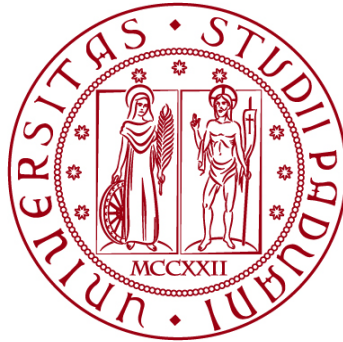


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



TESI DI LAUREA

I livelli di marea in laguna di Venezia: confronto tra i dati mareografici del 1932 e oggi

Relatore: Chiar.mo prof. Luca Carniello

Correlatore: dott. Davide Tognin

Laureando: Jacopo Facchin
1219677

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

ABSTRACT

La laguna di Venezia è un ambiente di transizione soggetto ad un'escursione di marea. In questa tesi vengono analizzati i dati mareografici misurati all'interno della laguna di Venezia nel 1932 e nel 2022 per descrivere le caratteristiche tipiche della marea in questo ambiente e capire come queste siano state modificate dagli interventi realizzati nella laguna nell'ultimo secolo. Lo studio delle maree ha scopi in molti settori, che variano dalla difesa degli ambienti soggetti alle maree alla costruzione di opere ingegneristiche, ad esempio in ambienti portuali.

Dopo aver inquadrato in generale il fenomeno della marea, vengono presentati gli strumenti necessari per misurare i livelli di marea, dai classici mareografi a galleggiante con pozzetto di calma agli strumenti basati su misure di pressione, su misure acustiche e radar. Con i dati misurati da questi strumenti è possibile calcolare il *datum* di marea attraverso le procedure proposte dalla National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) degli Stati Uniti d'America.

Per il 1932, i dati sono disponibili negli Annali Idrologici per le stazioni di Porto Marghera, Punta della Salute, Brondolo, Conche, Diga Sud Lido, San Felice di Chioggia e Pagliaga. Tra queste, le stazioni interne alla laguna mantenute fino ad oggi sono le stazioni di Porto Marghera e Punta della Salute. Per questo motivo, l'analisi si è concentrata su queste due stazioni. Le analisi evidenziano i cambiamenti dell'onda di marea all'interno della laguna di Venezia tra il 1932 e il 2022 dovute agli interventi realizzati in questo periodo.

Indice

1. Introduzione.....	1
2. La Laguna di Venezia	2
2.1 Inquadramento	2
2.2 Opere e modifiche dal 1932.....	3
3. Fenomeno della marea	4
3.1 Componente astronomica della marea.....	4
3.2 Componente meteorologica della marea.....	6
3.3 Propagazione della marea nella Laguna di Venezia	7
4. Strumenti per la misura del livello di marea	8
4.1 Stazioni con galleggiante e pozzetto di calma.....	8
4.2. Stazioni con strumenti a pressione.....	10
4.3. Stazioni con strumenti acustici	11
4.4. Stazioni con strumenti radar	12
4.5 Definizione dei vari tidal datum	12
5. Dati disponibili	13
5.1 Banche dati.....	13
5.2 Dati utilizzati.....	15
6. Metodi utilizzati	18
6.1 Tipologia di stazioni	18
6.2 Standard method per maree miste.....	18
6.3 Metodo tide by tide	20
6.4 Codice utilizzato	22
7. Risultati	26
7.1 Risultati per la stazione di Punta della Salute.....	26
7.2 Risultati per la stazione di Porto Marghera	26
7.3 Risultati per lo <i>standard method</i> per il 1932	29
7.4 Risultati per il metodo <i>tide by tide</i> per il 1932	30
8. Conclusioni.....	34
Bibliografia.....	36

1. Introduzione

Negli ambienti costieri si osserva una variazione periodica del livello legata ai fenomeni di marea. Questa dipende da due fattori: il primo è dato da una componente astronomica, dovuto alla posizione della Terra rispetto il Sole e la Luna, il secondo, invece, è dato da una componente meteorologica.

Lo studio delle osservazioni mareografiche, attraverso dati raccolti e trasmessi dalle reti mareografiche, rappresenta una fonte di informazioni utili per applicazioni di interesse tecnico e scientifico, come ad esempio la variazione del livello del mare, la difesa dalle alte maree, la stima del rischio di inondazione dovuto alle mareggiate, le possibili trasformazioni morfologiche delle zone costiere, degli estuari e delle lagune. Questi dati sono utili anche dal punto di vista ingegneristico, ad esempio per definire quote di progetto di opere portuali come banchine e frangiflutti, o per verificarne la stabilità.

Questa ricerca analizza i dati mareografici della laguna di Venezia, confrontando in particolare i periodi 1924-1942 e 2004-2022. I dati del periodo 1924-1942 sono disponibili negli Annali Idrologici in formato cartaceo, quindi sono stati digitalizzati nell'ambito di questo lavoro di tesi. I dati del periodo 2004-2022 sono disponibili già in formato digitale.

Per il calcolo del *datum* di marea (*tidal datum*), sono stati utilizzati il metodo *standard* e il metodo *tide by tide* che vengono illustrati nei manuali del *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Per poter implementare questi metodi è stato utilizzato un codice Matlab, che ha permesso di calcolare il datum di marea delle stazioni di San Felice di Chioggia, Pagliaga, Brondolo, Conche, Diga Sud Lido utilizzando come stazione primaria la stazione di Punta della Salute nel 1932. Oltre a queste stazioni si è scelto di calcolare, per 19 anni e per il 1932, il datum di marea da definizione per la stazione di Porto Marghera, consentendo così di vedere l'accuratezza del calcolo del datum di marea in un anno a confronto con un periodo di 19 anni. Applicando questi metodi ai due intervalli temporali è possibile confrontare le caratteristiche della marea nei due periodi. Delle stazioni disponibili per il 1932, tra quelle interne alla laguna sono state mantenute fino ad oggi le stazioni di Punta della Salute e Porto Marghera, per questo motivo l'analisi si è focalizzata su queste stazioni.

Per comprendere le dinamiche di marea che influenzano i dati considerati, all'inizio viene presentata la laguna di Venezia, la sua conformazione e alcuni interventi che sono stati realizzati nel corso dell'ultimo secolo. Viene poi descritto il fenomeno delle maree e delle sue due componenti, la componente astronomica e la componente meteorologica, per poi descrivere gli strumenti con cui è possibile effettuare delle misure mareografiche, le quali consentono di determinare i datum di marea. Quindi sono illustrati i dati disponibili, la loro provenienza e i metodi di analisi utilizzati con un commento del codice Matlab utilizzato per calcolare i risultati. Infine, vengono presentate le conclusioni che sono state tratte dall'analisi dei risultati ottenuti.

2. La Laguna di Venezia

2.1 Inquadramento

La Laguna di Venezia si trova nella parte settentrionale del mare Adriatico, tra il tratto finale del fiume Sile a nord e la foce del fiume Brenta a sud. Con una superficie di circa 550 km², una larghezza compresa tra gli 11 e i 12 km ed una lunghezza di circa 50 km, è la laguna più grande del Mar Mediterraneo ed è suddivisa nei tre bacini di Lido, Malamocco e Chioggia collegati al mare aperto tramite le tre bocche di porto che prendono il nome dal rispettivo bacino che servono (Figura 1.1). La laguna è poco profonda. Se si escludono i canali, la profondità media è di circa 145 centimetri rispetto al livello medio del mare attuale. I canali dragati servono principalmente alle navi sia mercantili che turistiche per raggiungere il porto di Venezia e la zona industriale di Porto Marghera, una delle più grandi d'Europa e possono raggiungere una profondità importante. Ad esempio, la profondità del canale Malamocco-Marghera è mantenuta pari a 12 metri.

Al livello amministrativo il territorio della laguna ricade principalmente sotto l'amministrazione della città di Venezia, con alcune zone nei comuni di Chioggia, Codevigo, Campagna Lupia, Mira, Musile di Piave, Jesolo e Cavallino-Treporti.



Figura 1.1: Vista dall'alto della laguna di Venezia (Fonte: MOSE Venezia).

2.2 Opere e modifiche dal 1932

Nel corso dei secoli la laguna ha subito molte modifiche, partendo dall'antichità quando i primi nuclei abitativi avevano cominciato con la bonifica di piccole zone paludose, modifiche di qualche specchio d'acqua per poterlo utilizzare come salina o approfondire qualche tratto dei canali minori, durante la Repubblica di Venezia con la deviazione dei fiumi che sfociavano all'interno fino ad arrivare al secolo scorso con lo scavo dei maggiori canali navigabili per collegare il mare aperto con Venezia e Porto Marghera per consentire il transito di navi con pescaggio maggiore.

Lo scavo del canale Vittorio Emanuele tra il 1920 e 1925 permetteva alle navi di collegare Venezia e Marghera, ma andò a produrre subito effetti sull'ambiente lagunare. Per via della sua profondità sotto il punto di vista idrodinamico andò a costituire una via preferenziale per la propagazione della marea in arrivo da Lido muovendosi lungo il canale di S. Nicolò, della Giudecca e Vittorio Emanuele, andando a creare delle modifiche locali del regime delle correnti con conseguenze negative per le zone d'acqua e per i canali più vicini. Tutto questo comportava la presenza di fenomeni di sedimentazione di materiale derivante dai processi erosivi dei bassifondi vicini che interessavano sia i canali vicini sia direttamente il canale Vittorio Emanuele. Successivamente alla costruzione del canale Malamocco-Marghera il canale ha perso di importanza, e non venendo più mantenuto come un tempo è possibile vedere l'effetto dei sedimenti che ha portato ad una diminuzione della profondità del canale.

Il canale che però ha avuto l'impatto più significativo è il Malamocco-Marghera realizzato tra il 1964 e il 1968, con una larghezza che varia tra 150 metri e i 60 metri con profondità fino a 12 metri. La sua costruzione ha contribuito a modificare sensibilmente la circolazione delle correnti di marea nella laguna centrale comportando conseguenze date anche da fenomeni idrodinamici derivanti dalla navigazione di navi di grande stazza.

Le conseguenze si sono viste con la graduale erosione dei bassifondali nella zona circostante, andando man mano a far scomparire i canali naturali che la innervavano e ne governavano il regime di marea. Tutto questo ha contribuito ad un degrado morfologico generalizzato che interessa la laguna centrale, riducendo drasticamente l'importanza delle strutture naturali che l'hanno protetta e caratterizzata nei secoli.

Nella laguna meridionale, un'ulteriore modifica all'ambiente lagunare si è visto con la costruzione della variante della Strada Statale Romea per il collegamento della città di Chioggia, che è andata ad ostacolare i fenomeni generati dal vento, che consentivano lo scambio delle acque dalle zone più periferiche della laguna rispetto le bocche di porto.

Ultimi, ma non per importanza, sono gli effetti che hanno subito le correnti in entrata e in uscita dalla laguna come conseguenza dell'aver armato le bocche di porto con dei moli per consentire il passaggio delle navi per poter accedere ai porti interni, andando a creare dei percorsi preferenziali non naturali della marea.

Questi interventi hanno contribuito a modificare la conformazione della laguna, influenzando anche i meccanismi naturali di riduzione dei livelli massimi di marea. Nella laguna ottocentesca questi fenomeni erano prevalentemente di tipo dissipativo, oggi invece si ha la prevalenza di fenomeni prevalentemente di tipo inerziale, i quali vanno ad amplificare i colmi nella loro propagazione.

3. Fenomeno della marea

Le maree sono oscillazioni periodiche del livello marino causate principalmente dall'attrazione delle masse d'acqua presenti sulla Terra da parte del Sole e della Luna, ovvero da una componente astronomica, e secondariamente possono essere influenzate anche dalle condizioni meteorologiche, per questo viene definita anche una componente meteorologica.

Con un periodo di 12 ore e 25 minuti e con una lunghezza pari alla metà della circonferenza terrestre, le maree sono le onde più lunghe conosciute dai mareografi, venendo identificate come alta marea, o colmo, nel momento in cui l'innalzamento della superficie marina raggiunge il suo culmine, mentre quando l'abbassamento raggiunge la minima elevazione si identifica la fase di bassa marea o cavo. Diversi fattori possono alterare la propagazione delle onde di marea, come ad esempio fattori meteorologici o idrologici, oppure la configurazione delle coste, la topografia del fondale marino o la profondità del mare nel luogo in cui si sta osservando la marea. Per questo motivo, nelle zone costiere si possono osservare anche maree con periodo diverso da quello di 12 ore e 25 minuti.

