



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

**IL PROCESSO DI RACCOLTA E VALIDAZIONE DEI DATI MAREOGRAFICI
REGISTRATI NELLA LAGUNA DI VENEZIA E NELL'ARCO COSTIERO NORD
ADRIATICO**

Dr. Ing. Devis Canesso

Tutor dell'Ente Promotore: Prof. Ing. Andrea Defina

Tutor ISPRA: Dr. Marco Cordella, Dr. Franco Crosato

ANNO 2011

Tesi di tirocinio di formazione e orientamento

(Convenzione stipulata tra ISPRA e l'Università degli Studi di Padova)

Data	Firma Tirocinante	Firma del Tutor ISPRA	Firma Responsabile Servizio ISPRA

Abstract

Il presente studio costituisce il frutto del lavoro di validazione dei dati di marea svolto presso ISPRA-Servizio Laguna di Venezia durante il mio tirocinio di formazione ambientale. I livelli di marea registrati da 13 stazioni della Rete Mareografica della Laguna di Venezia durante il biennio 2009-2010 sono stati sottoposti ai controlli necessari per essere rilasciati al pubblico come dati validati. Le operazioni di validazione sono state descritte in dettaglio, riportando tutte le fasi del processo e le possibili casistiche che si possono presentare durante la validazione dei dati. A questo lavoro sono poi allegati un'analisi di un fenomeno di acqua alta verificatosi a Venezia a fine dicembre 2010 e due studi relativi alla modifica della quota del caposaldo di alcune stazioni mareografiche.

Prefazione

Misurare il fenomeno delle maree comporta diverse fasi lavorative: la prima consiste nelle operazioni di campagna di misura e di raccolta del dato sul campo. La seconda fase, silenziosa, ma non meno fondamentale della prima, consiste nel metodico riordino, organizzazione, archiviazione e revisione dei dati raccolti. I dati raccolti durante le campagne di misura sono infatti allo stato “grezzo”, ovvero non rifinito. Tutte le operazioni di verifica, correzione, validazione del dato sono funzionali al rilascio e divulgazione al pubblico di un dato di qualità, affidabile. L’obiettivo di questa tesi di tirocinio è di illustrare ed esemplificare puntualmente tutte le procedure adottate in seno all’ISPRA nell’ambito delle attività di validazione dei dati mareografici.

Tutte le fasi del controllo dei dati costituiscono l’applicazione dei protocolli di varie istituzioni che si occupano a vario titolo della raccolta e analisi di dati mareografici e oceanografici, e in particolare dell’European Sea Level Service (ESAS) e dell’International Oceanographic Commission (IOC). Il pregio di questo lavoro risiede anche nella contestualizzazione di questi procedimenti nell’ambito delle stazioni dell’Alto Adriatico e della Laguna di Venezia, appartenenti alla Rete Mareografica della Laguna di Venezia (RMLV), non disgiunto dall’applicazione sul campo di tecniche pratiche tramandate dalla lunga esperienza in materia mareografica maturata in seno all’Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia, poi APAT ed infine ISPRA.

Vale infine la pena di sottolineare la personale soddisfazione di poter trasmettere queste conoscenze mediante percorsi guidati di formazione ed educazione ambientale, che contribuiscono a rendere intellettualmente ricco e stimolante il nostro lavoro.

I Tutor

Marco Cordella, Franco Crosato

Indice

Introduzione	1
 Capitolo 1	
Il fenomeno della marea	
1.1 Dinamica della marea	3
1.2 Propagazione della marea nel mare Adriatico	7
1.3 Propagazione della marea nella Laguna di Venezia	9
 Capitolo 2	
Metodologia per la validazione dei dati di marea	
2.1 Le misurazioni di marea nella Laguna di Venezia	13
2.2 Funzionamento di una stazione mareografica	15
2.3 Procedure di validazione dei dati di marea	20
 Capitolo 3	
Validazione di alcune serie di dati di livello di marea registrate da stazioni della Rete Mareografica della Laguna di Venezia	
3.1 Stazioni mareografiche considerate nella validazione	26
3.2 Applicazione delle procedure di validazione dei dati	27
3.2.1 Filtro dei dati grezzi	30
3.2.2 Analisi del sovrizzo	33
3.2.3 Analisi per direttrice di propagazione della marea	35
3.2.4 Analisi del livello medio del mare	36
3.2.5 Analisi del fenomeno delle quadrature	39

Conclusioni	40
Bibliografia	41
Allegati	43

Introduzione

La Rete Mareografica della Laguna di Venezia è composta da 52 stazioni predisposte per la registrazione, la raccolta e la trasmissione dei dati di livello di marea. Le osservazioni mareografiche da essa registrate costituiscono una notevole fonte di informazioni per lo studio di varie questioni di interesse tecnico-scientifico quali, ad esempio, le variazioni del livello del mare, la difesa di Venezia dalle alte maree, le trasformazioni morfologiche del bacino lagunare o il rischio di inondazione di tutta la fascia costiera nord adriatica. Affinché queste analisi diano contributi scientifici consistenti è necessario che i dati di livello di marea siano preventivamente corretti e validati, al fine di escludere eventuali errori in essi presenti.

Questo lavoro, svolto in occasione di un tirocinio di formazione ambientale di durata semestrale, illustra le procedure necessarie per la validazione dei dati mareografici, elencando i vari problemi che si possono presentare e le modalità per risolverli. Esso viene presentato in tre parti: nella prima parte viene trattata la fenomenologia del fenomeno della marea, nella seconda parte viene esposta la metodologia alla base della validazione dei dati mareografici, nella terza parte vengono descritti i risultati operativi e i problemi riscontrati durante le validazioni.

La prima parte descrive le caratteristiche principali del fenomeno della marea, la periodicità, la suddivisione nei contributi astronomico e meteorologico (sovralzo), la propagazione nel mare Adriatico e all'interno della Laguna di Venezia, con le relative modificazioni che l'onda di marea subisce quando entra in laguna. Viene data, inoltre, una descrizione dell'evoluzione della laguna veneta indotta dagli interventi antropici nel corso dei secoli.

Nella seconda parte viene presentata una breve storia delle osservazioni mareografiche nella Laguna di Venezia, viene descritto il funzionamento e la dotazione di una stazione mareografica, e si espone la metodologia da adottare per portare a termine correttamente le validazioni, descrivendo le varie fasi di cui si compone questo processo.

Nella terza parte si presentano, da un punto di vista operativo, i controlli effettuati durante le validazioni condotte sui dati di livello di marea, in particolare: le procedure di filtro dei dati grezzi, le analisi del sovralzo, le analisi per direttrice di propagazione della marea, le analisi di livello medio del mare decadale, mensile ed annuale e le analisi delle quadrature.

Negli allegati, a cui spesso si rimanda, sono contenuti degli studi complementari alle procedure di validazione, in particolare: l'analisi di un evento di acqua alta a Venezia, utile a comprendere alcuni aspetti del fenomeno della marea in Laguna di Venezia, le analisi relative alla proposta di modifica della quota di caposaldo di alcune stazioni, utili a risolvere alcuni problemi emersi in sede di validazione, ed infine delle statistiche sui livelli medi del mare delle stazioni validate.

I dati validati sono stati messi a disposizione del pubblico nel sito www.ispravenezia.it, all'interno della sezione Dati, e contribuiscono ad integrare le serie di dati storici per le 13 stazioni validate.

Capitolo 1

Il fenomeno della marea

1.1 Dinamica della marea

I mari e gli oceani sono sempre agitati da movimenti ondulatori e percorsi da correnti più o meno uniformi e profonde. Le cause che generano questi fenomeni sono eterogenee e sono tali da produrre diversi stati di agitazione del mare, tra cui vanno considerati:

- le *onde*, generate dal vento per attrito con la superficie del mare, si propagano per lunghi tratti al di fuori della zona di generazione e anche dopo la cessazione della causa generatrice, fino a frangere in prossimità delle coste;
- le *maree*, oscillazioni periodiche del livello marino, dovute all'attrazione gravitazionale degli astri e, secondariamente, alle perturbazioni meteorologiche;
- le *correnti*, movimenti lineari delle masse d'acqua;
- le *sesse*, oscillazioni stazionarie libere che si producono nei mari interni (ad esempio l'Adriatico), nei bacini chiusi e nei porti;
- lo *tsunami*, oscillazione prodotta da un fenomeno sismico.

In questo studio i fenomeni trattati riguardano esclusivamente le maree, periodici movimenti di innalzamento e abbassamento della superficie del mare causati dall'attrazione del Sole e della Luna sulle masse d'acqua presenti sulla Terra.

La fase di innalzamento raggiunge il suo culmine nel momento di massima elevazione del livello marino, detta alta marea (o colmo), mentre la fase di abbassamento termina con la minima elevazione della superficie marina, detta bassa marea (o cavo). La differenza tra alta e bassa marea viene chiamata escursione o ampiezza di marea.

Le maree sono le onde più lunghe conosciute dai mareografi, avendo un periodo di 12^h25' ed una lunghezza pari alla metà della circonferenza terrestre. In base alla periodicità con cui si presentano le alte e basse maree nell'arco di un giorno è possibile classificarle come:

- maree diurne, quando si verifica una sola alta marea e una sola bassa marea al giorno;
- maree semidiurne, quando si verificano due alte maree e due basse maree al giorno di ampiezza poco diversa;
- maree miste, quando si verificano due alte maree e due basse maree al giorno di ampiezza molto diversa.

L'ampiezza delle maree risulta sensibilmente diversa in base alla morfologia dei bacini in cui si verificano, tuttavia, i valori minimi si registrano in mezzo agli oceani mentre i valori massimi si presentano in prossimità delle coste. Nelle isole Midway ad esempio, situate in pieno Oceano Pacifico, l'escursione di marea è pari a circa 30 cm mentre nella Baia di Fundy, sulla costa atlantica del Nord America, l'ampiezza di marea arriva fino a 20 m. Nel Mediterraneo si hanno generalmente deboli escursioni di marea, con valori inferiori ai 50 cm, con qualche eccezione per il golfo di Gabès (Tunisia) e l'Alto Adriatico, in cui si raggiungono valori superiori ai 100 cm (Matteotti, 1999).

La marea registrata in una certa località è sempre data dalla composizione di due fattori che sommano i propri effetti: la componente astronomica e quella meteorologica (sovrizzo).

La componente astronomica agisce esclusivamente sull'ampiezza della marea, ed è a sua volta una combinazione di due forze che agiscono sulle masse d'acqua che ricoprono la Terra:

- la forza di attrazione gravitazionale del sistema Terra-Luna-Sole;
- la forza centrifuga dovuta alla rotazione del sistema Terra-Luna attorno al proprio baricentro.

La forza di attrazione gravitazionale è la nota legge di gravitazione universale di Newton, la quale afferma che due punti materiali si attraggono con una forza di intensità direttamente proporzionale al prodotto delle masse ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa. Esaminando il caso di un pianeta ricoperto in modo uniforme dall'acqua e soggetto all'azione di un solo satellite, tale forza fa in modo che la superficie del mare non si disponga secondo una sfera, ma secondo un elissoide che ruota seguendo sempre il satellite che lo attrae. Per un osservatore fermo sul pianeta il fenomeno appare come una variazione ciclica del livello del mare, generando appunto la marea.

La forza centrifuga è una forza apparente che agisce su un corpo in moto circolare e nel sistema Terra-Luna ha direzione opposta rispetto quella di attrazione gravitazionale. La combinazione di queste due forze fa in modo che la superficie degli oceani si modelli in

modo da essere sempre in equilibrio tra la forza centrifuga del moto della terra e la forza d'attrazione degli astri (*figura 1*).

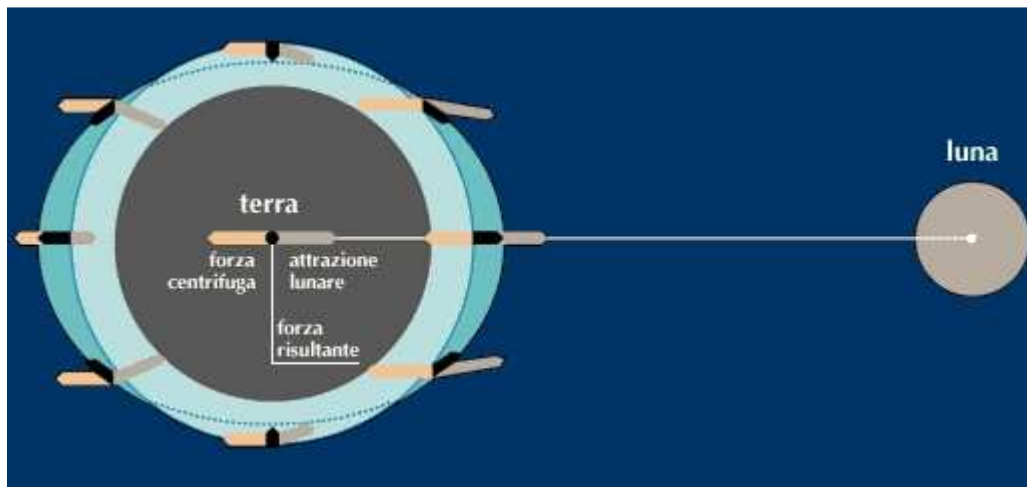


Figura 1. Combinazione delle forze che generano la componente astronomica della marea.

La Terra è soggetta all'attrazione gravitazionale di tutti i corpi celesti del sistema solare, anche se gli effetti predominanti sono quelli della Luna e del Sole. La Luna infatti è il satellite più vicino alla Terra mentre il Sole ha una massa molto considerevole, pari a circa 330'000 volte quella della Terra. A seconda della posizione relativa che questi astri assumono tra loro, la marea registrata sulla Terra presenta delle caratteristiche diverse: quando il Sole, la Luna e la Terra sono allineati (luna piena e luna nuova) i rigonfiamenti della massa d'acqua terrestre dovuti all'attrazione lunare si sommano a quelli solari, dando luogo alle maree sizigiali, caratterizzate dalle maggiori escursioni di marea.

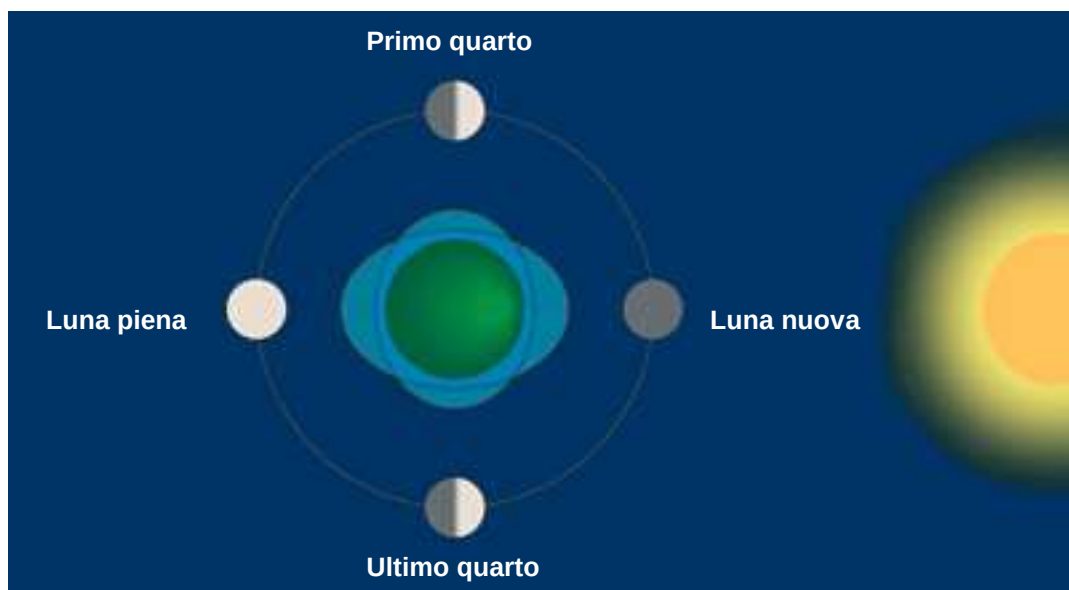


Figura 2. Posizione relativa della Luna rispetto alla Terra ed al Sole durante il mese lunare.

Quando il Sole e la Luna sono in quadratura (primo e ultimo quarto) i rigonfiamenti della massa d'acqua terrestre dovuti all'attrazione lunare si sottraggono a quelli solari, dando luogo alle maree di quadratura, caratterizzate dalle minori ampiezze di marea (*figura 2*).

La componente meteorologica della marea agisce direttamente sul livello marino, e deriva dall'azione del vento e della pressione atmosferica sulla superficie del mare. Gli effetti di questi fenomeni fisici vengono generalmente indicati con il termine “sovralzo” e possono generare incrementi positivi o negativi rispetto alle normali oscillazioni astronomiche. Il “sovralzo” infatti è, per definizione, la differenza tra la marea reale misurata in una certa località e la componente astronomica della marea prevista nella medesima località.

Gli elementi che danno il maggior contributo alla formazione del “sovralzo” sono quindi la pressione atmosferica ed il vento. La pressione atmosferica è data dalla forza che le masse d'aria esercitano sulla superficie terrestre. Tale forza agisce anche sui mari e sugli oceani e li comprime in relazione alla sua intensità: se un nucleo di bassa pressione insiste sopra un bacino, esso esercita una forza ridotta sulla superficie sottostante, con un conseguente incremento del livello marino. Al contrario, un nucleo di alta pressione tende a schiacciare la superficie del mare e ad abbassare il suo livello (meccanismo noto come “effetto barometrico inverso”). Per avere un'idea del contributo della pressione atmosferica sulla marea basti pensare che, secondo la teoria idrostatica, in mare aperto ad una diminuzione della pressione atmosferica di 1 millibar corrisponde un innalzamento di circa 1 cm del livello marino.

Il vento, invece, agisce sulla superficie del mare insaccando le acque nel suo verso di propagazione. Se esso soffia verso le coste tende a far aumentare temporaneamente il livello in prossimità dei litorali, generando una sorta di “run-up”. Al contrario, se il vento soffia verso il mare tende a far defluire le acque verso il largo, con una diminuzione del livello in vicinanza della costa, riducendo quindi anche la marea registrata.

Qualora un bacino sia caratterizzato da particolari caratteristiche morfologiche, in seguito al passaggio di una perturbazione meteorologica, l'azione congiunta del vento e di una variazione locale di pressione atmosferica può produrre un temporaneo dislivello in una zona limitata del mare. Per ristabilire l'equilibrio nei livelli, sulla superficie del bacino si generano delle oscillazioni libere che si smorzano lentamente, dette *sesse* (Polli, 1962). Queste onde sono generalmente stazionarie e tipiche dei bacini chiusi o semichiusi (come il mare Adriatico). Esse possono dare un contributo non trascurabile alla marea registrata in una certa località, specialmente se si trovano in fase con la marea astronomica. È questo

il caso del mare Adriatico, dove le due sesse principali hanno periodi molto prossimi (circa 21.33 ore e 12.19 ore) a quelle delle maree (circa 12.42 ore).

Il livello di marea misurato in una certa località scaturisce pertanto dalla somma del contributo astronomico e di quello meteorologico (“sovralzo” e sesse). A seconda delle condizioni meteorologiche, il “sovralzo” può risultare positivo o negativo, così da incrementare o ridurre la componente astronomica della marea. Per la Laguna di Venezia, ad esempio, i fenomeni di acqua alta si verificano per valori del “sovralzo” molto elevati, con una marea misurata pari anche a più di due volte la marea astronomica. Le acque alte infatti si verificano per la maggior parte nei mesi di novembre e dicembre, in cui le perturbazioni atmosferiche portano ampi campi di bassa pressione e i venti di Scirocco insaccano le acque nell’alto Adriatico. Per un’analisi di un evento di acqua alta si rimanda all’*Allegato 1* (Analisi evento di alta marea 22-26 dicembre 2010).

1.2 Propagazione della marea nel mare Adriatico

La propagazione dell’onda di marea assume caratteri diversi a seconda della forma del bacino nel quale essa si sviluppa. Il mare Adriatico, per la sua conformazione stretta e poco profonda, tende ad ampliare la componente astronomica della marea che si sviluppa nel bacino mediterraneo. Infatti da un’escursione media pari a ± 10 cm all’altezza del Canale di Otranto, si arriva ad avere nella Laguna di Venezia un’escursione media dell’ordine di ± 60 cm, con valori massimi di $\pm 75\div 80$ cm (Berrelli, 2004).

Nell’Adriatico l’onda di marea si propaga come un raggio rotante in senso antiorario, attorno ad un punto fisso detto “punto anfidromico”, situato circa a metà della distanza Ancona-Zara (*figura 3*). Nel momento in cui la marea entra nel canale di Otranto essa percorre il mare Adriatico in senso antiorario con una celerità di propagazione di circa 130 km/h. Essa risale dapprima la costa balcanica della Dalmazia in direzione sud-nord, lambisce l’Istria e prosegue verso Trieste e Grado. Successivamente ruota in senso est-ovest verso Lignano, Venezia e Chioggia, per percorrere infine la costa italiana verso Ancora, Vieste e Brindisi e riunirsi ad Otranto, dopo 12 ore e 24 minuti, con la successiva marea proveniente dallo Ionio per ricominciare il ciclo (Polli, 1961a).

Questa rotazione, detta “anfidromia”, deriva dalla composizione degli effetti di una oscillazione longitudinale, dovuta alla marea stessa, con una oscillazione trasversale che si sviluppa nel mare a causa della rotazione terrestre. Nel “punto anfidromico” l’ampiezza

della marea è nulla, in quanto vi interferiscono maree con fasi opposte (la marea che risale la costa dalmata e quella che ridiscende la costa italiana).

La propagazione dell'onda di marea si può rappresentare mediante un sistema di linee che congiungono i punti che hanno alta marea simultaneamente, dette linee cotidali. L'ampiezza dell'oscillazione si raffigura mediante le linee di uguale semiampiezza della marea. L'insieme dei due sistemi di linee costituisce le curve caratteristiche della propagazione della marea (*figura 3*). Tali curve possono essere tracciate per ogni singola componente della marea astronomica, una volta scomposta in oscillazioni elementari di tipo sinusoidale. Tale procedimento si avvale delle tecniche di analisi armonica, di cui si parlerà più approfonditamente nel capitolo successivo.

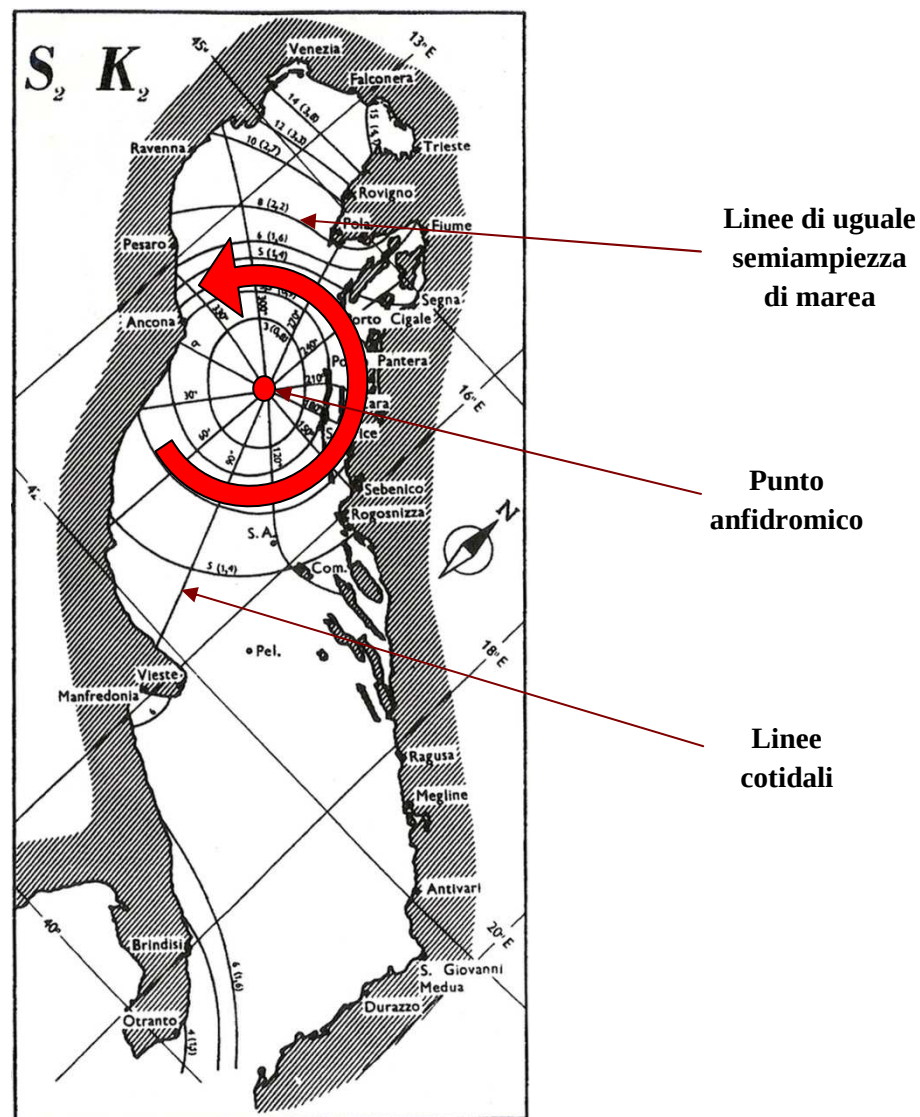


Figura 3. Curve caratteristiche della propagazione della marea relative a due componenti elementari della marea astronomica registrata nel mare Adriatico. La freccia indica il verso di rotazione delle linee cotidali. Fonte: S. Polli (1960), "La propagazione delle maree nell'Adriatico", Istituto Sperimentale Talassografico, Trieste, pubblicazione n. 370.

1.3 Propagazione della marea nella Laguna di Venezia

La Laguna di Venezia si estende su una superficie di circa 549 km² tra il corso terminale del Brenta a sud (foce di Brondolo) ed il tratto finale del Sile a nord (foce di Piave Vecchia), con una lunghezza di circa 50 km ed una larghezza compresa tra gli 11 e i 12 km. È messa in comunicazione con il mare Adriatico attraverso le tre bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia mentre verso la terraferma il suo perimetro è delimitato dalla linea di conterminazione lagunare. La profondità media è di circa 1.5 m e varia da poche decine di centimetri nelle zone più interne, a qualche decina di metri nei canali artificiali e nelle aree di accesso.

