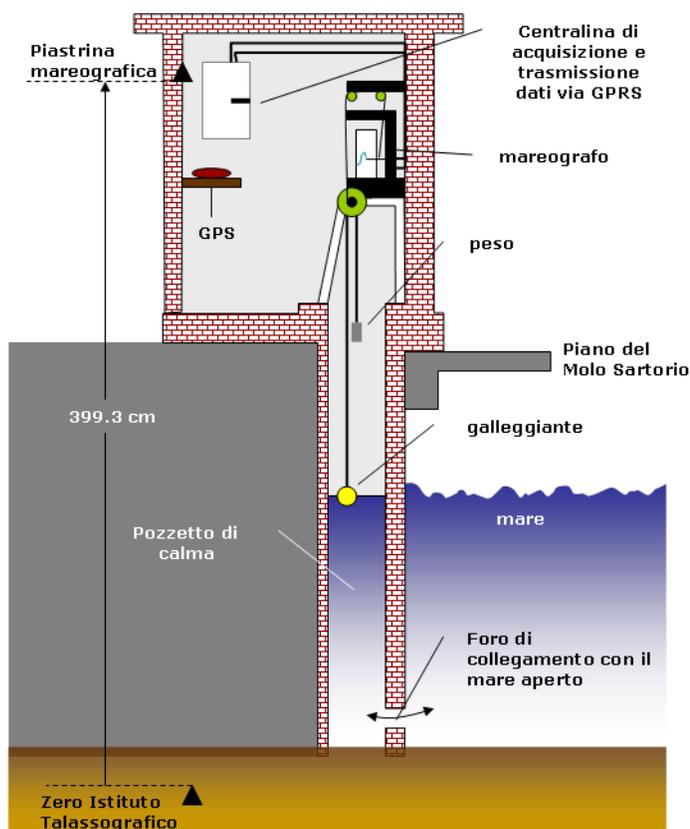


La stazione mareografica di Trieste

Sezione della cabina mareografica presso il Molo Sartorio



La stazione mareografica della U.O.S. di Trieste dell'Istituto di Scienze Marine del CNR, è situata in una cabina sul lato NE del Molo Sartorio, che dal 2004 è inclusa nella rinnovata sede dello Yacht Club Adriaco. Le coordinate geografiche sono: **latitudine 45° 38' 50.0" N, longitudine 13° 45' 33.9" E** (S. Zerbini, comunicazione privata, 2002).

La stazione è la più antica dell'Adriatico e le prime osservazioni mareografiche risalgono al 1859 a cura della Imperial Regia Accademia di Commercio e Nautica. Una rassegna storica di tale attività si trova in Ferraro (1972). Attualmente la stazione è dotata di quattro mareografi a galleggiante: due OTT digitali mod. Thalimedes, un OTT ed un PAGAN analogici. Uno dei due Thalimedes è attualmente collegato alla centrale operativa della Protezione Civile regionale del Friuli Venezia Giulia e trasmette i dati di livello del mare raccolti ogni 30 minuti. Il secondo Thalimedes è inserito nella rete meteomarina dell'ISMAR Trieste; vengono registrate le altezze puntuali del livello del mare rilevate ogni minuto, mentre la trasmissione dei dati via GPRS (General Packet Radio Service), con protocollo di trasmissione TCP/IP (Transmission Control Protocol e Internet Protocol), avviene ogni 5 minuti.

Le registrazioni analogiche su carta vengono invece raccolte a cadenza settimanale in occasione delle calibrazioni periodiche effettuate mediante un idrometro a contatto elettrico con fettuccia metrica. In questo modo sono misurate le altezze del livello rispetto alla piastrina mareografica, per un confronto simultaneo di queste ultime con quelle registrate dagli strumenti. La ridondanza dei sensori garantisce la continuità delle registrazioni anche in caso di malfunzionamenti meccanici e/o elettrici.

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 un foro, la cui sezione è pari ad $1/400$ della sezione orizzontale del pozzetto. Con questo accorgimento si ottiene la sufficiente attenuazione delle oscillazioni di alta frequenza causate dal moto ondoso, conservando quelle a più lungo periodo di rilevanza mareografica.