Le maree possono venire classificate in base alla periodicità con la quale si verificano nell'arco della giornata. Seguendo questo criterio si possono identificare:

- maree diurne, con il verificarsi giornalmente di una sola alta marea e di una sola bassa marea;
- maree semidiurne, con il verificarsi giornalmente di due alte maree e due basse maree di ampiezza poco diversa;
- maree miste, con il verificarsi giornalmente di due alte maree e due basse maree di ampiezza molto diversa.

A seconda della morfologia dei bacini nei quali si presenta, la marea può assumere ampiezze sensibilmente differenti, ma in generale, in mezzo agli oceani si registrano i valori minimi, mentre lungo le coste si possono misurare i valori massimi.

L'evoluzione della morfologia costiera, delle spiagge, degli estuari e delle correnti di marea viene influenzata dall'ampiezza delle maree. Secondo questo criterio si possono definire diverse tipologie di ambienti di marea:

- microtidali, con escursioni di marea inferiori a 2 metri;
- mesotidali, con escursione di marea tra 2 e 4 metri;
- macrotidali, con escursioni di marea maggiori a 4 metri

3.1 Componente astronomica della marea

La componente astronomica di marea è una combinazione di forze che agiscono sulle masse d'acqua presenti sulla superficie terrestre che influenzano l'ampiezza della marea:

- la forza di attrazione gravitazionale data dal sistema Terra-Sole-Luna;
- la forza centrifuga data dalla rotazione attorno al baricentro del sistema Terra-Luna.

Le forze che agiscono sulle masse d'acqua possono essere inquadrare per mezzo della legge gravitazionale universale di Newton, ovvero:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

dove G rappresenta la costante gravitazionale, m_1 e m_2 indicano le masse dei due corpi e r è la distanza tra i due centri di massa, è possibile ricavare la forza di attrazione gravitazionale.

Considerando un pianeta ricoperto uniformemente d'acqua che risente dell'effetto di un solo satellite, la forza di attrazione gravitazionale tende far disporre la superficie del mare secondo un ellissoide che ruota seguendo sempre il satellite che lo attrae. Se si osserva questo fenomeno dalla superficie del pianeta, questo risulta una variazione ciclica del livello del mare.

La forza centrifuga, che agisce su un corpo in moto circolare, è una forza apparente che nel sistema Terra-Luna ha direzione opposta rispetto a quella di attrazione gravitazionale. Combinando queste due forze, la superficie degli oceani si modifica in modo da risultare sempre in equilibrio tra la forza centrifuga del pianeta e la forza di attrazione gravitazionale degli astri.

La marea sulla Terra presenta caratteristiche differenti a seconda della posizione relativa che gli astri assumono tra loro: se il Sole, la Luna e la Terra sono allineati, ovvero in fase di luna piena o nuova, i rigonfiamenti della massa d'acqua dati dall'attrazione lunare si vanno a sommare con quelli solari, originando le maree sizigiali, caratterizzate dalle escursioni di marea maggiori (Figura 3.1).

Quando il Sole e la Luna sono in posizione di quadratura, ovvero in primo e ultimo quarto, i rigonfiamenti della massa d'acqua dati all'attrazione lunare si vanno a sottrarre a quelli solari, in questo modo si verificano le maree di quadratura, caratterizzate dalle minori ampiezze di marea (Figura 3.1).

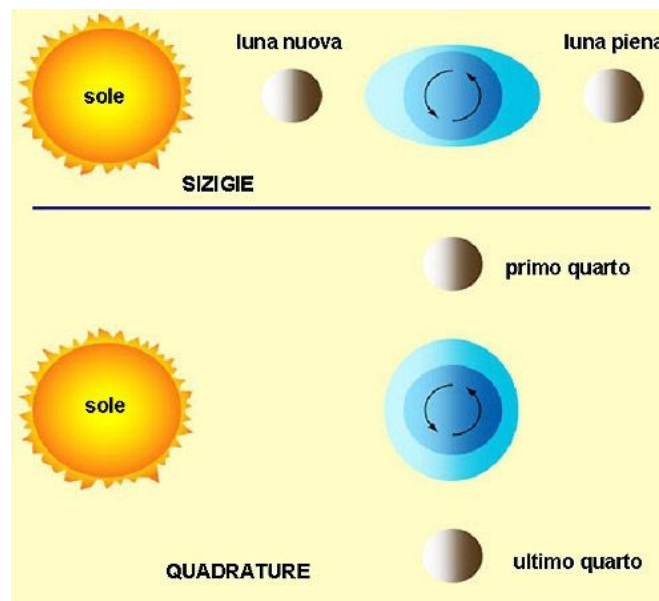


Figura 3.1: Posizione della Luna rispetto al Sole e alla Terra nelle maree di sizigie e delle maree di quadratura (Fonte: Caratteristiche della marea, sito ISPRA).

Un'ulteriore influenza astronomica delle maree deriva dalla regressione dei nodi lunari che comporta un'importante variazione dell'ampiezza dell'intervallo medio annuale delle maree e viene definito come un periodo di circa 19 anni che considera il cambiamento dell'inclinazione della Luna rispetto all'inclinazione del Sole.

Si considera il percorso apparente della Terra attorno al Sole, che se guardato dal Sole, viene chiamato eclittica. Questo percorso può essere rappresentato attorno alla Terra con un cerchio inclinato di 23° e $27'$ rispetto all'equatore terrestre (Figura 3.2). Allo stesso modo si può riferire il percorso apparente della Luna all'eclittica, facendo in modo di ottenere un percorso della Luna con un angolo di circa 5° rispetto all'eclittica. Quando la Luna si sposta nell'emisfero settentrionale dell'eclittica incrociando il nodo ascendente lunare, ovvero nell'equinozio di primavera, l'angolo di percorso della luna rispetto al sole è di circa $28,5^{\circ}$. Quando il nodo discendente della luna corrisponde all'equinozio di primavera l'angolo del percorso della Luna attorno al sole ha un angolo di circa $18,5^{\circ}$. Questa variazione del percorso della luna attorno al sole ha un periodo di circa 18,6 anni, e viene chiamata regressione dei nodi lunari.

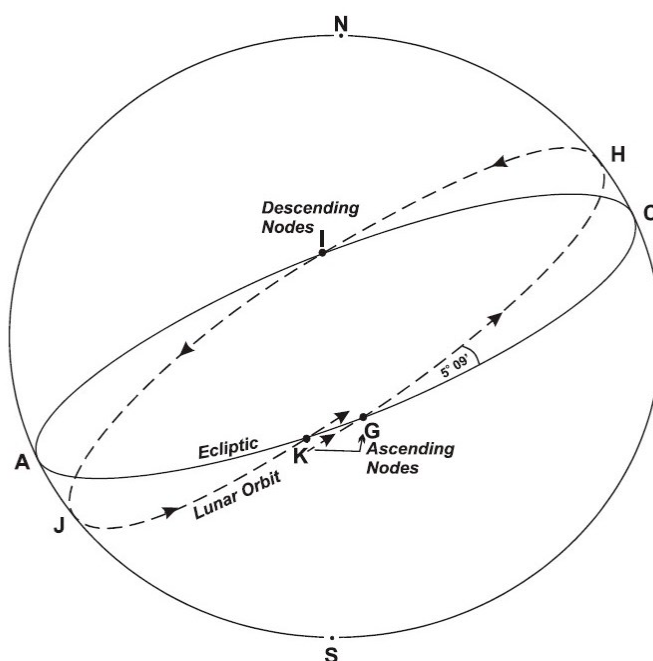


Figura 3.2: Posizione dei nodi lunari e inclinazione dell'orbita lunare rispetto all'eclittica (Fonte: *Tidal datum and their applications, National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, 2001*).

3.2 Componente meteorologica della marea

La componente meteorologica agisce direttamente sul livello marino, generata dall'azione del vento e dalla pressione atmosferica sulla superficie del mare. Questi effetti fisici generano gli effetti di sovrizzo, o *surge*, oppure di residuo comportando incrementi positivi o negativi rispetto alle normali oscillazioni astronomiche.

Il sovrizzo viene definito come la differenza tra la marea reale misurata in una certa località e la componente astronomica della marea prevista nella stessa località.

I maggiori contributi alla formazione del sovrizzo vengono dati dalla pressione atmosferica e dal vento, poiché la forza che le masse d'aria esercitano sulla superficie terrestre agisce anche sui mari e gli oceani, tendendo a comprimerli in base alla sua intensità. Il contributo della pressione atmosferica può essere dato da: un nucleo di alta pressione che tenderà a comprimere la superficie marina abbassandone il livello, oppure, da un nucleo di bassa pressione che eserciterà una forza ridotta sulla superficie del mare, comportando un incremento del livello marino.

La componente del vento agisce sulla superficie marina, insaccando le acque nel suo verso di propagazione. Quindi se il vento soffia verso la costa, tenderà a far aumentare temporaneamente il livello della marea in prossimità dei litorali. Al contrario, se il vento soffia da terra verso mare, tende a far diminuire il livello marino nelle vicinanze della costa, portando ad una riduzione del livello registrato.

Nel caso il bacino sia caratterizzato da particolari caratteristiche morfologiche, successivamente al passaggio di una perturbazione meteorologica, l'azione congiunta della variazione locale di pressione atmosferica e del vento può comportare un temporaneo dislivello in una zona limitata di mare. Per ristabilire l'equilibrio nei livelli, si generano delle sesse, o *seiches*, ovvero delle oscillazioni libere che si vanno a smorzare lentamente. Questo tipo di onda è tipico dei laghi, dei porti, dei bacini chiusi o semichiusi e generalmente sono stazionarie. Il mare Adriatico è un esempio di questo caso, dove le due sesse principali hanno periodi molto prossimi a quelli delle maree, ovvero, circa 21.33 ore e 12.19 ore per le sesse e 14.42 ore circa per le maree.

In sintesi, il livello di marea che viene misurato in una certa località contiene i contributi della componente astronomica e della componente meteorologica, ovvero il sovrizzo e sesse, dove il sovrizzo può assumere sia valori negativi che positivi. Un esempio significativo è dato dalla laguna di Venezia, dove in caso di valori di sovrizzo particolarmente elevati è possibile riscontrare valori di marea anche due volte superiori alla marea astronomica.

3.3 Propagazione della marea nella Laguna di Venezia

Il fenomeno della propagazione dell'onda di marea nella laguna di Venezia risulta più complesso per via della presenza delle bocche di porto che la collegano al mare aperto. Nella fase di flusso si ha che il livello liquido della laguna non si alza con la stessa velocità del mare aperto che è più alto, generando una forte corrente di marea entrante in laguna. Durante la fase di flusso l'acqua percorre i canali presenti nella laguna, raggiungendo le zone più interne. Nella fase di riflusso invece, il livello del mare è superiore in laguna rispetto al mare aperto, portando al fenomeno opposto, generando una forte corrente di marea uscente.

Il mare Adriatico tende ad ampliare la componente astronomica della marea che si sviluppa nel Mar Mediterraneo per via della sua conformazione stretta e poco profonda, quindi se nel canale di Otranto si ha un'escursione media pari a ± 10 cm, in laguna l'escursione media diventa di circa $\pm 75-80$ cm.

4. Strumenti per la misura del livello di marea

Le misurazioni mareografiche, dal punto di vista tecnico, possono presentare difficoltà legate sia a problemi logistici, sia al posizionamento e all'utilizzo della strumentazione, che deve poter operare in modo affidabile e sicuro in un ambiente spesso ostile.

Uno dei problemi maggiori nella misura strumentale delle maree è la necessità di filtrare il livello da misurare, dato che la superficie del mare è sempre in movimento e viene mossa da onde aventi diversa ampiezza e con periodo eterogenei. Quindi le misure di marea richiedono la capacità di saper separare le onde a lungo periodo (le maree) da quelle con un periodo breve, come ad esempio le onde generate dal vento. Inoltre, le misurazioni vengono influenzate anche dalla temperatura e dalle proprietà fisiche dell'acqua, come la densità o la salinità, le quali, a seconda dello strumento utilizzato, possono influire sulle misurazioni in maniera più o meno evidente. Per la misurazione del livello del mare i metodi possono essere suddivisi in due categorie: quelli appropriati per le misure in prossimità della costa, e quelli adatti ad essere utilizzati al largo e off-shore.

Le tecniche attualmente disponibili per le misure mareografiche vicino alla costa di interesse per questa tesi si possono raggruppare in quattro tipologie:

- Galleggiante alloggiato all'interno di un pozzetto di calma;
- Sistemi a pressione;
- Sistemi acustici;
- Sistemi radar (ondametri).

