

Antonio Rusconi ^(*)

ACQUE ALTE CON TEMPO BELLO IN LAGUNA VENETA HIGH WATERS WITH FINE WEATHER IN THE VENETIAN LAGOON

L'altezza della marea nella laguna di Venezia è data dalla sovrapposizione della marea astronomica e della marea meteorologica. Questa, in genere, è determinante per il fenomeno dell'"acqua alta", così convenzionalmente chiamata quando l'altezza dell'acqua supera la soglia di + 110 cm riferiti allo zero mareografico. Le maree inferiori, comprese tra + 80 cm e + 110 cm, vengono chiamate "acque medio-alte": in questo caso a Venezia prossimamente verrà attivato il "sistema insula" per tenere in asciutto la piazza S. Marco. A questo, quando la marea supererà il livello di + 110 cm, si aggiungerà l'attivazione del "sistema Mose". L'articolo ha considerato i valori della marea astronomica dell'anno 2024, pubblicati da Ispra e altri, e li ha adattati ai diversi valori di ipotetica crescita del livello medio del mare che si verificheranno nei prossimi anni, conteggiando l'aumento delle frequenze di superamento delle diverse soglie. Con l'aumento del livello del mare di oltre 20 centimetri, relativamente alla componente astronomica della marea, oltre all'aumento della frequenza di attivazione del "sistema insula", dovrà comunque essere attivato anche il "sistema Mose".

Parole chiave: Laguna veneta, Livello medio mare, Marea astronomica.

The height of the tide in the Venice lagoon is given by the superposition of the astronomical tide and the meteorological tide. This generally determines the 'acqua alta' phenomenon, conventionally called when the height of the water exceeds the threshold of + 110 cm referred to the tidal zero. The lower tides, between + 80 cm and + 110 cm, are called 'medium-high water': in this case in Venice the 'insula system' will soon be activated to keep St. Mark's Square dry. In addition to this, when the tide exceeds the + 110 cm level, the 'Mose system' will be activated. The article considered the astronomical tide values for the year 2024, published by Ispra and others, and adapted them to the different hypothetical values of average sea level rise that will occur in the coming years, counting the increase in the frequencies of exceedances of the different thresholds. As the sea level rises by more than 20 centimetres, in relation to the astronomical component of the tide, in addition to the increase in the frequency of activation of the 'insula system', the 'Mose system' will also have to be activated.

Keywords: Venetian Lagoon, Mean Sea Level, Astronomical Tide.

1. LE ACQUE "MEDIO-ALTE" E LE ACQUE "ALTE"

Lo schema per la difesa di Venezia dalle acque alte, adottato dal Magistrato alle Acque alcuni decenni or sono, ed approvato con Delibera del Comitatone⁽¹⁾, prevede che la chiusura della laguna con le barriere mobili alle bocche di porto lagunari (in seguito MOSE) venga attivata per impedire che il livello di marea in città superi + 110 cm sullo zero mareografico di Punta Salute (in seguito ZMPS⁽²⁾). A tale quota però una parte non trascurabile del Centro Storico (San Marco, Rialto, Cannaregio, ecc.) è moderatamente comunque già allagata dalle cosiddette acque medio alte.

^(*) Ingegnere. Venezia, 1948. Già Direttore del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, Segretario Generale dell'Autorità di Bacino dei fiumi dell'Alto Adriatico e componente della Commissione di Salvaguardia di Venezia.

⁽¹⁾ Il Comitatone è stato istituito con la legge speciale per Venezia n. 171 del 1973. E' presieduto dal Presidente del Consiglio dei Ministri ed è composto da diversi Ministri del Governo, dal Presidente della Regione Veneto, dal Sindaco di Venezia e dai Sindaci dei Comuni della gronda lagunare (Chioggia, Mira, Cavallino, ecc.).

⁽²⁾ Lo Zero Mareografico di Punta Salute è un riferimento altimetrico solidale con il suolo veneziano. La sua variazione nel tempo dipende sia dall'aumento del livello medio del mare, sia della subsidenza del suolo lagunare.



A suo tempo il *Comitatone* stabilì che, a integrazione dell'azione assegnata al MOSE, nel Centro storico veneziano e in alcune isole lagunari (Burano, ecc.) le acque medio-alte, comprese tra + 80 cm e + 110 cm ZMPS, dovessero essere fermate con il sistema delle *insulae*, difese locali realizzate nei singoli isolotti cittadini con sistemi di adattamento non impattanti: modesto sopralzo dei pavimenti, sistemazione e regolazione dei sistemi di fognatura, impermeabilizzazione dei muri, impianti di sollevamento locali, ecc..

Da alcuni mesi sono iniziati i lavori da parte del Ministero delle Infrastrutture finalizzati alla difesa idraulica di una parte dell'*insula* di San Marco. Si tratta di un complesso di iniziative finalizzate alla difesa idraulica di un intorno della piazza omonima, compresa la Basilica, per la protezione di una fascia della marea compresa tra + 70 ≈ 80 cm e + 110 cm ZMPS.

Il progetto, in sintesi, prevede la creazione di una “cintura” di difese idrauliche attorno all'*insula* considerata. Comprende il rialzo di alcuni pavimenti, l'impermeabilizzazione di alcuni muri periferici, la chiusura di valvole per impedire la risalita della marea attraverso le condotte fognarie, l'attivazione di pompe per l'espulsione dell'acqua piovana e di quella marina comunque infiltrata, alcune modeste barriere modulari removibili lungo la riva lagunare della piazza, paratie removibili nelle finestre del Patriarcato poste in rio della Canonica a quota sommergibile, barriere anti onde nel molo S. Marco e la creazione di un Centro operativo in presidio continuo (*Consorzio Venezia Nuova et al.*, 2020)⁽³⁾.