La Laguna di Venezia ha subito modificazioni morfologiche notevoli nel corso dei secoli, a causa degli interventi antropici volti a salvaguardare gli interessi commerciali e militari della Serenissima Repubblica di Venezia e, successivamente, dello Stato Italiano. All'inizio del Trecento le bocche di porto erano otto (Jesolo, Lido Maggiore, Lido-Tre Porti, Lido-Sant'Erasmo, Lido-San Niccolò, Malamocco, Chioggia e Brondolo) e all'interno del bacino lagunare si riversavano numerosi fiumi, tra i quali il Brenta, il Sile, il Bacchiglione ed il Piave. Alla fine del secolo iniziarono le operazioni di deviazione del fiume Brenta al di fuori della laguna, ultimate solo all'inizio del XVI secolo. Nel Quattrocento le acque del Brenta sfociavano nel bacino di Malamocco attraverso il Canale Maggiore. Nel Cinquecento, con la costruzione della Brenta Nova, la foce venne spostata verso Chioggia mentre il Piave veniva portato più a nord attraverso il Taglio di Re. In questo secolo venne scavato anche il Canale di Santo Spirito, con l'obiettivo di permettere il transito delle navi dalla bocca di Malamocco a Venezia. Venne costruito inoltre il Paradore di Brondolo, un argine che impediva alle acque del Brenta e del Bacchiglione di defluire nella laguna di Chioggia. Nel Seicento venne ultimato il Taglio Novissimo del Brenta, portandolo a sfociare direttamente a Brondolo. Alla fine del secolo venne ultimato il taglio del Sile, che deviava il fiume nel vecchio alveo del Piave, mentre quest'ultimo subiva una diversione che lo portava a sfociare a Porto Santa Margherita. Nel Settecento iniziarono gli interventi di difesa dei litorali con la costruzione dei murazzi, mentre al porto di Malamocco venne scavato il canale Rocchetta per il transito delle imbarcazioni verso la laguna settentrionale. Nell'Ottocento iniziò la costruzione dei moli a protezione delle bocche di porto di Lido e Malamocco. Venne edificato il ponte ferroviario translagunare e si avviarono gli interventi per la costruzione di Porto Marghera. All'inizio del Novecento venne ultimata la costruzione dei moli alla bocca di Lido (unificando così i tre antichi canali porto) ed iniziarono i lavori di armatura della bocca di Chioggia. Venne creata la prima zona

industriale a Porto Marghera e fu scavato il Canale Vittorio Emanuele III per collegare direttamente Marghera alla bocca di Lido. Nella seconda metà del Novecento venne creata la seconda zona industriale e furono realizzate le casse di colmata per una terza zona industriale (poi non insediata). Venne scavato un nuovo canale artificiale tra Marghera e Malamocco (canale dei petroli), fu costruito l'aeroporto Marco Polo e venne edificato anche il ponte translagunare che collega Chioggia alla terraferma. All'inizio degli anni Duemila, alle bocche di porto hanno preso avvio le opere per la costruzione del Mo.S.E., per difendere la città di Venezia dalle sempre più frequenti acque alte (Consorzio Venezia Nuova, 2011).

La laguna attuale, pertanto, è molto diversa da come si presentava alcuni secoli fa e probabilmente oggi sarebbe quasi del tutto interrita se l'intervento dell'uomo non avesse cercato di conservarla artificialmente.

In condizioni normali la laguna è sottoposta ad un regime di marea astronomica con periodo di 12 ore ed escursione media di $\pm 30 \div 35$ cm rispetto al livello del medio mare. Tuttavia, essendo situata all'estremità di un mare semi-chiuso come l'Adriatico, essa è soggetta a grandi escursioni del livello delle acque, le più vistose delle quali (soprattutto nei periodi autunnali e primaverili, in concomitanza con particolari condizioni meteorologiche) provocano fenomeni come l'acqua alta, che allaga periodicamente le isole più basse, o l'acqua bassa che rende impraticabili i canali meno profondi (Polli, 1952).

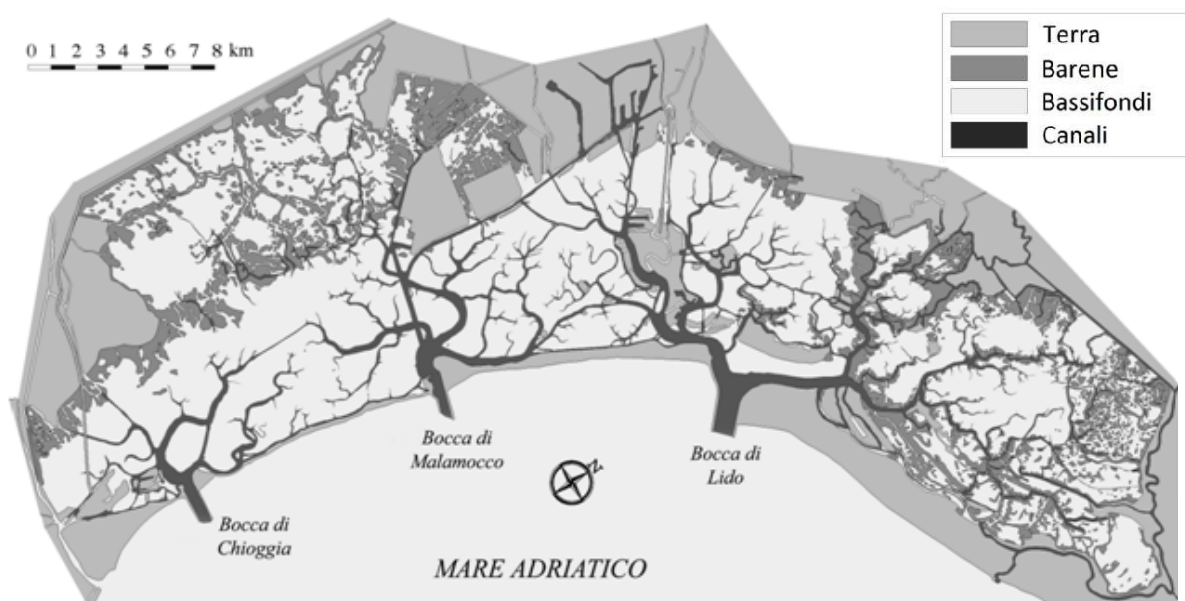


Figura 4. Composizione morfologica della Laguna di Venezia.

Nel golfo di Venezia l'onda di marea si propaga da nord-est a sud-ovest senza notevoli ritardi, in modo che essa si presenta alle tre bocche di porto quasi contemporaneamente,

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

Durante la fase di flusso, la marea si propaga lungo i canali ed invade i vasti e bassi fondali della laguna. Nella propagazione l'onda di marea subisce generalmente un ritardo, un'attenuazione e una deformazione progressivi nell'avanzare dalle bocche di porto alle località più interne. L'attenuazione, in particolare, risulta essere maggiore nelle zone più interne della laguna settentrionale, dove l'ampiezza di marea astronomica può essere inferiore del 20-30% rispetto a quella registrata a Venezia (*figura 5*).

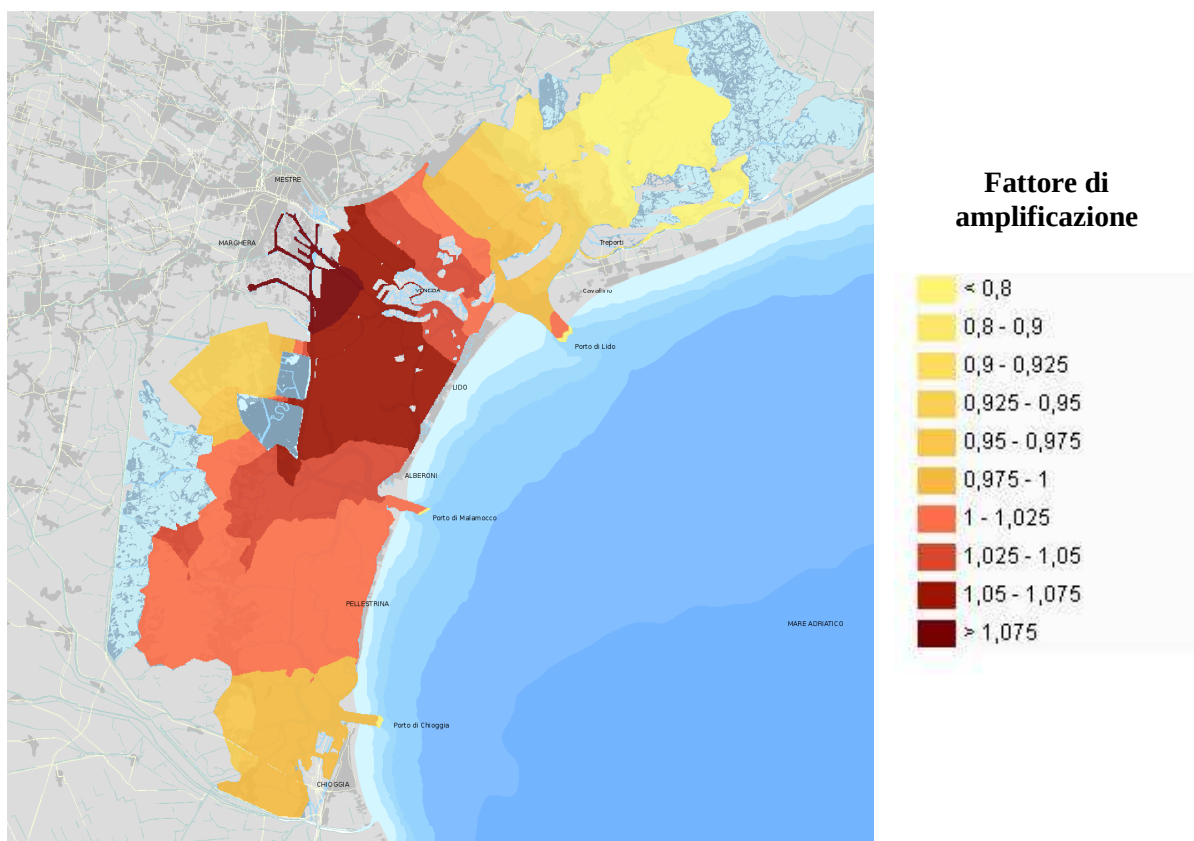


Figura 5. Attenuazione o amplificazione del colmo di marea rispetto a quello misurato alla bocca di porto di Lido. Valori superiori ad 1 del fattore di amplificazione indicano un aumento dell'altezza dell'onda di marea, e quindi una sua esaltazione. Valori inferiori ad 1 implicano invece una riduzione dell'altezza dell'onda, e quindi uno smorzamento della stessa. Fonte: Atlante della Laguna, 2006.

In queste stesse zone (Grassabò, Cavallino) il ritardo con cui un'alta marea si presenta rispetto il mare aperto può essere notevole e raggiungere anche le 3 ore (*figura 6*). Durante la fase di riflusso l'acqua affluita nella laguna si ritira nei canali e, lungo questi, torna al mare. (Gottardo, 1975).

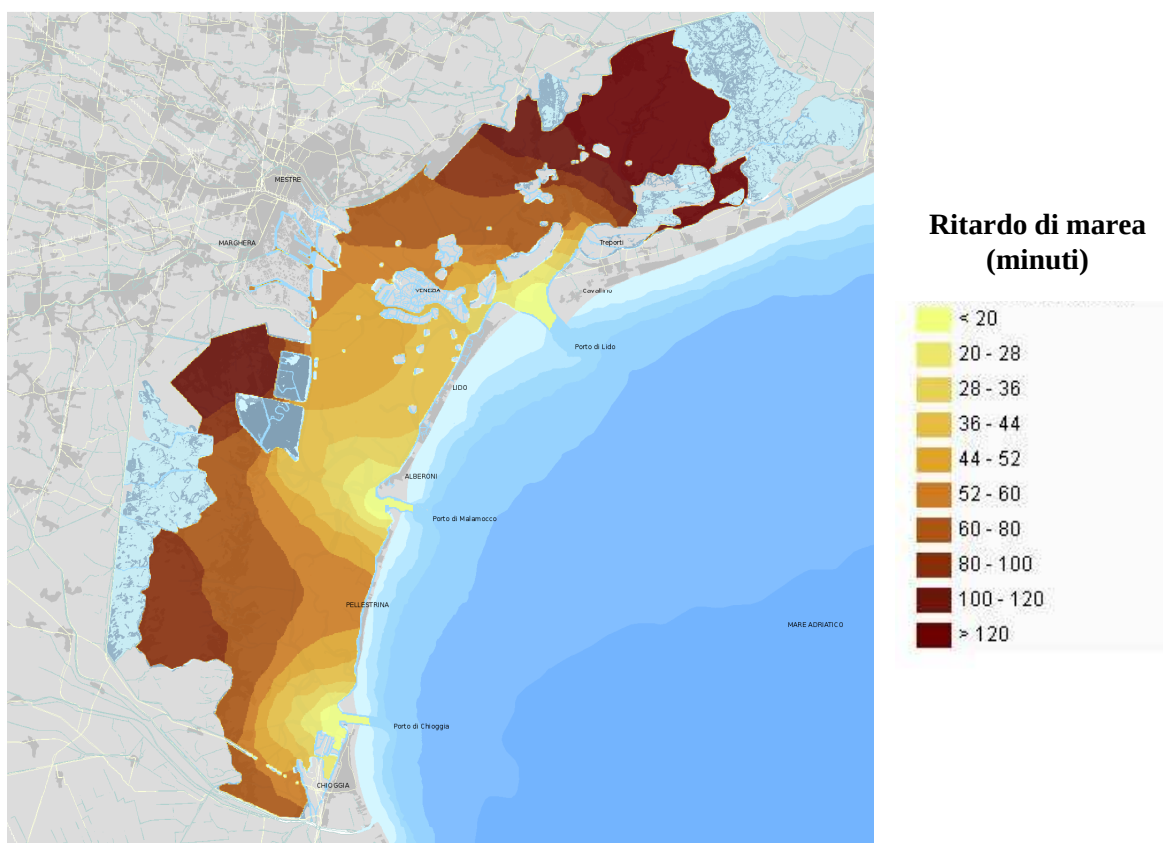


Figura 6. Tempo di propagazione dell'onda di marea all'interno del bacino lagunare. Il tempo è riferito al momento in cui l'onda di marea entra in laguna attraverso la bocca di porto di Lido. Fonte: Atlante della Laguna, 2006.

Capitolo 2

Metodologia per la validazione dei dati di marea

2.1 Le misurazioni di marea nella Laguna di Venezia

Le misurazioni sistematiche del livello del mare e dei massimi e dei minimi di marea iniziarono a Venezia nel 1871, quando l'Ing. Tomaso Mati istituì il primo mareografo a palazzo Loredan in Campo Santo Stefano, presso la sede del Genio Civile (Dorigo, 1961). Questa data rappresenta l'inizio delle registrazioni di marea con metodo scientifico, ossia con l'introduzione di un piano di riferimento (il Comune Marino del 1825) da cui ricavare delle altezze di marea rilevate in orari ben precisi. Prima del 1871 non si hanno a disposizione dati quantitativi sulle quote raggiunte dalla marea, ma sono reperibili delle cronache compilate in occasione degli eventi di acqua alta. Questi documenti danno delle informazioni di tipo qualitativo sul fenomeno e sono disponibili fin dal VI secolo, con descrizioni del tipo: “l'incremento dell'acqua fu 8 piedi più del solito” (18 gennaio 1386), o “l'acque arrivarono agli scalini dell'altar maggiore di Sant'Antonino” (9 novembre 1750), (Giordani Soika, 1976).

Nel 1888, l'Istituto Geografico Militare istituì un altro mareografo presso l'Arsenale di Venezia e nel 1906 venne installata la stazione mareografica che storicamente ricopre il maggior interesse, quella di Punta della Salute in bacino di San Marco. Inizialmente essa fu posta sul Canal Grande ma nel 1923 fu spostata nel sito dove si trova tuttora, sul lato del Canale della Giudecca (*figura 7*).

Le misurazioni del livello del mare erano originariamente effettuate dal Genio Civile e dall'Istituto Geografico Militare. Esse divennero di competenza del Magistrato alle Acque quando, con la legge istitutiva n.257 del 24 maggio 1907, lo Stato Italiano ricostituì questo istituto come autorità idraulica preposta al buon governo delle acque nei bacini idrografici, nelle lagune e lungo i litorali dell'area adriatica nord orientale. Tra i suoi compiti il Magistrato alle Acque doveva provvedere alla raccolta metodica ed ordinata delle osservazioni idrografiche riguardati le lagune, i litorali, il mare, i fiumi e i bacini montani. Per assolvere a tali funzioni, all'interno del Magistrato alle Acque venne costituito

l'Ufficio Idrografico con il proprio Servizio Mareografico, che acquisì il patrimonio di dati e osservazioni mareografiche iniziate nel 1871.

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



Figura 7. Stazione mareografica di Punta della Salute sul canale della Giudecca.

In seguito all'evento alluvionale del 4 novembre 1966 e all'emanazione della 1° legge speciale per Venezia, l'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque realizzò nei primi anni Settanta il progetto di ampliamento della rete mareografica in Laguna di Venezia. Tale progetto portò a 40 il numero delle stazioni fisse della rete, a cui si aggiungono le preesistenti 5 stazioni nella Laguna di Marano-Grado, la stazione di Caorle lungo il litorale a nord della laguna di Venezia e quella di Porto Caleri all'interno dell'omonima laguna a sud di Chioggia, per un totale di 47 stazioni di misura.

L'Ufficio Idrografico ha svolto le sue funzioni per quasi un secolo, fino al 2002, quando l'attività è stata affidata all'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici (APAT), confluita nel 2008 all'interno dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA).

Attualmente le stazioni di misura della Rete Mareografica in Laguna di Venezia sono 52, di cui più della metà attrezzate per la trasmissione in tempo reale dei dati (*figura 8*). Alcune di queste stazioni sono in grado di registrare anche l'ampiezza ed il periodo del moto ondoso nonché alcuni parametri climatici come pressione atmosferica, intensità e direzione del vento, temperatura, umidità, precipitazioni e radiazione solare (ISPRA, 2011). I dati raccolti dalle stazioni della rete mareografica costituiscono le fonti di riferimento per lo studio di varie questioni di interesse tecnico-scientifico quali le variazioni del livello del mare, la difesa di Venezia dalle alte maree, le trasformazioni morfologiche del bacino lagunare, il rischio di inondazione di tutta la fascia costiera nord adriatica.

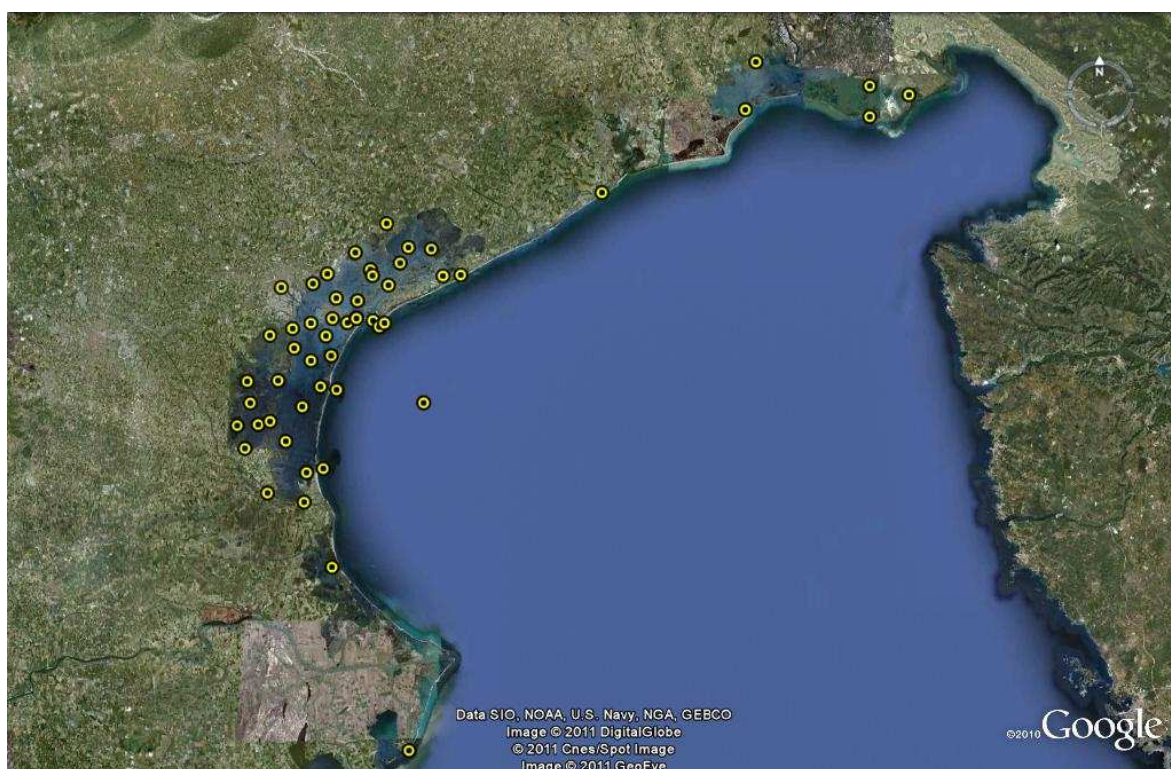


Figura 8. Stazioni della Rete Mareografica della Laguna di Venezia. Fonte immagine: Google Earth.

2.2 Funzionamento di una stazione mareografica

Una stazione mareografica situata in mare è in genere costituita da una cabina sorretta da pali di fondazione e circondata da “briccole” per permettere l'accosto delle imbarcazioni durante i periodici sopralluoghi per la manutenzione (*figura 9*). All'interno della cabina sono posizionati gli strumenti di misura e le apparecchiature per l'acquisizione e la trasmissione dei dati rilevati (*figura 10*).

La principale funzione della cabina mareografica, oltre ad alloggiare la strumentazione, è quella di ospitare un pozzetto che si apre sul pavimento ed è collegato al mare aperto tramite due fori opposti e sfalsati, situati rispettivamente a circa 30 cm e 60 cm dal fondo, con sezioni pari a 1/400 della sezione orizzontale del pozzetto (diametro di 2-5 cm), (Caterini E. *et al.*, 2011) Questo accorgimento permette di ottenere un filtro del segnale da registrare attraverso un'attenuazione delle oscillazioni di alta frequenza causate dal moto ondoso (il pozzetto è detto infatti “pozzetto di calma”). In questo modo si conservano solamente le oscillazioni più rilevanti dal punto di vista mareografico, ossia quelle aventi il periodo più lungo: le maree.



Figura 9. Stazione mareografica situata in prossimità dell'isola di Murano.

La misurazione della marea presuppone l'introduzione di un piano di riferimento rispetto al quale riferire le quote mareali rilevate. Per la Laguna di Venezia questo riferimento è rappresentato dallo Zero Mareografico di Punta della Salute (Z.M.P.S.). Esso è pari al livello medio del mare del 1897 ed è stato calcolato mediando i dati di 25 anni di osservazioni, dal 1885 al 1909, ed assegnando il valore di riferimento all'anno centrale (Dorigo, 1961). 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 Z.M.P.S. risulta più basso di circa 23 cm.

Dal punto di vista operativo, la marea viene misurata attraverso uno strumento detto mareografo, in grado di registrare le quote di marea con il relativo orario di rilevazione. La misura della quota di marea può essere effettuata con diverse modalità, ma usualmente si

utilizza un galleggiante inserito all'interno del pozzetto di calma. Il galleggiante è allacciato ad una puleggia tramite un filo teso da un contrappeso, mentre la puleggia è collegata al mareografo vero e proprio. Per fornire un livello di marea rispetto al piano di riferimento prescelto, la quota rilevata dal galleggiante viene messa in relazione con la quota della piastrina mareografica della stazione (caposaldo), riferita anch'essa allo stesso piano di riferimento. La differenza tra la quota del caposaldo della stazione e la quota fornita dal galleggiante determina l'altezza di marea registrata dal mareografo rispetto il piano di riferimento prescelto (nel nostro caso lo Z.M.P.S.).

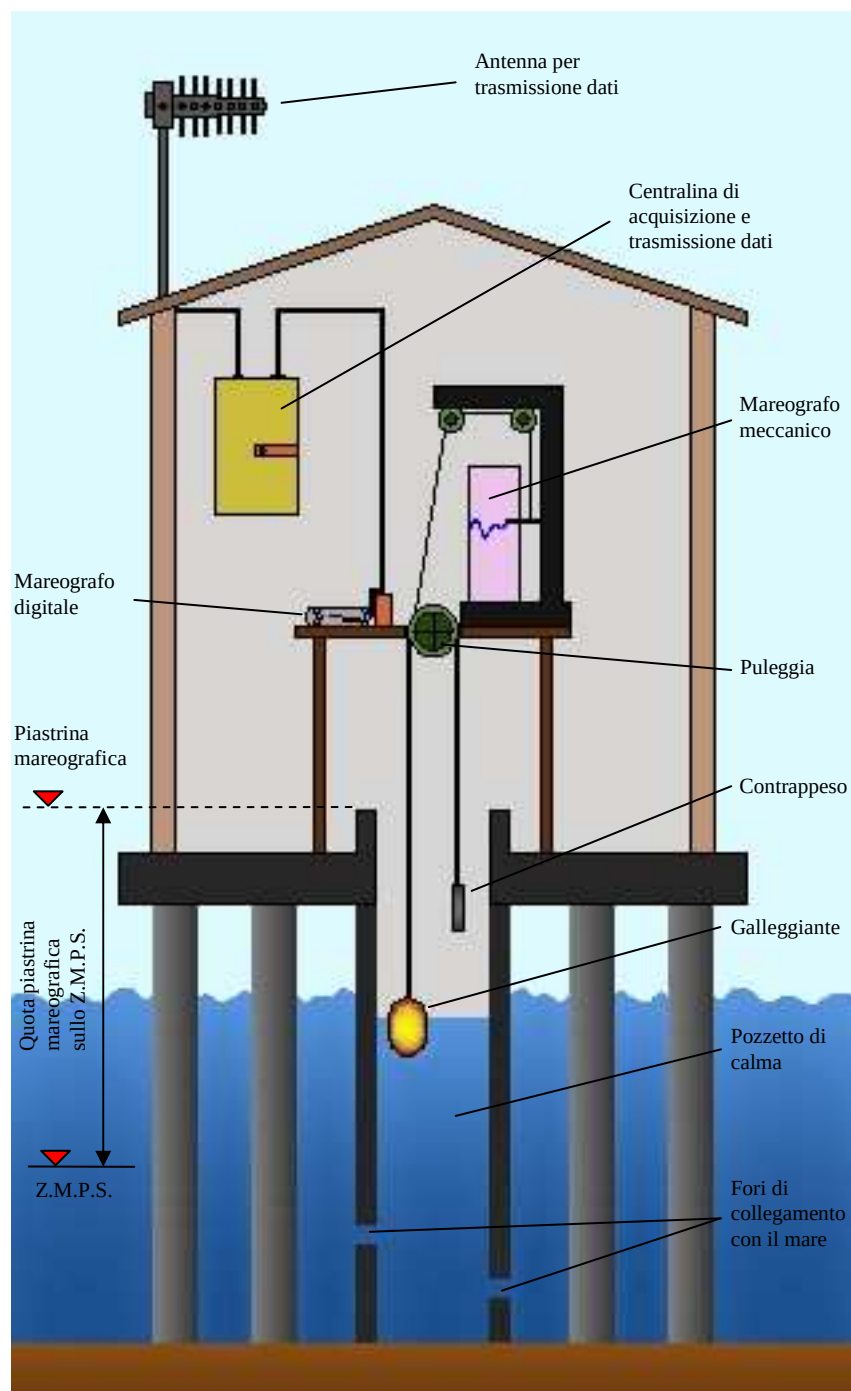


Figura 10: Sezione schematica di una stazione mareografica.