4.1 Stazioni con galleggiante e pozzetto di calma

Le stazioni mareografiche dotate di galleggiante in genere sono costituite da una cabina sorretta da pali di fondazione e circondata da *dolphins*, i quali permettono alle imbarcazioni di accostarsi durante la manutenzione periodica (Figura 4.1). La cabina al suo interno oltre ad ospitare la strumentazione necessaria alla raccolta dei dati di marea ospita il pozzetto di calma aperto sul pavimento, il quale viene collegato al mare aperto tramite dei fori. Nella zona nord adriatica questi fori si trovano a 30 cm e 60 cm rispetto al fondo del pozzetto, con una sezione a 1/400 della sezione orizzontale del pozzetto con un diametro variabile di 2-5 cm. Con questo metodo è possibile creare un filtro fisico del segnale da registrare attenuando le oscillazioni ad alta frequenza generate dal moto ondoso, rendendo possibile andare ad osservare solamente le oscillazioni più rilevanti dal punto di vista mareografico, ovvero quelle con il periodo più lungo: le maree.



Figura 4.1: A sinistra: stazione con pozzetto di calma presso Punta della Salute. A destra: stazione con pozzetto di calma a San Giorgio in Alga. Fonte: ISPRA.

Per poter misurare il livello di marea si ricorre ad uno strumento detto mareografo che può essere di tipo meccanico o digitale. Il mareografo fornisce un livello di marea rispetto ad un piano di riferimento prescelto definito o *datum*, mettendo in relazione la quota rilevata dal galleggiante con la piastrina mareografica della stazione che viene riferita allo stesso piano di riferimento tramite la definizione del caposaldo della stazione o *tide gauge bench mark*. L'altezza di marea riportata dal mareografo rispetto al piano di riferimento scelto viene definita tramite la differenza di quota tra il caposaldo della stazione e la quota del galleggiante.

I mareografi di tipo meccanico sono dotati di diagrammi cartacei, detti mareogrammi, sui quali viene continuamente segnata l'onda di marea tramite un pennino ad inchiostro. Ogni diagramma può avere una durata variabile che può essere regolata su periodi diversi, trascorsi i quali è necessario sostituire il mareogramma (Figura 4.2, sinistra).

I mareografi digitali invece vanno a raccogliere il dato di marea in una memoria interna, con la possibilità di trasmettere in tempo reale o differito i dati nel caso la stazione abbia le necessarie apparecchiature. I dati possono essere campionati con frequenze diverse in base allo strumento utilizzato (Figura 4.2, destra).

Questa tipologia di stazione nonostante gli svantaggi dati dall'elevato costo economico delle opere civili e dalla possibilità di ostruzione dei fori che collegano il pozzetto di calma, è ancora ampiamente utilizzato per il servizio mareografico nazionale per via della sua semplicità e robustezza.



Figura 4.2: A sinistra: mareografo meccanico con mareogramma cartaceo. A destra: mareografo digitale in servizio presso la stazione di Punta della Salute. Fonte: ISPRA.

4.2. Stazioni con strumenti a pressione

Gli strumenti a pressione, a differenza dei mareografi a galleggiante, permettono di ricavare indirettamente il livello del mare tramite la misura della pressione generata dalla colonna d'acqua al disopra dello strumento. I vantaggi di questo tipo di misurazione sono innanzitutto di tipo economico, visto che non richiedono la costruzione di opere civili, presentano una maggiore stabilità del *datum*, potenzialmente possono venire installati in qualunque ambiente marino e permettono di posizionare lo strumento per l'acquisizione dei dati anche a centinaia di metri di distanza. Gli svantaggi, oltre a dover conoscere i parametri locali come densità, pressione atmosferica e accelerazione gravitazionale, possono essere la complessità della determinazione iniziale del caposaldo della stazione, le difficoltà per operatori poco esperti di individuare eventuali malfunzionamenti o errori di misura per via di forti burrasche.

Si possono considerare due categorie per gli strumenti a pressione: i *bubblers* pneumatici e i trasduttori di pressione in mare. I *bubblers* pneumatici sfruttano l'aria compressa pompata verso una camera gorgogliatrice sul fondale marino tramite un tubo lungo il quale, una serie di valvole permettono di ridurre la pressione dell'aria pompata per andare a creare un flusso costante, mentre la pressione al suo interno viene misurata tramite un trasduttore di pressione. Sul fondale la pressione che l'aria deve avere per poter essere liberata in acqua sotto forma di bolle permette di ricavare la quota del livello del mare tramite la legge di Stevino.

I trasduttori di pressione invece montati direttamente in mare e generalmente vengono utilizzati negli ambienti più ostili come ad esempio le regioni polari. Sono solitamente all'interno di tubi protettivi fissati su banchine o moli, ma possono anche essere ancorati al fondale marino e collegati alla terra ferma tramite dei cavi armati, oppure possono essere presenti nelle stazioni a galleggiante all'interno del pozzetto di calma. Anche in questo caso la misurazione del livello della quota del mare si basa sulla legge di Stevino. Andando ad utilizzare uno

strumento differenziale è possibile determinare la sola pressione idrostatica, oppure utilizzando un barometro per suddividere le componenti della pressione in atmosferica e idrostatica si può ricavare la pressione totale.

L'utilizzo dei trasduttori di pressione ha come grande problema la definizione del caposaldo di misurazione, oltre a dover conoscere la temperatura che può andare ad influenzare la precisione delle misure e la necessità della stima della densità dell'acqua.

4.3. Stazioni con strumenti acustici

La misura del livello idrometrico viene ricavata indirettamente tramite l'utilizzo di una sonda capace di calcolare il tempo che un impulso acustico impiega per riflettersi verticalmente sulla superficie del mare (Figura 4.3). In base al tempo di riflessione e alla velocità del suono nell'aria è possibile determinare la quota idrometrica.

Nonostante l'economicità di questa tipologia di misurazione rispetto alle precedenti, si presentano diversi problemi nel momento di dover utilizzare questa soluzione. L'inconveniente principale di questi strumenti è la forte dipendenza della velocità del suono dalla temperatura e in parte dall'umidità dell'aria, che richiede l'installazione di più sensori per la misurazione della temperatura a diverse altezze per ottenere una misura dell'accuratezza desiderata. Oltre alle problematiche date dalla temperatura, è necessario considerare che l'impulso sonoro potrebbe non essere riflesso verticalmente dalla superficie marina, disperdendo il segnale. Per ovviare a questo tipo di problema è possibile installare lo strumento all'interno di un tubo di risonanza per rendere la superficie liquida più omogenea oltre a poter fornire protezione dagli agenti esterni la sonda. Questa soluzione comporta però una variazione di temperatura all'interno del tubo rispetto la temperatura esterna, quindi si ha la possibilità che la velocità del suono possa variare.



Figura 4.3: Ondametro ad ultrasuoni presente nella stazione di Murano. Fonte ISPRA.

4.4. Stazioni con strumenti radar

Le strumentazioni radar si basano sullo stesso principio delle onde acustiche, ma a differenza di quest'ultime non risentono dell'influenza della temperatura sulla velocità del suono in aria. Oltre al basso costo di questo tipo di strumentazione, questo il principale motivo per cui la strumentazione radar viene spesso utilizzata per andare a sostituire le sonde ad onde acustiche. La misura del livello idrico avviene indirettamente in base al tempo di riflessione degli impulsi elettromagnetici emessi dallo strumento sulla superficie liquida. Un ulteriore metodo può basarsi sull'invio di una frequenza continua da parte dello strumento radar e tramite lo sfasamento dell'onda riflessa andare a determinare la quota di marea.

4.5 Definizione dei vari tidal datum

Dall'analisi dei dati mareografici, per le maree vengono utilizzati dei valori denominati datum di marea, o *tidal datum*. I datum di marea sono locali, quindi non dovrebbero essere estesi in zone con differenti caratteristiche idrografiche senza sostanziali misure. Per poter essere recuperati quando se ne ha bisogno questi sono georeferenziati rispetto dei punti di riferimento, o *bench mark*.

I *tidal datum* utilizzati sono:

- *Mean Higher High Water* (MHHW), definito come la media aritmetica dei valori maggiori di alta marea osservati in uno specifico ciclo metonico di 19 anni. Viene considerato solo il valore maggiore di alta marea della giornata
- *Mean High Water* (MHW), definito come la media aritmetica dei livelli di alta marea osservati in uno specifico ciclo metonico di 19 anni
- *Mean Lower Low Water* (MLLW), definito come la media aritmetica dei valori minori di bassa marea osservati in uno specifico ciclo metonico di 19 anni. Viene considerato solo il valore minore di bassa marea della giornata
- *Mean Low Water* (MLW), definito come la media aritmetica dei livelli di bassa marea osservati in uno specifico ciclo metonico di 19 anni
- *Mean Tide Level* (MTL), è la media di MHW e MLW:

$$MTL = \frac{MHW + MLW}{2}$$

- *Mean Range* (Mn) è la differenza tra MHW e MLW

$$Mn = MHW - MLW$$

- *Diurnal High Water Inequality* (DHQ) è la differenza tra MHHW e MHW:

$$DHQ = MHHW - MHW$$

- *Diurnal Low Water Inequality* (DLQ) è la differenza tra MLW e MLLW:

$$DLQ = MLW - MLLW$$

- *Great Diurnal Range* (Gt) è la differenza tra MHHW e MLLW:

$$Gt = MHHW - MLLW$$

- *Diurnal Tide Level* (DTL) è un dato di marea che definisce il punto medio tra MHHW e MLLW:

$$DTL = \frac{MHHW + MLLW}{2}$$

- *Mean Sea Level* (MSL) definito come la media aritmetica delle altezze orarie osservate in un ciclo Metonico di 19 anni.

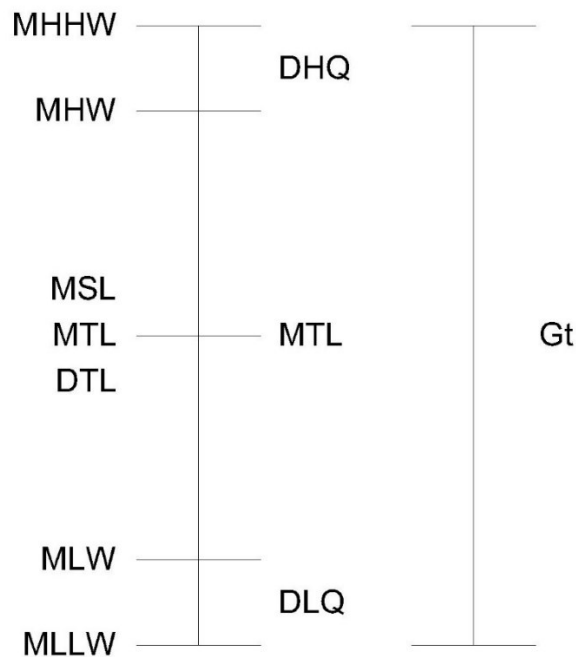


Figura 4.4: Disposizione grafica dei dati di marea.

5. Dati disponibili

5.1 Banche dati

Per questa ricerca sono stati utilizzati i dati mareografici riportati dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), raccolti prima negli Annali Idrologici redatti dall'Ufficio Mareografico del Regio Magistrato delle Acque sotto il Ministero dei Lavori Pubblici, poi in una banca dati all'interno del sito ISPRA.

I dati storici sono riportati all'interno degli annali idrologici costituiti dai bollettini idrografici, i quali riportano mensilmente i valori delle osservazioni pluviometriche e idrometriche. Gli annali sono suddivisi in due fascicoli, denominati come parte I e parte II. La parte I contiene i risultati delle osservazioni idrometriche, pluviometriche. Nel corso del tempo i bollettini sono stati integrati con elaborazioni riguardanti la termometria, il bilancio idrologico, il trasporto solido in sospensione, la freaticimetria e la mareografia. I bollettini riportano

i dati in tabelle mensili, dove le stazioni di misura sono raggruppate per bacini principali e ordinate secondo la rispettiva posizione idrografica.