Alla conclusione dei lavori il sistema di difesa idraulica dell'*insula* S. Marco risulterà il seguente (rif. ZMPS):

- Maree < + 70 cm: l'altimetria dell'*insula* non richiede alcuna difesa idraulica (tranne la basilica di S. Marco, recentemente difesa da sistemi di difesa per maree ≥ + 60 cm e da una vetrata posta a difesa della facciata).
- Maree > + 70 cm e < + 110 cm: sistema di difesa *insula*.
- Maree > + 110 cm: sia sistema di difesa *insula* e sia attivazione del MOSE.

Nel presente studio si assume, per comodità, che l'attivazione del sistema *insula* avvenga al raggiungimento della quota di marea ≥ + 80 cm ZMPS.

2. LA MAREA IN LAGUNA DI VENEZIA

Va specificato che i valori della marea registrati nella città di Venezia e nella laguna non sono riferiti all'attuale livello medio del mare (in seguito LMM), né allo zero della *Rete Altimetrica dello Stato* (in seguito RAS), ma allo ZMPS, calcolato, nei primi anni del '900, sul periodo di osservazioni di 25 anni attorno all'anno centrale 1897. Tale riferimento è solidale con il suolo veneziano e quindi, con il trascorrere degli anni, le rilevazioni mareografiche tengono conto sia della crescita del livello del mare, sia del fenomeno di abbassamento del terreno dovuto alla subsidenza.

Ovviamente la quota dello ZMPS, indicata materialmente con un caposaldo fissato sul suolo veneziano, col trascorrere degli anni, si è gradualmente abbassata rispetto alla RAS. Il vantaggio di tale misurazione è che, a distanza di molti decenni, un certo livello di marea (ad esempio + 110 cm rispetto allo ZMPS) allaga approssimativamente le medesime superfici delle calli e dei campi veneziani, essendo peraltro variata, nel corso degli anni, la frequenza degli stessi allagamenti (*ISPRA et al.*, 2024).

Dalla fine del '800 ai nostri giorni (anno 2024) a Venezia il livello misurato secondo lo ZMPS (comprendendo quindi anche della subsidenza del terreno) è cresciuto di circa 33 cm. Il confronto con l'andamento della curva registrata dal mareografo di Trieste (molo Sartorio), dove non c'è il fenomeno della subsidenza, consente di distinguere i due contributi della crescita del LMM rispetto alla RAS e quello dovuto alla subsidenza del terreno. Questo è ben rappresentato nella *Figura 1*, pubblicata nel 2022 nel Box 13.1 del 6^a Rapporto dell'IPCC (*IPCC*, 2022).

Negli anni '20 del secolo scorso l'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque iniziò la pubblicazione delle curve di marea astronomica per Venezia. Ai nostri giorni la pubblicazione annuale continua a cura dell'ISPRA, Comune di Venezia e CNR (*Cordella et al.*, 2010).

Il metodo usato per calcolare il livello $y(t)$ per la previsione della marea astronomica è l'analisi per componenti armoniche: con questo metodo per avere il livello a un certo istante, si sommano i valori

⁽³⁾ Il Progetto definitivo degli “Interventi di salvaguardia dell'*insula* di Piazza San Marco a Venezia” è stato discusso e approvato dalla Commissione di Salvaguardia di Venezia nell’ottobre 2020.

assunti in quell'istante da alcune curve sinusoidali (di coseno, secondo le convenzioni). Al tutto si aggiunge il livello medio di riferimento (A_0) secondo la relazione:

$$y(t) = A_0 + \sum_i^8 A_n \cos(\omega_n t - \varphi_n)$$

dove A_n è l'ampiezza, ω_n indica la velocità angolare e φ_n il ritardo di fase. La variabile t indica il tempo in ore relativo alla valutazione che si vuole fare a partire dalle ore 1 del 1 gennaio fino a $t = 8760$ alle ore 24 del 31 dicembre di quell'anno. Il calcolo della marea si effettua mediante le "costanti armoniche" (A e φ) di ciascuna componente per la località scelta. A Venezia (Punta Salute) si considerano 8 "costanti armoniche": quattro "semidiurne" (M_2, S_2, N_2, K_2) e 4 diurne (K_1, O_1, P_1, S_1) i cui valori, opportunamente aggiornati, sono riportati nelle richiamate tavole (ISPRA et al., 2024).

Box 13.1 (continued)

Protecting Venice from sea level rise and coastal flooding

(a) Observed relative sea level rise and flood events in Venice

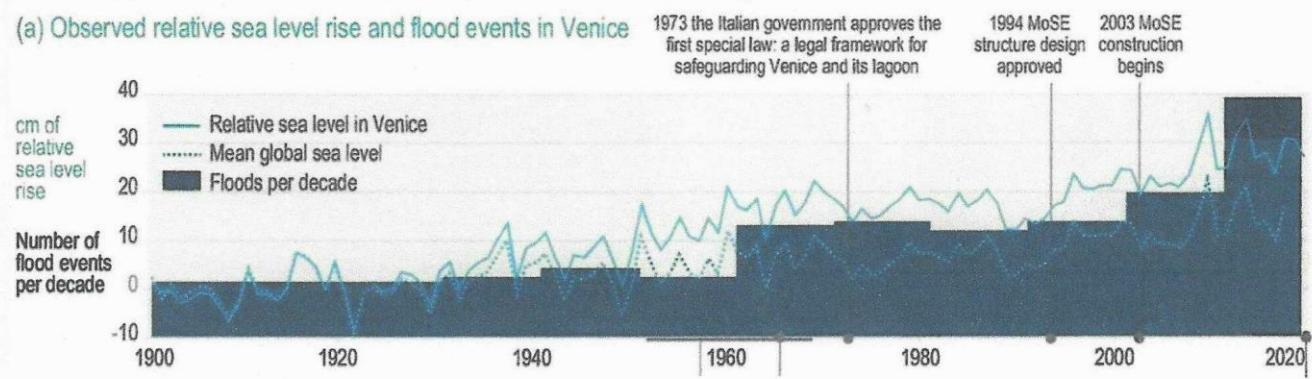


Figura 1 - Confronto tra l'innalzamento del livello del mare globale e quello relativo osservato a Venezia. Protezione della città dall'innalzamento del livello del mare e dalle inondazioni costiere (IPCC, 2022).