I mareografi vengono tarati per fornire direttamente la misura della marea rispetto lo Z.M.P.S. e la registrazione del dato avviene in modo diverso a seconda del tipo di mareografo installato nella stazione. Esistono infatti mareografi di tipo meccanico e, più recentemente, mareografi di tipo elettronico (*figura 11*). I mareografi meccanici sono dotati di diagrammi cartacei (mareogrammi) sui quali un pennino ad inchiostro segna in continuo la curva di marea. La durata di ciascun diagramma è regolata su periodi di 2 o 4 mesi, trascorsi i quali il mareogramma deve essere fisicamente sostituito da un operatore. Il rapporto di riduzione della altezze di marea registrate nel mareogramma è invece di 1/10. I mareografi digitali raccolgono il dato in modo informatizzato nella loro memoria interna, con la possibilità di trasmetterlo in tempo reale. La frequenza di campionamento dei dati per le stazioni della R.M.L.V. permette di registrare una quota di marea ogni 5 minuti, anche se solitamente la granularità è di 10 minuti.



Figura 11. A sinistra: mareografo meccanico posto nella stazione mareografica di Val Grande. A destra: mareografo elettronico all'interno della stazione mareografica di Punta della Salute.

Utilizzando esclusivamente tecniche di tipo digitale, è possibile misurare il livello di marea anche con strumenti che non presuppongono l'impiego del galleggiante. È questo il caso degli ondometri e degli idrometri a pressione.

Un ondometro è costituito da un sensore ad ultrasuoni montato su un braccio esterno alla cabina della stazione mareografica (*figura 12*). Il livello di marea viene calcolato attraverso una media mobile valutata in una adeguata finestra temporale, al fine di filtrare il segnale dalle oscillazioni ad alta frequenza indotte dal moto ondoso (effetto concettualmente

identico a quello prodotto dal pozzetto di calma per gli strumenti a galleggiante). Per le stazioni situate in mare tale finestra temporale è di 30 minuti (ad esempio per Piattaforma CNR) mentre per le stazioni situate in laguna, essendo meno esposte al moto ondoso, essa coincide con l'intervallo di acquisizione dei dati.

Un idrometro a pressione è invece uno strumento posto sul fondo del mare. Esso ricava l'altezza di marea misurando la pressione della colonna d'acqua che lo ricopre e calcolando il tirante d'acqua attraverso la legge di Stevino.



Figura 12. A sinistra: galleggianti all'interno del pozzetto di calma della stazione di Punta della Salute.
A destra: ondametro ad ultrasuoni montato all'esterno della stazione di Murano.

Al di là dei tipi di strumento utilizzati per la misurazione della marea, una stazione mareografica è in genere attrezzata con più dispositivi di rilevazione, siano essi ondametri, idrometri a pressione o mareografi a galleggiante. La ridondanza dei sensori, infatti, garantisce la continuità delle registrazioni anche in caso di malfunzionamenti di tipo meccanico o elettrico.

Le apparecchiature per la trasmissione dei dati di marea in tempo reale¹ o differito completano infine la dotazione di una stazione mareografica. Per la R.M.L.V. la granularità con cui vengono registrati i dati di marea è tale da consentire la trasmissione in

¹ La rilevazione del dato in tempo reale si rende necessaria anche in virtù della Direttiva PCM 27/2/2004, secondo la quale il Servizio Laguna di Venezia, responsabile della sorveglianza e del buon funzionamento della RMLV, svolge compiti operativi di protezione civile relativi al monitoraggio e all'analisi di eventi e/o evoluzione di grandezze climatologiche ed ambientali, nonché dello stato del mare, utili anche alla modellistica previsionale in tempo reale di eventi marittimi e costieri a scala locale.

tempo reale di un almeno dato di marea ogni 10 minuti. I dati inviati in tempo differito sono invece rappresentati da una serie di dati inviati regolarmente con cadenza prefissata, ad esempio giornaliera. Qualora non siano presenti gli strumenti per l'invio dei dati si deve provvedere manualmente alla raccolta dei dati stessi, mediante un operatore che si rechi fisicamente alla cabina della stazione mareografica. I mareografi digitali infatti registrano le altezze di marea anche nella loro memoria interna, da cui è possibile scaricare i files con un apposito computer palmare.

Con i procedimenti appena esposti si hanno così a disposizione i dati dei livelli di marea “grezzi”. Tale denominazione deriva dal fatto che questi dati possono contenere errori di varia natura, come derive strumentali, oscillazioni indotte del livello del pozzetto, ecc. In un secondo momento i dati grezzi vengono analizzati ed elaborati per ottenere i dati “validati”.

2.3 Procedure di validazione dei dati di marea

Il fine principale della validazione dei dati di marea è quello di rilevare e, se possibile, correggere gli errori per minimizzare la perdita di informazioni ed assicurare una buona qualità dei dati registrati. Alla base del controllo di qualità si pone un'attenta analisi ed ispezione dei dati grezzi raccolti dalle stazioni mareografiche, attraverso un procedimento che si può schematizzare nelle seguenti fasi applicate in successione:

- a) filtro dei dati grezzi;
- b) analisi del sovrizzo;
- c) analisi per direttrice di marea;
- d) analisi del livello di medio mare decadale, mensile ed annuale.

L'applicazione del filtro permette di rilevare gli errori più grossolani presenti nei dati grezzi dovuti, nella maggior parte dei casi, a guasti o malfunzionamenti degli strumenti di misura o di trasmissione/ricezione dei dati.

In questo tipo di errori si possono includere:

- gli *spike*, picchi anomali del tracciato di marea di durata molto ridotta;
- gli *scarruolamenti*, variazioni repentine del livello di marea dovute ad uno scorrimento sulla puleggia della fune agganciata al galleggiante;
- i *blocchi*, arresti prolungati del galleggiante ad una quota costante;

- i *dati mancanti*, buchi nel tracciato di marea per mancata registrazione o trasmissione/ricezione dei dati;
- la presenza di *valori privi di significato fisico*, dovuta alle cause più diverse;

Da un punto di vista operativo, l'operazione di filtro dei dati grezzi avviene attraverso il calcolo della differenza di livello di marea tra due osservazioni successive, assumendo che essa sia inferiore a 10 cm in condizioni fisiche standard (filtro standard). Dal momento che una stazione appartenente alla R.M.L.V. registra un dato di marea ogni 10 minuti, utilizzando tale soglia si suppone che sia minima la probabilità di avere una differenza di livello di marea di ± 10 cm in un intervallo di 10 minuti. Usualmente tale condizione è soddisfatta, poiché il tracciato di marea è una curva che varia in modo graduale, con differenze di livello tra due osservazioni successive inferiori a 5 cm. Il superamento della soglia di 10 cm avviene invece quando si presentano i problemi sopra citati, risultando particolarmente adeguata per individuare eventuali spike.

È necessario evidenziare, tuttavia, che il superamento della soglia non è sempre indice della presenza di errori grossolani nei dati grezzi. Può avvenire infatti che, in caso di forti mareggiate, il moto ondoso prodotto dal vento induca a cospicue variazioni tra due successive misurazioni del livello di marea. Tale circostanza non rappresenta un errore e si manifesta frequentemente per le stazioni mareografiche situate al di fuori della Laguna di Venezia (bocche di porto e mare aperto).

Quando l'applicazione del filtro permette di riscontrare questi tipi di anomalie si provvede alla correzione del dato grezzo, con modalità diverse a seconda del tipo di errore rilevato. Per minimizzare la perdita di informazioni, la correzione dei dati errati è sempre da preferire alla loro eliminazione, da attuare solamente in caso di particolari condizioni di incertezza. Attraverso le operazioni di filtro e correzione dei dati si ottengono i dati filtrati che vengono utilizzati per la fase successiva.

Il processo di analisi del sovrizzo permette di individuare eventuali avarie dell'orologio interno del mareografo e/o possibili sfasamenti temporali nel tracciato di marea.

Per compiere questo tipo di analisi è necessario innanzitutto calcolare la marea astronomica prevista per la stazione mareografica di cui si stanno validando i dati. La componente astronomica di marea è infatti descritta da una precisa formulazione matematica come sovrapposizione di varie oscillazioni armoniche a diversa periodicità. Per avere il livello di marea astronomica ad un certo istante, si sommano i valori assunti in quell'istante da alcune curve sinusoidali (*figura 13*). A questa curva risultante va aggiunto un livello di riferimento, pari alla differenza tra il livello medio mare attuale e lo Z.M.P.S.

riferito al 1897 (dal 2010 tale quantità è di 26 cm), (Cordella *et al.*, 2011). La formula che fornisce la marea astronomica risulta essere pertanto:

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos(\sigma_n t - \kappa_n) \quad (1)$$

dove A_0 è il livello di riferimento, A_n è l'ampiezza, σ_n è la frequenza angolare, κ_n è il ritardo di fase della componente armonica n , mentre t è il tempo.

Nel caso della Laguna di Venezia sono sufficienti otto componenti mareali per il calcolo pratico della marea astronomica prevista (Defant, 1960), quattro semidiurne (M2, S2, N2, K2) e quattro diurne (K1, O1, P1, S1). L'ampiezza ed il ritardo di fase di ciascuna componente elementare sono detti costanti armoniche e possono essere calcolate analizzando estese serie storiche di dati di livello del mare, attraverso un software denominato Polifemo (Tomasin, 2005).

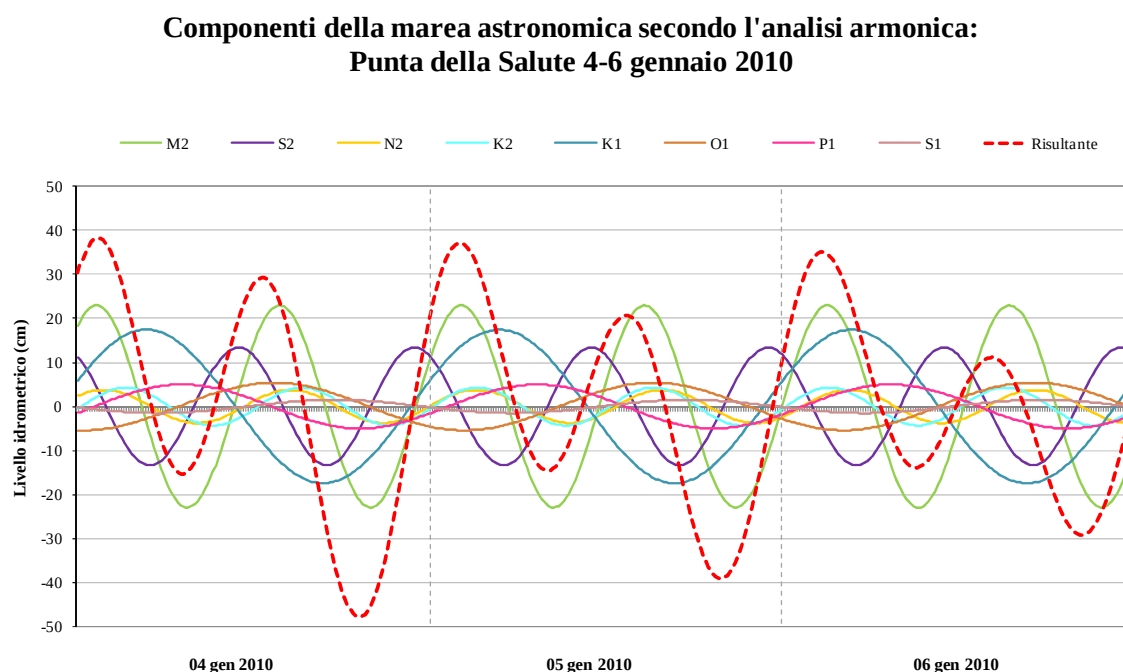


Figura 13. Le 8 componenti principali della marea astronomica necessarie per il calcolo della marea astronomica a Venezia. Stazione di Punta della Salute, 4-6 gennaio 2010.

Il processo di analisi del sovrizzo prende avvio dal calcolo delle costanti armoniche annualizzate per la stazione mareografica di cui si stanno validando i dati. Per ottenerle si devono considerare i dati precedentemente filtrati provenienti da un anno di osservazioni mareali, da cui vengono estratti i valori orari del livello di marea necessari per il corretto funzionamento del software Polifemo. Questo procedimento permette di ottenere delle costanti armoniche annualizzate, ossia basate sulle serie storiche di dati registrati e sui dati della serie annuale in esame. In questo modo, applicando l'equazione (1), si ottiene la marea astronomica prevista per la stazione mareografica considerata. Con essa, infine, è

possibile calcolare il sovrizzo, dato dalla differenza tra marea reale registrata dal mareografo e marea astronomica.

Il processo di analisi del sovrizzo consiste nel controllo visivo della curva rappresentativa del sovrizzo stesso, alla ricerca di sue eventuali periodicità. Infatti qualora l'orologio del mareografo abbia un orario sbagliato o induca a sfasamenti temporali del tracciato di marea, il sovrizzo appare come una curva periodica, simile ad una curva di marea. Al contrario il sovrizzo non presenta alcuna periodicità se i dati di livello di marea sono corretti da un punto di vista temporale.

In certi casi può accadere di riscontrare un sovrizzo periodico anche in assenza di reali problemi di orario del mareografo. Ciò si verifica, in particolare, quando delle onde di sessa si sovrappongono alla marea astronomica. La loro ampiezza, tuttavia, tende a smorzarsi gradualmente normalizzando il sovrizzo, cosa che non accadrebbe in presenza di un vero e proprio sfasamento temporale delle misure di livello di marea.

Qualora venga riscontrato un problema di orario nei dati di livello di marea è sufficiente, generalmente, traslare nel tempo la serie di misurazioni di una quantità pari all'errore di orario riscontrato. La serie di dati così corretta viene poi impiegata nel processo di analisi successivo.

L'analisi delle costanti armoniche permette anche di accertare se siano avvenute delle importanti modificazioni morfologiche nelle vicinanze della località considerata. In questo caso infatti, esse tendono a variare nel corso degli anni e potrebbero spiegare eventuali comportamenti anomali di lungo periodo sulle registrazioni di marea (*figura 14*).

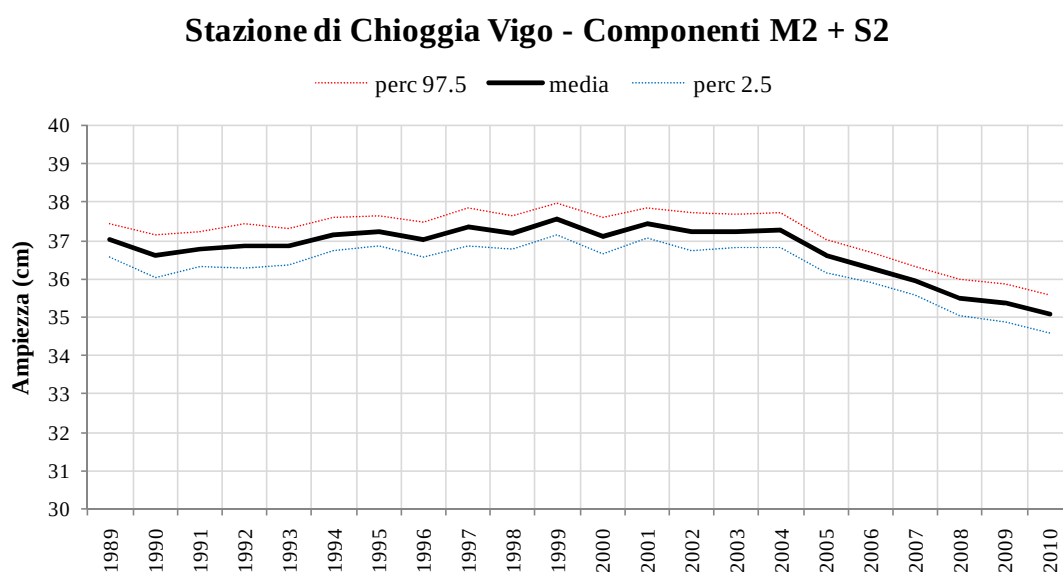


Figura 14. Variazione delle costanti armoniche nel tempo per due componenti della marea astronomica. Stazione di Chioggia Vigo, ampiezza delle componenti M2 e S2.

Il processo di analisi per direttrice di marea consente di mettere a confronto i livelli di marea di più stazioni mareografiche posizionate lungo la stessa direttrice di propagazione. All'interno della Laguna di Venezia si possono individuare infatti più direttrici: esse sono le vie preferenziali attraverso cui si muovono le masse d'acqua durante le fasi di flusso e riflusso della marea e sono costituite da una successione dei principali canali che innervano la laguna (*figura 15*). La stazione di Punta della Salute, ad esempio, è situata sulle direttrice del canale di San Nicolò, che dalla bocca di Lido arriva fino a Porto Marghera, passando per il canale di San Nicolò, quello della Giudecca ed il Vittorio Emanuele III.

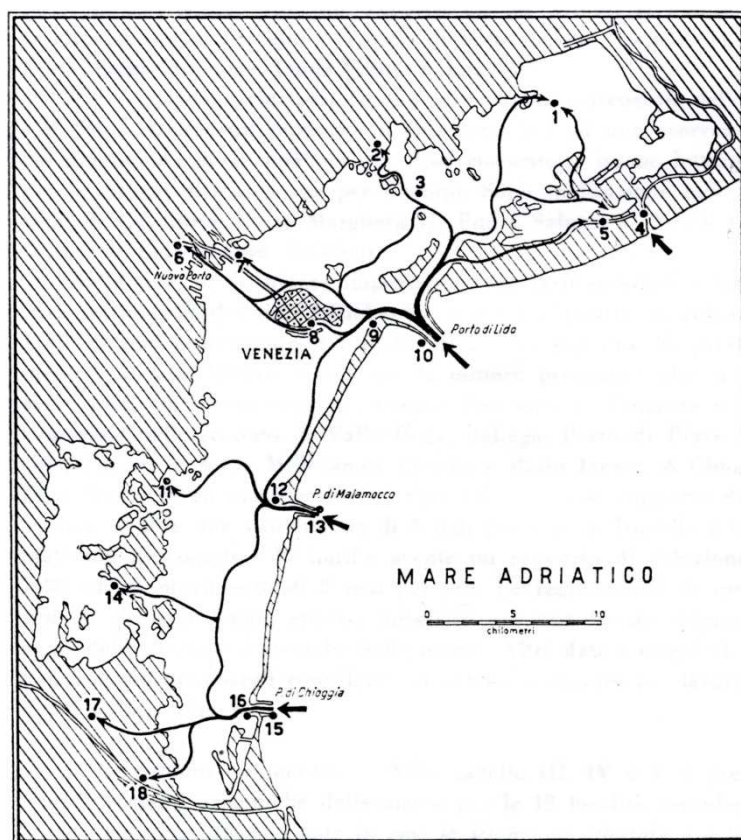


Figura 15. Arterie principali di propagazione della marea dalle bocche di porto alle stazioni mareografiche. Fonte: S. Polli (1951), "Propagazione della marea nella laguna di Venezia", Istituto Sperimentale Talassografico, Trieste, pubblicazione n. 288.

Questo tipo di analisi consente di rilevare eventuali errori nel tracciato mareale non riscontrati nelle due fasi precedenti. Lungo una direttrice infatti, la marea subisce un ritardo di propagazione ed una attenuazione della sua ampiezza. Mettendo a confronto le stazioni situate nella medesima direttrice è possibile verificare la bontà dei dati di livello registrati. Infatti il tracciato di marea di stazioni che appartengono alla stessa direttrice ha un andamento molto simile, salvo essere traslato nel tempo per il ritardo di propagazione ed attenuato in ampiezza. Ciò permette di rilevare le eventuali starature degli strumenti di

misura del livello di marea, dovute ad errate regolazioni degli strumenti stessi o a variazioni del caposaldo della stazione mareografica (ad esempio a causa della subsidenza del terreno). Sono individuabili inoltre i possibili sfasamenti temporali non riscontrati nelle analisi precedenti: il ritardo di propagazione rispetto il mare aperto è infatti noto per tutte le stazioni mareografiche. Ciò consente di conoscere il tempo che intercorre tra il passaggio del colmo di marea in più stazioni appartenenti alla stessa direttrice e di verificare che esso si mantenga su valori costanti.

L'ultima analisi consiste nel calcolo e nel controllo dei valori di livello medio del mare su base decadale, mensile ed annuale per stazioni contermini o appartenenti alla stessa direttrice. Questo processo permette di mettere in relazione i livelli registrati in stazioni prossime tra loro al fine di verificare l'esatta taratura dei mareografi ed il corretto valore del caposaldo della stazione. Infatti per stazioni situate all'interno della laguna, il livello medio del mare deve essere simile e differire, al massimo, di una quantità pari ad 1 cm. Per le stazioni site in mare, soggette alla forza del moto ondoso, è tollerabile invece una differenza più ampia, comunque contenuta entro un paio di centimetri.

Qualora una stazione presenti un errore di taratura del suo mareografo, il livello medio del mare rispetto a stazioni contermini può risultare discordante. L'entità della differenza di livello medio dà un'utile informazione sulla correzione da apportare ai dati di livello di marea. La finestra temporale in cui viene calcolata la media (decadale, mensile, annuale) permette inoltre di risalire al momento in cui il problema ha iniziato a manifestarsi.

Una volta che una serie di dati di livello di marea ha superato con successo questi controlli si può considerare validata e corretta, quindi adatta ad essere utilizzata in qualunque tipo di analisi tecnico-scientifica che ne presupponga l'impiego. È bene sottolineare, tuttavia, che la validazione dei dati non costituisce di per sé un risultato assoluto: può accadere infatti che dati validati in passato possano essere messi in discussione a causa di errori commessi in sede di validazione o da conoscenze recenti non disponibili al momento della validazione.

Capitolo 3

Validazione di alcune serie di dati di livello di marea registrate da stazioni della Rete Mareografica della Laguna di Venezia

3.1 Stazioni mareografiche considerate nella validazione

Le procedure di validazione dei dati di livello di marea descritte nel capitolo precedente sono state applicate alle osservazioni provenienti da alcune stazioni mareografiche appartenenti alla R.M.L.V. In particolare sono state considerate 13 stazioni, con dati di marea registrati nel biennio 2009-2010, registrati esclusivamente da strumenti elettronici (*figura 16*). Le stazioni validate sono elencate in *tabella 1*, in cui vengono riportati anche i tipi di strumentazione elettronica presente all'interno della stazione mareografica per la misura della marea.

Num.	Stazioni	Anni validati	Mareografi disponibili (elettronici)
1	Chioggia Vigo	2010	2 galleggianti
2	Porto Caleri	2010	2 galleggianti
3	Grado	2010	2 galleggianti
4	Lido diga sud	2010	1 galleggiante + 1 idrometro a pressione
5	Malamocco diga nord	2010	2 galleggianti
6	Chioggia diga sud	2010	1 galleggiante + 1 idrometro a pressione
7	Piattaforma CNR	2010	1 ondometro
8	Meda	2009-2010	1 galleggiante
9	Sant'Erasmo	2009-2010	1 galleggiante
10	Punta della Salute	2010	2 galleggianti + 1 idrometro a pressione
11	San Nicolò	2009-2010	2 galleggianti
12	Marghera	2009-2010	2 galleggianti
13	Faro Rocchetta	2009-2010	2 galleggianti

Tabella 1. Stazioni mareografiche di cui sono stati validati i dati.

In base alla loro localizzazione, le stazioni considerate si possono dividere in due gruppi: al primo gruppo appartengono le stazioni situate lungo la costa adriatica, mentre al secondo appartengono le stazioni ubicate all'interno della laguna. Le procedure di validazione sono le medesime per i due gruppi ma, generalmente, le stazioni situate in mare presentano un tracciato di marea meno uniforme ed omogeneo rispetto a quello delle stazioni posizionate all'interno della laguna, a causa della presenza di moto ondoso più intenso.

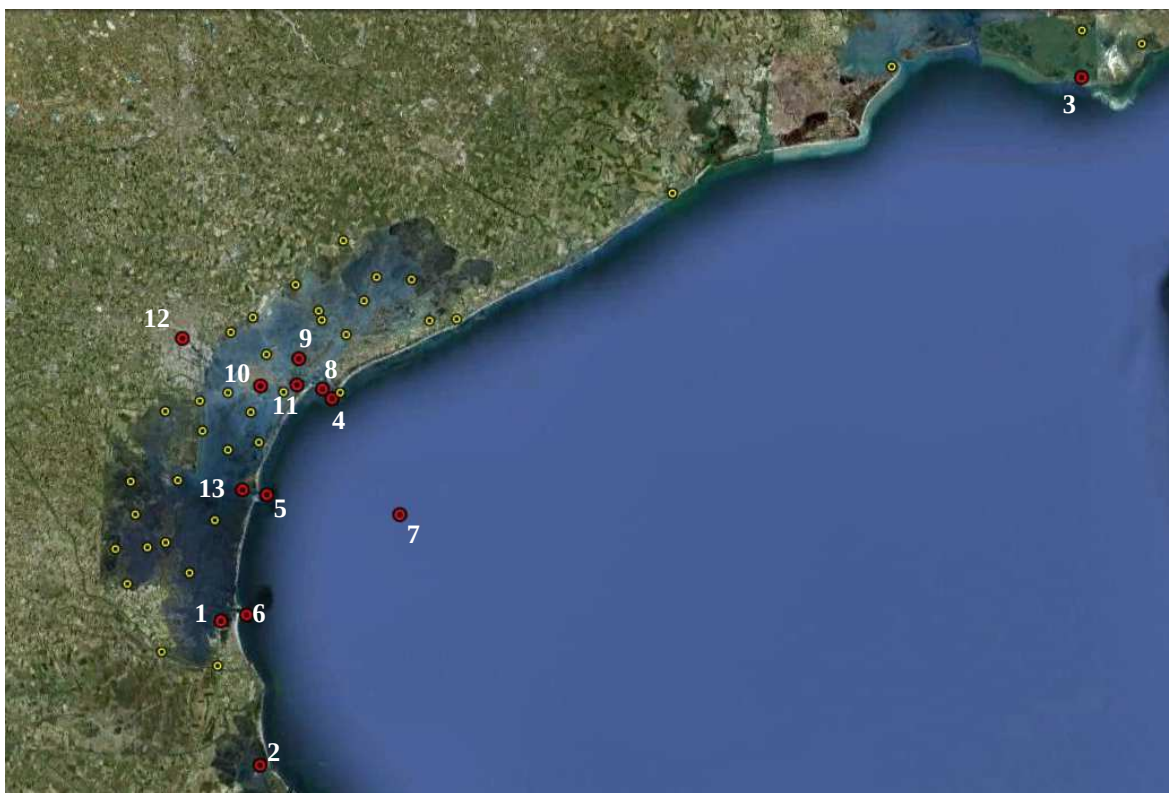


Figura 16. Stazioni mareografiche della R.M.L.V. di cui sono stati validati i dati di livello di marea.

3.2 Applicazione delle procedure di validazione dei dati

Prima di applicare le varie fasi necessarie per la validazione dei dati di livello di marea come descritto formalmente nel § 2.3, sono stati analizzati i registri contenenti le operazioni svolte dal personale addetto alla manutenzione periodica dei mareografi. Ogni stazione mareografica, infatti, viene regolarmente visitata per la sostituzione dei mareogrammi, lo scarico dei dati dalle memorie fisiche e le operazioni pianificate di ispezione. Quest'ultime, in particolare, hanno lo scopo di verificare lo stato di funzionamento delle strumentazioni ed effettuare le operazioni di stop ai mareografi.