ORA ED ALTEZZA DELL'ALTA E BASSA MAREA

57

Giorno e illuminazione	Diga Sud Lido						Punta della Salute						Porto di Marghera						Giorno e illuminazione	Diga Sud Lido						Punta della Salute						Porto di Marghera						Giorno e illuminazione						
	ALTA			BASSA			ALTA			BASSA			ALTA			BASSA				ALTA			BASSA			ALTA			BASSA			ALTA			BASSA									
	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.		Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.	Ors	cm.							
1	5,5	223,0	23,35	137,5	6,35	222,0	23,35	140,5	6,35	226,0	23,35	141,0	6,35	226,0	23,35	141,0	11	14,0	144,5	8,0	107,5	0,40	159,0	15,30	150,0	8,45	110,5	1,0	162,0	9,5	110,0	21	10,15	171,0	6,0	102,5	11,30	175,0	5,5	105,0	11,35	179,0	5,40	102,0
2	8,15	185,5	24,5	160,5	9,35	189,0	24,5	163,0	9,40	194,0	24,5	163,0	9,40	194,0	24,5	163,0	12	0,40	151,0	10,45	126,0	3,30	153,0	11,35	132,0	3,10	155,5	12,30	135,0	22	10,45	163,0	4,40	101,5	11,45	168,0	5,40	104,5	12,0	172,0	6,10	101,5		
3	9,40	207,5	25,45	132,0	10,45	208,0	25,45	137,0	11,0	213,0	25,45	137,0	11,0	213,0	25,45	137,0	13	4,35	158,5	13,15	115,5	6,30	161,0	13,45	130,0	7,5	170,0	14,0	124,5	23	11,30	163,0	5,10	100,5	12,30	167,0	6,15	103,0	13,35	170,0	6,40	98,5		
4	9,10	229,0	26,5	112,5	10,35	229,0	26,5	112,5	11,0	234,5	26,5	112,5	11,0	234,5	26,5	112,5	14	4,45	168,0	13,0	100,5	6,35	171,0	14,15	101,5	6,35	174,0	14,10	101,0	24	11,30	148,0	5,45	93,5	12,55	153,0	6,45	95,5	13,5	156,0	7,5	92,0		
5	9,15	223,5	26,5	135,5	10,30	220,0	26,5	135,5	10,35	227,5	26,5	135,5	10,35	227,5	26,5	135,5	15	6,30	167,0	13,35	140,5	7,45	171,0	14,30	100,0	8,10	175,0	14,30	144,0	25	13,5	137,5	6,0	89,0	14,15	143,5	7,30	88,5	14,5	150,0	7,30	84,5		
6	9,35	193,5	24,40	83,5	10,35	196,0	24,40	88,0	11,15	200,0	24,40	88,0	11,15	200,0	24,40	88,0	16	9,30	163,0	14,15	102,0	6,45	166,5	14,5	104,0	8,0	169,5	15,30	103,0	26	0,15	159,5	6,30	94,5	14,55	142,5	7,25	94,0	15,10	145,5	7,30	89,0		
7	11,10	167,0	27,40	116,5	11,45	172,0	27,40	116,5	12,10	215,0	27,40	116,5	12,10	215,0	27,40	116,5	17	8,35	172,5	13,10	129,5	9,35	176,5	15,40	104,0	9,30	180,0	16,10	101,0	27	0,15	149,5	7,30	109,0	10,55	153,5	8,0	111,0	11,5	154,5	8,35	109,5		
8	13,5	161,0	27,0	128,0	13,0	165,5	27,0	128,0	13,30	171,0	27,0	128,0	13,30	171,0	27,0	128,0	18	9,5	167,0	14,55	94,0	9,30	172,0	15,45	96,0	10,15	175,5	16,15	92,0	28	1,05	152,5	13,40	99,0	10,30	157,0	13,45	103,0	11,45	154,5	11,5	104,5		
9	13,5	156,0	27,45	91,0	13,0	162,0	27,45	91,0	13,30	168,5	27,45	91,0	13,30	168,5	27,45	91,0	19	9,40	165,0	15,30	98,0	10,35	171,0	16,15	100,5	10,55	175,0	16,45	97,0	29	5,10	151,0	13,15	92,0	6,15	155,5	13,15	93,0	6,30	158,5	13,30	91,0		
10	9,5	182,0	27,0	97,5	10,45	187,0	27,0	97,5	11,0	190,5	27,0	97,5	11,0	190,5	27,0	97,5	20	9,35	171,0	15,55	100,0	11,0	175,5	16,40	103,5	11,30	180,0	17,10	100,0	30	3,10	151,0	13,10	90,5	4,40	148,5	13,15	91,5	5,5	153,5	13,30	89,0		
	13,35	142,0	28,0	128,0	13,30	131,0	28,0	128,0	13,40	131,0	28,0	128,0	13,40	131,0	28,0	128,0	31	5,40	137,5	13,30	61,0	7,30	141,0	14,0	62,5	7,15	143,5	13,30	58,0															

MARZO 1935

Figura 5.1: tabella mensile dei dati mareografici delle stazioni di Diga Sud Lido, Punta della Salute e Porto di Marghera nel marzo del 1935.

La parte II, è suddivisa nelle sezioni A, riguardante la pluviometria, e nella sezione B, relativa all'idrometria. La prima contiene le caratteristiche delle stazioni operative durante l'anno, come la tipologia delle strumentazioni presenti, coordinate geografiche, funzionamento, quota sul mare o altri dati come le massime precipitazioni giornaliere per ogni mese e i volumi di afflusso meteorico. La sezione B invece, oltre a contenere come nella sezione A l'anagrafica delle varie stazioni, contiene le medie mensili e annue delle altezze idrometriche e le corrispondenti frequenze per le sole stazioni con copertura annuale completa, le misure di portata eseguite durante l'anno e i valori giornalieri delle portate ricavate dalle stazioni che consentono di tracciare una scala di flusso.

I dati più recenti invece si possono trovare all'interno del sito ISPRA della sezione per la Laguna di Venezia sotto la sezione "Dati" dove è possibile, a seconda se la stazione è dotata degli appositi strumenti di misura, scaricare i dati di marea, della temperatura, della radiazione solare, della pressione atmosferica, della pioggia giornaliera, la direzione del vento media, temperatura istantanea. È possibile consultare sia gli storici degli anni precedenti sia i dati in tempo reale dalla stazione scelta.

Stazioni Attive		Stazioni Dismesse	
Nome stazione	Dati in tempo reale	Dati storici	
Burano	Dati Stazione	🌊	
CanalAncora	🌊	🌊	
Caorle	🌊	🌊	
Cavallino Centro	🌊	🌊	
Cavallino Darsena	🌊	🌊	
Chioggia Diga Sud	🌊 🌡️ 🌞	🌊 🌡️ 🌞	
Chioggia Vigo	🌊	🌊	
Faro Rocchetta	🌊	🌊	
Foce Po	🌊 🌡️ 🌞	🌊 🌡️ 🌞	
Grado	🌊	🌊 🌡️ 🌞	
Grassabò	🌊 🌡️ 🌞	🌊 🌡️ 🌞	
Laguna Caleri - Moceniga	🌊 🌡️ 🌞 🌡️ 🌞 🌡️ 🌞	🌊 🌡️ 🌞 🌡️ 🌞 🌡️ 🌞	
Lido Diga Sud	Dati Stazione	🌊 🌡️ 🌞	
Lido Meteo	🌊 🌡️ 🌞 🌡️ 🌞 🌡️ 🌞	🌊 🌡️ 🌞 🌡️ 🌞 🌡️ 🌞	
Malamocco Diga Nord	🌊 🌡️ 🌞	🌊 🌡️ 🌞	
Marghera	🌊	🌊	
Meda Bocca Lido	🌊	🌊	
Murano	🌊	🌊	

Figura 5.2: Pagina iniziale della banca dati del sito ISPRA dove è possibile trovare sia i dati in tempo reale delle stazioni attive, sia i dati storici delle stazioni ormai dismesse.

5.2 Dati utilizzati

Per calcolare i dati di marea è stata utilizzata come stazione primaria la stazione di Punta della Salute dove vengono considerati 19 anni di misurazioni, come stazione di confronto per i risultati ottenuti la stazione di Porto Marghera per 19 anni. Come stazioni secondarie sono state scelte le stazioni di Brondolo, San Felice di Chioggia, Pagliaga, Conche, Diga sud Lido e per poter avere un confronto nei risultati ottenuti utilizzando un periodo di 19 anni e un solo anno è stata scelta anche la stazione di Porto Marghera per il 1932.

Nome stazione	Data inizio misurazione	Data fine misurazione	Posizione
Punta della Salute	1 Gennaio 1932	31 Dicembre 1942	Latitudine 45° 25' 50,49" N Longitudine 12° 20' 11,97" E
Porto Marghera	1 Gennaio 1932	31 Dicembre 1942	Latitudine 45° 28' 27,15" N Longitudine 12° 14' 20,97" E
Diga Sud Lido	1 Gennaio 1932	31 Dicembre 1942	Latitudine 45° 25' 05,19" N Longitudine 12° 25' 35,17" E
San Felice di Cioggia	1 Gennaio 1932	31 Dicembre 1942	Latitudine 45° 13' 25,02" N Longitudine 12° 16' 49,56" E
Brondolo	1 Gennaio 1932	31 Dicembre 1942	Latitudine 45° 11' 01,74" N Longitudine 12° 16' 28,22" E
Pagliaga	1 Gennaio 1932	31 Dicembre 1942	Latitudine 45° 31' 09,20" N Longitudine 12° 23' 00,01" E
Conche	1 Gennaio 1932	31 Dicembre 1942	Latitudine 45° 14' 19,50" N Longitudine 12° 12' 19,40" E

Tabella 5.1: Stazioni mareografiche scelte.

Per il secondo periodo, che va dal 2004 al 2022 invece sono state utilizzate solo le stazioni di Punta della Salute e di Porto Marghera perché tutte le altre stazioni attive all'interno della laguna nel 1932 sono state dismesse.

Nome stazione	Data inizio misurazione	Data fine misurazione	Posizione
Punta della Salute	1 Gennaio 2004	31 Dicembre 2022	Latitudine 45° 25' 50,49" N Longitudine 12° 20' 11,97" E
Porto Marghera	1 Gennaio 2004	31 Dicembre 2022	Latitudine 45° 28' 27,15" N Longitudine 12° 14' 20,97" E

Tabella 5.2: Stazioni mareografiche scelte per il secondo periodo.

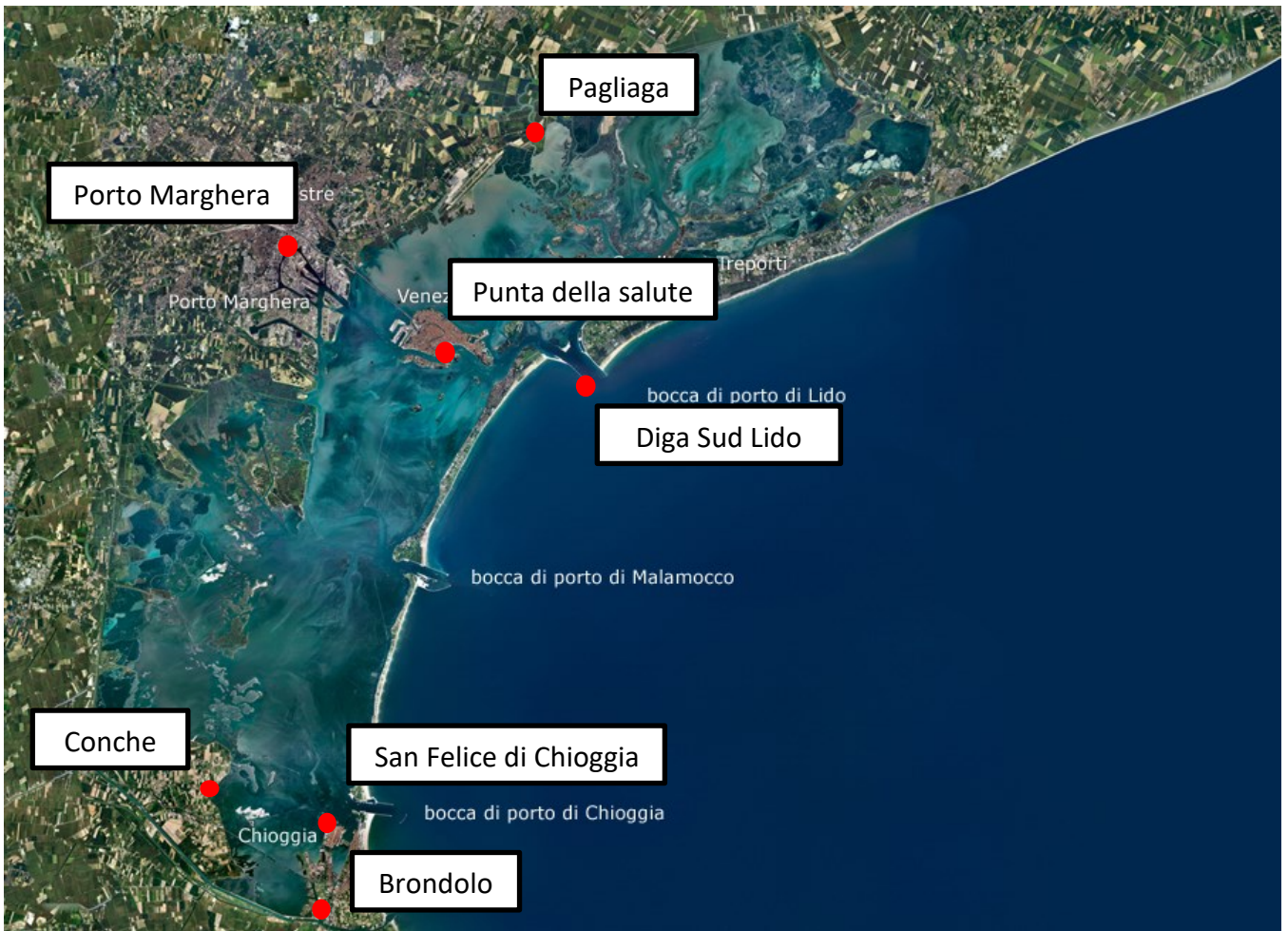


Figura 5.3: Posizione delle stazioni utilizzate.