Le maree sono generalmente di tipo semidiurno, ciò significa che nelle 24 ore si registrano due valori di alta marea e due di bassa marea. Nel periodo di novilunio o di plenilunio (sizigie) le maree presentano le massime ampiezze e la massima regolarità; al contrario, nei periodi di primo e di ultimo quarto di luna (quadrature) alcune maree si presentano con una sola alta e una sola bassa marea nelle 24 ore, risultando meno ampie e meno regolari: diventano, cioè, diurne.

3. LO STUDIO

I ragionamenti del presente studio sono costruiti sulla ipotesi "immaginaria" che la marea reale coincida tutti i giorni dell'anno con la marea astronomica: ciò, a rigore, non trova riscontri pratici (Fig. 2), se non in rare situazioni meteo-marine. L'analisi che ne è derivata può costituire comunque uno strumento utile per aiutare ad affrontare le situazioni della marea lagunare reale al crescere del livello medio del mare nei prossimi decenni.

Le considerazioni che seguono hanno assunto come riferimento le "Previsioni di marea per il bacino San Marco" dell'anno 2024 pubblicate da ISPRA e altri (ISPRA et al., 2024). Hanno compreso, per differenti ipotetici aumenti del LMM, le stime delle future situazioni della marea astronomica con la conseguente entrata in funzione sia delle difese locali dalle acque medio-alte (con l'attivazione del sistema dell'*insula* di S. Marco), sia della difesa della laguna dalle acque alte mediante l'azionamento del MOSE (in esercizio dal 2020). Le due situazioni considerano, a partire dai giorni nostri (anno 2024) e nelle future diverse ipotesi di aumenti del LMM, rispettivamente le due condizioni di superamento delle marea astronomiche per livelli $\geq + 80$ cm ZMPS (attivazione del sistema *insula*) e $\geq + 110$ cm ZMPS (attivazione del sistema MOSE).

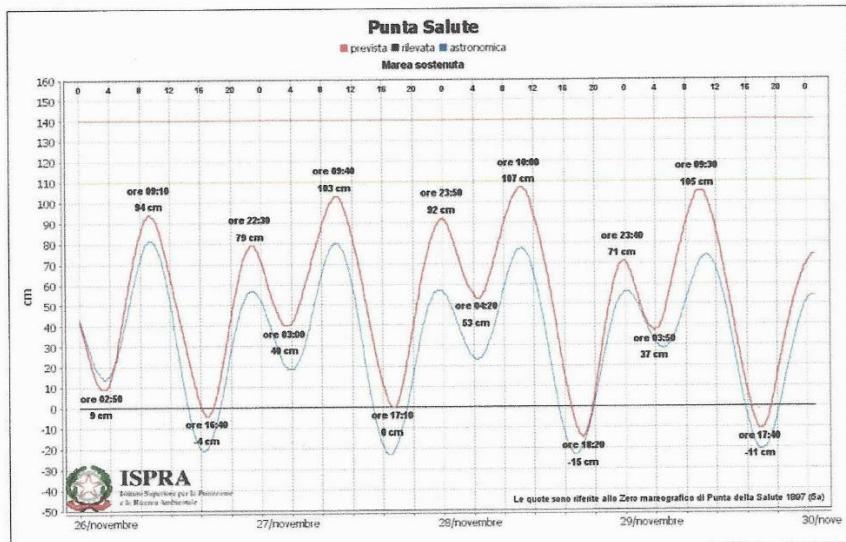


Figura 2 - Le previsioni di marea giornaliere pubblicate da ISPRA valide per i 5 giorni dal 26 al 30 novembre 2023. In blu l'andamento della marea astronomica. In rosso la previsione della marea reale, risultante dalla somma della marea astronomica e dei sopralzi dovuti a fattori meteorologici (pressione barica, vento, sese adriatiche, ecc.).

Le curve di marea astronomica del 2024 considerate indicano 1358 valori estremali di alta e bassa marea distribuiti nei 12 mesi dell'anno. Il valore medio è risultato di 33,54 cm, a conferma del valore del LMM misurato secondo il riferimento veneziano ZMPS dell'anno 2024. Si tratta del valore più significativo dell'innalzamento relativo del LMM in laguna veneta a partire dal 1897: solo nel 2009 il valore era pari a 23 cm (Cordella et al., 2010), confermando che negli ultimi 15 anni a Venezia il mare è cresciuto di circa 10 cm (subsidenza compresa).

Ai nostri giorni le alte maree astronomiche di livello $\geq + 80$ cm ZMPS si verificano anche in condizioni meteorologiche normali, senza alcun contributo meteorologico e con mare tranquillo (Rusconi, 2021). Nel corso dell'anno 2024, ciò si verifica in 54 casi, con raggiungimento del valore massimo di + 87 cm ZMPS in due eventi (8 aprile e 6 maggio). La frequenza di questi casi aumenterà nei prossimi anni, fino a mettere in difficoltà il Centro Storico veneziano e alcune isole lagunari e la stessa gestione e il funzionamento del sistema *insula*.

