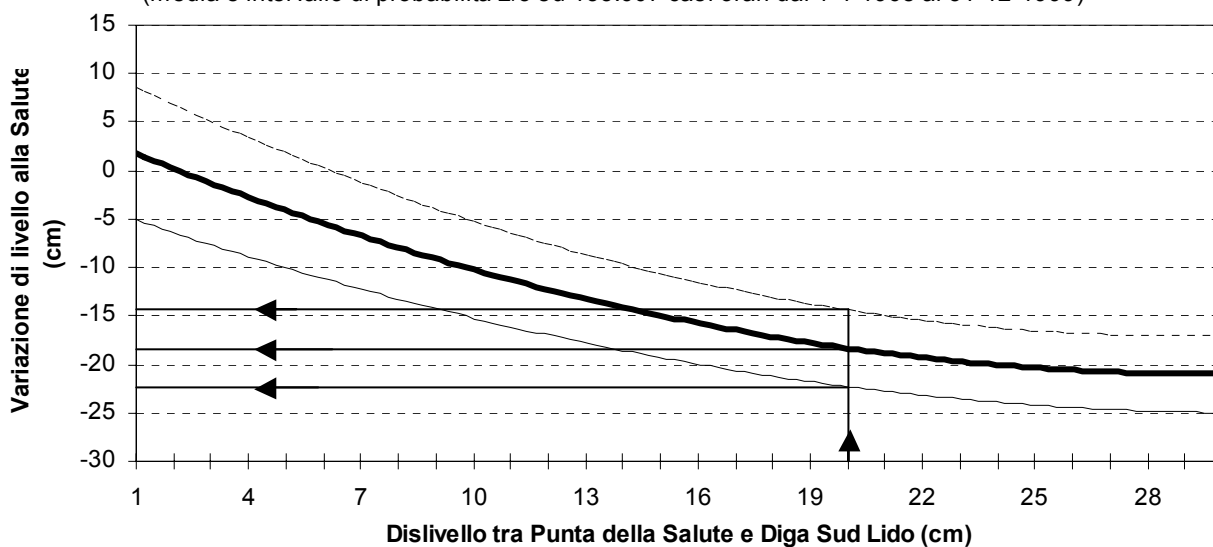


Fig. 2 - Altezze di marea a Venezia dall'11 al 14 febbraio 1951, aumentate di 60 cm. Il livello medio della laguna è stato ottenuto simulando il funzionamento del MOSE

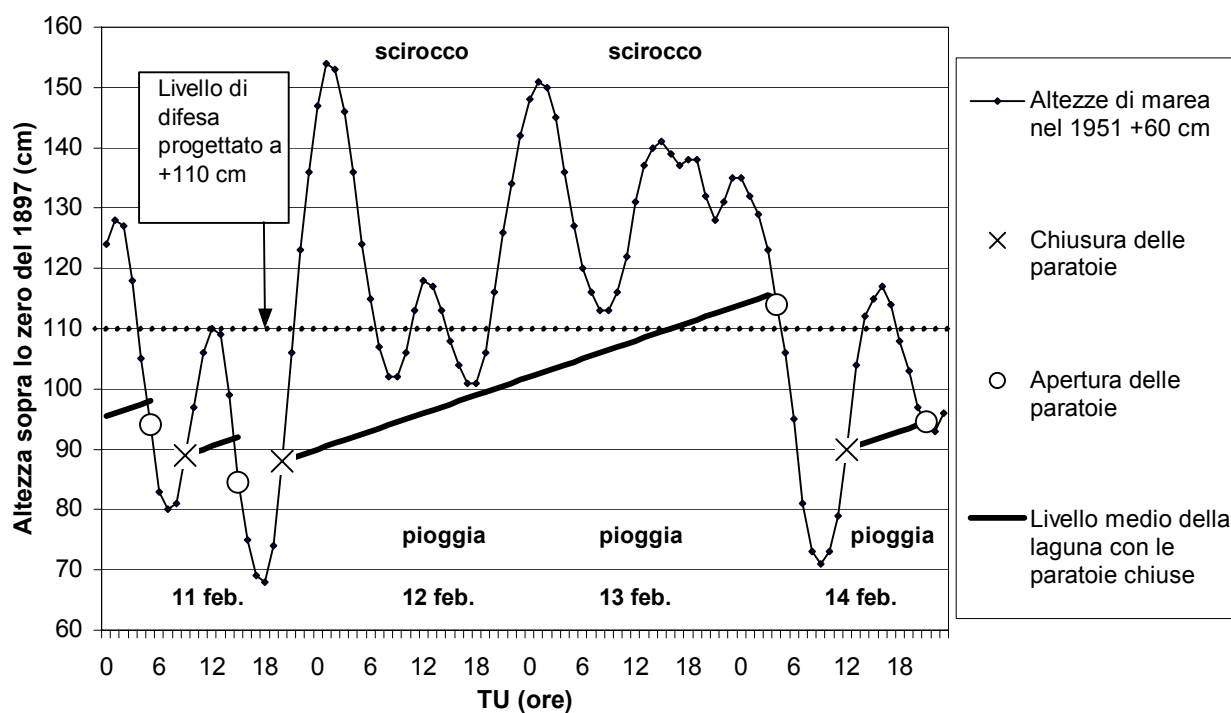


Fig. 3 - Altezze di marea a Venezia dal 2 al 5 novembre 1966, aumentate di 50 cm. Il livello medio della laguna è stato ottenuto simulando il funzionamento del MOSE