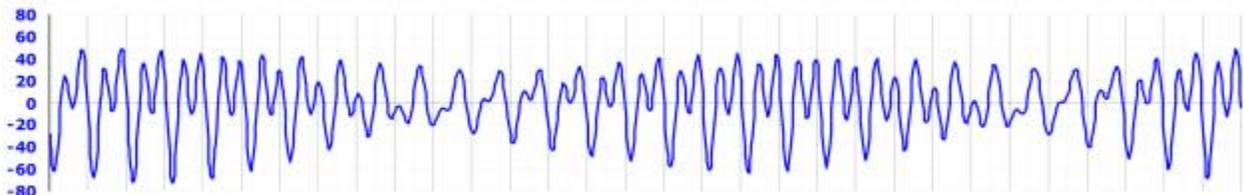


la cabina mareografica prima e dopo l'inglobamento nella nuova sede dello Yacht Club Adriaco avvenuta nel 2004

La marea astronomica



La **marea astronomica** è causata dall'**azione gravitazionale della Luna e del Sole sulla massa d'acqua**, e dipende dalla posizione della Terra rispetto ai due astri. Poiché il moto relativo di questi corpi celesti è conosciuto con grande precisione, anche **l'evoluzione della marea dovuta a tale interazione è deterministicamente prevedibile, a differenza, per esempio, delle previsioni meteorologiche**. Sulle coste dell'Adriatico Settentrionale la marea si presenta prevalentemente con due alte e due basse giornaliere (tipo semidiurno). **In coincidenza dei noviluni e pleniluni (sizigie) tale fenomeno è molto appariscente e si raggiungono le massime escursioni**. In vicinanza del primo e dell'ultimo quarto delle fasi lunari (quadrature) la marea si presenta con escursioni poco pronunciate, manifestando una sola alta ed una sola bassa nell'arco del giorno (tipo diurno).



A questo proposito è importante far notare che **al moto verticale del livello del mare è associato lo spostamento orizzontale della massa d'acqua con velocità proporzionale all'ampiezza di marea (flusso e riflusso)**. Tale spostamento interessa l'intero corpo d'acqua e pertanto, specialmente nelle zone costiere e di basso fondale come il Golfo di Trieste, viene continuamente garantito il ricambio dell'acqua. Tale ricambio, essendo legato alle velocità delle correnti di marea, raggiunge il massimo nei periodi di sizigie ed il minimo nei periodi di quadrature.