Diversamente, le alte maree $\geq + 110$ cm ZMPS ai nostri giorni non si verificano per la sola marea astronomica. Ma, al crescere del LMM, nei prossimi anni tale valore sarà raggiunto comunque, anche per la marea astronomica, tanto da richiedere l'azionamento del sistema MOSE malgrado le condizioni meteo normali e con mare tranquillo⁽⁴⁾. A titolo illustrativo le Figure 3 e 4 mostrano gli allagamenti dovuti a due casi di acque medio-alte, rispettivamente in Piazza e in Piazzetta San Marco, il 16.10.2024 (+ 90 cm ZMPS) e il 20.10.2024 (+ 80 cm ZMPS).



Figure 3 e 4 - L'acqua medio-alta di + 90 cm ZMPS il 16.10.2024 in Piazza S. Marco; + 80 cm ZMPS il 20.10.2024 in Piazzetta S. Marco. (Foto dell'Autore).

⁽⁴⁾ Non sembra inutile ricordare che l'eccezionale insuperata acqua alta del 4 novembre 1966 (+194 cm ZMPS) si è verificata con una marea di quadratura.

4. LE MAREE ASTRONOMICHE DI ALTEZZA $\geq + 80$ CM CON I PROSSIMI AUMENTI DEL LMM

Una prima valutazione ha compreso il conteggio dei colmi di marea di altezza $\geq + 80$ cm ZMPS, mensili e annui, per diversi aumenti del LMM a partire dalla situazione odierna dell'anno 2024 (valore 0) fino al valore $+ 110$ cm con passo 10 cm (Fig. 5). È stato anche indicato l'aumento del LMM di $+111$ cm, soglia oltre la quale tutti i 1358 valori estremali di marea sono $\geq + 80$ cm ZMPS.

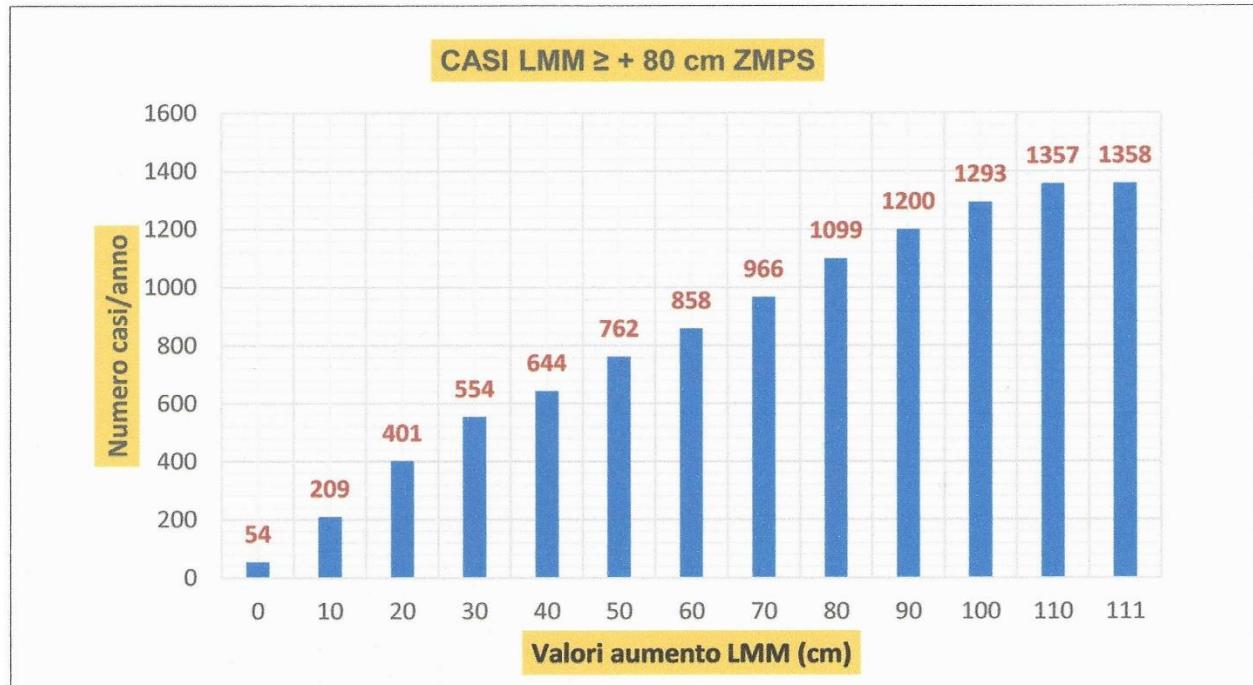


Figura 5 - Eventi annui di marea astronomica $\geq + 80$ cm ZMPS conseguenti ad incrementi di 10 cm del LMM a partire dalla situazione dei nostri giorni (2024).

Con l'aumento dei prossimi 10 cm del LMM rispetto alla situazione di oggi (54 casi), le attivazioni del sistema *insula*, nell'ipotesi di coincidenza “marea-manovra” per livelli $\geq + 80$ cm ZMPS, aumentano a 209 casi/anno. A partire dall'aumento del LMM dei successivi 20 cm, i casi diventano 401, superando mediamente un caso al giorno. A partire da questa situazione quindi, durante tutti i giorni dell'anno sarà necessario – in media – il continuo mantenimento attivo del sistema *insula*.

Con l'aumento del LMM di 50 cm, i 762 casi annui $\geq + 80$ cm ZMPS si verificano in media 2 volte al giorno.

Negli anni in cui l'aumento del LMM avrà superato i 70 cm la frequenza delle alte maree astronomiche tenderà a verificarsi mediamente 3 volte al giorno (966 casi).

Al crescere ulteriore del LMM di 80, 90 e 100 cm i livelli di alta marea $\geq + 80$ cm ZMPS raggiungono rispettivamente 1099, 1200 e 1293 casi (oltre il 90%).