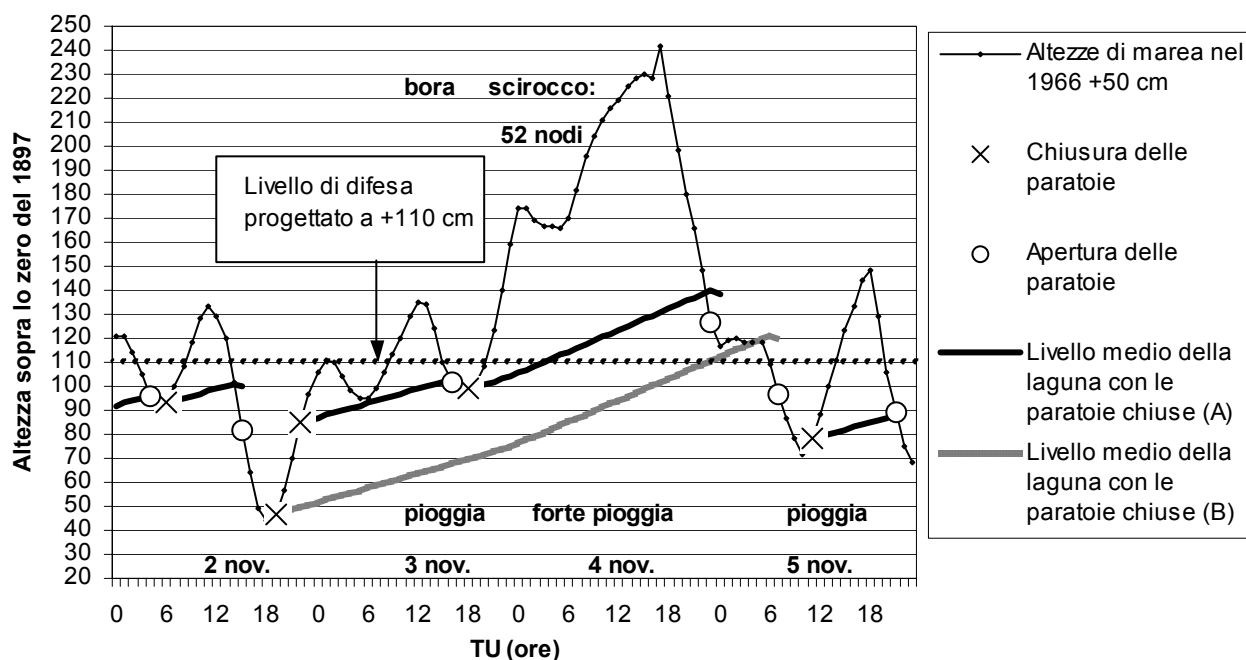


Fig. 4 - Altezze di marea a Venezia il 29-30 ottobre 1976, aumentate di 50 cm. Il livello medio della laguna è stato ottenuto simulando il funzionamento del MOSE