6. Metodi utilizzati

6.1 Tipologia di stazioni

Il calcolo dei dati di marea avviene tramite l'utilizzo di più stazioni, andando a confrontare le stazioni che sono presenti nel territorio in esame da più tempo a stazioni con meno disponibilità di dati, perché più recenti o perché temporanee. Queste stazioni vengono suddivise dal NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) in tre categorie, anche se ne per questa ricerca ne verranno utilizzate solo due tipologie:

- *Control Station* sono le stazioni in funzione da almeno 19 anni con la previsione che continuino ad operare in futuro. Vengono utilizzate per ottenere una raccolta dati continua dei livelli del mare in una certa località, utilizzate per fornire dati di controllo con applicazioni nazionali.
- *Secodary Station* sono le stazioni in uso da meno di 19 anni, ma funzionanti da più di 1 anno con un tempo di utilizzo limitato. Vengono utilizzate per ottenere dati di controllo in baie e estuari dove gli effetti delle maree non sono registrati dalla stazione di controllo più vicina. Le osservazioni alle stazioni di controllo non sono sufficienti per una precisa stima dei dati di marea, ma se i dati sono ridotti rispetto una stazione di controllo si possono ricavare dei risultati rilevanti.
- *Tertiary Station* sono le stazioni che hanno operato per più di un mese, ma per meno di un anno e come con le stazioni secondarie è possibile ridurre i dati rispetto una stazione primaria. Solitamente i dati di queste stazioni vengono utilizzati per supportare controlli idrologici.

6.2 Standard method per maree miste

Questo metodo viene utilizzato per determinare i dati di marea calcolando i valori di DHQ, DLQ, Mn e MT attraverso un parametro di correzione ricavato confrontando i dati della *secondary station* con i dati della *primary station* definiti come “*accepted for B*”. Successivamente i parametri di correzione verranno utilizzati per correggere i dati della *secondary station* che verranno definiti come “*corrected for A*” per poi essere utilizzati per determinare i *tidal datum* MLW, MLLW, MHW e MHHW (rispettivamente *Mean Low Water*, *Mean Loewst Low Water*, *Mean High Water*, *Mean Highest High Water*).

In questa ricerca le stazioni di Brondolo, Pagliaga, Diga sud Lido, San Felice di Chioggia e Conche, assieme alla stazione di Porto Marghera nel 1932 per lo *standard method* verranno considerate come *secondary station* e nelle formulazioni seguenti saranno rappresentate dalla lettera “A”. La stazione di Punta della Salute invece sarà la *control station* e nel metodo viene definita come “B”.

In questo capitolo viene spiegato solamente lo *standard method* per le maree miste, in caso lo si voglia applicare ad altre tipologie di maree le formulazioni successive del metodo non sono più valide.

MTL (*Mean Tide Level*) viene calcolato tramite la somma del valore medio della differenza tra MTL calcolato da definizione per B e A e il valore medio di MTL della stazione B

$$MTL_{CORRECTED\ FOR\ A} = MTL_{ACCEPTED\ FOR\ B} + \overline{(MTL_A - MTL_{ACCEPTED\ FOR\ B})}$$

(A) SUBORDINATE STATION 9414750 ALAMEDA, SAN FRANCISCO BAY
 (B) STANDARD STATION 9414290 SAN FRANCISCO, SAN FRANCISCO BAY

Mon	Year	M T L		
		A	B	A - B
		METER	METER	METER
Mar	1997	2.058	2.731	-0.673
Apr	1997	1.978	2.648	-0.670
May	1997	2.066	2.741	-0.675
Jun	1997	2.131	2.809	-0.678
Jul	1997	2.147	2.830	-0.683
Aug	1997	2.196	2.882	-0.686
Sep	1997	2.199	2.878	-0.679
Oct	1997	2.216	2.905	-0.689
Nov	1997	2.298	2.995	-0.697
Dec	1997	2.267	2.970	-0.703
Jan	1998	2.303	3.001	-0.698
Feb	1998	2.414	3.103	-0.689
SUMS				-8.220
TOTAL MONTHS				12.000
MEANS				-0.685
ACCEPTED FOR B				2.728
CORRECTED FOR A				2.043

Tabella 6.1: Tabella utilizzata per il calcolo di MTL tramite il metodo standard nel manuale NOAA, dove è possibile vedere nel parametro denominato “MEANS” la media delle differenze utilizzata per correggere il dato della stazione B (Fonte: *Computational Techniques for Tidal Datum handbook – NOAA, 2003*).

Mn (*Mean Range*) viene calcolato moltiplicando il valore di Mn calcolato da definizione per B e la media del rapporto tra Mn calcolato da definizione di A e B

$$Mn_{CORRECTED\ FOR\ A} = Mn_{ACCEPTED\ FOR\ B} * \frac{Mn_A}{Mn_{ACCEPTED\ FOR\ B}}$$

DHQ (*Diurnal High Water Inequality*) viene definito nel paragrafo 4.5 come la differenza tra MHHW e MHW nel metodo standard viene definito come:

$$DHQ_{CORRECTED\ FOR\ A} = DHQ_{ACCEPTED\ FOR\ B} * \frac{1}{N} \sum_{I=1}^N \frac{DHQ_A(I)}{DHQ_{ACCEPTED\ FOR\ B}(I)}$$

DLQ (*Diurnal Low Water Inequality*) definito come la differenza tra MLW e MLLW nel metodo standard viene definito come:

$$DLQ_{CORRECTED\ FOR\ A} = DLQ_{ACCEPTED\ FOR\ B} * \frac{1}{N} \sum_{I=1}^N \frac{DLQ_A}{DLQ_{ACCEPTED\ FOR\ B}}$$

Dopo aver determinato i valori corretti, è possibile andare a determinare i valori corretti di MLW, MLLW, MHW, MHHW tramite le seguenti formule:

$$MLW_A = MTL_{CORRECTED\ FOR\ A} - 1/2Mn_{CORRECTED\ FOR\ A}$$

$$MHW_A = MLW_A + Mn_{CORRECTED\ FOR\ A}$$

$$MLLW_A = MLW_A - DLQ_{CORRECTED FOR A}$$

$$MHHW_A = MHW_A + DHQ_{CORRECTED FOR A}$$

6.3 Metodo tide by tide

Il secondo metodo utilizzato è comparazione simultanea di acque alte e basse o *Tide by Tide Analysis* e viene impiegato per computare dati da stazioni a breve termine. Per determinare i dati di marea MLW, MLLW, MHW e MHHW per la stazione “A” è necessario determinare dei fattori correttivi che verranno definiti come “*corrected for A*” tramite una stima di Mn, DLQ e DHQ denominati come “*Ratio*” e un certo ΔMn e confrontati con i dati della stazione “B” denominati come “*accepted for B*”.

Anche in questo caso, come nel precedente metodo, le stazioni di Brondolo, Pagliaga, Diga sud Lido, San Felice di Chioggia e Conche, assieme alla stazione di Porto Marghera nel 1932 verranno considerate come *secondary station* e nelle formulazioni seguenti saranno rappresentate dalla lettera “A”, e la stazione di Punta della Salute invece sarà la *control station* che nel metodo viene definita come “B”.

COMPARISON OF SIMULTANEOUS OBSERVATIONS FOR 97 3 1 TO 97 3 7
 (A) SUBORDINATE STATION 9414750 ALAMEDA, SAN FRANCISCO BAY
 (B) STANDARD STATION 9414290 SAN FRANCISCO, SAN FRANCISCO BAY

(A) STATION HEIGHT OF				(B) STATION HEIGHT OF				(A) - (B) HEIGHT DIFFERENCE				
HHW _A	LHW _A	LLW _A	HLW _A	HHW _B	LHW _B	LLW _B	HLW _B	Δ HHW	Δ LHW	Δ LLW	Δ HLW	
2.748	2.250	1.306	1.744	3.340	2.853	2.111	2.532	-0.592	-0.603	-0.805	-0.788	
2.815	2.304	1.214	1.784	3.417	2.901	2.008	2.568	-0.602	-0.597	-0.794	-0.784	
2.768	2.352	1.039	1.725	3.361	2.933	1.857	2.511	-0.593	-0.581	-0.818	-0.786	
2.814	2.468	0.848	1.642	3.391	3.021	1.669	2.438	-0.577	-0.553	-0.821	-0.796	
2.940	2.641	0.729	1.527	3.488	3.165	1.535	2.335	-0.548	-0.524	-0.806	-0.808	
3.077	2.784	0.705	1.361	3.603	3.292	1.498	2.172	-0.526	-0.508	-0.793	-0.811	
3.139				3.648				-0.509				
SUMS:	20.301	14.799	5.841	9.783	24.248	18.165	10.678	14.556	-3.947	-3.366	-4.837	-4.773
NUMBER:	7	6	6	6	7	6	6	6	7	6	6	6
MEANS:	HHW _A	LHW _A	LLW _A	HLW _A	HHW _B	LHW _B	LLW _B	HLW _B	Δ HHW	Δ LHW	Δ LLW	Δ HLW
	2.900	2.467	0.974	1.631	3.464	3.028	1.780	2.426	-0.564	-0.561	-0.806	-0.796

Tabella 6.2 Tabella che contiene i dati iniziali per poter andare ad applicare il metodo Tide by tide, dove è possibile vedere le altezze a confronto nelle prime due colonne e nella terza le differenze tra i dati della stazione A e la stazione B. Nell’ultima riga denominata sono presenti le medie delle dodici colonne (Fonte: *Computational Techniques for Tidal Datum handbook – NOAA, 2003*).