Il quadro si completa con l'aumento del LMM di 111 cm con il 100% dei casi di alta marea $\geq + 80$ cm ZMPS.

Ovviamente gli estremi di marea conteggiati per valori $\geq + 80$ cm ZMPS (Fig. 5) non comprendono solo valori di alta-marea: all'aumentare del LMM entrano gradualmente nell'elenco anche i valori estremi di bassa-marea. Ai fini pratici, cioè per l'attivazione del sistema *insula* e della stima della sua durata, interessa conoscere l'estensione temporale delle condizioni di livello $\geq + 80$ cm ZMPS.

A tale fine è stato adottato il concetto di *Permanenza della Marea Medio-Alta* (in seguito PMMA_n) per indicare l'entità della durata del livello di marea astronomica al di sopra del livello $+ 80$ cm ZMPS senza alcuna interruzione.

Si è assunta l'ipotesi (teorica) che il sistema *insula* venga attivato all'inizio di ogni PMMA_n, cioè nel momento in cui la marea raggiunge e supera (\geq) la soglia di $+ 80$ cm ZMPS, e sia disattivato alla fine della PMMA_n, quando la marea scende al di sotto ($<$) di tale soglia. Nelle condizioni attuali (anno



2024), ciascuna PMMA_n comprende un unico valore di massimo di marea (“colmo”) e pertanto viene attribuito l’indice “1” al pedice (in seguito PMMA₁). La sua durata non supera le 3-5 ore. All’aumentare del LMM, ogni PMMA₁ si dilata anche temporalmente e gradualmente aumenta la sua durata di diverse ore; oltre determinate soglie, soprattutto nelle fasi di quadratura, alcune PMMA_n modificano le proprie caratteristiche: si estendono fino a unirsi con la successiva alta marea (cioè la successiva PMMA_n) “catturando” il valore intermedio della “bassa” marea. In questo caso quindi la PMMA_n comprende 3 valori consecutivi di valori estremi di alta-bassa-alta marea e verrà indicato con il nuovo indice PMMA₃.

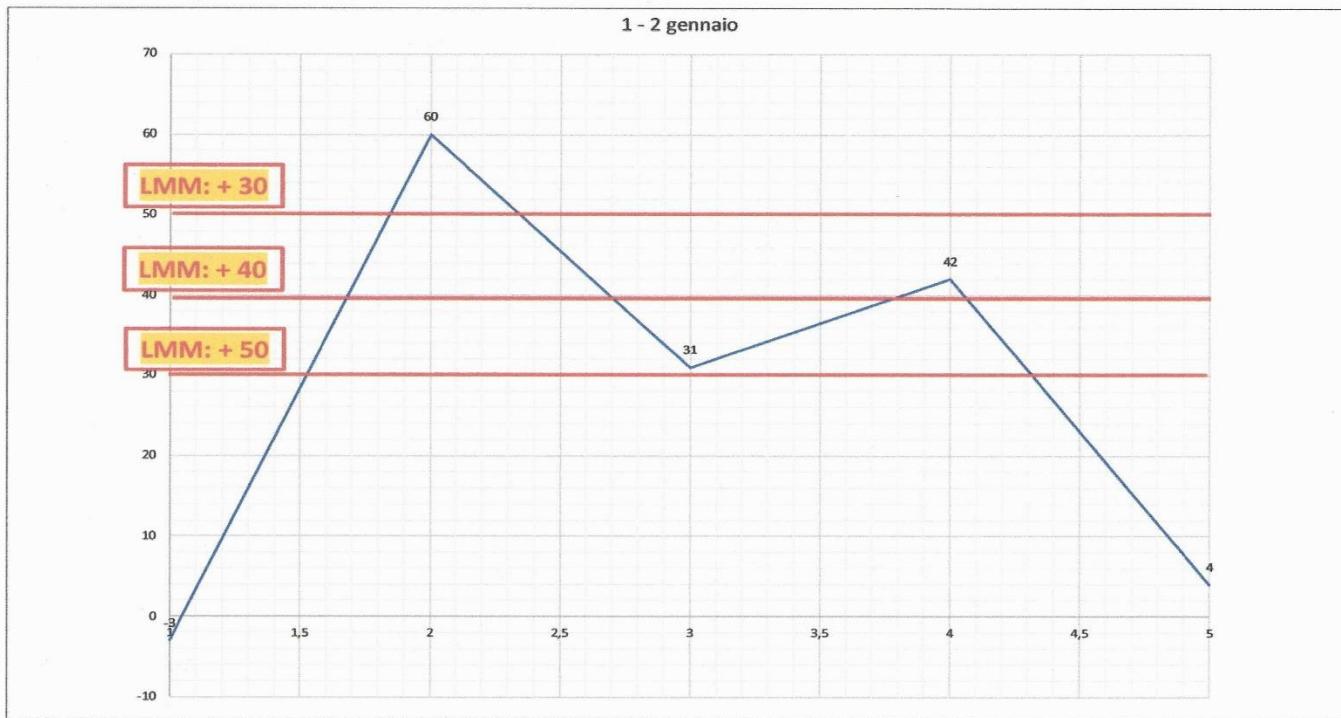


Figura 6 - Previsioni di marea astronomica 2024, dalle 19,40 del 1^o gennaio alle 20,05 del giorno successivo. Con l'aumenti del LMM di 30, 40 e 50 cm si osserva inizialmente una PMMA₁, di circa 3 ore, poi se ne formano due (dure rispettivamente di 6 e 1 ora) e quindi, con una crescita del LMM di 50 cm, una PMMA₃ di durata di oltre 16 ore.