Le operazioni di stop consistono nell'esecuzione di una misurazione manuale, mediante cordella metrica, del livello di marea all'interno del pozzetto di calma rispetto la piastrina della stazione. La quota della piastrina è collegata al piano di riferimento individuato dallo Zero Mareografico di Punta della Salute e rappresenta il caposaldo per la stazione considerata. Il livello di marea rispetto allo Z.M.P.S. viene calcolato per differenza, sottraendo la misura manuale effettuata dall'operatore alla quota del caposaldo (*figura 17*).

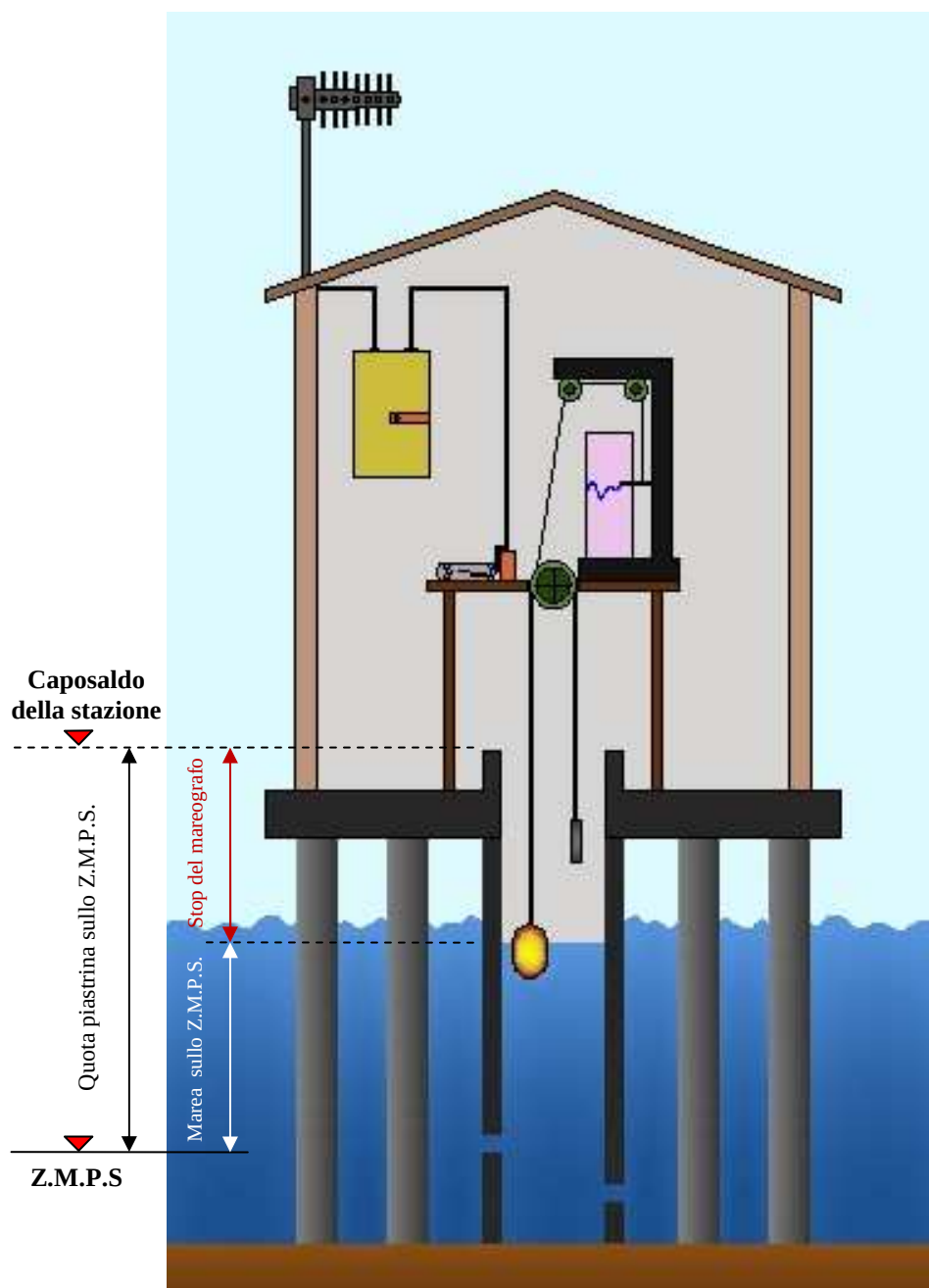


Figura 17. Operazione di stop di un mareografo per la misura del livello di marea.

Il valore dell'altezza di marea, la data e l'ora vengono annotati su un apposito registro, denominato scheda stazione (*tabella 2*). Nel caso in cui, a seguito del calcolo del livello di

marea rispetto lo Z.M.P.S., si osservi uno scostamento di ± 1 cm rispetto all'altezza indicata dal mareogramma o dal display degli strumenti elettronici, l'operatore effettua la regolazione manuale del mareografo starato. Ciò avviene adattando la misura strumentale al valore misurato manualmente, annotando opportunamente l'operazione effettuata nell'apposita scheda stazione. L'utilizzo di questi registri consente di tener memoria di tutte le operazioni di taratura effettuate sugli strumenti di misura.

Data	Stazione		C.S.	Operatore
27/12/2010	Punta della Salute		174.00	Pav
	Orario	Lettura	Note	
STOP Arrivo	9:22s	148.00	26.00	
Galleggiante 1	9:20s	28.00	Regolo ora e quota, scarico, svuoto	
Galleggiante 2	9:22s	27.00	Ok	
Idrometro press		26.00	Ok (controllato quota in centrale)	
Meccanico	9:22s	27.50	Regolo quota	
STOP Partenza	9:30s	143.00	31.00	
Note				

Tabella 2. Scheda stazione compilata in data 27 dicembre 2010 durante una ispezione di controllo presso la stazione di Punta della Salute.

Qualora l'operatore abbia provveduto alla regolazione manuale dello strumento, in sede di validazione è necessario ripartire gradualmente a ritroso nel tempo la correzione introdotta sui dati di livello. Tale procedimento è facilmente intuibile se si ricorre ad un esempio. Si faccia riferimento alla scheda stazione contenuta in *tabella 2*: il 27 dicembre 2010 lo strumento galleggiante 1 segna un livello di marea di 28 cm mentre l'operatore misura con la cordella metrica un livello di 26 cm. Lo strumento pertanto risulta starato di 2 cm. Supponendo che la visita precedente alla stazione sia avvenuta il 25 novembre 2010, il tempo trascorso tra le due visite, estremi inclusi, è di 33 giorni. Per introdurre la correzione di 2 cm, questo periodo di tempo viene diviso in tre parti uguali di 11 giorni: nella prima parte non viene apportata nessuna modifica, nella seconda parte si applica una correzione di 1 cm ed infine nell'ultima parte si passa ad una correzione di 2 cm. In questo modo si è in grado di spalmare con gradualità gli errori derivanti dalle derive strumentali dei mareografi.

3.2.1 Filtro dei dati grezzi

Dopo aver portato a termine questo tipo di controllo con le relative correzioni, si passa al processo di filtro dei dati, al fine di rilevare gli errori più grossolani presenti nei dati grezzi. Questo processo di basa sull'interpretazione visiva delle curve di marea rappresentative delle misurazioni effettuate dai diversi strumenti e di quelle relative al filtro standard (con soglia ± 10 cm).

La presenza di uno spike è segnalata da un picco anomalo presente nel tracciato di marea, con il filtro standard che subisce una rapida escursione positiva e negativa. La correzione di questo tipo di errore può esser fatta in due modi: il primo prevede l'eliminazione dello spike senza la sostituzione del valore di livello di marea che si presume essere corretto. Il tracciato di marea rimane così privo del dato registrato nell'istante in cui si è manifestato lo spike. Questo tipo di correzione si introduce quando nella stazione considerata è presente un solo mareografo e non si hanno altre osservazioni per integrare il dato cancellato. Il secondo metodo consiste invece nel sostituire il dato anomalo di livello con un dato registrato da un altro strumento della stessa stazione (*figura 18*). Questa via è percorribile se in quella stazione sono presenti più strumenti e solo uno di essi presenta lo spike. Se entrambi gli strumenti dovessero presentare uno spike nello stesso istante è consigliato mantenerlo ed indagare il fenomeno nella successiva fase di confronto per direttrici, per vedere se questo problema si manifesta anche nelle stazioni contermini.

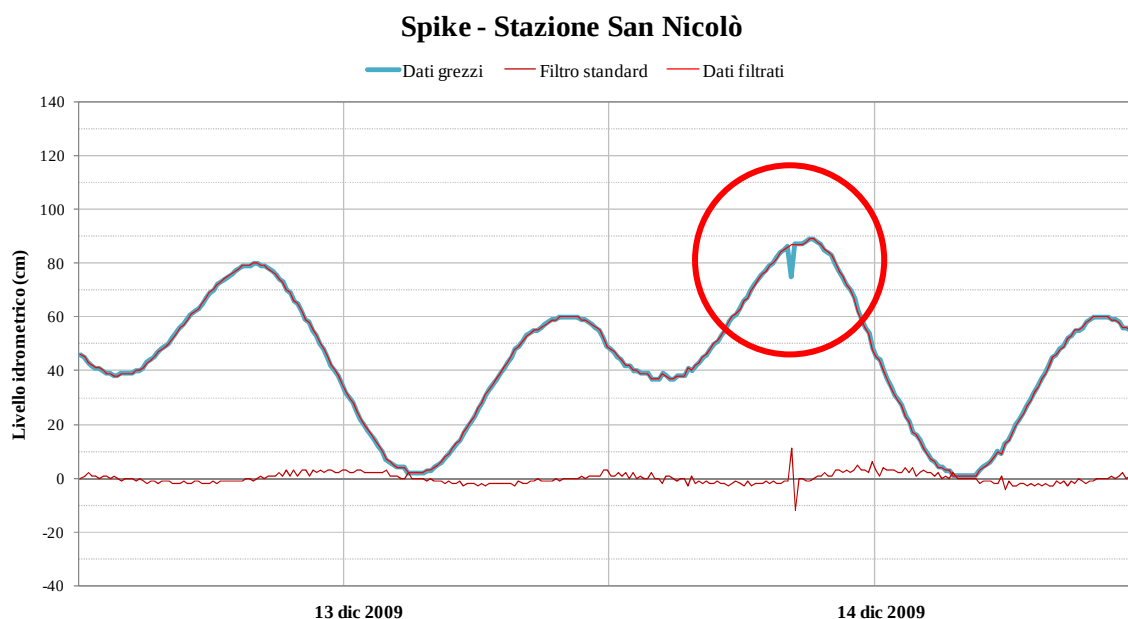


Figura 18. Esempio di spike con relativa correzione. Stazione di San Nicolò, 13-14 dicembre 2009.

Uno scarrucolamento si manifesta come una improvvisa traslazione del tracciato di marea, con il filtro standard che subisce una variazione pari all'entità dello scarrucolamento. Per correggere questo tipo di errore, analogamente a quanto visto per lo spike, si può ricorrere alle osservazioni di un altro strumento posizionato nella stessa stazione, sostituendo tutti i dati registrati dal mareografo dal momento dello scarrucolamento fino alla sua nuova taratura da parte del personale addetto alla manutenzione. Se nella stazione è presente un solo mareografo la correzione è più complessa. Infatti è possibile traslare la serie dei dati di livello di una quantità pari all'entità dello scarrucolamento solamente se esso si verifica in prossimità dei colmi o dei cavi della marea (*figura 19*). Qualora esso si presenti durante le fasi di marea crescente o calante la correzione potrebbe essere falsata a causa del forte gradiente di livello che si manifesta in queste condizioni. L'entità dello scarrucolamento data dal filtro standard, infatti, potrebbe essere diversa da quella realmente avvenuta.

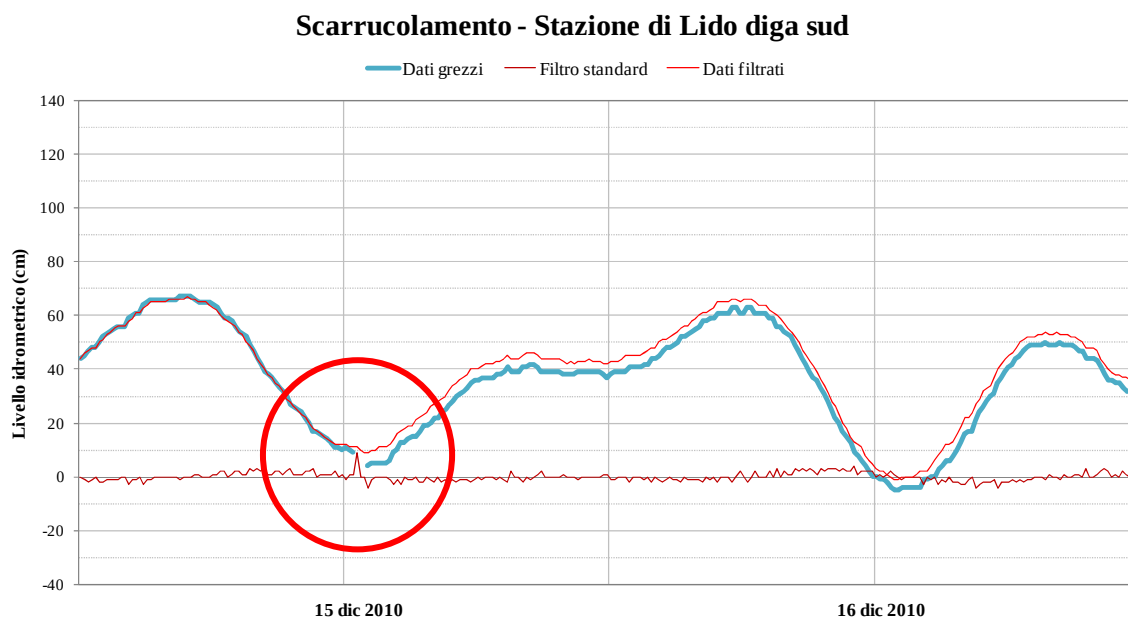


Figura 19. Esempio di scarrucolamento con relativa correzione. Stazione di Lido diga sud, 15-16 dicembre 2010.

La presenza di un blocco del galleggiante del mareografo è segnalata dal manifestarsi di una quota costante nel tracciato di marea per una durata pari a quella del blocco. Il filtro standard non fornisce indicazioni nel momento in cui il galleggiante si blocca, ma presenta un picco nel momento in cui avviene lo sblocco e lo strumento inizia a misurare regolarmente (*figura 20*). La correzione di questo tipo di problema dipende sempre dalla ridondanza di strumenti presenti all'interno della stazione. Se essa è dotata di un solo strumento vengono cancellati i dati registrati nell'intervallo di tempo in cui il mareografo è

rimasto bloccato. Se la stazione è equipaggiata con più strumenti, si possono utilizzare i dati registrati da un altro mareografo per sostituirli a quelli dello strumento bloccato.

Blocco a quota costante - Stazione di Punta della Salute

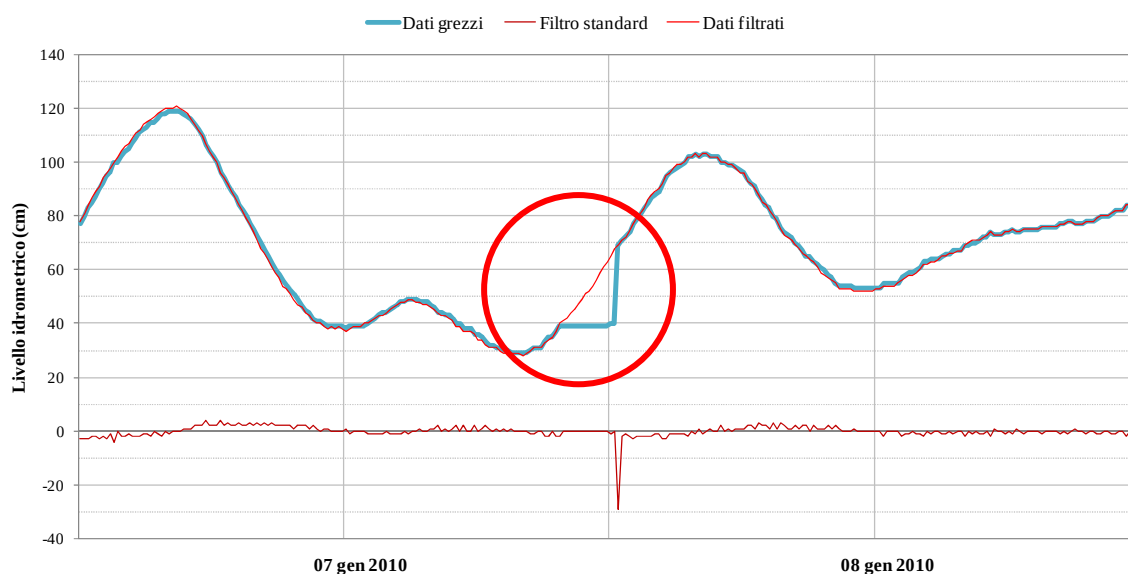


Figura 20. Esempio di blocco con relativa correzione. Stazione di Punta della Salute, 7-8 gennaio 2010.

Quando vi sono dati mancanti nel tracciato di marea, esso presenta dei buchi mentre il filtro standard mostra una serie di picchi in corrispondenza dei dati mancanti (*figura 21*). La mancanza del dato può essere dovuta ad un'avaria temporanea nei sistemi elettronici di registrazione oppure a dei problemi di trasmissione/ricezione del segnale di invio dei dati dalla stazione mareografica alla centrale di raccolta.

Dati mancanti - Stazione di Punta della Salute

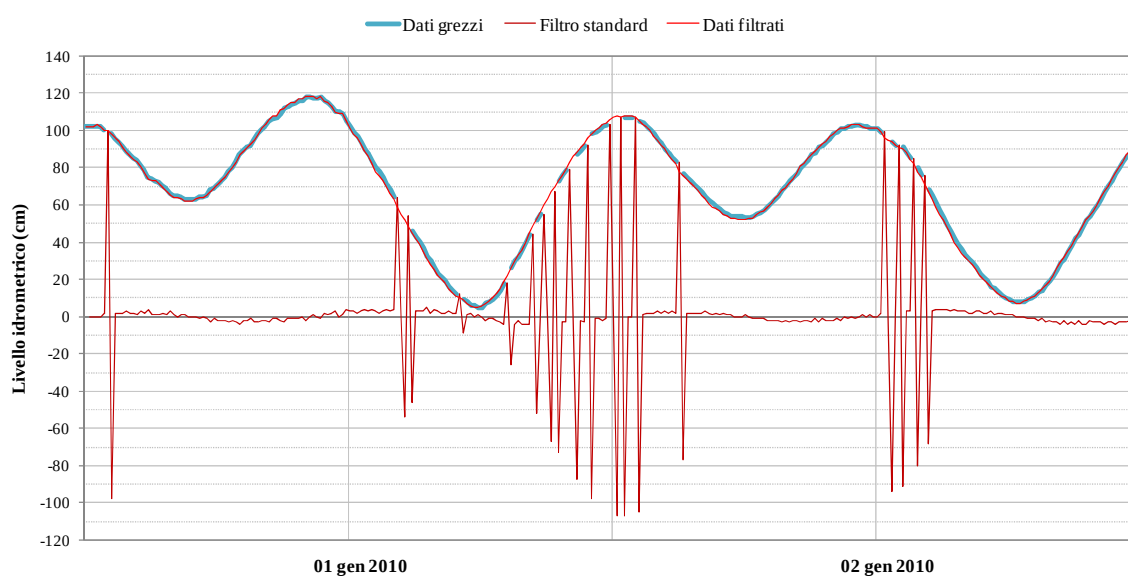


Figura 21. Esempio di dati mancanti con relativa correzione. Stazione di Punta della Salute, 1-2 gennaio 2010.

Per correggere questo tipo di problema, se il dato mancante non è stato registrato per un'avaria temporanea del mareografo, è sufficiente integrare i dati mancanti con altre registrazioni provenienti da uno strumento presente nella stessa stazione. Se l'indisponibilità del dato, invece, è dovuta ad un problema di ricezione/trasmissione del segnale, il dato è comunque presente nella memoria locale del mareografo. Per averlo a disposizione si deve però attendere lo scarico manuale dei dati da parte del personale addetto alla manutenzione della stazione mareografica.

La presenza di valori privi di significato fisico può essere dovuta alle cause più diverse, ma in genere essi sono causati da malfunzionamenti o avarie degli strumenti di misura (*figura 22*). La correzione di questo tipo di problema prevede l'eliminazione del dato privo di significato fisico e la sua sostituzione con osservazioni corrette provenienti da un altro strumento della stessa stazione mareografica.

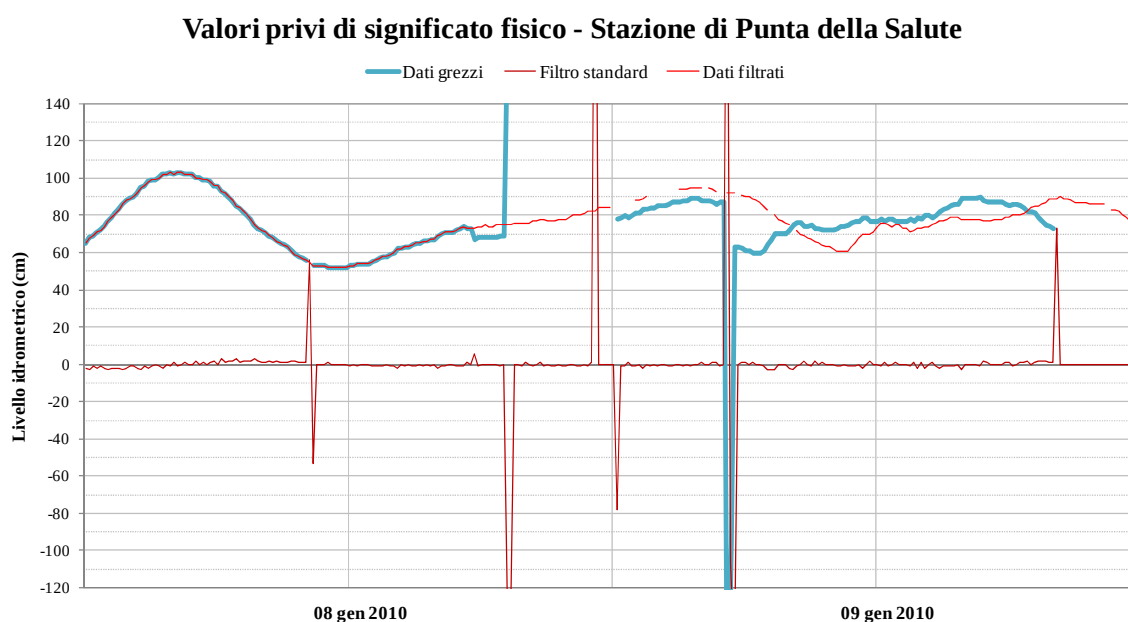


Figura 22. Esempio di tracciato di marea contenente valori privi di significato fisico. Stazione di Punta della Salute, 8-9 gennaio 2010.

3.2.2 Analisi del sovrizzo

Dai dati filtrati, seguendo il procedimento presentato nel precedente capitolo (cfr. § 2.3), sono state ricavate le costanti armoniche necessarie per il calcolo della marea astronomica. Con essa è stato possibile ricavare il sovrizzo, dato dalla differenza tra marea rilevata (rappresentata dai dati filtrati) e marea astronomica prevista.

L'analisi del sovranzo permette di rilevare eventuali errori di orario nel mareografo dovuti, ad esempio, ad una errata regolazione dell'orologio durante le operazioni di stop del mareografo o ad un'avaria dello strumento. Qualora sia presente un errore sull'orario del mareografo, la curva del sovranzo è periodica e assomiglia ad un tracciato di marea (*figura 23*). Ciò è dovuto alla differenza di fase che viene a crearsi tra marea misurata e marea astronomica prevista. Per correggere questo tipo di errore è sufficiente traslare la serie dei dati avanti o indietro nel tempo di una quantità tale da rendere minimo e non periodico il sovranzo. Per determinare l'entità della correzione vengono comunque in aiuto anche le schede stazioni: durante l'operazione di stop, infatti, viene annotato l'orario fornito dallo strumento e quello esatto relativo all'istante in cui viene effettuato lo stop (cfr. *tabella 2*). La differenza tra questi due orari rappresenta l'entità della correzione temporale da apportare ai dati registrati prima della visita alla stazione.

Nelle serie di dati considerate per la validazione, questo tipo di problema si è presentato molto raramente. Infatti se una stazione dispone di due mareografi, come quasi tutte quelle esaminate, è improbabile che entrambi gli strumenti presentino un errore di orario nello stesso periodo di tempo dal momento che i mareografi registrano le misure di livello di marea in modo indipendente l'uno dall'altro, salvando i dati su memorie fisiche separate. È opportuno sottolineare, tuttavia, che questo tipo di analisi è utilizzabile solo se l'errore di orario è superiore ai 20-30 minuti. Un errore più piccolo infatti, dell'ordine di pochi minuti, non è individuabile con la curva del sovranzo. In tal caso si rende necessario il confronto con il tracciato di marea fornito da uno strumento montato nella stessa stazione.

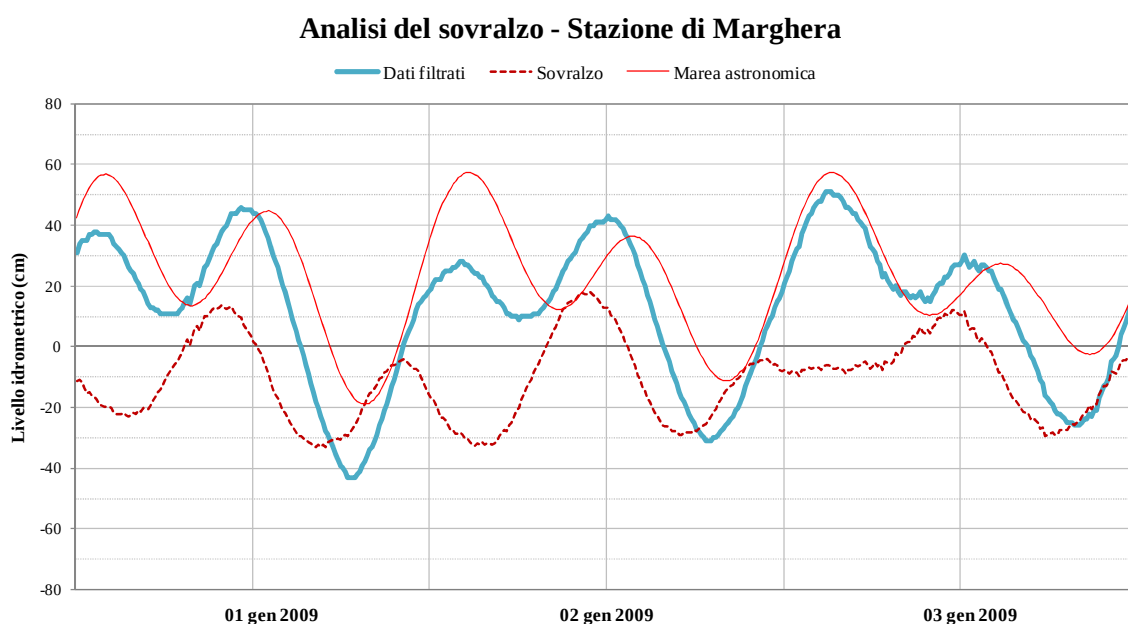


Figura 23. Esempio di analisi del sovranzo. In questo caso i dati filtrati risultavano in anticipo di un'ora rispetto la marea astronomica prevista. Stazione di Marghera, 1-3 gennaio 2009.