Per prima cosa è necessario calcolare DHQ e DLQ di A utilizzando i parametri $\overline{HHW_A}$, $\overline{HLW_A}$, $\overline{LHW_A}$, $\overline{LLW_A}$ (*Higher High Water, Higher Low Water, Lower High Water e Lower Low Water*) tramite le formule:

$$DHQ_A = 0.5 * (\overline{HHW}_A - \overline{LHW}_A)$$

$$DLQ_A = 0.5 * (\overline{HLW}_A - \overline{LLW}_A)$$

Si procede calcolando la media delle acque alte della stazione A \overline{HW}_A (*Mean High Water Height*) e la media delle acque basse \overline{LW}_A (*Mean Low Water Height*) con le formule:

$$\overline{HW}_A = 0.5 * (\overline{HHW}_A + \overline{LHW}_A)$$

$$\overline{LW}_A = 0.5 * (\overline{HLW}_A + \overline{LLW}_A)$$

Ora è possibile ricavare Mn (*Mean Range*) e MTL (*Mean Tide Level*) della stazione A:

$$Mn_A = \overline{HW}_A - \overline{LW}_A$$

$$MTL_A = 0.5 * (\overline{HW}_A + \overline{LW}_A)$$

Ora dalla tabella 6.1 si può andare ad utilizzare la media delle differenze per poter ricavare le differenze ΔDHQ (*Diurnal High Water Inequality*) e ΔDLQ (*Diurnal Low Water Inequality*):

$$\Delta DHQ = 0.5 * (\overline{\Delta HHW} - \overline{\Delta LHW})$$

$$\Delta DLQ = 0.5 * (\overline{\Delta HLW} - \overline{\Delta LLW})$$

Le differenze $\overline{\Delta HW}$ e $\overline{\Delta LW}$ vengono date da:

$$\overline{\Delta HW} = 0.5 * (\overline{\Delta HHW} + \overline{\Delta LHW})$$

$$\overline{\Delta LW} = 0.5 * (\overline{\Delta HLW} + \overline{\Delta LLW})$$

Le differenze ΔMn e ΔMTL sono date da:

$$\Delta Mn = \overline{\Delta HW} - \overline{\Delta LW}$$

$$\Delta MTL = 0.5 * (\overline{\Delta HW} + \overline{\Delta LW})$$

Con questi parametri ora andare a definire Mn_{RATIO} , DHQ_{RATIO} e DLQ_{RATIO} :

$$Mn_{RATIO} = \frac{Mn_A}{Mn_A - \Delta Mn}$$

$$DHQ_{RATIO} = \frac{DHQ_A}{DHQ_A - \Delta DHQ}$$

$$DLQ_{RATIO} = \frac{DLQ_A}{DLQ_A - \Delta DLQ}$$

Con questi risultati è possibile andare a determinare i dati di marea della stazione A:

$$MTL_{CORRECTED\ FOR\ A} = MTL_{ACCEPTED\ FOR\ B} + \Delta MTL$$

$$Mn_{CORRECTED\ FOR\ A} = Mn_{ACCEPTED\ FOR\ B} * Mn_{RATIO}$$

$$DHQ_{CORRECTED\ FOR\ A} = DHQ_{ACCEPTED\ FOR\ B} * DHQ_{RATIO}$$

$$DLQ_{CORRECTED\ FOR\ A} = DLQ_{ACCEPTED\ FOR\ B} * DLQ_{RATIO}$$

$$MLW_A = MTL_{CORRECTED\ FOR\ A} - 0.5 * Mn_{CORRECTED\ FOR\ A}$$

$$MHW_A = MLW_A + Mn_{CORRECTED\ FOR\ A}$$

$$MLLW_A = MLW_A - DLQ_{CORRECTED\ FOR\ A}$$

$$MHHW_A = MHW_A + DHQ_{CORRECTED\ FOR\ A}$$

6.4 Codice utilizzato

Per poter utilizzare i due metodi descritti nei due paragrafi precedenti è stato utilizzato un codice implementato in Matlab che viene riportato e brevemente spiegato successivamente.

Prima di tutto vengono identificati i picchi di alta marea, indicati con 'H', e di bassa marea, indicati con 'L'.

Per il calcolo del datum di marea da definizione viene implementata una funzione che permette di andare a selezionare i valori a seconda se questi sono di alta o bassa marea, per poi suddividere in massimi e minimi giornalieri, andando a creare degli elementi definiti come *timetable*:

```

THsec = T(T.stage=="H",:);
TLsec = T(T.stage=="L",:);
Tasec = T(:,1);
THHsec = retime(Tasec,'daily','max');
TLLsec = retime(Tasec,'daily','min');
Thsec = THsec(:,1);
Thhsec = THHsec(:,1);
Tlsec = TLsec(:,1);
Tllsec = TLLsec(:,1);

```

Dopo aver suddiviso i dati è possibile andare a calcolare i vari dati di marea da definizione inserendoli all'interno di una tabella:

```

T19 = table;
T19.MLLW = mean(Tll.level,'omitnan');
T19.MLW = mean(Tl.level,'omitnan');
T19.MSL = mean(Ta.level,'omitnan');

```

```

T19.MHW = mean(Th.level,'omitnan');
T19.MHHW = mean(Thh.level,'omitnan');

T19.MTL =(T19.MHW + T19.MLW)/2;
T19.DTL = (T19.MHHW + T19.MLLW)/2;
T19.Mn = T19.MHW - T19.MLW;
T19.DHQ = T19.MHHW - T19.MHW;
T19.DLQ = T19.MLW - T19.MLLW;
T19.Gt = T19.MHHW - T19.MLLW;

```

Questo procedimento viene effettuato sia per le stazioni di controllo che per le stazioni secondarie. Con i dati ricavati è possibile cominciare ad implementare i metodi per il calcolo dei dati di marea. Partendo con il metodo standard si vanno a calcolare i fattori correttivi:

```

dAB = table;
dAB.MTL = TA.MTL - TB.MTL;
dAB.Mn = TA.Mn./TB.Mn;
dAB.DHQ = TA.DHQ./TB.DHQ;
dAB.DLQ = TA.DLQ./TB.DLQ;
dABm = mean(dAB);

```

Dopo aver calcolato i fattori correttivi è possibile andare a calcolare i datum di marea per la stazione secondaria applicando i fattori correttivi ai valori calcolati per la stazione di controllo, in questo caso Punta della Salute:

```

ST.MTL = dABm.MTL + TtPDS.MTL;
ST.Mn = dABm.Mn * TtPDS.Mn;
ST.DHQ = dABm.DHQ * TtPDS.DHQ;
ST.DLQ = dABm.DLQ * TtPDS.DLQ;
ST.MLW = ST.MTL - 1/2*ST.Mn;
ST.MHW = ST.MLW + ST.Mn;
ST.MLLW = ST.MLW - ST.DLQ;
ST.MHHW = ST.MHW + ST.DHQ;

```

Il metodo standard è stato implementato, ora si può procedere con l'applicazione del metodo *tide by tide*, dove per prima cosa è necessario scegliere un intervallo di dati limitato, dato che questo metodo funziona bene per brevi lassi di tempo. In questo caso si è scelto di utilizzare una settimana di tempo:

```

Tstart1= datetime("23-Apr-2010");
Tend1= Tstart1 + days(7);
Trange1 = timerange(Tstart1,Tend1);
TrA = Tsec(Trange1,:);

```

L'intervallo scelto deve avere lo stesso numero di dati e picchi di alta e bassa marea per poter funzionare, quindi si è ricorsi ad un'associazione grafica per poter valutare la correttezza del periodo scelto:

```

figure
hold on
plot(TrA.time,TrA.level,'DisplayName','A');
plot(TrB.time,TrB.level,'DisplayName','B');
legend

```

L'ultima cosa a fare prima di poter andare ad applicare il metodo è preparare una tabella uguale alla tabella 6.1, andando a selezionare i picchi di alta e bassa marea:

```

ThA = TrA(TrA.stage=="H",'level'); % tutte le alte maree di A
ThhA = retime(ThA,'daily','max'); % High High tide
TlhA = retime(ThA,'daily','min'); % Low High tide

TlA = TrA(TrA.stage=="L",'level'); % tutte le basse maree di
A
ThlA = retime(TlA,'daily','max'); % High Low tide
TllA = retime(TlA,'daily','min'); % Low Low tide

ThB = TrB(TrB.stage=="H",'level'); % tutte le alte maree di B
ThhB = retime(ThB,'daily','max'); % High High tide
TlhB = retime(ThB,'daily','min'); % Low High tide

TlB = TrB(TrB.stage=="L",'level'); % tutte le basse maree di
B
ThlB = retime(TlB,'daily','max'); % High Low tide
TllB = retime(TlB,'daily','min'); % Low Low tide

Tc = synchronize(ThhA,TlhA,ThlA,TllA,ThhB,TlhB,ThlB,TllB);
Tc.Properties.VariableNames = {'hhA' 'lhA' 'hlA' 'llA' 'hhB'
'lhB' 'hlB' 'llB'};

clear ThhA TlhA ThlA TllA ThhB TlhB ThlB TllB

%calcolo delle differenze
Tc.dhhAB = Tc.hhA - Tc.hhB;
Tc.dlhAB = Tc.lhA - Tc.lhB;
Tc.dhlAB = Tc.hlA - Tc.hlB;
Tc.dllAB = Tc.llA - Tc.llB;

TcM = mean(Tc,'omitnan'); %valori medi

```

Ora avendo ricavato la tabella 6.1 è possibile andare ad implementare il metodo. Si comincia andando a calcolare fattori correttivi richiesti, lavorando anche in questo caso tramite tabelle:

```

inTbT = table; % Tabella per i calcoli iniziali del metodo
tide by Tide

inTbT.DHQa = 0.5 * (TcM.hhA - TcM.lhA);
inTbT.DLQa = 0.5 * (TcM.hlA - TcM.llA);
inTbT.mHWa = 0.5 * (TcM.hhA + TcM.lhA);
inTbT.mLWa = 0.5 * (TcM.hlA + TcM.llA);
inTbT.Mna = inTbT.mHWa - inTbT.mLWa;
inTbT.MTLa = 0.5 * (inTbT.mHWa + inTbT.mLWa);

dTbT = table; % Tabella con le differenze per il metodo tide
by tide

dTbT.dDHQ = 0.5 * (TcM.dhhAB - TcM.dlhAB);
dTbT.dDLQ = 0.5 * (TcM.dhlAB - TcM.dllAB);
dTbT.dHWm = 0.5 * (TcM.dhhAB + TcM.dlhAB);
dTbT.dLWm = 0.5 * (TcM.dhlAB + TcM.dllAB);
dTbT.dMn = dTbT.dHWm - dTbT.dLWm;
dTbT.dMTL = 0.5 * (dTbT.dHWm + dTbT.dLWm);

ratio = table; % Tabella con i valori denominati "ratio", eq.
77, 78, 79 NOAA

ratio.Mn = inTbT.Mna / (inTbT.Mna - dTbT.dMn);

```

```

ratio.DHQ = inTbT.DHQa / (inTbT.DHQa - dBtT.dDHQ);
ratio.DLQ = inTbT.DLQa / (inTbT.DLQa - dBtT.dDLQ);

```

Dopo aver calcolato i vari fattori correttivi vengono calcolati i dati di marea:

```

TbT = NaN(1,width(TtMGR)); %Tabella con i risultati del
metodo
TbT =
array2table(TbT,'VariableNames',TtMGR.Properties.VariableName
s);

TbT.MTL = TtPDS.MTL + dBtT.dMTL;
TbT.Mn = TtPDS.Mn * ratio.Mn;
TbT.DHQ = TtPDS.DHQ * ratio.DHQ;
TbT.DLQ = TtPDS.DLQ * ratio.DLQ;
TbT.MLW = TbT.MTL - 0.5 * TbT.Mn;
TbT.MHW = TbT.MLW + TbT.Mn;
TbT.MLLW = TbT.MLW - TbT.DLQ;
TbT.MHHW = TbT.MHW + TbT.DHQ;

```

Successivamente per il metodo *tide by tide* è possibile andare a calcolare lo sfasamento del livello di marea tra le due stazioni andando a lavorare con i tempi e ricavando il tempo medio della propagazione della marea tra le due stazioni:

```

D = table;
D.thA = ThA.time;
D.tlA = TlA.time;
D.thB = ThB.time;
D.tlB = TlB.time;
% calcolo la differenza dell'istante di tempo di alta e bassa
marea
D.dth = D.thA - D.thB;
D.dtl = D.tlA - D.tlB;
% calcolo valore medio dei tempi
DM = mean(D);

```

7. Risultati

7.1 Risultati per la stazione di Punta della Salute

Di seguito sono stati riportati i dati di marea ricavati da definizione per la stazione di Punta della Salute relativi ai due intervalli temporali di 19 anni scelti. Tutti i valori successivamente riportati sono espressi in metri.

Datum di marea	1924-1942	2004-2022
MLLW	-0.327	-0.104
MLW	-0.210	0.028
MSL	0.092	0.315
MHW	0.393	0.604
MHHW	0.463	0.691
MTL	0.092	0.316
DTL	0.068	0.294
Mn	0.603	0.576
DHQ	0.070	0.087
DLQ	0.117	0.132
Gt	0.790	0.794

Tabella 7.1: datum di marea per la stazione di Punta della Salute nei due intervalli considerati.

Come è possibile vedere nella tabella 7.1 i *datum* di marea tra un periodo e l'altro sono aumentati di circa 20 centimetri ciascuno, tranne Gt, ovvero il *Great Diurnal Range*, evidenziando un aumento del livello del mare dallo zero idrometrico, ma che comunque la differenza tra i minimi e i massimi di marea è rimasta molto simile.