Livello residuo e livello osservato



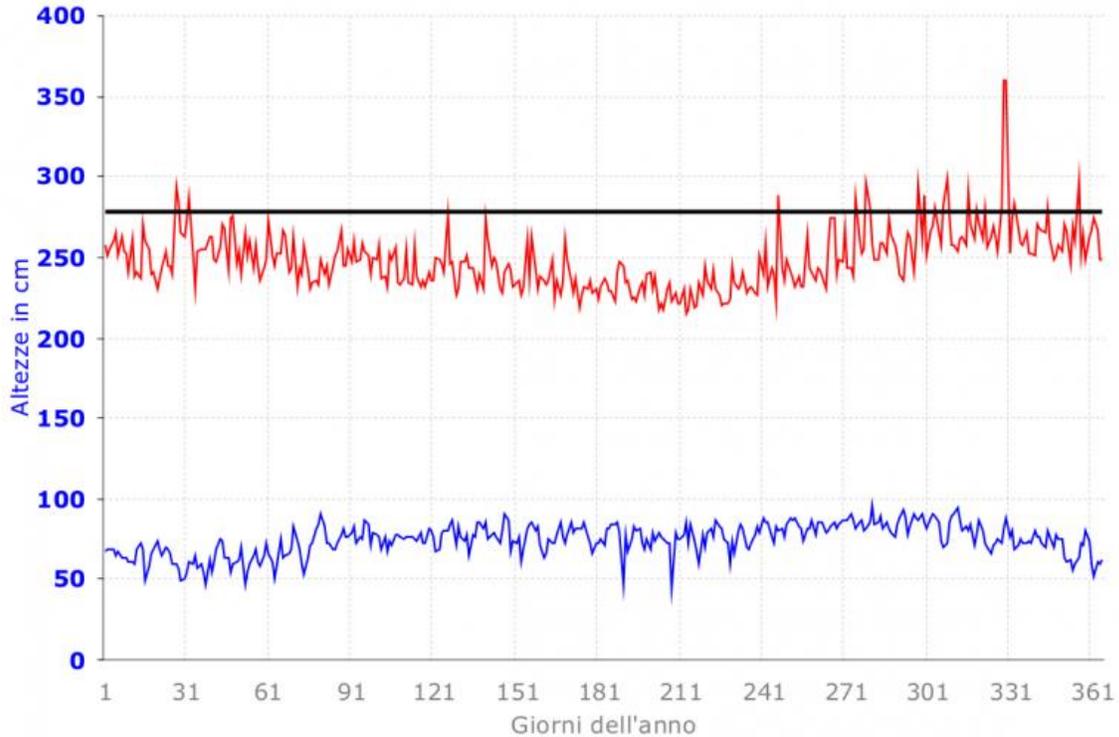
Il livello residuo (marea meteorologica) è dato dalla differenza fra il livello osservato e la marea astronomica. Le sue variazioni dipendono dal forzante meteorologico, principalmente il vento e la pressione atmosferica. A tale proposito il grafico proposto di seguito riporta tre curve di cui la centrale rappresenta il livello medio del mare, per ciascun giorno dell'anno, ottenuto a partire dai valori giornalieri del periodo 1939 - 2006 riferiti allo ZIT; le altre due (superiore ed inferiore) derivano da quella centrale rispettivamente sommando e sottraendo per ogni giorno la corrispondente deviazione standard. Le deviazioni della curva centrale dal livello medio annuo dipendono dall'azione esercitata localmente dal vento e della pressione atmosferica. Senza entrare in dettagli, (vedi Ferraro e Crisciani, 2001), un'alta pressione atmosferica determina l'abbassamento del livello e una bassa pressione atmosferica ne determina l'innalzamento; per quel che riguarda i venti, quelli continentali, nel Golfo di Trieste soprattutto la Bora, causano un abbassamento del livello marino ed un ritardo nella marea entrante. I venti meridionali, Scirocco e Libeccio, provocano accumulo d'acqua sotto costa e, conseguentemente, livello più alto.



Sempre con riferimento al grafico proposto, **è evidente il minimo di livello dei mesi invernali, legato alla prevalenza di pressione alta e vento continentale, ed un marcato massimo nel mese di novembre, corrispondente alla maggiore frequenza di venti meridionali e di bassa pressione atmosferica. Il picco autunnale è correlato al fenomeno dell'acqua alta che si manifesta prevalentemente in ottobre, novembre e dicembre.**

Nel grafico successivo sono messi in evidenza i valori estremi del livello del mare osservati nel periodo 1939-2006 per ogni giorno dell'anno.

L'altezza è sempre riferita allo ZIT. La linea nera in grassetto corrisponde all'altezza di 277.8 cm e rappresenta il piano del Molo Sartorio, cioè, con buona approssimazione, la quota oltre la quale si verificano le tracimazioni. Le curve rossa e blu rappresentano rispettivamente i massimi ed i minimi giornalieri assoluti. Tra i valori estremi osservati ricordiamo il massimo di 360 cm del 26 novembre 1969 (82 cm al di sopra del piano del Molo Sartorio) ed il minimo di 30 cm del 14 febbraio 1934 (248 cm al di sotto del piano del Molo Sartorio, non compreso nel grafico).



Di seguito sono elencati gli episodi di acqua alta con tracimazione. Da questo elenco sono escluse le tracimazioni dovute al solo moto ondoso causato dal vento di Libeccio. Ulteriori notizie sul livello residuo relativo al Golfo di Trieste sono reperibili in Ferraro e Crisciani (2001).