3.2.3 Analisi per direttrice di propagazione della marea

Il passo successivo ai processi di filtro e analisi del sovrizzo consiste nel mettere a confronto le misure di livello di marea fornite da stazioni appartenenti alla stessa direttrice di propagazione della marea. Questo tipo di analisi permette di rilevare eventuali errori non riscontrati nelle fasi precedenti, comprese eventuali variazioni del caposaldo della stazione dovute a fenomeni come la subsidenza del terreno o a sprofondamenti dell'intera stazione. Dato il numero relativamente ridotto di stazioni validate, è stato possibile fare un'analisi su due direttrici complete di tutte le relative stazioni e di una direttrice incompleta:

- la direttrice mare (completa), a cui afferiscono le stazioni situate all'esterno della Laguna di Venezia e alle bocche di porto: Grado, Lido diga sud, Malamocco diga nord, Chioggia diga sud, Porto Caleri, Piattaforma CNR;
- la direttrice del canale di San Nicolò e del bacino di San Marco (completa): Lido diga sud, Meda, San Nicolò, Punta della Salute, Marghera (*figura 24*);
- la direttrice Malamocco-Marghera (incompleta): Malamocco diga nord, Faro Rocchetta, Marghera. Mancano le stazioni di Motte di Volpego e Fusina.



Figura 24. Stazioni situate sulla direttrice di marea passante per Punta della Salute ed il bacino di San Marco.

Durante questa fase del processo di validazione, è stata valutata la presenza di una effettiva attenuazione dell'ampiezza di marea ed il mantenimento del ritardo di propagazione tra

stazioni appartenenti alla stessa direttrice (*figura 25*). L'entità dell'attenuazione è variabile a seconda della morfologia della laguna in prossimità della stazione considerata: una stazione situata nei pressi di un importante canale, ad esempio, fornisce attenuazioni molto più ridotte rispetto un'altra stazione posizionata in una zona barenicola, in cui le resistenze al moto tendono a smorzare significativamente l'onda di marea. Questo indicatore, pertanto, va valutato di caso in caso, in funzione della localizzazione delle stazioni. Il ritardo di propagazione dell'onda di marea tra stazioni afferenti alla stessa direttrice deve mantenersi invece su valori costanti. Esso infatti è noto a priori dalle tavole annuali di previsione della marea astronomica² e una sua variazione significativa può essere indice di uno sfasamento temporale nelle registrazioni di una certa stazione.

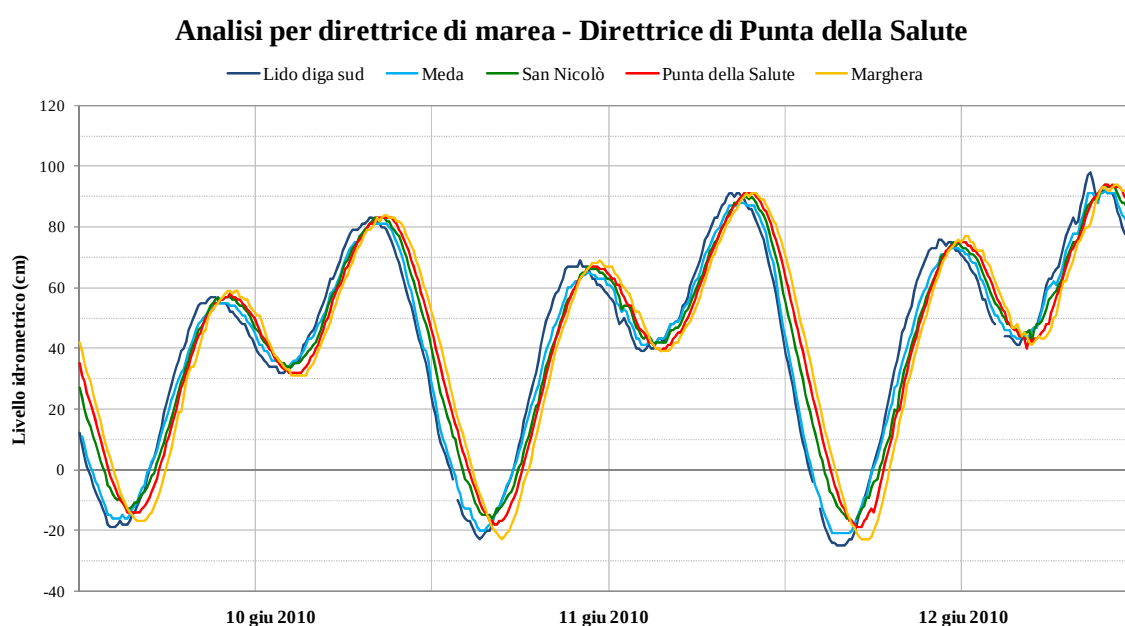


Figura 25. Andamento dei livelli di marea registrati dalle stazioni presenti sulla direttrice passante per Punta della Salute ed il bacino di San Marco. 10-12 giugno 2010.

3.2.4 Analisi del livello medio del mare

Parallelamente all'analisi per direttrice di marea è buona norma effettuare un confronto del livello medio del mare ottenuto dai dati di livello di marea in corso di validazione. Il livello

² Ogni anno vengono redatte le "Previsioni delle altezze di marea per il Bacino di San Marco e delle velocità di corrente per il Canal Porto di Lido", pubblicazione nata dalla collaborazione tra il Centro Previsioni e Segnalazioni Maree (ICPSM) del Comune di Venezia, il Servizio Laguna di Venezia (ISPRA) e l'Istituto di Scienze Marine (CNR-ISMAR).

di medio mare viene calcolato come media aritmetica di tutti i dati registrati in finestre temporali prestabilite, ottenendo così medie decadali, mensili ed annuali (figure 26 e 27).

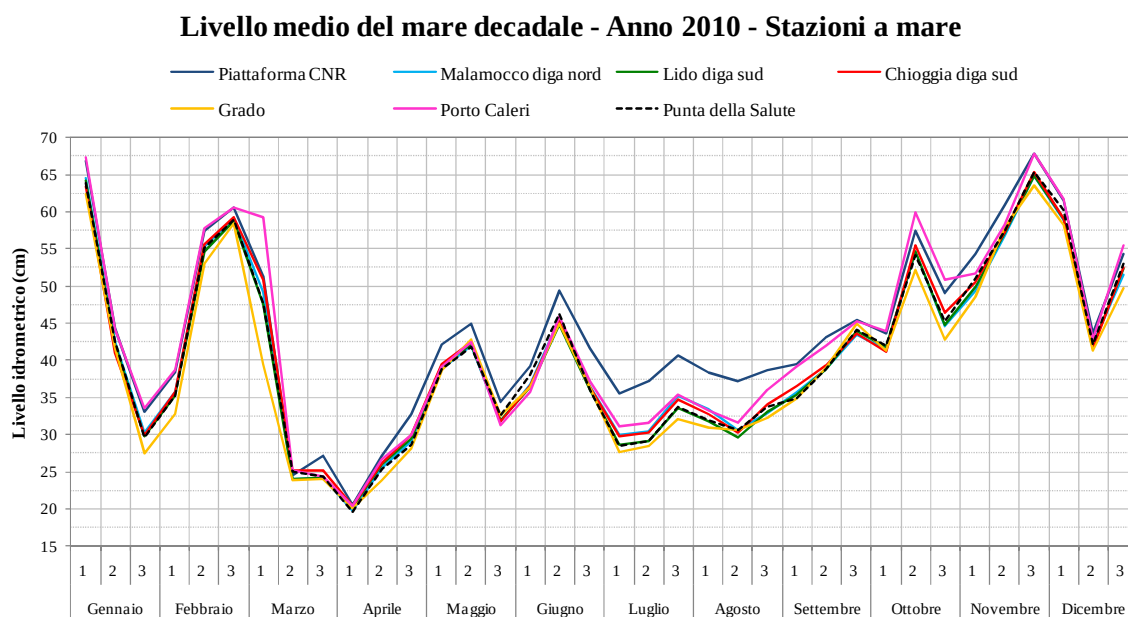


Figura 26. Andamento del livello medio mare decadale per le stazioni della direttrice mare, anno 2010.

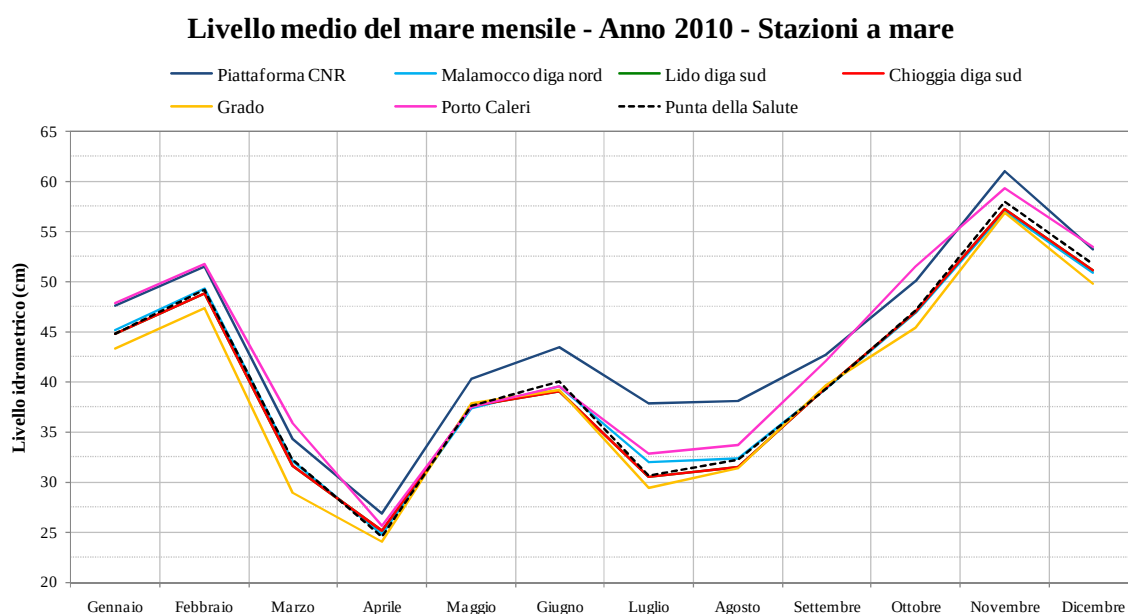


Figura 27. Andamento del livello medio mare mensile per le stazioni della direttrice mare, anno 2010.

Lo scopo di questa analisi è di verificare la compatibilità e la concordanza delle misure di marea registrate da stazioni mareografiche distanti l'una dall'altra ma riferite tutte allo stesso piano di riferimento individuato dallo Z.M.P.S. (Lo Castro, 2008). In quest'ottica riveste un'importanza fondamentale la stazione di Punta della Salute: essa infatti, data

l'importanza storica, è tenuta costantemente sotto controllo³ e si può ritenere che i dati registrati in questa stazione siano tra quelli meno affetti da errori (Rosso, 2008).

Una volta calcolato il livello medio del mare, per le stazioni situate all'interno della laguna è tollerabile una differenza di ± 1 cm rispetto il valore fornito dal mareografo di Punta della Salute. Per le stazioni situate all'esterno della laguna è ammissibile invece una differenza più grande, ma comunque contenuta entro qualche centimetro. Questa maggiore tolleranza è dovuta principalmente a due fattori: il primo riguarda la maggiore intensità del moto ondoso sottocosta e in mare aperto rispetto a quello che si può generare in laguna. In caso di mareggiate, infatti, le onde vengono difficilmente filtrate dal pozzetto di calma e si sovrappongono al tracciato di marea, fornendo quindi livelli più elevati. Questa situazione si presenta frequentemente per le stazioni situate alle bocche di porto, ma è più difficile da riscontrare all'interno della laguna. I fondali lagunari, infatti, sono meno profondi rispetto a quelli esterni alla laguna, ed il moto ondoso che vi si può sviluppare è quindi più ridotto. Il secondo fattore si basa sulla legittimità di riferire i livelli di marea misurati da stazioni esterne e lontane dalla laguna ad un punto di riferimento situato invece al suo interno. È questo il caso, ad esempio, di stazioni come Grado o Porto Caleri, distanti in linea d'aria rispettivamente circa 86 km e 37 km da Punta della Salute. Questa distanza pone alcuni dubbi sull'ipotesi che l'entità e i fenomeni di subsidenza che si verificano in queste località siano gli stessi di quelli che si riscontrano sul suolo lagunare veneziano. A questo si deve aggiungere il fatto che tali stazioni sono situate in zone caratterizzate da una morfologia molto diversa da quella presente in Laguna di Venezia. Questa circostanza può modificare la curva di marea, influenzando l'andamento e l'entità dei livelli misurati.

Quando viene riscontrata una differenza significativa di livello medio del mare tra stazioni contermini o rispetto alla stazione di Punta della Salute, è opportuno indagare le ragioni che inducono a questo fenomeno, controllando adeguatamente le varie fasi della validazione. In questo modo si possono escludere eventuali errori commessi durante il processo di filtro e correzione dei dati. Infatti può accadere che si riscontrino delle incompatibilità nel livello medio del mare quando vi sia una variazione della quota del caposaldo di una stazione rispetto allo Z.M.P.S. Per comprendere come è possibile rilevare e correggere questo tipo di problema si rimanda agli *Allegati 2 e 3*.

³ Esiste, ad esempio, una convenzione tra ICPSM, ISPRA-SLV e CNR-ISMAR per il controllo tramite GPS del caposaldo della stazione. Al suo interno sono posizionati inoltre vari strumenti appartenenti a questi enti ed istituti, così da avere a disposizione numerose osservazioni indipendenti del livello di marea.

3.2.5 Analisi del fenomeno delle quadrature

Una quadratura è un fenomeno durante il quale il livello del mare all'interno della laguna si mantiene pressoché costante per un tempo che può raggiungere le sei ore. Esso si verifica solo in particolari condizioni: deve essere presente infatti una marea di quadratura (primo o ultimo quarto del mese lunare) con oscillazioni di livello contenute in ± 1 cm per una durata di almeno 3 ore, durante la quale si manifestino condizioni meteorologiche favorevoli, caratterizzate da pressione atmosferica stabile ed intensità del vento inferiore a 7-10 nodi (grado 3 della scala Beaufort), (Minozzi, 2008). Quadrature di questo tipo in un anno di osservazioni sono piuttosto rare: nel 2010, ad esempio, sono state individuate solamente due quadrature (4-5 giugno e 23-24 luglio) benché il fenomeno astronomico di marea di quadratura si verifichi due volte ogni mese.

Questo tipo di analisi consente di verificare indirettamente la correttezza delle quote dei capisaldi delle stazioni mareografiche attraverso un confronto dei livelli di marea durante la quadratura. In questa situazione, infatti, i livelli misurati dalle diverse stazioni devono essere pressoché identici. Qualora fossero diversi tra loro è probabile che qualche stazione tra quelle considerate abbia subito una variazione di quota del caposaldo, ad esempio per subsidenza del terreno o cedimenti delle fondazioni della cabina mareografica. Per comprendere come è stato possibile rilevare e correggere questo tipo di problema per alcune stazioni tra quelle validate si rimanda agli *Allegati 2 e 3*.

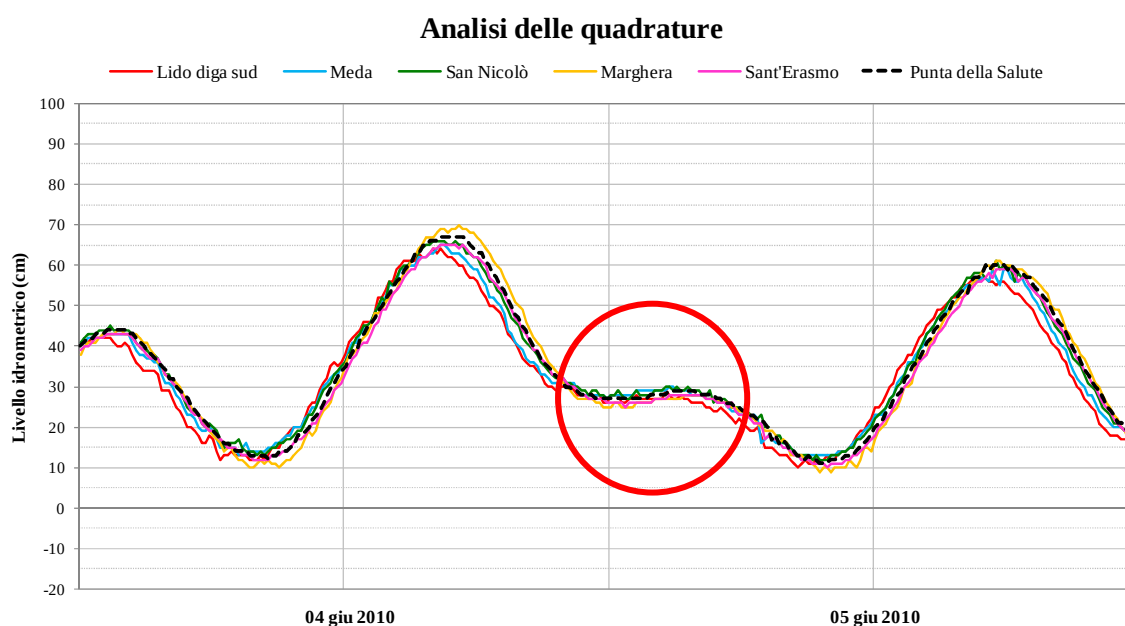


Figura 28. Andamento della marea durante la quadratura verificatasi tra il 4 e il 5 giugno 2010.

Conclusioni

In questo lavoro sono state presentate le tecniche necessarie alla validazione dei dati mareografici applicate ad alcune stazioni appartenenti alla Rete Mareografica della Laguna di Venezia.

L'operazione di validazione è stata scomposta in tutte le fasi che la compongono e sono stati analizzati e descritti i problemi che si possono presentare in sede di revisione dei dati, proponendo diverse modalità di correzione degli errori. Queste procedure sono state applicate a 13 stazioni mareografiche, con dati relativi al biennio 2009-2010, consentendo di arricchire le serie storiche delle stazioni validate.

Il valore del lavoro svolto consiste nell'aver organizzato, assemblato e applicato i protocolli di varie istituzioni internazionali che si occupano di raccolta e analisi di dati mareografici ed oceanografici, nonché le tecniche pratiche maturate dall'esperienza di quegli istituti che a Venezia hanno storicamente registrato i dati di marea.

La ripetibilità dei risultati ottenuti in questo lavoro è assicurata dall'essenza stessa della validazione dei dati mareografici: essa, infatti, deve essere continuamente applicata ai nuovi dati che ogni giorno vengono raccolti, ma può essere utilizzata anche per la revisione di dati già validati in passato, specialmente quando si hanno a disposizione conoscenze recenti non disponibili al momento della validazione originaria.

In quest'ottica, il presente lavoro si configura come una guida pratica da applicare ogni volta che si intende portare a termine una validazione su dati mareografici, con l'obiettivo di divulgare al pubblico solamente dati affidabili e di qualità, quindi adatti ad essere utilizzati in qualunque tipo di analisi tecnico-scientifica che ne presupponga l'impiego.

Bibliografia

Berrelli G., 2004, *Influenza delle condizioni meteorologiche sui sovralti differenziati dei livelli di marea nella Laguna di Venezia*, Tesi di laurea, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Roma.

Caterini E., Colucci R.R., Crisciani F., Raicich F., 2011, *Previsioni di marea 2011 per il Golfo di Trieste con le costanti armoniche aggiornate*, CNR-ISMAR, Trieste.

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, Venezia.

Defant A., 1960, *Physical oceanography*, Pergamon Press, New York, pp. 598.

Dorigo L., 1961, *Le osservazioni mareografiche in Laguna di Venezia*, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Estratto dal volume “I Rapporti preliminari della Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia”, Venezia.

European Sea Level Service, *Quality control of sea level observations*.

Giordani Soika A., 1976, *Venezia e il problema delle acque alte*, Supplemento al vol. XXVII del bollettino del Museo di Storia Naturale di Venezia, Venezia.

Gottardo D., 1975, *Propagazione della marea nella Laguna di Venezia*, Giornale economico speciale, Venezia.

ICPSM, ISPRA, CNR-ISMAR, 2011, *Previsioni delle altezze di marea per il bacino di San Marco e delle velocità di corrente per il Canal Porto di Lido – Laguna di Venezia, valori astronomici 2011*, Venezia.

Intergovernmental Oceanographic Commission, 1993, *Manual of quality control procedures for validation of oceanographic data*.

International Council for the Exploration of the Sea, 2000, *ICES WGMDM Guidelines for water level data*.

Lo Castro D., 2008, *Progetto “Annali meteo-mareografici 2002-2005”*, Tesi di stage APAT, Venezia.

Matteotti G., 1999, *Lineamenti di costruzioni marittime*, S.G.E., Padova.

Minozzi A., 2008, *Progetto “Annali meteo-mareografici 2002-2005”*, Tesi di stage APAT, Venezia.

Polli S., 1952, *Propagazione della marea nella laguna di Venezia*, Istituto Talassografico sperimentale, Pubbl. n. 288, Trieste.

Polli S., 1961a, *La propagazione delle maree nell’Adriatico*, Istituto Talassografico sperimentale, Pubbl. n. 370, Trieste.

Polli S., 1961b, *Propagazione della marea nel golfo di Venezia*, Istituto Talassografico sperimentale, Pubbl. n. 385, Trieste.

Polli S., 1962, *Le sesse (seiches) dell’Adriatico*, Istituto Talassografico sperimentale, Pubbl. n. 393, Trieste.

Raicich F., 2002, *Review of current quality control applied to tide gauge data*, CNR, Istituto Sperimentale Talassografico, Trieste.

Rosso E., 2008, *Progetto “Ricostruzione della serie storica di Venezia-Punta della Salute” (1924-2005)*, Tesi di stage APAT, Venezia.

Tomasin A., 2005, *The software Polifemo for tidal analysis*, Technical Note 202, CNR-ISMAR, Venezia.

World Ocean Circulation Experiment, 1997, *Developments in sea level data management and exchange*, Ocean Data Symposium Papers, Dublino.

Consorzio Venezia Nuova, <<http://www.salve.it/it/eco/default.htm>>, 2011.

<http://it.wikipedia.org/wiki/Marea>, 28/07/2011.

ISPRA, <http://www.ispravenezia.it/ispra/index.php?folder_id=11>, 2011.

Allegati

- Allegato 1.** Analisi evento di alta marea del 22-26 dicembre 2010.
- Allegato 2.** Lido diga sud: proposta di variazione della quota del caposaldo e relativa correzione dei dati di marea.
- Allegato 3.** Malamocco diga nord – Faro Rocchetta – Chioggia diga sud: proposta di variazione della quota del caposaldo e relativa correzione dei dati di marea.
- Allegato 4.** Livello medio del mare decadale e mensile rilevato nelle stazioni validate

Allegato 1

Analisi evento di alta marea del 22-26 dicembre 2010

In questo documento viene presentata l'analisi dell'evento del 22-26 dicembre 2010 quale esempio del fenomeno di “*storm surge*”, ovvero di un sensibile incremento del livello di marea all'interno della laguna e del golfo di Venezia, causato dall'azione contemporanea di persistenti venti di Scirocco e di una forte differenza di pressione atmosferica lungo il mare Adriatico.

I giorni che hanno preceduto l'evento in esame sono stati caratterizzati, a partire dalle ore 12:00 del giorno 21, da un generale decremento della pressione atmosferica lungo l'intero bacino del mare Adriatico, causato dal passaggio di una serie di impulsi ciclonici di origine atlantico-mediterranea. Osservando l'andamento della pressione registrata da alcune stazioni meteorologiche presenti sul litorale adriatico (Venezia, Ancona, Vieste ed Otranto) si nota che l'andamento della pressione e l'entità della sua variazione non sono state omogenee nelle località considerate (figura 1). Nei primi giorni infatti, nell'Adriatico settentrionale la pressione è diminuita molto più velocemente che nella sua parte meridionale: a Venezia alle ore 23:00 del 22 dicembre la pressione è di 1009.6 hPa, ed in continuo abbassamento, mentre ad Otranto si mantiene sui valori del giorno precedente con 1015.6 hPa, determinando pertanto uno scarto di 6 hPa.

Nella giornata del 23 dicembre si assiste ad un vero e proprio “crollo barico” nel nord Adriatico: a Venezia la pressione scende di quasi 20 hPa in poco più di 24 ore, toccando il minimo di 990.4 hPa alle ore 3:00 del giorno 24, e rimanendo sotto i 991 hPa per alcune ore. Un'analoga situazione si verifica anche ad Ancona, che mantiene poi una pressione di circa 993 hPa per tutta la giornata del 24 dicembre.

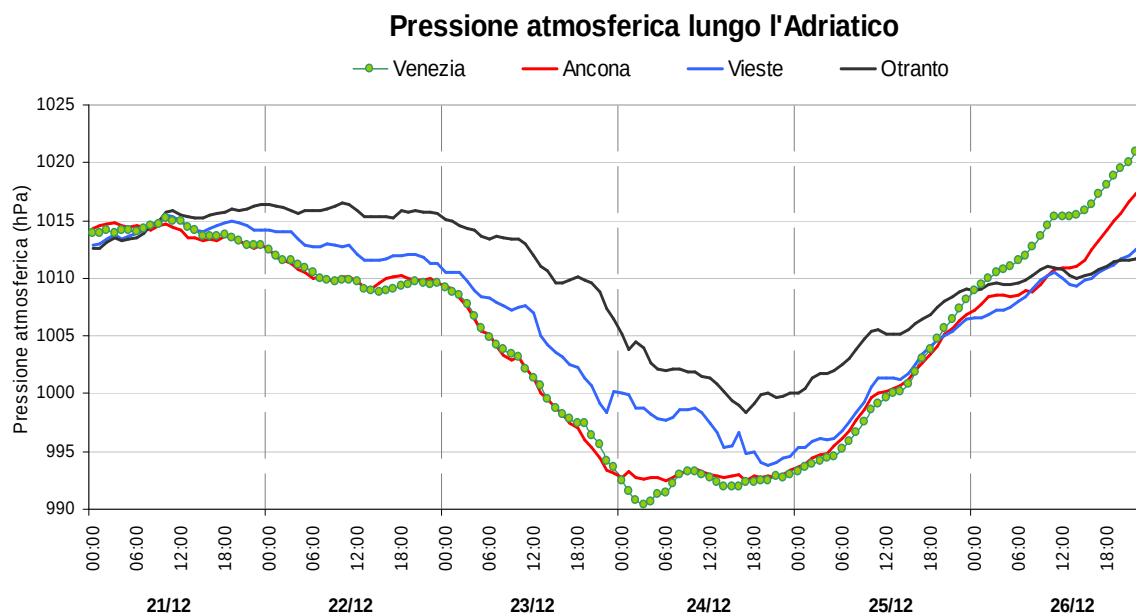


Figura 1

Nella parte meridionale del bacino adriatico la diminuzione di pressione è invece più contenuta. Contemporaneamente al minimo barico registrato a Venezia, ad Otranto la pressione misurata è pari a 1004 hPa, evidenziando pertanto una differenza tra nord e sud di 13.6 hPa, valore più che doppio rispetto ai 6 hPa del giorno precedente. Nella serata del 24 dicembre si raggiungono i minimi barici anche nell'Adriatico meridionale, prima ad Otranto (998.4 hPa alle ore 17:00) poi a Vieste (993.8 hPa alle ore 20:00).