All’aumentare del LMM, aumenterà il numero delle PMMA_n che si associeranno coinvolgendo le intermedie basse maree. Avremo così una sequenza di PMMA₅, PMMA₇, ... PMMA₂₁, ... ecc., sempre di indice dispari, ad eccezione dell’aumento del LMM di 111 cm, con tutti i 1358 valori dei colmi riuniti in una unica PMMA₁₃₅₈ di indice pari e durata annuale: la marea astronomica sarà sempre superiore a + 80 cm ZMPS, e il sistema *insula* dovrà ovviamente funzionare continuamente, senza interruzioni: ma, probabilmente, Venezia, la laguna e la costa alto-adriatica, se ancora esistenti, saranno difesi in altro modo! La Figura 6 mostra un esempio chiarificatore dello schema adottato: viene indicata la previsione di marea astronomica 2024, dal valore minimo delle 19,40 del 1^o gennaio 2024 (-3 cm) al valore minimo delle 20,05 del giorno successivo (4 cm). In tale intervallo temporale di durata di circa 27 ore, nell’anno 2024 la marea si presenta sempre < + 80 cm ZMPS, quindi non c’è nessuna PMMA_n.

L’esempio mostra 3 casi di crescita del LMM: + 30, + 40 e + 50 cm:

- con la crescita del LMM di + 30 cm si osserva una PMMA₁ (durata ≈ 3 ore con un massimo di marea di + 90 cm ZMPS).
- con la crescita del LMM di + 40 cm si verificano due PMMA₁, quella precedente amplificata (durata oltre 6 ore con massimo di marea di + 100 cm) e quella “nuova” (durata poco più di 1 ora con massimo mareale di + 82 cm ZMPS).
- con la crescita del LMM di + 50 cm le due PMMA₁ si sono riunite in un’unica PMMA₃ che ha “catturato” il minimo mareale di + 81 cm ZMPS. La durata è cresciuta notevolmente fino a ≈ 16 ore.

La Tabella I riporta il numero delle differenti PMMA_n (1^a colonna) conteggiate nell'ambito dei vari aumenti del LMM (1^a riga), di passo 10 cm, a partire dalla situazione odierna (anno 2024: valore 0). L'analisi della tabella mostra che:

- ^ per aumenti del LMM fino a + 30 cm, si presentano solo situazioni di PMMA₁;
- ^ Con gli aumenti del LMM di + 40, + 50 e + 60 cm, oltre alle PMMA₁, in diminuzione, si verificano anche alcuni casi di PMMA₃ in crescita.
- ^ Una significativa situazione verrà a crearsi con l'aumento del LMM di + 70 cm: con una netta diminuzione delle PMMA₁, un ulteriore aumento delle PMMA₃ e la comparsa di 3 PMMA₅, 3 PMMA₇, 4 PMMA₉, 5 PMMA₁₁ e 2 PMMA₁₃.
- ^ La successiva crescita del LMM di + 80 cm vede 2 PMMA₁₃, 1 PMMA₁₅, 11 PMMA₁₇, 3 PMMA₁₉, 4 PMMA₂₁, 1 PMMA₂₃, 2 PMMA₂₅, e 1 PMMA₂₇.
- ^ Con l'aumento del LMM di + 90 cm si verifica la comparsa di nuove PMMA_n con gli indici 21, 23, 25, 27, 29, 33, ... 39, 93, ...101.
- ^ Con gli aumenti del LMM rispettivamente di +100 e +110 cm compaiono rispettivamente le PMMA₉₉, PMMA₂₁₃, PMMA₃₁₉, e quindi PMMA₆₀₄ e PMMA₇₅₃. Ovviamente con l'aumento del LMM di + 111 cm avremo un'unica PMMA₁₃₅₈: anche il minimo di marea astronomica del 22 luglio, oggi pari a -31 cm ZMPS, sarà ≥ + 80 cm ZMPS.

Tabella I - Numero delle differenti PMMA (1^a colonna) conteggiate nell'ambito dei vari aumenti del LMM (1^a riga), di passo 10 cm, a partire dalla situazione odierna (anno 2024: valore 0). Con l'aumento del LMM di 111 cm, anche il minimo di marea astronomica del 22 luglio, oggi pari a - 31 cm, sarà ≥ + 80 cm ZMPS

	0	+10	+20	+30	+40	+50	+60	+70	+80	+90	+100	+110	+111
< +80 cm _{ZMPS}	1304	1149	957	804	714	596	500	392	259	158	65	1	-
≥ +80 cm _{ZMPS}	54	209	401	554	605	483	321	156	36	-	-	-	-
PMMA ₁	54	209	401	554	605	483	321	156	36	-	-	-	-
PMMA ₃	-	-	-	-	13	93	179	219	198	134	49	-	-
PMMA ₅	-	-	-	-	-	-	-	3	-	1	-	-	-
PMMA ₇	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-
PMMA ₉	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-
PMMA ₁₁	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-
PMMA ₁₃	-	-	-	-	-	-	-	2	2	-	-	-	-
PMMA ₁₅	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
PMMA ₁₇	-	-	-	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-
PMMA ₁₉	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-
PMMA ₂₁	-	-	-	-	-	-	-	-	4	1	-	-	-
PMMA ₂₃	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
PMMA ₂₅	-	-	-	-	-	-	-	-	2	7	-	-	-
PMMA ₂₇	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	-	-	-
PMMA ₂₉	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-
PMMA ₃₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
PMMA ₃₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2	-	-
PMMA ₃₅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
PMMA ₃₇	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	3	-	-
PMMA ₃₉	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
PMMA ₄₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-
PMMA ₄₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PMMA ₄₅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-
PMMA ₄₇	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PMMA ₄₉	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PMMA ₉₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PMMA ₉₉	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PMMA ₁₀₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PMMA ₂₁₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PMMA ₃₁₉	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PMMA ₆₀₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PMMA ₇₅₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PMMA ₁₃₅₈	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1



5. LE MAREE ASTRONOMICHE DI ALTEZZA $\geq + 110$ CM CON I PROSSIMI AUMENTI DEL LMM

Con l'aumento del LMM di + 23 cm, in tre casi: 8 aprile, 6 maggio e 17 ottobre, si raggiunge il livello + 110 cm ZMPS. Ciò comporterà l'attivazione del sistema MOSE a causa della sola alta marea astronomica (e normali condizioni meteo-marine). A partire dal LMM + 30 cm (*Tab. II*) si verificheranno 54 casi di marea $\geq + 110$ cm ZMPS all'anno (4^a colonna). Ovviamente questo valore coincide con i casi attuali $\geq + 80$ cm ZMPS. Anche i successivi 12 casi della 4^a colonna coincidono con i casi della 3^a colonna, traslati di 30 cm.