7.2 Risultati per la stazione di Porto Marghera

Nella tabella 7.2 vengono riportati i dati di marea della stazione di Porto Marghera utilizzata come controllo, dove è possibile vedere nella prima colonna i dati calcolati da definizione per un periodo di 19 anni, nella seconda utilizzando solo l'anno 1932 andando a stimare i dati di marea tramite il metodo standard e nella terza e quarta colonna è possibile vedere l'errore assoluto e relativo della stima dei dati di marea tramite il metodo standard applicato a questa stazione. Nelle altre tre colonne è possibile vedere i risultati del metodo *tide by tide* con i relativi errori assoluti e relativi. Nella tabella 7.3 invece vengono riportati i dati di marea di Porto Marghera nel periodo di tempo tra il 2004 e il 2022, usando l'anno 2010 come anno per l'applicazione dei metodi. Tutti i valori successivamente riportati sono espressi in metri.

	MGR19	Standard	abs St	relE St %	Tide by tide	abs TbT	rel TbT %
MLLW	-0.339	-0.351	0.012	3.480	-0.320	0.019	5.469
MLW	-0.219	-0.229	0.010	4.762	-0.204	0.015	6.736
MSL	0.105	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
MHW	0.429	0.421	0.008	1.900	0.431	0.002	0.464
MHHW	0.498	0.491	0.007	1.380	0.504	0.006	1.177
MTL	0.105	0.096	0.009	8.841	0.113	0.008	7.967
DTL	0.079	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Mn	0.647	0.650	0.002	0.351	0.635	0.013	1.969
DHQ	0.069	0.070	0.001	1.847	0.073	0.004	5.606
DLQ	0.120	0.122	0.001	1.145	0.116	0.004	3.162
Gt	0.837	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Tabella 7.2: Risultati dei metodi applicati per la stazione di Porto Marghera per il periodo 1924-1942 dove oltre ai dati di marea ricavati da definizione e con i due metodi è possibile vedere l'errore assoluto (abs St abd TbT) e l'errore relativo percentuale (relE St%, relE TbT%) della stima dei dati di marea con i due metodi. Nel metodo tide by tide è stata utilizzata la settimana dal 14 aprile 1932 al 21 aprile 1932.

Stazione	Alta Marea [h]	Bassa Marea [h]
Porto Marghera	00:20:50	00:29:35

Tabella 7.3: Tempi con cui l'onda di marea arriva alla stazione di Porto Marghera rispetto Punta della Salute per la settimana dal 14 aprile al 21 aprile 1932.

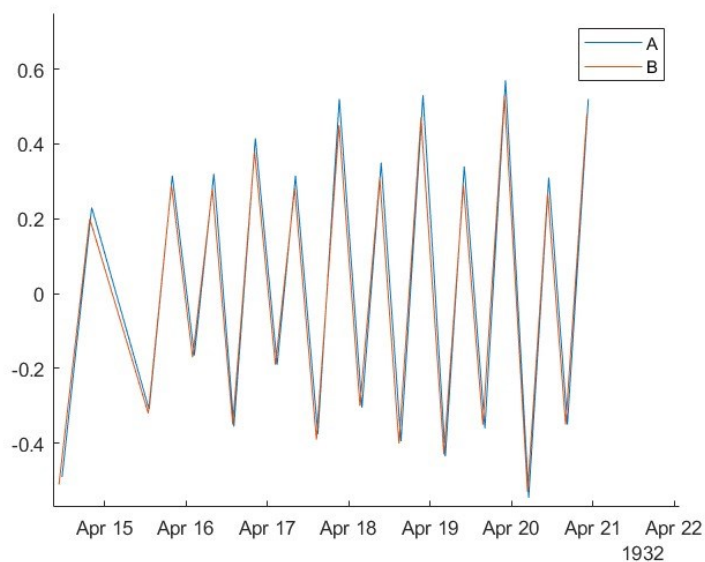


Figura 7.1: Confronto dei picchi di marea tra la stazione di Porto Marghera e la stazione di Punta della Salute per la settimana dal 14 aprile al 21 aprile 1932.

	MGR19	Standard	abs St	relE St %	Tide by tide	abs TbT	rel TbT %
MLLW	-0.126	-0.124	0.002	1.758	-0.121	0.006	4.410
MLW	0.013	0.015	0.002	14.238	0.021	0.008	62.019
MSL	0.309	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
MHW	0.606	0.612	0.006	0.927	0.627	0.021	3.487
MHHW	0.698	0.705	0.006	0.915	0.712	0.013	1.916
MTL	0.310	0.313	0.004	1.206	0.324	0.015	4.712
DTL	0.286	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Mn	0.593	0.597	0.004	0.636	0.606	0.013	2.208
DHQ	0.092	0.093	0.001	0.836	0.084	0.008	8.412
DLQ	0.139	0.139	0.000	0.270	0.142	0.002	1.768
Gt	0.825	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Tabella 7.4: Risultati dei metodi applicati per la stazione di Porto Marghera per il periodo 2004-2022 dove oltre ai dati di marea ricavati da definizione e con i due metodi è possibile vedere l'errore assoluto (abs St abd TbT) e l'errore relativo percentuale (relE St%, relE TbT%) della stima dei dati di marea con i due metodi. Nel metodo tide by tide è stata utilizzata la settimana dal 23 aprile 2010 al 30 aprile 2010.

Tutte le stazioni secondarie come detto nel capitolo 5 ormai non sono più attive, ma, utilizzando il metodo *tide by tide*, è stato comunque possibile ricavare la differenza di tempo con cui l'onda di marea arriva alla stazione di Porto Marghera rispetto alla stazione di Punta della Salute:

Stazione	Alta Marea [h]	Bassa Marea [h]
Porto Marghera	00:15:00	00:19:17

Tabella 7.5: Tempi con cui l'onda di marea arriva alla stazione di Porto Marghera rispetto Punta della Salute per la settimana dal 23 aprile al 30 aprile 2010.

Come detto nel capitolo 7.1 anche in questo caso è possibile notare una differenza di circa 20 centimetri tra nei vari datum di marea tra i due periodi scelti tranne per il caso di Gt.

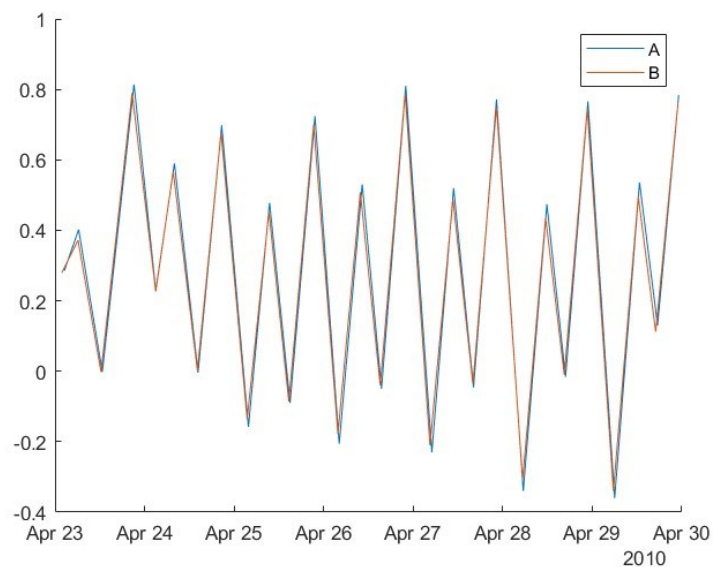


Figura 7.2: Confronto dei picchi di marea tra la stazione di Porto Marghera e la stazione di Punta della Salute per la settimana dal 23 aprile al 30 aprile 2010.

7.3 Risultati per lo *standard method* per il 1932

Di seguito vengono riportati in tabella 7.6 i risultati ottenuti con il metodo standard per le stazioni secondarie di Brondolo, Pagliaga, Diga Sud Lido, San Felice di Chioggia e Conche utilizzando i dati del 1932. Tutti i valori successivamente riportati sono espressi in metri.

Stazione	MLLW	MLW	MHW	MHHW	MTL	Mn	DHQ	DLQ
Brondolo	-0.220	-0.122	0.451	0.518	0.164	0.574	0.067	0.097
Conche	-0.113	-0.032	0.514	0.588	0.241	0.546	0.074	0.081
Diga Sud Lido	-0.352	-0.236	0.361	0.435	0.062	0.597	0.075	0.115
Pagliaga	-0.154	-0.070	0.441	0.507	0.185	0.511	0.066	0.083
San Felice di Chioggia	-0.277	-0.169	0.388	0.456	0.109	0.557	0.068	0.108

Tabella 7.6: Risultati ottenuti tramite *standard method* per le cinque stazioni secondarie per il 1932.

7.4 Risultati per il metodo *tide by tide* per il 1932

Si riportano in tabella 7.7 i risultati ottenuti con il metodo *tide by tide* per le stazioni secondarie di Brondolo, Pagliaga, Diga Sud Lido, San Felice di Chioggia e Conche utilizzando i dati del 1932. In questo il metodo utilizzato funziona solo per brevi lassi di tempo, quindi sono stati utilizzati solo sette giorni, dal 14 aprile 1932 al 21 aprile 1932 a titolo d'esempio. Tutti i valori successivamente riportati sono espressi in metri.

Stazione	MLLW	MLW	MHW	MHHW	MTL	Mn	DHQ	DLQ
Brondolo	-0.248	-0.147	0.414	0.493	0.134	0.561	0.079	0.101
Conche	-0.208	-0.131	0.428	0.509	0.148	0.559	0.082	0.077
Diga Sud Lido	-0.342	-0.224	0.356	0.432	0.066	0.580	0.076	0.118
Pagliaga	-0.132	-0.057	0.449	0.511	0.196	0.506	0.062	0.074
San Felice di Chioggia	-0.257	-0.146	0.388	0.465	0.121	0.534	0.077	0.112

Tabella 7.7: Risultati ottenuti tramite il metodo *tide by tide* per le cinque stazioni secondarie per il 1932.

Se si va a vedere la stazione di Diga Sud Lido si può vedere come il *datum* MLW risulti molto diverso rispetto a quello delle altre stazioni, questo per via della sua posizione esterna rispetto alla laguna.

Nel metodo *tide by tide* è stato calcolato anche il tempo che l'onda di marea impiega a raggiungere una determinata stazione rispetto la stazione di Punta della Salute:

Stazione	Alta Marea [h]	Bassa Marea [h]
Brondolo	-01:05:50	-00:28:20
Conche	01:10:00	01:18:45
Diga sud Lido	-00:50:50	-00:48:20
Pagliaga	01:10:50	01:17:30
San Felice di C.	-00:18:45	-00:27:55

Tabella 7.8: Tempi con cui la marea arriva rispetto alla stazione di Punta della Salute.

Come detto nel capitolo 6.4 per applicare il metodo *tide by tide* si è ricorsi ad un confronto grafico per vedere se i picchi di alta e bassa marea corrispondono. Successivamente vengono riportati i grafici di confronto per

le varie stazioni utilizzate, dove la stazione di Punta della Salute viene indicata con “B” e la stazione utilizzata viene indicata con “A”:

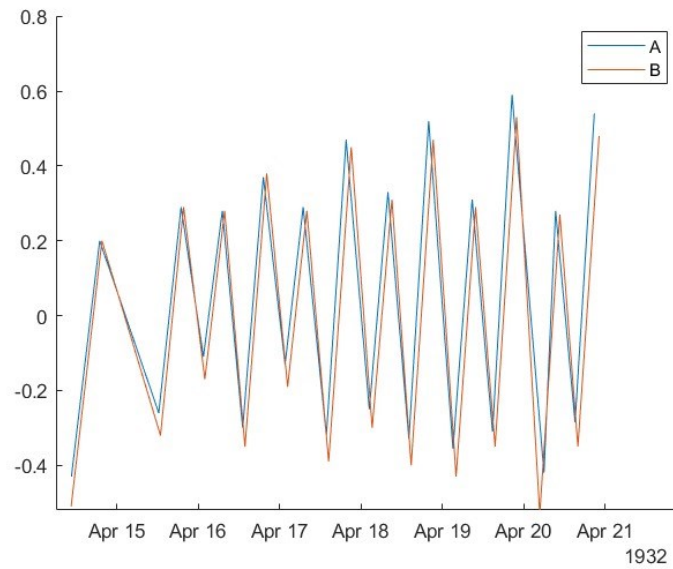


Figura 7.3: Confronto dei picchi di marea tra la stazione di Brondolo e la stazione di Punta della Salute.