h [cm]	data	h [cm]	data	h [cm]	data	h [cm]	data
(290)	14 ottobre 1875	291	16 aprile 1936	289	3 novembre 1968	278	23 settembre 1984
(287)	23 febbraio 1879	279	28 novembre 1947	285	18 dicembre 1968	281	13 novembre 1985
(320)	25 febbraio 1879	286	29 novembre 1947	360	26 novembre 1969	289	1 febbraio 1986
284	12 marzo 1895	295	27 gennaio 1948	278	28 dicembre 1970	284	24 novembre 1987
313	27 novembre 1898	286	28 gennaio 1948	282	18 novembre 1975	290	2 ottobre 1993
317	15 novembre 1910	294	4 settembre 1948	279	17 febbraio 1979	284	6 maggio 1997
283	18 novembre 1910	302	12 novembre 1951	282	24 settembre 1979	284	31 ottobre 2004
291	13 novembre 1913	290	15 novembre 1959	302	22 dicembre 1979	279	28 maggio 2007
(285)	24 ottobre 1926	285	11 dicembre 1959	302	25 ottobre 1980	320	1 dicembre 2008
(291)	10 novembre 1927	278	5 novembre 1960	291	27 ottobre 1981	286	23 dicembre 2009
279	15 dicembre 1933	283	12 novembre 1961	308	6 ottobre 1982	283	25 dicembre 2009
289	18 novembre 1935	285	20 novembre 1965	283	7 ottobre 1982		
278	4 dicembre 1935	306	4 novembre 1966	279	20 maggio 1984		

N.B. i dati inseriti tra parentesi sono approssimati

Si ha notizia, dalle cronache, di almeno altre 5 tracimazioni avvenute tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo, ma di questi eventi non si dispone delle misure e quindi non si conosce la loro reale entità.

Le elenchiamo di seguito:

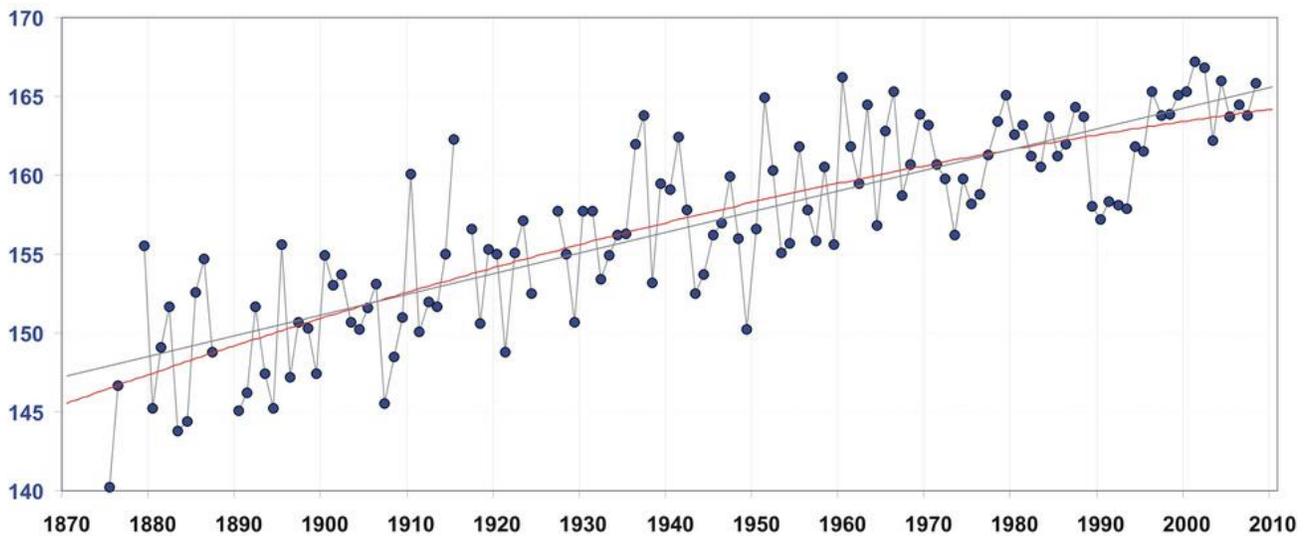
10 dicembre 1882

11 dicembre 1882

15 ottobre 1896

6 dicembre 1903 (2 tracimazioni, mattina e sera)

Livello del mare a Trieste dal 1875



Le scale di variabilità temporale del livello marino possono essere distinte in funzione dei fattori che le determinano. Le variazioni su scale temporali fino all'interannuale sono causate dalla meteorologia, soprattutto vento e pressione atmosferica. Dalla scala interannuale in su sono importanti inoltre le variazioni delle caratteristiche termoline dell'oceano.