Nei giorni successivi il nucleo depressionario lascia l'Italia e la pressione torna gradualmente a salire, mostrando a Venezia un aumento molto più rapido rispetto a quello delle altre località esaminate lungo l'Adriatico.

Le differenze nell'andamento della pressione tra Adriatico settentrionale e meridionale si ripercuotono anche sul regime dei venti registrati lungo il litorale. In concomitanza con l'abbassamento di pressione, nel basso e medio Adriatico si registrano persistenti venti dai quadranti meridionali. Ad Otranto il Libeccio soffia quasi ininterrottamente a partire dal pomeriggio del giorno 21, con un'intensità media di 5 m/s; a Vieste spira lo Scirocco da mezzogiorno del 21 dicembre alla mezzanotte del 23 dicembre, con un'intensità media di 6 m/s e punte di 12.5 m/s; ad Ancona si rileva Scirocco nella prima metà del giorno 22 e nella seconda metà del 23, con un'intensità media di 6 m/s e punte di 8.5 m/s (figura 2).

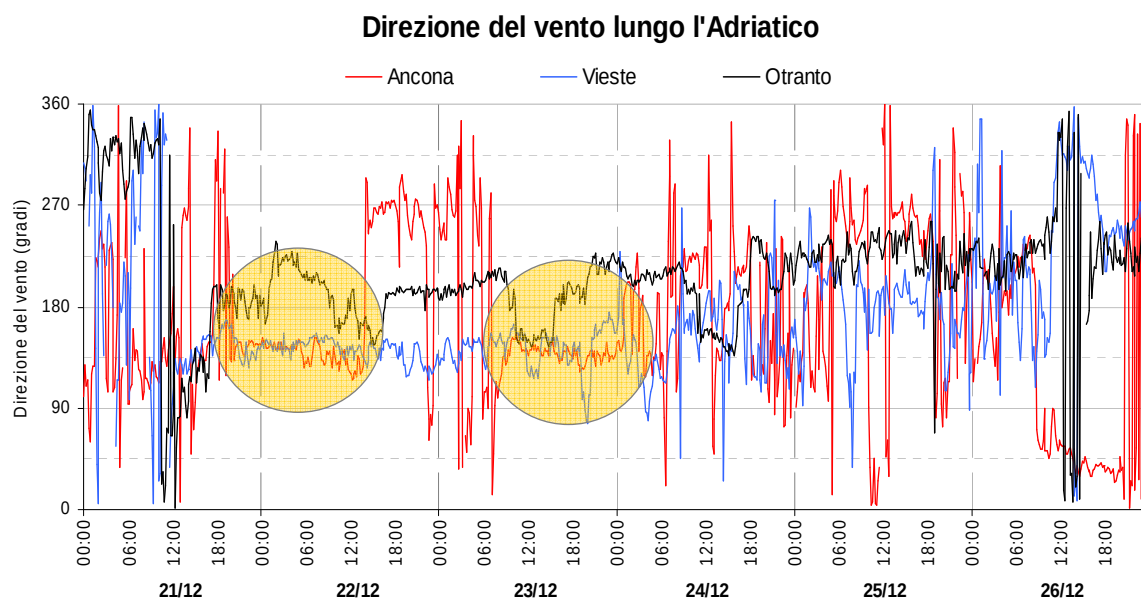


Figura 2

A Venezia tra il 21 e 22 dicembre è inizialmente prevalsa la Bora mentre il vento di Scirocco ha soffiato nella seconda parte del giorno 23 e nelle prime ore del 24, per un periodo minore rispetto a quanto registrato nel medio-basso Adriatico ma con un'intensità mediamente maggiore (8 m/s), favorita dalla notevole differenza di pressione riscontrata in quelle ore alle estremità dell'Adriatico. Dalla mattina del 25 dicembre è poi tornata a spirare la Bora, con raffiche fino a 14.6 m/s (28 nodi), innescata dal repentino rialzo barico verificatosi nell'Adriatico settentrionale (figura 3).

Direzione e Velocità del vento nell'alto Adriatico - Lido Diga Sud (Venezia)

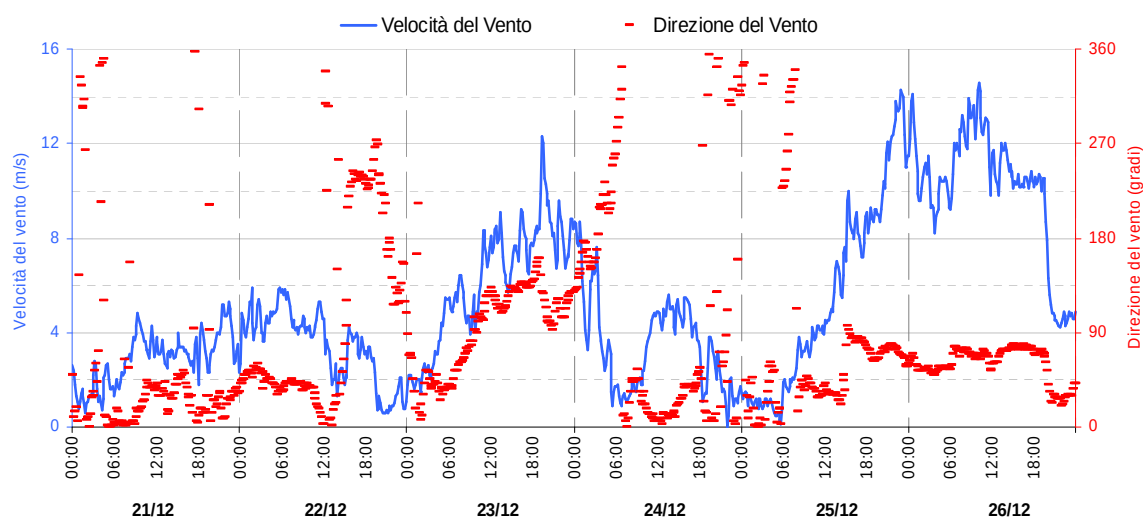


Figura 3

L'azione congiunta della pressione in diminuzione e dello spirare dei venti dai quadranti meridionali nei giorni antecedenti all'evento in esame determina un'evidente amplificazione del fenomeno della marea nell'Adriatico settentrionale.

A Venezia - Punta della Salute, infatti, viene dapprima rilevato un colmo di +101 cm, riscontrato alle 11:10 del 22 dicembre, con un sovrizzo (il cosiddetto contributo meteorologico) di 32 cm sopra la marea astronomica. Sotto la spinta dei venti di Scirocco si registra successivamente una massima di +124 cm alle 12:10 del giorno 23, con un sovrizzo di 61 cm. Al culmine dell'evento, in corrispondenza del minimo di pressione rilevato a Venezia, si realizza un picco di +144 cm alle 01:40 del 24 dicembre, con un sovrizzo di ben 83 cm. Il successivo massimo di marea fa registrare un valore ancora elevato, con +115 cm alle ore 11:50 dello stesso giorno (figura 4). Nei giorni seguenti, sotto l'azione di forti venti di Bora, la marea si mantiene ancora molto sostenuta, con massimi che permangono al di sopra dei 100 cm anche il 25 e 26 dicembre (livello evidenziato in figura 4).

All'interno della laguna una situazione analoga si verifica anche a Chioggia: si registrano infatti una massima di +119 cm alle ore 11:30 del 23 dicembre, con un sovrizzo di 57 cm, ed una punta di +138 cm alle ore 01:20 del giorno 24, con un sovrizzo di 79 cm. Nei giorni di Natale e S. Stefano la marea mantiene i propri massimi ancora sopra i 100 cm.

È interessante sottolineare come a Chioggia l'effetto del vento di Bora induca ad un'intensificazione del sovrizzo, piuttosto che un suo smorzamento, per tutta la giornata del 26 dicembre. Mentre a Venezia dalla serata del giorno 25 esso tende gradualmente a diminuire, a Chioggia si rileva un andamento opposto ed il sovrizzo di fatto aumenta. Questo fenomeno è essenzialmente dovuto all'orientamento della laguna, che nel suo asse maggiore è diretta nello stesso verso di propagazione del vento di Bora (da nord-est a sud-ovest), influenzando così l'assetto idraulico lagunare.

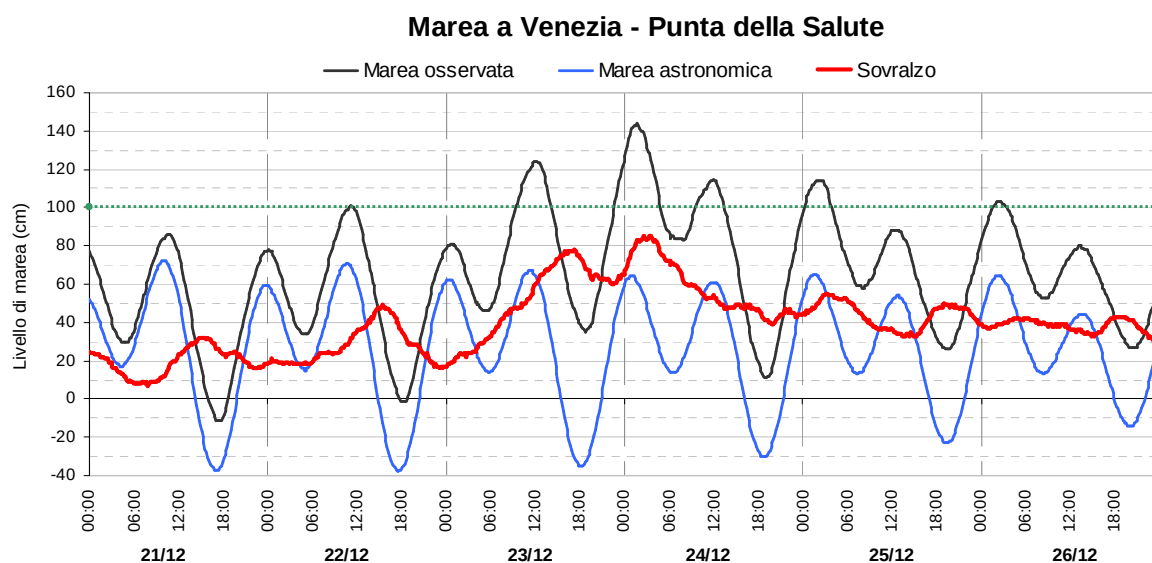


Figura 4

Ponendo l'attenzione all'esterno della laguna, nell'andamento dei livelli di marea si notano delle analogie rispetto i valori registrati dalle stazioni mareografiche situate al suo interno, ma anche delle significative differenze per quanto riguarda il sovrалzo.

In piattaforma CNR, situata in mare aperto a 15 km circa dal litorale veneziano, si raggiungono i +126 cm alle ore 10:50 del giorno 23, con un sovrалzo di 62 cm, e alle 00:10 del 24 dicembre si toccano +157 cm, con un contributo meteorologico di 96 cm. La vigilia di Natale e nei giorni successivi la marea rimane poi ampiamente al di sopra dei 100 cm, smorzandosi molto lentamente (figura 5).

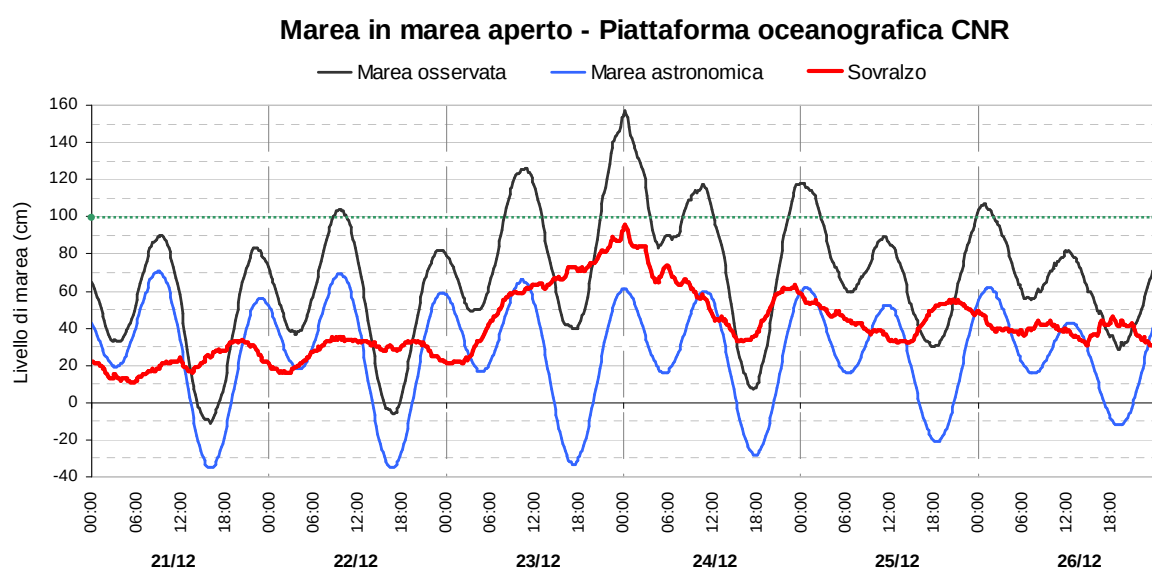


Figura 5

A Grado, situata all'imboccatura del golfo di Trieste, si registrano +129 cm alle ore 10:10 del 23 dicembre, con un sovrалzo di 62 cm, ed una massima di +154 cm alle 00:20 del giorno 24, con una differenza rispetto la marea astronomica di 90 cm.

L'andamento del sovrizzo mette in evidenza come l'effetto dello Scirocco, che ha soffiato a Venezia nel pomeriggio del 23 dicembre, abbia avuto in questo caso un'influenza locale, e sia stato significativo principalmente all'interno della laguna piuttosto che al suo esterno. Infatti, osservando il contributo meteorologico che si realizza in piattaforma CNR, si nota la mancanza del picco di sovrizzo che si registra invece a Venezia e a Chioggia attorno alle ore 17:00 del giorno 23.

In coda all'evento, nei giorni di Natale e S. Stefano, sia a Venezia ma ancor più in mare aperto, l'andamento del sovrizzo mette chiaramente in evidenza la formazione di un'onda di sessa con periodo prossimo alle 22 ore. Tale onda si sviluppa a seguito dell'impulso meteorologico che ha avuto luogo sul bacino adriatico nella notte del 23 dicembre e, essendo un'oscillazione libera della superficie del mare, tende ad attenuarsi gradualmente.

Tornando infine alla marea registrata a Punta della Salute è possibile fare un'ultima considerazione. I picchi del sovrizzo di 78 cm e 83 cm rilevati nel pomeriggio del 23 e nella notte del 24 dicembre, sono coincisi rispettivamente con un minimo e con un massimo di marea astronomica. Quest'ultimo ha dato luogo all'evento di "acqua alta" di +144 cm mentre il primo non ha determinato questa situazione solamente perché verificatosi in fase con la minima astronomica. Se il vento di Scirocco registrato a Venezia si fosse manifestato qualche ora prima, ovvero in concomitanza temporale con la massima astronomica di +67 cm delle ore 11:20, avrebbe potuto dar luogo ad una marea eccezionale di +145 cm (data dalla somma di 78 e 67 cm), determinando così due eventi particolarmente gravosi per la città di Venezia nel giro di poche ore.

In conclusione si possono schematicamente distinguere le seguenti fasi dell'evento:

1. una prima fase in cui la pressione nell'alto Adriatico inizia a scendere mentre nella parte bassa del bacino soffiano venti di Scirocco e la pressione si mantiene costante, determinando il primo picco nel sovrizzo attorno alle ore 14:00 del 22 dicembre;
2. una seconda fase coincidente con il brusco crollo di pressione nella parte alta del bacino adriatico, il contemporaneo instaurarsi di venti provenienti dal secondo quadrante anche lungo la costa veneta, con le massime registrate a Venezia il giorno 23 di +124 e +144 cm;
3. una terza fase in cui la pressione torna gradualmente a salire, si instaurano forti venti di Bora all'interno della laguna (andamento singolare del sovrizzo a Chioggia) e si ha la generazione di un'onda di sessa in Adriatico.

Conclusioni

Nei giorni 23 e 24 dicembre 2010, sotto l'azione di forti venti sciroccali e di una brusca diminuzione di pressione sull'Adriatico settentrionale, nel bacino lagunare veneziano è stata registrata un'alta marea eccezionale, che è poi rimasta molto sostenuta anche nei giorni successivi.

I picchi raggiunti a Venezia mettono in evidenza come l'andamento della marea nell'alto Adriatico sia fortemente influenzato dagli impulsi meteorologici che si generano sulla sua superficie. Ad una diminuzione della pressione barometrica corrisponde un innalzamento del livello del mare e l'azione del vento tende ad insaccare le acque nella direzione del suo verso di propagazione. Pertanto, se si sommano gli effetti di una pressione in drastica diminuzione nell'alto Adriatico e di una persistente azione dei venti di Scirocco, si possono ottenere notevoli amplificazioni del livello di marea, raggiungendo valori più che doppi rispetto quelli previsti dalla sola componente astronomica.

Allegato 2

Lido diga sud: proposta di variazione della quota del caposaldo e relativa correzione dei dati di marea

In questo documento si vuole porre l'attenzione sui livelli di marea registrati nella stazione di Lido diga sud, evidenziando come il livello misurato in questa posizione sia sistematicamente superiore a quello rilevato nelle altre stazioni della rete mareografica della laguna di Venezia (RMLV).

Nel corso delle procedure di validazione dei dati di marea registrati nella laguna settentrionale nell'anno 2010, analizzando l'andamento del livello medio mare mensile presso le varie stazioni, è risultato evidente che i valori maggiori si registrano costantemente nella stazione di Lido diga sud. Questo comportamento si manifesta sia nel confronto con le altre stazioni situate alle dighe (Malamocco diga nord, Chioggia diga sud), sia rispetto ad altre stazioni situate all'interno della laguna (Chioggia Vigo, Punta della Salute, San Nicolò, Meda, Sant'Erasmo). Nel confronto con le altre stazioni a mare non è stata considerata la stazione di Lido diga nord, in quanto situata in una zona soggetta a continua sedimentazione, che ha causato l'interrimento del pozzetto di calma della stazione; a questo problema si è aggiunta anche l'attuale ostruzione dei fori del pozzetto. Tali problematiche hanno reso le misurazioni dall'anno 2010 completamente inattendibili ai fini della validazione.

Nei confronti effettuati si è scelto di utilizzare la stazione di Punta della Salute come termine di paragone fondamentale. Essa infatti, data l'importanza storica, è tenuta costantemente sotto controllo (vedi convenzione controllo caposaldo con ICPSM e CNR-ISMAR di Venezia) e si ritiene pertanto che i dati registrati in questa posizione siano quelli meno affetti da errori.

Per quanto riguarda le stazioni situate alle dighe, il livello medio mare annuale 2010 per Lido diga sud (DS) è di 45.34 cm, per Malamocco diga nord (NM) è di 43.57 cm, per Chioggia diga sud (SC) è di 43.84 cm. Il grafico in *figura 1* evidenzia che la stazione di Lido diga sud fornisce i valori più elevati tra quelle situate alle dighe, con una differenza dell'ordine dei 2 cm.

Facendo un confronto con i dati di alcune stazioni situate all'interno della laguna in prossimità della bocca di porto di Lido questa tendenza viene confermata: il livello medio mare annuale 2010 per Lido diga sud (DS) è di 45.34 cm, per Punta della Salute (PS) è di 40.58 cm, per San Nicolò (SN) è di 41.71 cm, per Meda (ME) è di 40.49 cm e per Sant'Erasmo (SE) è di 40.00 cm.

Il grafico in *figura 2* evidenzia che la stazione di Lido diga sud fornisce i valori più elevati tra quelle situate in prossimità della bocca di porto di Lido, con una differenza dell'ordine dei 4-5 cm.

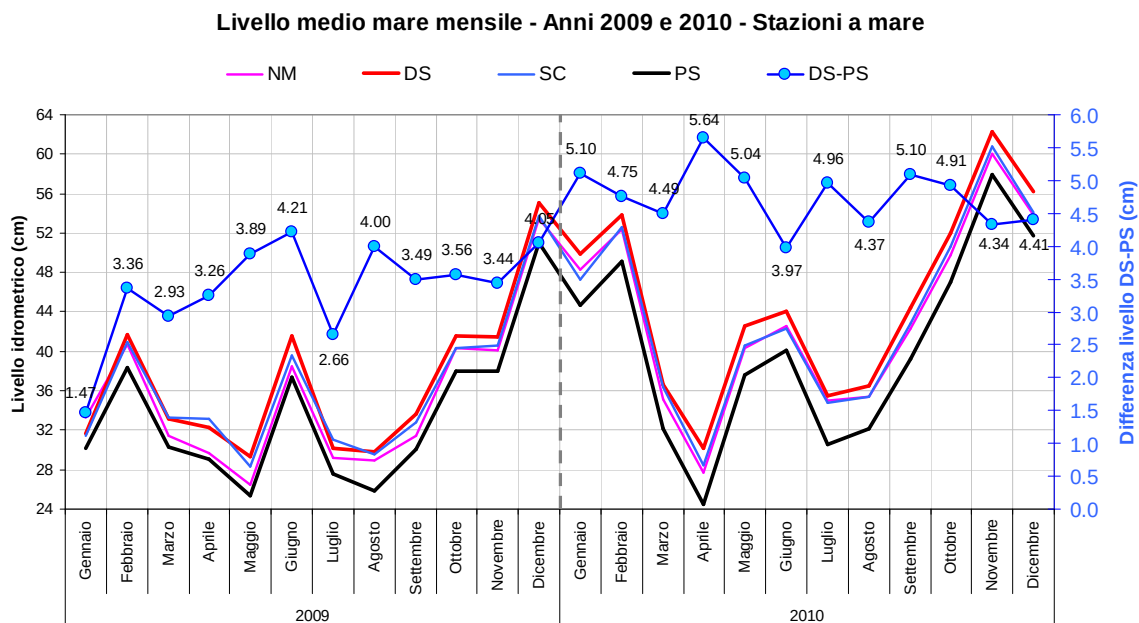


Figura 1

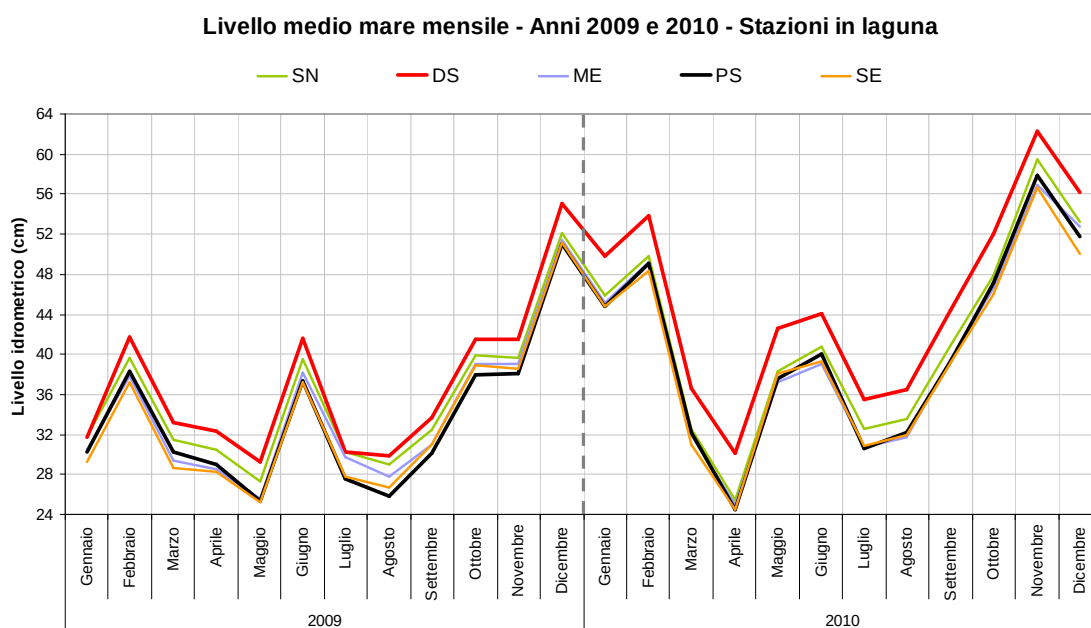


Figura 2

Nella stazione di Lido diga sud si misurano livelli costantemente superiori a quelli delle altre stazioni non solo nel 2010, ma anche nel corso del 2009. Questa tendenza tuttavia sembra essere sempre più evidente con il passare del tempo, come si evince dal grafico in *figura 1*, in cui è rappresentata anche la differenza di livello medio mare tra Lido diga sud e Punta della Salute. Nel 2009 questa differenza è stata mediamente di +3.36 cm, salita poi a +4.76 cm nel corso del 2010. Alla luce di queste considerazioni sull'andamento del livello medio mare, si ritiene opportuno apportare una modifica stimabile in **-5 cm** ai livelli misurati dalla stazione di Lido diga sud nel corso del 2010.

Questo tipo di correzione sembra essere suggerito anche dall'analisi di due quadrature che si sono verificate nel 2010: la prima tra il 23 e il 24 marzo, la seconda tra il 4 e il 5 giugno.

Si è deciso di analizzare queste quadrature in quanto la loro durata è superiore alle 3 ore, in presenza di un vento con intensità inferiore ai 6 m/s. La quadratura di marzo infatti dura 3 ore e 20 minuti, con un vento registrato in piattaforma CNR inferiore ai 3.6 m/s; la quadratura di giugno dura 3 ore e 40 minuti, con un vento registrato in piattaforma CNR inferiore a 5.8 m/s. È lecito ipotizzare che in queste situazioni si abbia un livello di marea quasi costante per alcune ore in tutta la laguna.

Durante la quadratura di marzo, il livello medio misurato nella stazione di Lido diga sud è stato di 22.57 cm mentre a Punta della Salute il livello medio è stato di 17.48 cm. La differenza tra i due livelli è pari a 5.09 cm (*figura 3*).