Tabella II - Per diversi aumenti del LMM, ad iniziare dalla situazione attuale (1^a colonna): valori del LMM rispetto lo ZMPS (2^a colonna); numero di casi di superamento della marea astronomica $\geq + 80$ cm ZMPS (3^a colonna) e $\geq + 110$ cm ZMPS (4^a colonna). Per $\Delta\text{LMM} = + 23$ cm iniziano 3 casi di massimi $\geq + 110$ cm ZMPS e, per per $\Delta\text{LMM} = + 141$ cm questi casi si verificano sempre (1358 casi).

ΔLMM	I.m.m. rispetto ZMPS (cm)	Casi $\geq + 80$ cm (Insula)	Casi $\geq + 110$ cm (Mose)
0	33,5	54	0
+10	43,5	209	0
+20	53,5	401	0
+23	56,5	447	3
+30	63,5	554	54
+40	73,5	644	209
+50	83,5	762	401
+60	93,5	858	554
+70	103,5	966	644
+80	113,5	1099	762
+90	123,5	1200	858
+100	133,5	1293	966
+110	143,5	1357	1099
+111	144,5	1358	1108
+120	153,5	1358	1200
+130	163,5	1358	1293
+140	173,5	1358	1357
+141	174,5	1358	1358

La *Figura 7* indica le due serie di valori di marea astronomica nei due casi rispettivamente di superamento della quota $\geq + 80$ cm ZMPS e $\geq + 110$ cm ZMPS. Si evidenzia la rilevanza della prossima crescita del LMM di 23 cm, soglia oltre la quale dovranno funzionare contemporaneamente sia il sistema Mose (3 casi/anno), sia il sistema insula (447 casi/anno).

Con l'aumento del LMM di + 50 cm, i casi di marea astronomica $\geq + 110$ cm ZMPS saranno 401; quindi il MOSE dovrà essere attivato mediamente ogni giorno. Quando il LMM supererà + 70 cm, la frequenza di sollevamento delle paratoie sarà necessaria 2 volte al giorno. La tabella indica anche il sollevamento del LMM di + 141 cm: quando ciò accadrà la marea astronomica sarà perennemente superiore al livello di + 110 cm ZMPS.

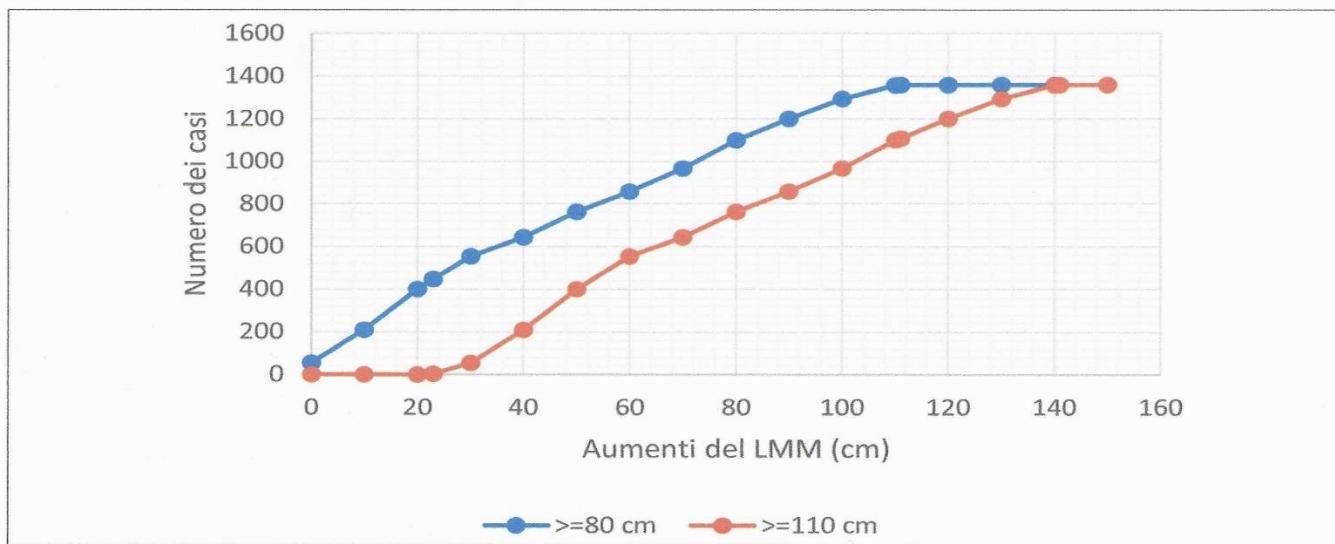


Figura 7 - Eventi annui di marea astronomica $\geq + 80$ cm ZMPS (curva azzurra) e $\geq + 110$ cm ZMPS (curva arancio) come riportati nella Tabella II.



Analogamente all'introduzione delle PMMA_n analizzate con le maree $\geq + 80$ cm ZMPS, al fine di analizzare le durate delle maree $\geq + 110$ cm ZMPS viene adottato il concetto di *Permanenza della situazione di acqua-alta* (in seguito PSAA_n).