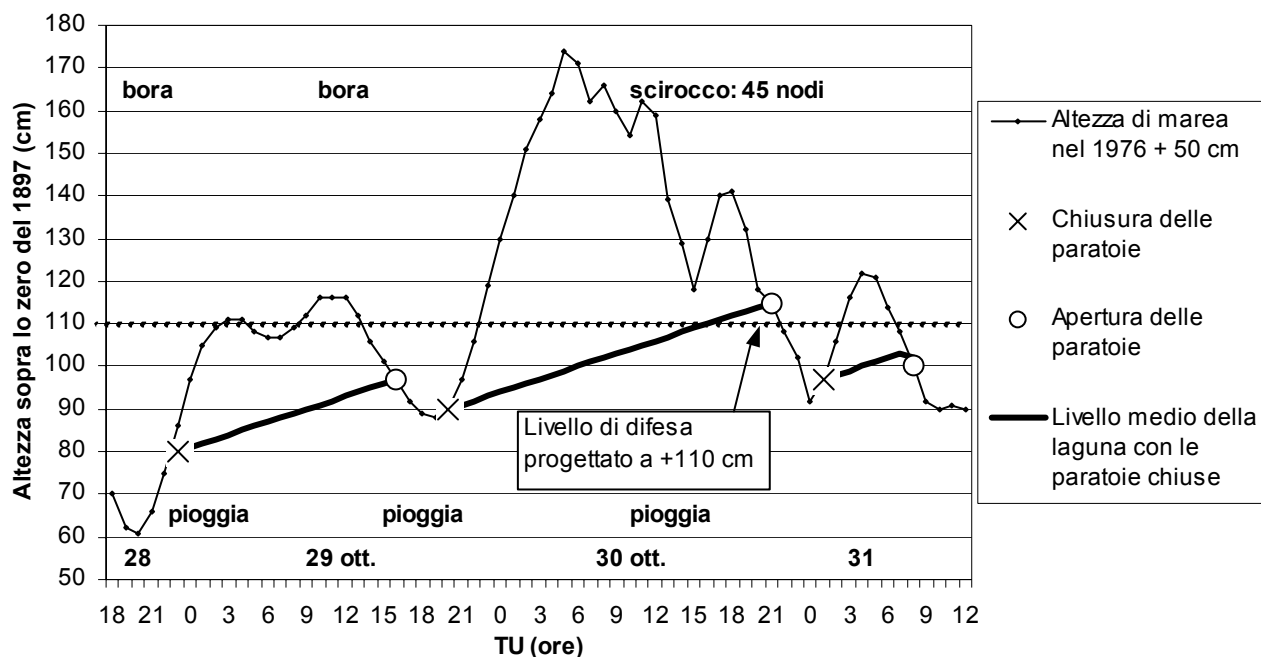


Fig. 5 - Altezze di marea a Venezia dal 15 al 17 ottobre 1980, aumentate di 50 cm. Il livello medio della laguna è stato ottenuto simulando il funzionamento del MOSE

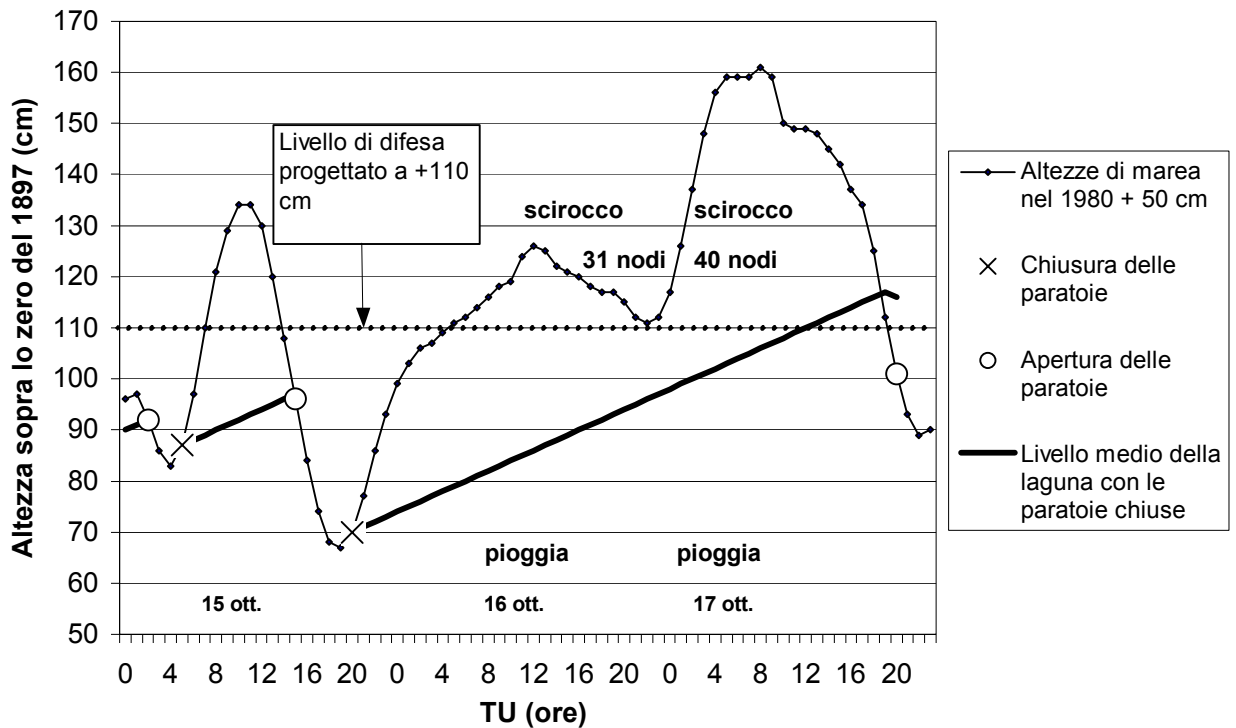


Fig. 6 - Altezze di marea a Venezia dal 17 al 19 dicembre 1981, aumentate di 50 cm. Il livello medio della laguna è stato ottenuto simulando il funzionamento del MOSE