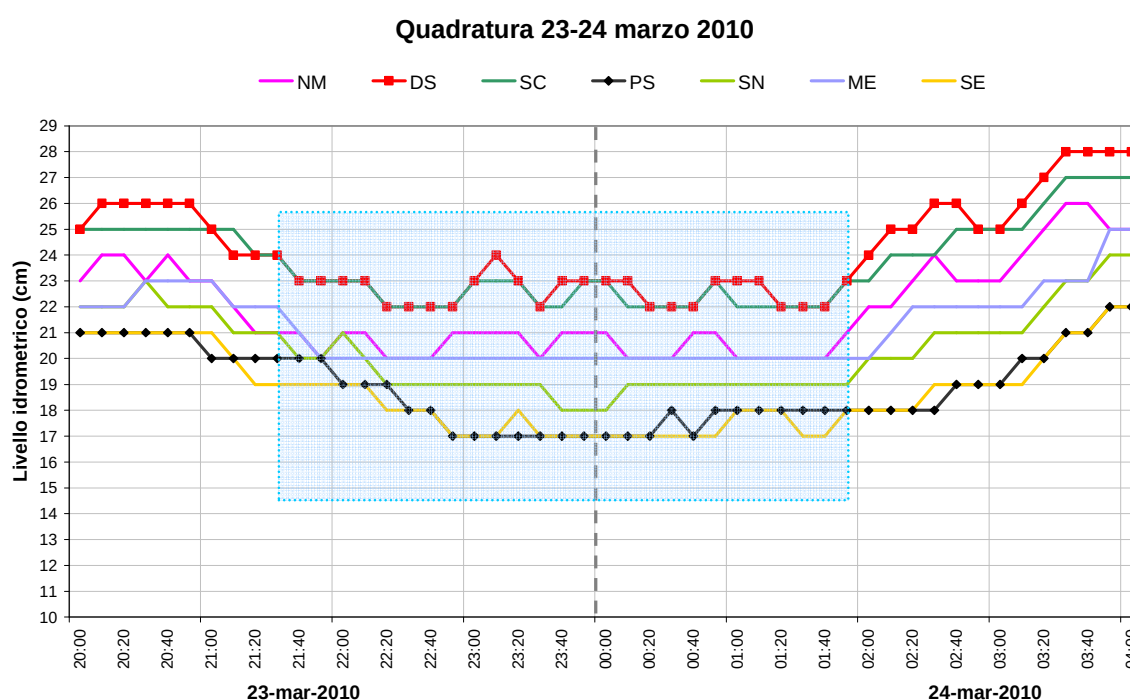
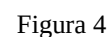


Figura 3

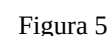
Durante la quadratura di giugno, il livello medio misurato nella stazione di Lido diga sud è stato di 32.00 cm mentre a Punta della Salute il livello medio è stato di 27.35 cm. La differenza tra i due livelli è pari a 4.65 cm (*figura 4*).

Anche l'analisi di queste quadrature conferma il fatto che i livelli misurati a Lido diga sud sono costantemente superiori a quelli registrati in altre stazioni presenti in laguna.

Pertanto in base a queste analisi si ritiene opportuno apportare una modifica stimabile in **-5 cm** ai livelli misurati dalla stazione di Lido diga sud nel corso del 2010.



Il problema della quota del caposaldo in questa stazione sembra essere confermato anche dal confronto con le quote dei capisaldi presi a riferimento dagli altri enti che presentano i propri strumenti all'interno della stazione in esame: RMN (ISPRA) ed ICPSM (*figura 5*).



Il caposaldo attuale della RMLV per Lido diga sud è pari a 246.5 cm, il caposaldo della Rete Mareografica Nazionale è pari a 243 cm, il caposaldo ICPSM è stato recentemente abbassato da 243 a 241 cm (novembre 2009). Ad oggi quindi, la quota del caposaldo della RMLV risulta superiore di 3.5 cm (RMN) e di 5.5 cm (ICPSM).

Pertanto, in base alle considerazioni sopra esposte, si propone una correzione sui dati di livello di marea a Lido diga sud di **-5 cm** a partire dal 01/01/2010, introducendo con gradualità questa modifica anche negli anni precedenti secondo le prescrizioni contenute nella tabella sottostante (si fa presente che i dati del 2006 non sono di buona qualità, pertanto non sono stati validati).

Correzioni da apportare ai livelli misurati a Lido diga sud			
Anno	Correzione	Differenza DS-PS con c.s. attuale (246.5 cm)	Differenza DS-PS con correzione proposta
2005	0 cm	1.30 cm	/
2006	-1 cm	/	/
2007	-2 cm	4.12 cm	2.12 cm
2008	-3 cm	2.90 cm	-0.10 cm
2009	-4 cm	3.36 cm	-0.64 cm
2010	-5 cm	4.76 cm	-0.24 cm

Parallelamente si suggerisce un abbassamento della quota del caposaldo, da effettuarsi in data prossima, di una quantità stimata in **-5.5 cm**, portando la quota da 246.5 cm a 241 cm sullo ZMPS.

Si vuole segnalare infine un altro risultato emerso dall'analisi dei livelli di medio mare e delle quadrature 2010 per la stazione di Lido diga sud. Appare evidente infatti la necessità di compiere ulteriori indagini riguardo i capisaldi delle stazioni interessate dai lavori del Mose (Malamocco diga nord, Chioggia diga sud, Faro Rocchetta) e della stazione in mare aperto di Piattaforma CNR, in quanto anch'esse forniscono livelli di marea sistematicamente superiori a Punta della Salute negli anni 2009 e 2010.

Con riferimento alle altre stazioni del modello statistico adottato da Ispra-Venezia, la stazione di Chioggia Vigo, al contrario di Lido diga sud, sembra presentare un livello medio mare sempre inferiore rispetto a Punta della Salute sia nel 2009 che nel 2010. Da una prima analisi dei dati del 2011, inoltre, sembra che anche la stazione di Burano presenti lo stesso problema di caposaldo evidenziato a Lido diga sud negli ultimi due anni. A tal proposito ci si riserva di fornire in seguito ulteriori e più approfondite analisi.

Allegato 3

Malamocco diga nord – Faro Rocchetta – Chioggia diga sud: proposta di variazione della quota del caposaldo e relativa correzione dei dati di marea

In questo documento si vuole porre l'attenzione sui livelli di marea registrati nelle stazioni di Malamocco diga nord, Faro Rocchetta e Chioggia diga sud, evidenziando come il livello misurato in queste posizioni negli ultimi anni sia significativamente superiore a quello rilevato in altre stazioni della rete mareografica della laguna di Venezia.

Dall'analisi dell'andamento del livello medio mare mensile presso le stazioni di Malamocco diga nord, Faro Rocchetta e Chioggia diga sud, emerge chiaramente che i livelli di marea misurati in queste stazioni situate alle bocche di porto sono costantemente superiori a quelli rilevati sia a Punta della Salute che a Lido diga sud (rapporto n.1/2011).

Tale situazione risulta particolarmente evidente dopo la variazione di quota del caposaldo per la stazione di Lido diga sud intervenuta il 25/05/2011, che ha comportato anche la correzione dei dati registrati in questa stazione a partire dal 01/01/2007 (cfr. rapporto n.2/2011).

Nei confronti effettuati sul livello medio mare mensile si è scelto di utilizzare le stazioni di Punta della Salute e Lido diga sud come punti di riferimento. La stazione di Punta della Salute infatti, data l'importanza storica, è tenuta costantemente sotto controllo (vedi convenzione controllo caposaldo con ICPSM e CNR-ISMAR di Venezia) e si ritiene pertanto che i dati registrati in questa posizione siano quelli meno affetti da errori. I dati provenienti dalla stazione di Lido diga sud, invece, essendo stati recentemente esaminati e corretti, possono essere utilizzati come solida base di appoggio per compiere nuove analisi su altre stazioni.

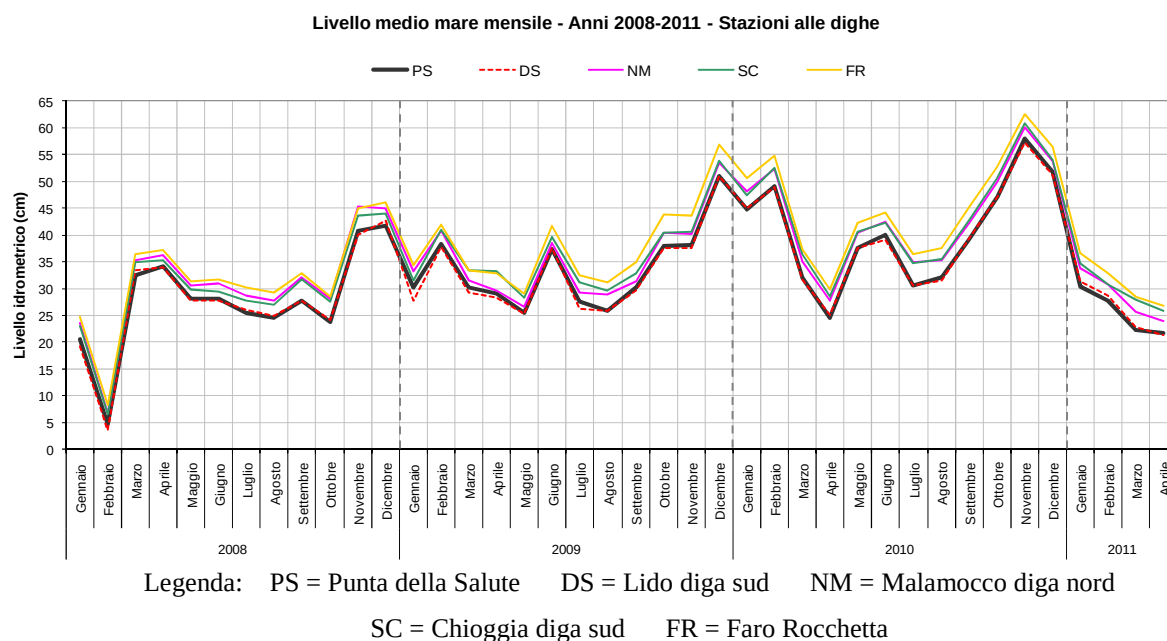
Nel confronto con gli strumenti situati alle dighe non è stata considerata la stazione di Lido diga nord, in quanto situata in una zona soggetta a continua sedimentazione, che ha causato l'interrimento di tutta l'area a ridosso della stazione; a questo problema si è aggiunta anche l'attuale ostruzione dei fori del pozzetto di calma. Tali problematiche hanno reso le misurazioni dall'anno 2010 completamente inattendibili ai fini della validazione.

Analisi dell'andamento dei livelli di medio mare

Facendo riferimento al triennio 2008-2010, si riportano nella seguente tabella i livelli di medio mare annuale registrati nelle stazioni di Punta della Salute, Lido diga sud, Malamocco diga nord, Faro Rocchetta e Chioggia diga sud.

Livello medio mare annuale nel triennio 2008-2010			
Anno	2008	2009	2010
Punta della Salute	27.69 cm	33.43 cm	40.58 cm
Lido diga sud	27.58 cm	32.79 cm	40.34 cm
Malamocco diga nord	30.85 cm	35.31 cm	43.57 cm
Faro Rocchetta	31.80 cm	37.99 cm	45.82 cm
Chioggia diga sud	30.09 cm	36.25 cm	43.84 cm

L'analisi di questi dati mostra che la stazione di Faro Rocchetta registra i valori di medio mare annuale più elevati tra quelli delle stazioni considerate, con una differenza dell'ordine dei 4-5 cm rispetto a Punta della Salute. Le stazioni di Malamocco diga nord e Chioggia diga sud, pur mostrando valori di medio mare annuale confrontabili tra loro, forniscono valori comunque superiori sia a Punta della Salute che a Lido diga sud, con una differenza dell'ordine dei 3 cm. Questo tipo di andamento inoltre si mantiene inalterato anche nel corso del 2011 (*figura 1*).



N.B.: I dati del 2011 e di FR 2009/2010 sono da considerarsi provvisori, in quanto non ancora validati

Figura 1

Stazione di Malamocco diga nord

Analizzando le differenze di livello medio mare annuale della stazione considerata rispetto alle stazioni di Punta della Salute e Lido diga sud, la tendenza sopra citata viene confermata.

Nel 2008 a Malamocco diga nord si è registrata una differenza di +3.16 cm rispetto a Punta della Salute e di +3.27 cm rispetto a Lido diga sud. Nel 2009 tale differenza è stata di +1.88 cm rispetto a Punta della Salute e di +2.52 cm rispetto a Lido diga sud. Nel 2010 questa quantità è salita rispettivamente a +2.98 cm e +3.23 cm, stabilizzandosi attorno a questi valori anche nei primi mesi del 2011 (figura 2).

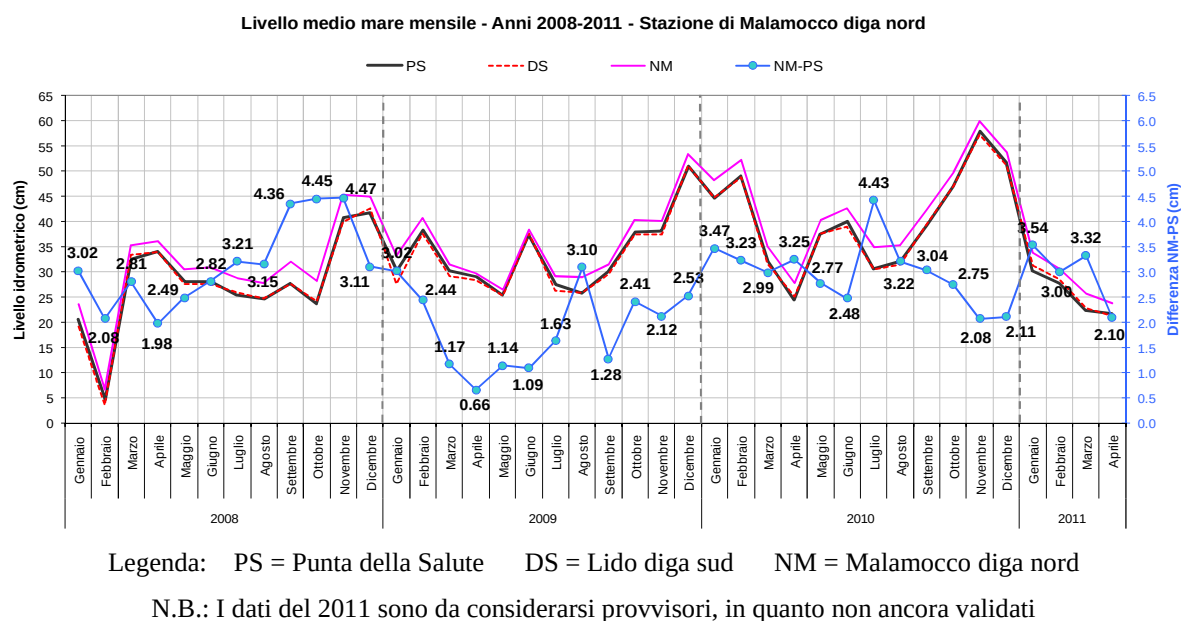


Figura 2

Negli ultimi tre anni, pertanto, la differenza di livello medio mare tra la stazione di Malamocco diga nord e le stazioni di Punta della Salute e Lido diga sud è stata mediamente di +3 cm.

Stazione di Faro Rocchetta

Nel 2008 a Faro Rocchetta si è registrata una differenza di livello medio mare annuale di +4.12 cm rispetto a Punta della Salute e di +4.22 cm rispetto a Lido diga sud. Nel 2009 tale differenza è salita rispettivamente a +4.57 cm e +5.21 cm, mentre nel 2010 è salita ulteriormente a +5.24 cm rispetto a Punta della Salute e a +5.48 cm rispetto a Lido diga sud, mantenendosi su questi valori anche all'inizio del 2011 (figura 3).

Si fa presente che i dati provenienti da questa stazione, anche se scremati da eventuali errori grossolani, sono da considerarsi provvisori per gli anni 2009, 2010 e 2011, in quanto non ancora validati.

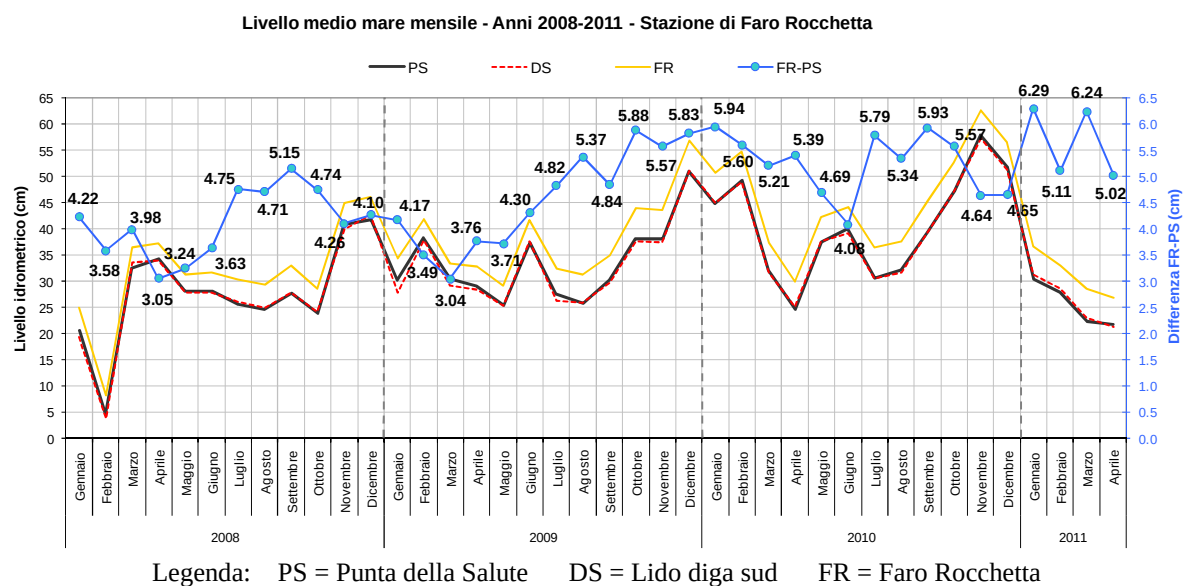


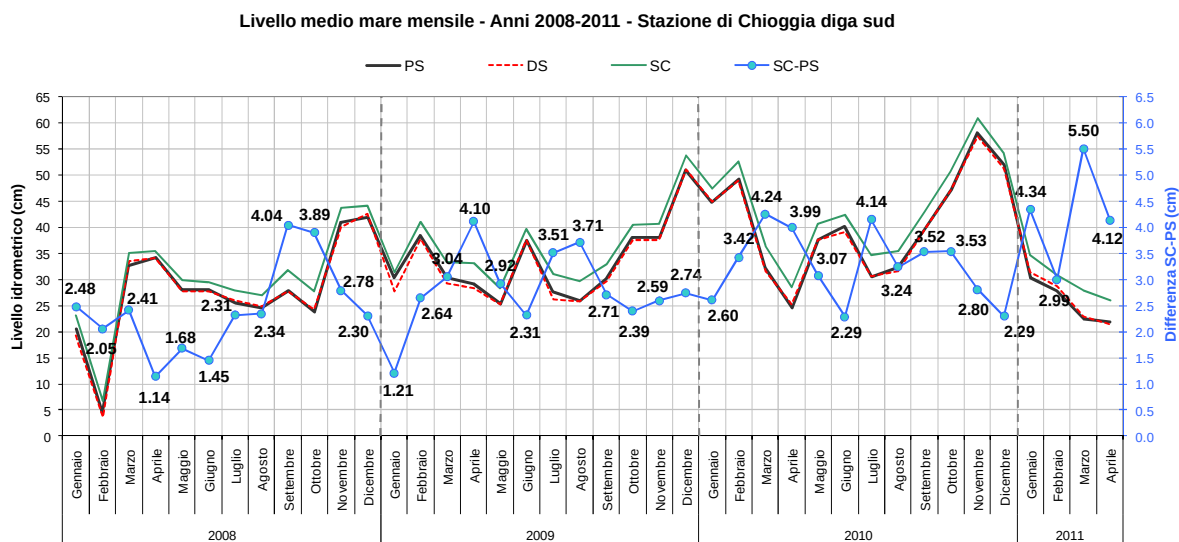
Figura 3

Negli ultimi tre anni, pertanto, la differenza di livello medio mare tra la stazione di Faro Rocchetta e le stazioni di Punta della Salute e Lido diga sud è stata mediamente di +5 cm.

Stazione di Chioggia diga sud

Nel 2008 a Chioggia diga sud si è registrata una differenza di livello medio mare annuale di +2.41 cm rispetto a Punta della Salute e di +2.51 cm rispetto a Lido diga sud. Nel 2009 la differenza è stata di +2.82 cm rispetto a Punta della Salute e di +3.46 cm rispetto a Lido diga sud. Nel 2010 tale differenza è salita rispettivamente a +3.26 cm e +3.51 cm, aumentando ancora nei primi mesi del 2011 (figura 4).

Negli ultimi tre anni, pertanto, la differenza di livello medio mare tra la stazione di Chioggia diga sud e le stazioni di Punta della Salute e Lido diga sud è stata mediamente di +3 cm.



Legenda: PS = Punta della Salute DS = Lido diga sud SC = Chioggia diga sud

N.B.: I dati del 2011 sono da considerarsi provvisori, in quanto non ancora validati

Figura 4

Alla luce di queste considerazioni sull'andamento del livello medio mare, si ritiene opportuno apportare una modifica stimabile in **-5 cm** ai livelli misurati dalla stazione di Faro Rocchetta, ed una modifica quantificabile in **-3 cm** ai livelli misurati a Malamocco diga nord e Chioggia diga sud nel corso del 2010.

Quadratura del 4-5 giugno 2010

Il tipo di correzione proposta viene inoltre confermato dall'analisi di una quadratura verificatasi nel corso del 2010, in particolare quella tra il 4 e il 5 giugno 2010. Si è deciso di analizzare questa quadratura in quanto la sua durata è superiore alle 3 ore (essa si mantiene infatti per 3 ore e 40 minuti), in presenza di un vento con intensità inferiore ai 6 m/s (in piattaforma CNR il vento misurato non ha mai superato i 5.8 m/s). È lecito ipotizzare che in questa situazione si verifichi un livello di marea quasi costante per alcune ore in tutta la laguna.

Durante la quadratura, il livello medio misurato nella stazione di Malamocco diga nord è stato di 29.87 cm, a Chioggia diga sud è stato di 30.00 cm e a Faro Rocchetta di 32.30 cm, mentre a Punta della Salute il livello medio è stato di 27.35 cm e a Lido diga sud di 27.17 cm. La differenza di livello medio rispetto a Punta della Salute risulta quindi di +2.52 cm per Malamocco diga nord, +2.65 cm per Chioggia diga sud e +4.96 cm per Faro Rocchetta. La differenza di livello medio rispetto a Lido diga sud si attesta su +2.70 cm per Malamocco diga nord, +2.83 cm per Chioggia diga sud e +5.13 cm per Faro Rocchetta (figura 5).

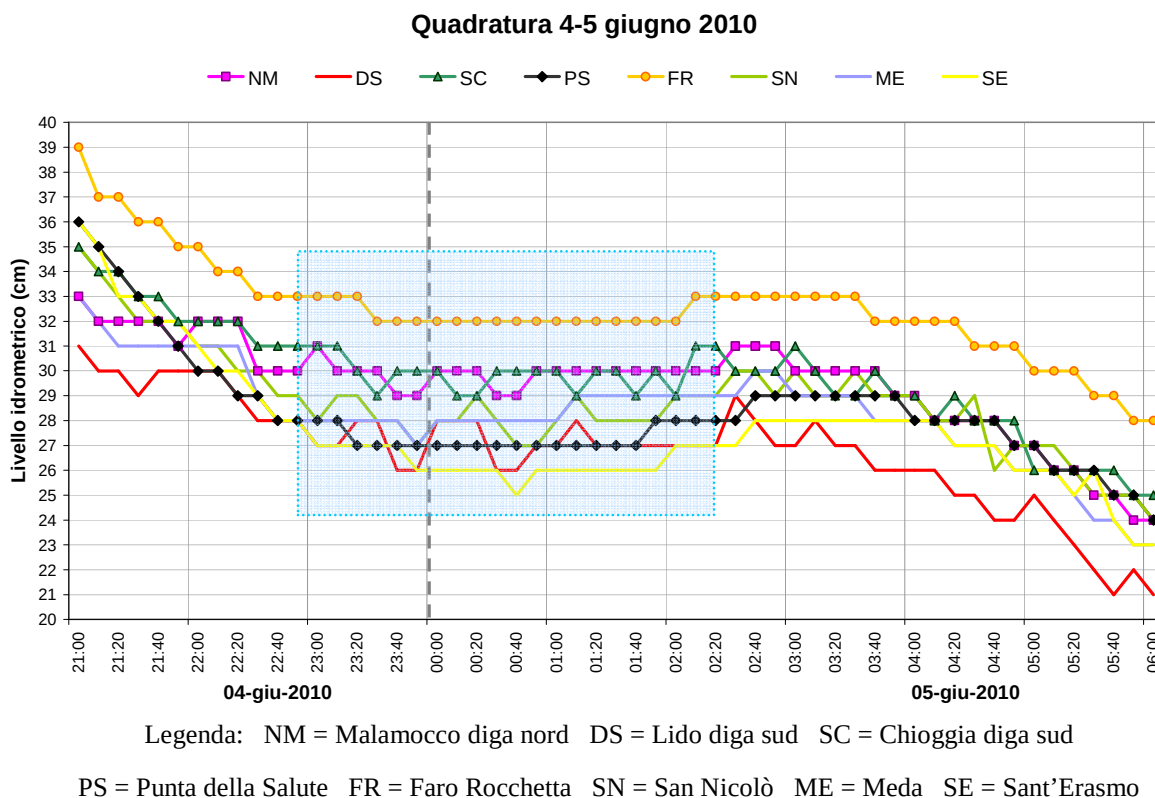


Figura 5

Anche l'analisi di questa quadratura conferma il fatto che i livelli misurati a Malamocco diga nord, Chioggia diga sud e Faro Rocchetta sono costantemente superiori a quelli registrati a Lido diga sud, Punta della Salute e in altre stazioni presenti in laguna. In base a questa analisi si ritiene opportuno apportare una modifica stimabile in **-5 cm** ai livelli misurati dalla stazione di Faro Rocchetta, ed una correzione di **-3 cm** ai livelli misurati a Malamocco diga nord e Chioggia diga sud nel corso del 2010.

Proposta di variazione della quota dei capisaldi

La causa di questi scostamenti nei livelli di marea registrati in queste stazioni sembra essere un problema di abbassamento della quota dei capisaldi, dovuto presumibilmente ai lavori in corso d'opera alle bocche di porto per la costruzione del Mose. La stazione di Faro Rocchetta infatti, essendo situata all'imboccatura della bocca di Malamocco, può aver risentito degli effetti dei lavori per la realizzazione della spalla, elemento di raccordo tra le paratorie mobili ed il litorale degli Alberoni. Le stazioni di Malamocco diga nord e Chioggia diga sud inoltre, essendo posizionate su moli foranei a protezione dei rispettivi canali di porto, sono esposte anche all'aggressività del moto ondoso sottocosta, che può indurre le dighe stesse a degli assestamenti strutturali.