Può essere interessante mettere a sistema entrambe le situazioni delle permanenze PMMA_n con le PSAA_n (funzionamento sia del *sistema insula* sia del *sistema MOSE*) con l'aumento del LMM di + 23 cm. In tale scenario si avranno 447 PMMA₁ e 3 PSAA₁. In termini pratici il sistema insula dovrà essere attivo mediamente ogni giorno, a cui si dovrà aggiungere, rispettivamente agli inizi di aprile e di maggio e a metà ottobre, anche l'attivazione del MOSE.

6. CONCLUSIONI

Le considerazioni dei paragrafi precedenti, nell'ipotesi "immaginaria" che la marea reale coincida con quella astronomica, possono costituire un utile esercizio numerico per mostrare le prossime situazioni mareali che comunque si potranno verificare, oltre ovviamente ai contributi portati dalle condizioni atmosferiche e meteorologiche che ne influenzano i valori, anche in maniera considerevole.

Per quanto riguarda la frequenza delle maree *medio-alte* e quindi l'attivazione del sistema *insula* S. Marco, si è visto che l'attuale frequenza settimanale di superamento del livello $\geq + 80$ cm ZMPS, pari a 54 casi/anno, si quadruplica con l'aumento del LMM di + 10 cm (209 casi/anno). Con l'aumento del LMM di + 20 cm la frequenza media diventerà giornaliera, consentendo comunque una pausa ad ogni bassa marea.

A cominciare dall'aumento del LMM di + 70 cm le PMMA_n comprenderanno anche alcune fasi di basse maree, aumentando sensibilmente i tempi di permanenza del livello $\geq + 80$ cm ZMPS, quindi con il funzionamento del sistema *insula*. Quando l'aumento del LMM supererà il metro, la permanenza della marea medio-alta $\geq + 80$ cm ZMPS sarà perenne, e la sostenibilità del sistema *insula* sarà oltremodo complessa e onerosa. Rimane inoltre irrisolto il problema delle altre numerose *insulae* del centro storico e degli altri centri lagunari e circum-lagunari (Murano, Burano, Giudecca, Lido, Pellestrina, Treporti, ecc.).

L'attivazione del MOSE per maree astronomiche, con il raggiungimento di livelli mareali $\geq + 110$ cm ZMPS, inizierà con l'aumento del LMM di + 23 cm, con tre casi/anno, per aumentare gradualmente fino a + 140 cm di crescita, quando la chiusura idraulica della laguna dovrà essere perenne (bocche portuali sempre chiuse).

A cominciare dall'aumento del LMM di + 70 cm le PSAA_n comprenderanno anche alcune fasi di basse maree, aumentando sensibilmente i tempi di permanenza del livello $\geq + 110$ cm ZMPS, quindi di funzionamento del sistema MOSE.

La crescita del LMM di + 23 cm vedrà così la contestuale attivazione di entrambi i sistemi *insula* (447 casi/anno) e MOSE (3 casi/anno), dando così inizio ad una nuova fase di difesa idraulica "combinata" dei centri storici veneziano e lagunari per cause solamente astronomiche.

Un'ultima considerazione riguarda la stima di quando ciò potrà verificarsi. L'ultimo Rapporto AR6 dell'IPCC ha introdotto cinque possibili scenari "SSP" (*Shared Socioeconomic Pathways*) conseguenti a differenti politiche climatiche, proponendo i possibili futuri scenari di aumento del LMM, sia a livello globale, sia nella regione mediterranea (IPCC, 2022).

E difficile prevedere quali potranno essere le emissioni più probabili e quindi proporre il periodo in cui l'aumento del LMM, nell'area veneziana, raggiungerà la soglia dei + 20-23 cm rispetto ai nostri giorni. Ipotizzando ottimisticamente di estendere ai prossimi anni l'attuale tasso di crescita del LMM del fenomeno, comprensivo dell'eustatismo e della subsidenza, pari a + 4,3 mm/anno, nel corso del decennio 2050/2060, la marea *astronomica* avrà raggiunto e superato tale situazione. Senza trascurare, ovviamente, le reali insidie causate dalla marea *meteorologica*.

Acronimi

AM – Alta Marea.

IPCC – International Panel on Climate Change.

LMM – Livello Medio del Mare.

MOSE – Modulo Sperimentale Elettromeccanico.

PMMA_n – Permanenza della marea medio-alta.

PSAA – Permanenza della situazione di acqua-alta.

RAS – Rete Altimetrica dello Stato.

SSP – Shared Socioeconomic Pathways.

ZMPS – Zero Mareografico di Punta Salute.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Consorzio Venezia Nuova, Kostruttiva Scpa, Thetis S.p.A., MATE engineering, 2020. *Interventi di salvaguardia dell'isola di Piazza San Marco a Venezia*. Progetto definitivo. Febbraio.

Cordella M., Zampato L., Pastore F., Tomasin A., Canestrelli P., Ferla M., 2010. *Le tavole annuali di marea per Venezia*. Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti. Tomo CLXIX (2010-2011) – Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali. Venezia

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2022. *Sixth Assessment Report, AR6. Working Group II Contribution, Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Chapter 13 Europe. Box 13.1: Venice and Its Lagoon, pagg 1828-1829.

ISPRA, CPSM, CNR-ISMAR, 2024. *Previsione delle altezze di marea per il bacino San Marco e delle velocità di corrente per il canale porto si Lido – Laguna di Venezia. Valori astronomici*,

Rusconi A., 2021 *Innalzamento del livello marino a Venezia: necessarie nuove misure di adattamento*. Nimbus, Rivista della Società Meteorologica Italiana ONLUS. Anno XXIX – N.2, luglio-dicembre.