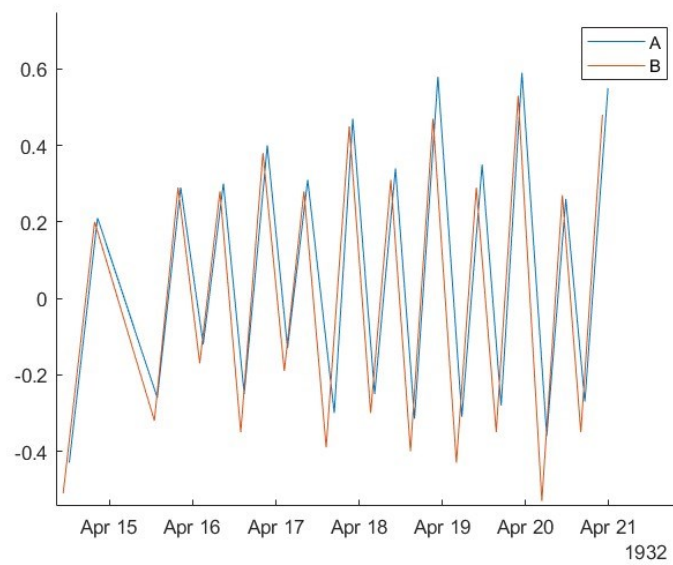


Figura 7.4: Confronto dei picchi di marea tra la stazione di Conche e la stazione di Punta della Salute.

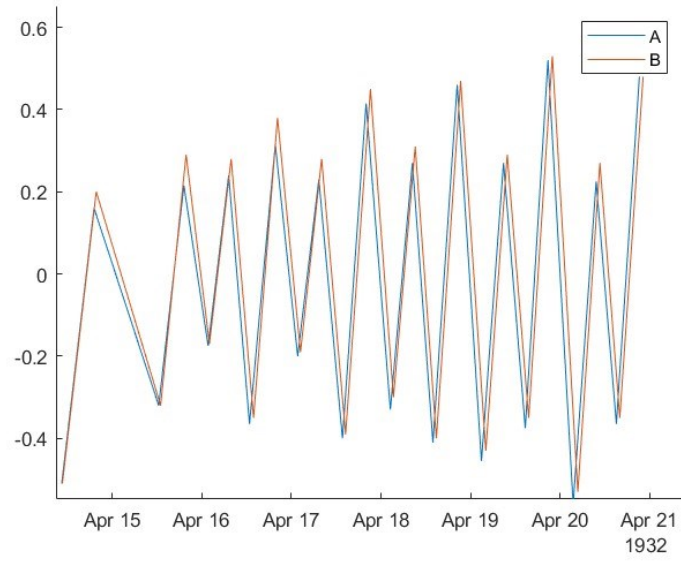


Figura 7.5: Confronto dei picchi di marea tra la stazione di Diga sud Lido e la stazione di Punta della Salute.

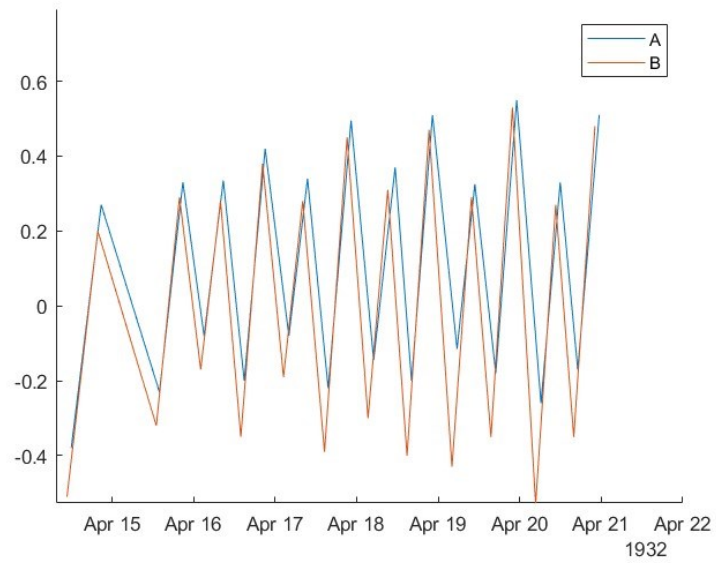


Figura 7.6: Confronto dei picchi di marea tra la stazione di Pagliaga e la stazione di Punta della Salute.

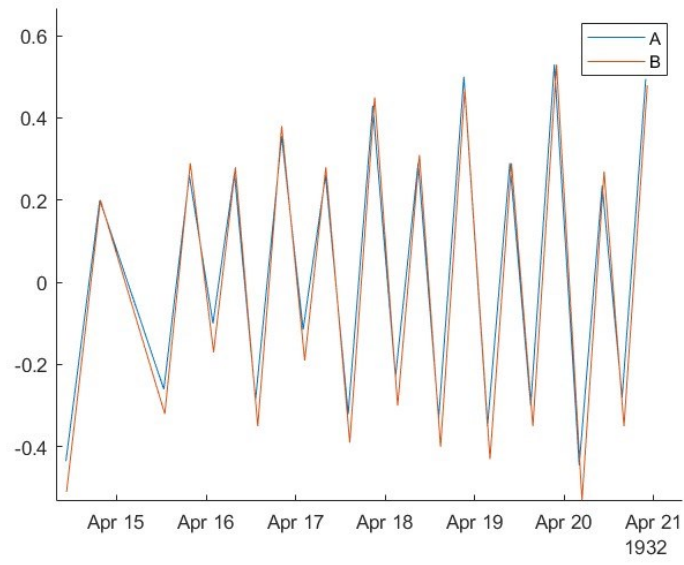


Figura 7.7: Confronto dei picchi di marea tra la stazione di San Felice di Chioggia e la stazione di Punta della Salute.

8. Conclusioni

Come è possibile vedere nei risultati i datum di marea ottenuti tramite i due metodi sono molto simili, indicando che entrambi metodi possono portare ad una corretta stima dei dati di marea. Detto questo però si vuol far notare che in alcuni casi la stima dei dati di marea può portare ad alcune differenze piuttosto significative, come nel caso della stazione di Conche nelle tabelle 7.5 e 7.6 dove il valore MLLW ha una differenza tra i due metodi di circa 10 centimetri, oppure sempre nelle stesse i valori di MTL, e MHW. Queste differenze si possono vedere solo nella stazione di Conche, andando ad indicare che molto probabilmente il motivo di queste differenze risiede all'interno dei dati scelti per il metodo *tide by tide*, dove è probabile che i valori medi di marea fossero più bassi rispetto alla media annuale. Questo evidenzia che i risultati del metodo *tide by tide* possono dipendere dal periodo scelto per l'analisi.

La stazione di Porto Marghera come già detto, viene utilizzata come controllo per valutare la differenza e gli errori commessi nell'utilizzare un metodo o l'altro. Come è possibile vedere nelle tabelle 7.2 e 7.4, gli errori restituiti dal metodo standard, riportati nelle colonne abs St e relE St%, sono molto bassi, quindi calcolare il datum dalla definizione su 19 anni e utilizzare i dati di un anno corretti con una stazione principale non comporta differenze sostanziali. Quanto detto per il metodo standard può valere anche per il metodo *tide by tide*, anche se nel caso dell'errore relativo percentuale del parametro MLW non sembra valere, ma l'errore di circa il 62% è solo una conseguenza del valore dell'errore assoluto molto vicino a zero, mentre tutti gli altri errori relativi restano sufficientemente bassi. In sostanza si ha che non cambia molto l'utilizzo di un metodo o l'altro nella stima dei dati di marea, anche se ci si sente di consigliare, se possibile, l'utilizzo di entrambi i metodi per avere un riscontro dei risultati.

Dalle tabelle 7.2 e 7.4 della stazione Porto Marghera e dalla tabella 7.1 per Punta della Salute se si va a guardare il dato MSL, che indica il livello medio del mare, è possibile vedere che il livello medio del mare rispetto allo zero idrometrico delle stazioni è aumentato di circa 20 centimetri dal 1932 al 2022 per la stazione di Porto Marghera, mentre per la stazione di Punta della salute si registra un innalzamento medio di circa 22 centimetri per lo stesso periodo. Questo innalzamento può essere sintomo sia dell'innalzamento del livello del mare, ma anche delle modifiche avvenute all'interno della laguna. Come riportato nel libro "Fatti e misfatti di idraulica lagunare" di Luigi D'Alpaos e come accennato nel capitolo 2, la costruzione dei canali navigabili all'interno della laguna hanno avuto come conseguenza quella di andare a rimodellare i processi idraulici all'interno della laguna, che da fortemente dissipativi per via della morfologia della laguna che andavano a ridurre il livello dell'onda di marea, si è passati a fenomeni dispersivi che vanno ad incrementare il livello dell'onda di marea. Oltre che nel livello medio del mare queste conseguenze è possibile vederle prima di tutto sui dati di marea MLLW, MLW, MHW e MHW che indicano i massimi e i minimi valori medi di marea. Infatti, osservando i risultati riportati in tabella 8.1 si possono vedere le differenze dei livelli di marea calcolati nei due periodi analizzati:

Stazione	$\Delta MLLW$	ΔMLW	$\Delta MHHW$	ΔMHW
Punta della Salute	0.223	0.182	0.228	0.211
Porto Marghera	0.213	0.206	0.2	0.177

Tabella 8.1: Differenze dei dati di mare tra il primo periodo e il secondo periodo. I valori riportati sono espressi in metri.

Queste differenze nel datum di marea indicano chiaramente che all'interno della laguna sono avvenuti o stanno ancora avvenendo dei cambiamenti che ne stanno modificando la sua capacità di smorzare le onde di marea. Guardando l'aumento dei valori MHHW e MHW, che indicano la media dei massimi valori di alta marea giornalieri e la media dei valori di alta marea, si può vedere che l'altezza media dell'alta marea sta aumentando e questo per la città di Venezia può significare un aumento degli allagamenti delle zone più basse della città.

Come ultima osservazione ci si vuole concentrare ai tempi ricavati con il metodo *tide by tide*. Come è possibile vedere nella tabella 7.8 la marea a seconda se si trovasse nella fase di alta o massa marea impiegava un certo tempo per propagarsi all'interno della laguna entrando dalle bocche di porto, dove i valori indicati con il segno meno sono i luoghi che vengono raggiunti prima dall'onda di marea rispetto alla stazione di Punta della Salute. Sfortunatamente la maggior parte delle stazioni secondarie utilizzate sono state dismesse, ma la stazione di Porto Marghera che è ancora attiva permette un confronto tra i due periodi temporali. Ciò che si può osservare se si vanno a confrontare i tempi presenti nella tabella 7.3 e quelli nella tabella 7.5 è che la marea entra nella laguna molto più velocemente rispetto ad un tempo. I motivi della riduzione dei tempi sono molteplici. Il primo e più importante è l'aver scavato i fondali della laguna per andare a creare dei canali artificiali che permettessero alle navi di maggiore stazza di navigare all'interno della laguna, raggiungendo Venezia in caso di navi turistiche o raggiungendo Porto Marghera per le grandi navi commerciali. Come riportato nel capitolo 2, lo scavo dei vari canali ha creato dei percorsi preferenziali per la marea che con il tempo ha portato alla distruzione della morfologia naturale della laguna che permetteva la riduzione dei colmi di marea.

Il secondo motivo è l'aver armato le bocche di porto, andandole ad approfondire per il passaggio del traffico navale, andando ad aumentare il volume di acqua e la velocità delle correnti in ingresso alla laguna.

La laguna di Venezia è un ambiente che nel corso dei secoli ha subito molti cambiamenti, passando da piccole opere ad opere estremamente invasive per il suo ambiente. Come conseguenza di queste opere e del cambiamento climatico che comporta un innalzamento del livello del mare, la laguna è in una condizione sempre più precaria e questo ambiente difficilmente tornerà indietro, quindi probabilmente l'uomo prima di progettare grandi opere a fini commerciali senza guardarsi dal valutare l'ambiente in cui si trova ogni tanto potrebbe aspettare e guardare prima di tutto l'ambiente in cui si trova e domandarsi le conseguenze di certe azioni.

Bibliografia

Computational techniques for tidal datum handbook. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2003.

Fatti e misfatti di idraulica lagunare. La laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere alle bocche di porto. Luigi D'Alpaos, 2010.

Manuale di mareografia e linee guida per i processi di validazione dei dati mareografici. Istituto Superiore per la Ricerca Ambientale (ISPRA), 2012.

Tidal datum and their applications. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2000.

Sitografia

Archivio annali: <http://www.bio.isprambiente.it/annalipdf/>

Immagine laguna: <https://www.mosevenezia.eu/ecosistema/>

Informazioni sulla marea: <https://www.venezia.isprambiente.it/la-marea#Astronomica>

Portale dati in tempo reale ISPRA: <https://www.venezia.isprambiente.it/meteo-mareographic-network>