Pertanto, in base alle considerazioni sopra esposte, si propone una correzione sui dati di livello di marea a partire dal 01/01/2010 (fino all'istante del cambio della quota del caposaldo) di una quantità stimata in **-3 cm** per le stazioni di Malamocco diga nord e Chioggia diga sud, e di **-5 cm** per la stazione di Faro Rocchetta. Questa modifica dovrà essere introdotta con gradualità anche negli anni precedenti secondo le prescrizioni contenute nelle tabelle sottostanti, tenendo presente che le variazioni di 3 cm vengono spalmate nell'ultimo triennio (2008-2010) mentre quella di 5 cm viene distribuita nell'ultimo quinquennio (2006-2010). Per quanto riguarda la stazione di Faro Rocchetta infatti, si registra mediamente una differenza di circa 5 cm rispetto a Punta della Salute a partire dal 2006, pertanto per migliorare progressivamente l'allineamento delle serie si richiede una correzione che coinvolga i dati dell'ultimo quinquennio.

Correzioni da apportare ai livelli misurati a Malamocco diga nord					
Anno	Correzione	Dati mancanti (%)		LMM(NM)-LMM(PS) con c.s. attuale (207 cm)	LMM(NM)-LMM(PS) con correzione proposta
		NM	PS		
2007	0 cm	0.00%	0.00%	+1.94 cm	+1.94 cm
2008	-1 cm	0.00%	0.00%	+3.16 cm	+2.16 cm
2009	-2 cm	0.14%	0.05%	+1.88 cm	-0.12 cm
2010	-3 cm	0.00%	0.04%	+2.98 cm	-0.02 cm
Legenda: LMM = livello medio mare NM = Malamocco diga nord PS = Punta della					

Correzioni da apportare ai livelli misurati a Faro Rocchetta					
Anno	Correzione	Dati mancanti (%)		LMM(FR)-LMM(PS) con c.s. attuale (250 cm)	LMM(FR)-LMM(PS) con correzione proposta
		FR	PS		
2005	0 cm	2.22%	0.00%	+2.95 cm	+2.95 cm
2006	-1 cm	0.40%	0.00%	+3.49 cm	+2.49 cm
2007	-2 cm	0.33%	0.00%	+5.59 cm	+3.59 cm
2008	-3 cm	0.00%	0.00%	+4.12 cm	+1.12 cm
2009	-4 cm	0.00%	0.05%	+4.57 cm	+0.57 cm
2010	-5 cm	0.00%	0.04%	+5.24 cm	+0.24 cm
Legenda: LMM = livello medio mare FR = Faro Rocchetta PS = Punta della Salute					

Correzioni da apportare ai livelli misurati a Chioggia diga sud					
Anno	Correzione	Dati mancanti (%)		LMM(SC)-LMM(PS) con c.s. attuale (257 cm)	LMM(SC)-LMM(PS) con correzione proposta
		SC	PS		
2007	0 cm	0.00%	0.00%	+1.96 cm	+1.96 cm
2008	-1 cm	0.00%	0.00%	+2.41 cm	+1.41 cm
2009	-2 cm	0.00%	0.05%	+2.82 cm	+0.82 cm
2010	-3 cm	0.01%	0.04%	+3.26 cm	+0.26 cm
Legenda: LMM = livello medio mare SC = Chioggia diga sud PS = Punta della Salute					

Conclusioni

In base ai risultati emersi dalle analisi sopra esposte, per correggere il tipo di problematica evidenziato si suggerisce per le future misurazioni di marea un abbassamento della quota dei tre capisaldi, da effettuarsi in data prossima, di una quantità stimata in **-3 cm** per le stazioni posizionate alle dighe e in **-5 cm** per la stazione di Faro Rocchetta. Le quote dei nuovi capisaldi saranno pertanto di **204 cm** per Malamocco diga nord (attualmente 207 cm), di **254 cm** per Chioggia diga sud (attualmente 257 cm) e di **245 cm** per Faro Rocchetta (attualmente 250 cm).

In questo documento si vuole porre l'attenzione sui livelli di marea registrati nella stazione di Lido diga sud, evidenziando come il livello misurato in questa posizione sia sistematicamente superiore a quello rilevato nelle altre stazioni della rete mareografica della laguna di Venezia (RMLV).

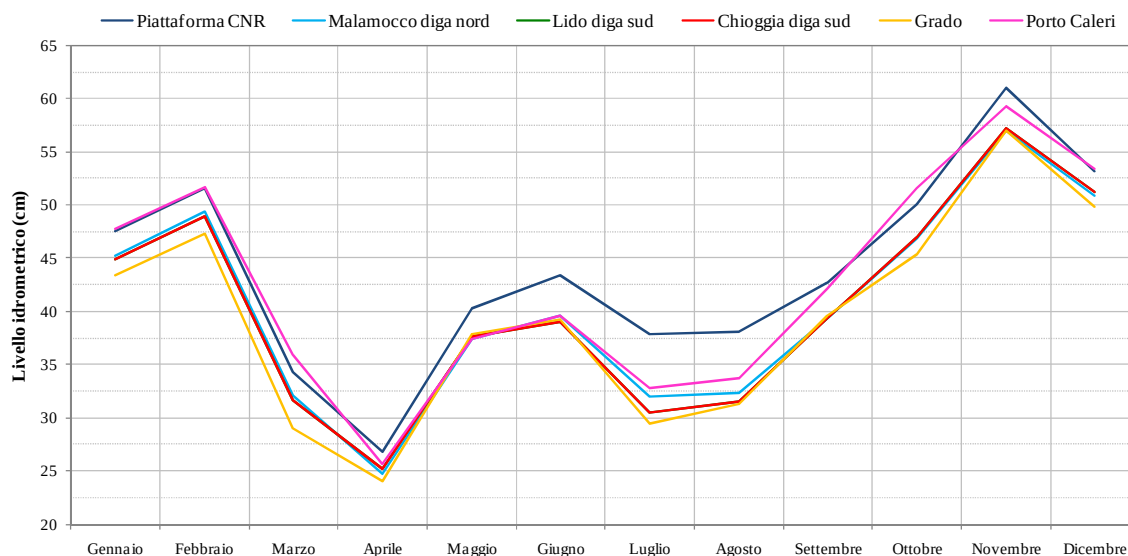
Allegato 4

Livello medio del mare decadale e mensile rilevate nelle stazioni validate

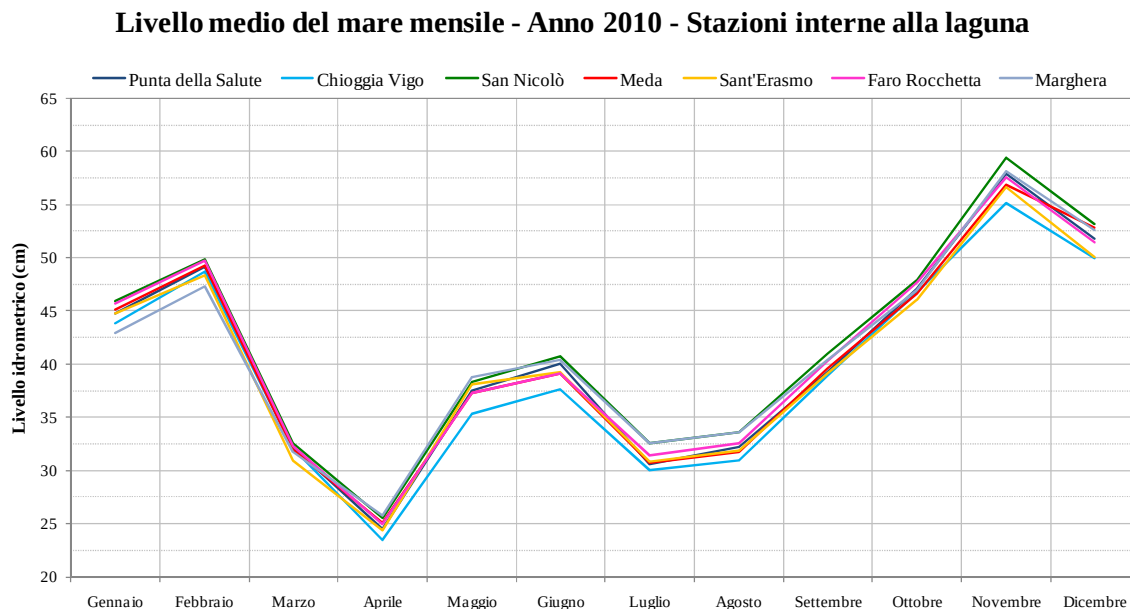
Valori espressi in cm rispetto allo Zero Mareografico di Punta della Salute

Stazioni esterne alla Laguna di Venezia – Media mensile						
Anno 2010	Piattaforma CNR	Malamocco diga nord	Lido diga sud	Chioggia diga sud	Grado	Porto Caleri
Gennaio	47.56	45.21	44.84	44.84	43.33	47.82
Febbraio	51.56	49.35	48.88	48.88	47.31	51.72
Marzo	34.30	32.15	31.64	31.64	28.96	35.84
Aprile	26.81	24.77	25.16	25.16	24.04	25.65
Maggio	40.27	37.34	37.61	37.61	37.85	37.44
Giugno	43.40	39.56	39.05	39.05	39.21	39.59
Luglio	37.89	31.99	30.53	30.53	29.46	32.78
Agosto	38.04	32.38	31.53	31.53	31.31	33.70
Settembre	42.70	39.32	39.38	39.38	39.63	42.13
Ottobre	50.01	46.82	46.98	46.98	45.34	51.56
Novembre	60.97	56.99	57.26	57.26	56.92	59.31
Dicembre	53.18	50.89	51.19	51.19	49.83	53.41
Media	43.89	40.57	40.34	40.34	39.43	42.58

Livello medio del mare mensile - Anno 2010 - Stazioni esterne alla laguna

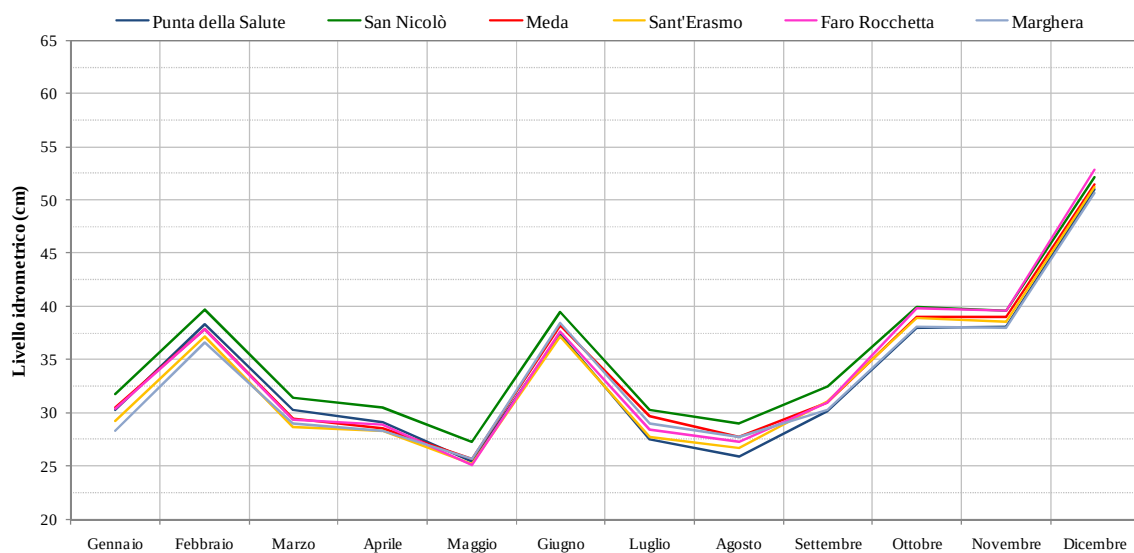


Stazioni interne alla Laguna di Venezia – Media mensile							
Anno 2010	Punta della Salute	Chioggia Vigo	San Nicolò	Meda	Sant’Erasmus	Faro Rocchetta	Marghera
Gennaio	44.74	43.87	45.92	45.12	44.82	45.68	42.93
Febbraio	49.13	48.63	49.87	49.21	48.37	49.73	47.26
Marzo	32.16	32.11	32.56	31.93	30.98	32.37	31.77
Aprile	24.52	23.49	25.53	25.02	24.44	24.91	25.80
Maggio	37.56	35.29	38.28	37.24	38.12	37.25	38.82
Giugno	40.08	37.57	40.74	39.09	39.24	39.16	40.43
Luglio	30.57	30.05	32.54	30.72	30.86	31.35	32.52
Agosto	32.16	31.00	33.56	31.75	31.91	32.50	33.63
Settembre	39.29	38.87	40.93	39.53	39.17	40.22	40.43
Ottobre	47.07	46.71	47.88	46.57	45.99	47.64	47.00
Novembre	57.92	55.15	59.44	56.88	56.63	57.56	58.16
Dicembre	51.78	49.95	53.23	52.80	50.11	51.43	52.61
Media	40.58	39.39	41.71	40.49	40.05	40.82	40.95



Stazioni interne alla Laguna di Venezia – Media mensile						
Anno 2009	Punta della Salute	San Nicolò	Meda	Sant’Erasmus	Faro Rocchetta	Marghera
Gennaio	30.23	31.81	30.47	29.27	30.40	28.35
Febbraio	38.33	39.65	37.86	37.16	37.82	36.64
Marzo	30.28	31.42	29.41	28.63	29.32	28.97
Aprile	29.06	30.54	28.53	28.28	28.82	28.25
Maggio	25.39	27.25	25.60	25.17	25.10	25.68
Giugno	37.34	39.48	38.24	37.19	37.64	38.39
Luglio	27.55	30.20	29.71	27.75	28.37	29.04
Agosto	25.84	28.97	27.75	26.68	27.21	27.76
Settembre	30.13	32.43	30.96	31.01	30.97	30.21
Ottobre	37.98	39.88	39.06	38.88	39.86	38.10
Novembre	38.04	39.63	39.04	38.57	39.61	37.98
Dicembre	50.98	52.11	51.41	51.19	52.81	50.59
Media	33.43	35.28	34.00	33.31	33.99	33.33

Livello medio del mare mensile - Anno 2009 - Stazioni interne alla laguna

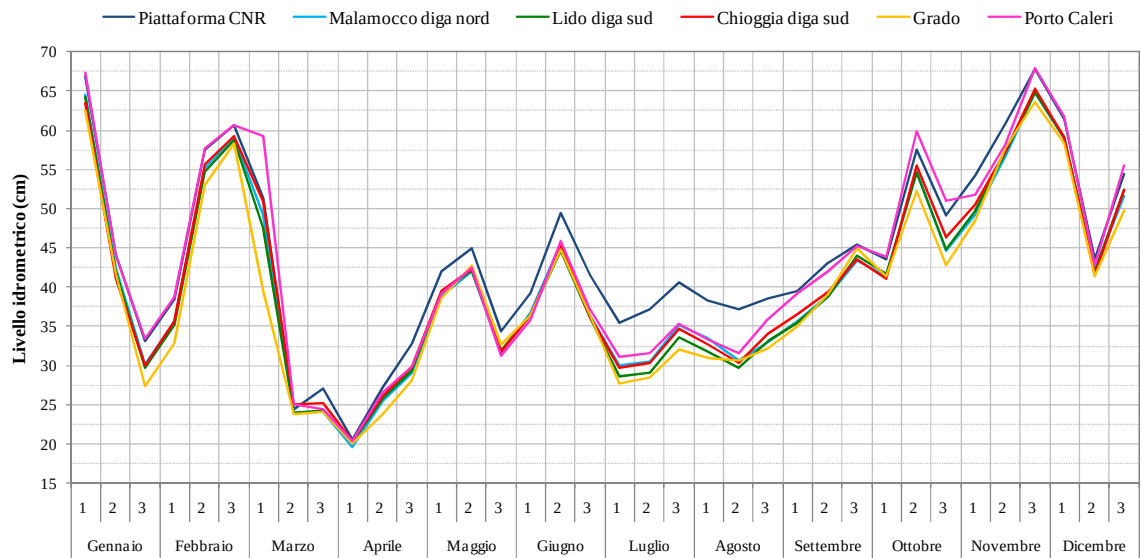


Stazioni esterne alla Laguna di Venezia – Media decadale							
Anno 2010	Decade	Piattaforma CNR	Malamocco diga nord	Lido diga sud	Chioggia diga sud	Grado	Porto Caleri
Gennaio	1°	66.81	64.48	64.25	63.40	62.44	67.34
	2°	44.23	42.47	42.04	41.04	41.69	44.03
	3°	33.08	30.19	29.75	30.02	27.45	33.51
Febbraio	1°	38.35	35.68	35.14	35.67	32.76	38.67
	2°	57.52	55.26	54.70	55.68	53.02	57.70
	3°	60.61	59.06	58.76	59.22	58.37	60.57
Marzo	1°	51.27	49.19	47.50	50.77	39.44	59.21
	2°	24.51	23.96	23.96	25.09	23.85	25.11
	3°	27.14	24.10	24.21	25.17	24.09	24.36
Aprile	1°	20.57	19.67	20.17	20.43	20.14	20.43
	2°	27.19	25.51	25.91	26.19	23.84	26.58
	3°	32.76	29.13	29.39	29.90	28.14	29.93
Maggio	1°	42.07	38.83	39.35	39.44	38.62	39.24
	2°	44.89	42.02	42.20	42.37	42.80	42.47
	3°	34.40	31.73	31.84	31.69	32.64	31.23
Giugno	1°	39.20	36.71	36.40	36.46	36.38	35.72
	2°	49.39	45.52	44.69	45.32	44.86	45.83
	3°	41.55	36.45	36.07	36.31	36.40	37.22
Luglio	1°	35.54	29.98	28.60	29.78	27.63	31.11
	2°	37.16	30.51	29.05	30.31	28.48	31.59
	3°	40.63	35.18	33.63	34.74	32.01	35.37
Agosto	1°	38.28	33.43	31.68	32.71	30.99	33.31
	2°	37.15	30.65	29.65	30.32	30.58	31.57
	3°	38.62	32.99	33.11	34.02	32.28	35.98
Settembre	1°	39.56	35.65	35.44	36.49	34.92	39.16
	2°	43.05	38.89	38.77	39.37	39.04	41.94
	3°	45.47	43.43	43.95	43.57	44.93	45.27
Ottobre	1°	43.59	41.41	41.72	41.05	41.34	43.92
	2°	57.46	54.71	54.63	55.53	52.22	59.88
	3°	49.07	44.57	44.82	46.35	42.71	50.93
Novembre	1°	54.23	49.34	49.79	50.56	48.47	51.73
	2°	60.97	56.81	57.15	57.32	57.85	58.31
	3°	67.74	64.84	64.83	65.29	63.52	67.88
Dicembre	1°	61.47	58.85	59.09	59.05	58.25	61.79
	2°	43.57	42.21	41.99	41.55	41.34	42.79
	3°	54.38	51.55	52.36	52.47	49.75	55.45
Media		43.99	40.69	40.46	40.96	39.53	42.70

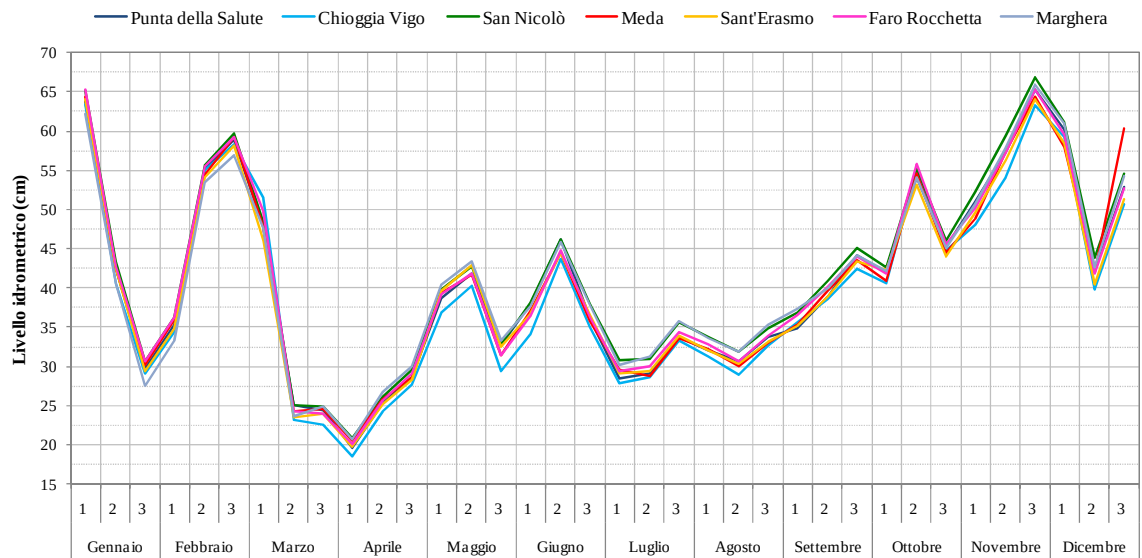
Stazioni interne alla Laguna di Venezia – Media decadale								
Anno 2010	Decade	Punta della Salute	Chioggia Vigo	San Nicolò	Meda	Sant' Erasmo	Faro Rocchetta	Marghera
Gennaio	1°	63.81	63.42	65.19	64.35	64.07	65.23	62.23
	2°	42.47	40.52	43.45	42.40	42.45	42.70	40.56
	3°	29.67	29.16	30.65	30.16	29.47	30.62	27.54
Febbraio	1°	35.23	34.40	36.21	35.92	34.82	36.31	33.34
	2°	55.16	55.08	55.62	54.49	54.12	55.52	53.45
	3°	58.95	58.35	59.75	59.24	58.10	59.25	56.93
Marzo	1°	47.78	51.49	48.39	47.72	46.07	49.70	47.55
	2°	25.08	23.16	25.11	24.21	23.53	24.22	23.62
	3°	24.40	22.62	24.92	24.65	24.03	24.02	24.84
Aprile	1°	19.57	18.47	20.88	20.57	19.72	20.10	20.63
	2°	25.33	24.30	26.22	25.79	25.22	25.61	26.73
	3°	28.65	27.71	29.50	28.70	28.38	29.03	30.05
Maggio	1°	38.75	36.86	39.84	39.29	39.59	39.15	40.39
	2°	41.82	40.22	42.77	41.61	42.85	41.82	43.39
	3°	32.62	29.37	32.79	31.41	32.46	31.37	33.24
Giugno	1°	37.98	34.04	38.08	36.97	36.68	36.41	37.57
	2°	46.24	43.73	46.13	44.45	44.47	44.80	45.87
	3°	36.02	34.95	38.00	35.84	36.58	36.27	37.86
Luglio	1°	28.47	27.91	30.84	29.52	29.02	29.36	30.20
	2°	29.16	28.68	30.92	28.71	29.37	29.99	31.31
	3°	33.75	33.23	35.55	33.65	33.89	34.40	35.74
Agosto	1°	32.00	31.30	33.79	32.17	32.08	32.77	33.62
	2°	30.59	28.87	31.89	30.05	30.30	30.69	31.86
	3°	33.73	32.65	34.89	32.91	33.21	33.91	35.24
Settembre	1°	34.89	35.62	36.92	35.30	35.20	36.51	37.25
	2°	38.84	38.53	40.85	39.67	38.94	40.17	39.93
	3°	44.13	42.47	45.03	43.60	43.36	43.98	44.11
Ottobre	1°	42.01	40.53	42.57	40.86	42.36	41.85	42.09
	2°	54.16	55.03	55.19	54.65	53.23	55.74	54.06
	3°	45.22	44.78	46.05	44.41	44.08	45.54	45.06
Novembre	1°	51.02	48.07	52.21	48.88	49.65	50.20	50.69
	2°	57.40	54.08	59.31	57.41	56.22	57.22	57.91
	3°	65.34	63.29	66.79	64.34	64.03	65.25	65.88
Dicembre	1°	60.17	59.25	61.13	58.04	58.41	59.59	60.87
	2°	42.11	39.84	43.82	42.02	40.41	41.89	42.57
	3°	52.94	50.75	54.59	60.30	51.39	52.68	54.24
Media		40.71	39.52	41.83	40.67	40.22	40.94	41.07

Stazioni interne alla Laguna di Venezia – Media decadale							
Anno 2009	Decade	Punta della Salute	San Nicolò	Meda	Sant’Erasmus	Faro Rocchetta	Marghera
Gennaio	1°	19.10	19.88	20.84	17.64	20.03	17.29
	2°	20.66	20.76	22.20	20.08	20.49	18.76
	3°	49.04	48.94	50.50	48.18	48.83	47.12
Febbraio	1°	66.41	65.69	67.78	65.19	66.72	64.76
	2°	31.97	31.97	33.52	31.06	31.30	30.28
	3°	11.18	10.50	12.15	9.74	9.87	9.44
Marzo	1°	36.08	35.73	37.30	34.55	35.08	34.41
	2°	20.79	20.11	21.88	19.15	19.65	19.56
	3°	33.63	32.16	34.74	31.87	32.88	32.57
Aprile	1°	23.27	23.16	24.81	22.27	23.00	22.36
	2°	29.05	29.25	30.82	28.68	28.96	27.99
	3°	34.85	33.19	36.00	33.90	34.51	34.41
Maggio	1°	23.05	22.08	23.92	22.07	21.80	21.93
	2°	26.03	27.40	28.67	26.44	26.38	26.82
	3°	26.91	27.12	28.97	26.84	26.93	28.06
Giugno	1°	39.78	40.45	41.78	39.57	39.71	40.75
	2°	35.82	37.26	38.18	35.68	36.79	37.01
	3°	36.43	37.00	38.50	36.32	36.42	37.41
Luglio	1°	36.25	37.37	38.53	36.11	36.63	37.04
	2°	26.08	27.79	28.78	26.33	27.00	27.56
	3°	20.98	22.53	23.94	21.43	22.10	23.12
Agosto	1°	27.55	29.25	30.65	28.27	28.69	29.48
	2°	23.11	24.89	26.18	24.08	24.28	25.06
	3°	26.77	29.00	29.99	27.59	28.53	28.63
Settembre	1°	26.51	26.91	28.80	26.93	27.04	26.96
	2°	32.63	33.28	34.78	33.51	33.25	32.59
	3°	31.24	32.70	33.69	32.69	32.62	31.08
Ottobre	1°	35.91	36.27	37.58	36.86	37.44	36.22
	2°	35.16	36.00	37.08	35.89	36.90	35.36
	3°	42.42	44.37	44.51	43.42	44.76	42.31
Novembre	1°	49.17	50.51	50.92	49.61	51.75	49.39
	2°	34.45	34.81	35.95	35.06	35.34	34.10
	3°	30.50	31.79	32.00	31.03	31.73	30.45
Dicembre	1°	40.99	41.63	42.20	41.45	42.48	41.07
	2°	45.59	45.66	46.49	45.61	48.20	45.60
	3°	64.97	65.54	66.23	65.12	66.39	63.79
Media		33.18	33.69	35.02	33.06	33.74	33.08

Livello medio del mare decadale - Anno 2010 - Stazioni esterne alla laguna



Livello medio del mare decadale - Anno 2010 - Stazioni interne alla laguna



Livello medio del mare decadale - Anno 2009 - Stazioni interne alla laguna