I venti dominanti sull'Adriatico sono la Bora, trasversale al bacino, e lo Scirocco, che spira lungo il bacino. Lo Scirocco tende ad accumulare acqua verso l'estremità settentrionale del bacino. Nel Nord Adriatico la Bora favorisce l'abbassamento del livello sulla costa orientale e un aumento su quella occidentale. Il Libeccio favorisce l'aumento del livello nel Golfo di Trieste.

La pressione atmosferica agisce attraverso la relazione nota come "effetto barometrico inverso". Quando nel Nord Adriatico la pressione è relativamente bassa, viene risucchiata acqua da Sud, alzando il livello marino, e viceversa. La combinazione di Scirocco e bassa pressione atmosferica locale provoca l'"acqua alta", ossia il notevole aumento di livello del mare osservato sulla costa settentrionale.

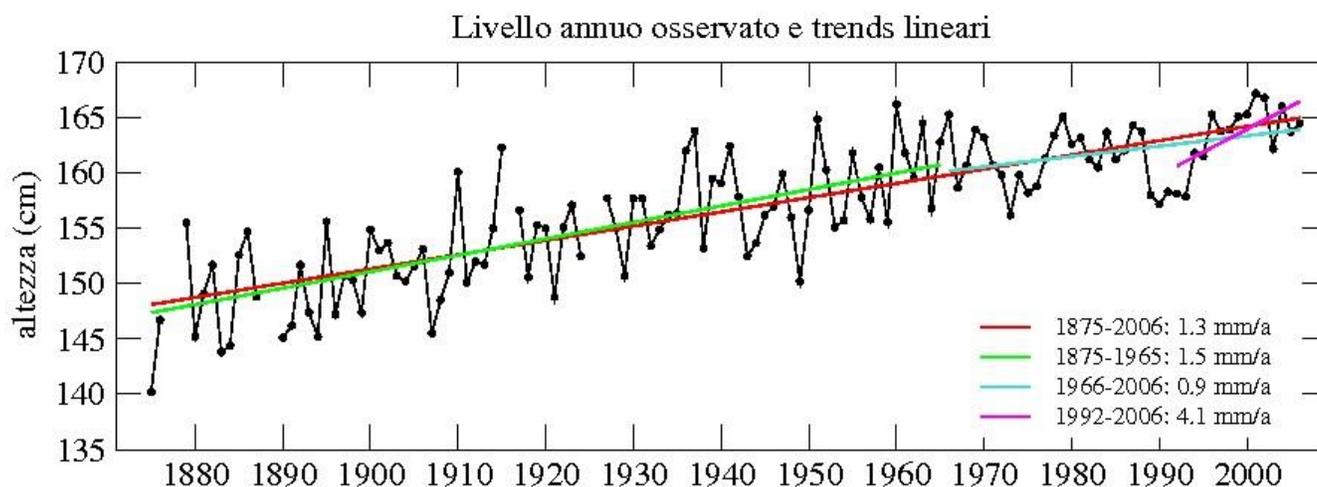
Le variazioni di **temperatura** e **salinità** comportano cambiamenti della densità dell'acqua, che si riflettono anche sul livello marino. Si tratta dell'"effetto sterico",

caratterizzato da un aumento del livello in occasione del riscaldamento dell'acqua e da una sua diminuzione in occasione di un aumento di salinità. Nel Golfo di Trieste la tendenza secolare dell'effetto sterico, circa -4 mm/secolo, è trascurabile rispetto a quella del livello osservato, dell'ordine di 100 mm/secolo.

Su scala globale, dopo il picco glaciale di circa 21000 anni fa, il livello è sempre mediamente aumentato, con velocità variabile. Tra 2000 e 100 anni fa l'aumento è stato inferiore a 2 cm per secolo. Misure di alta qualità presso stazioni considerate stabili concordano su tendenze tra **1.5 e 2.0 mm/anno nel XX secolo**, non considerando generalmente i movimenti verticali del suolo.

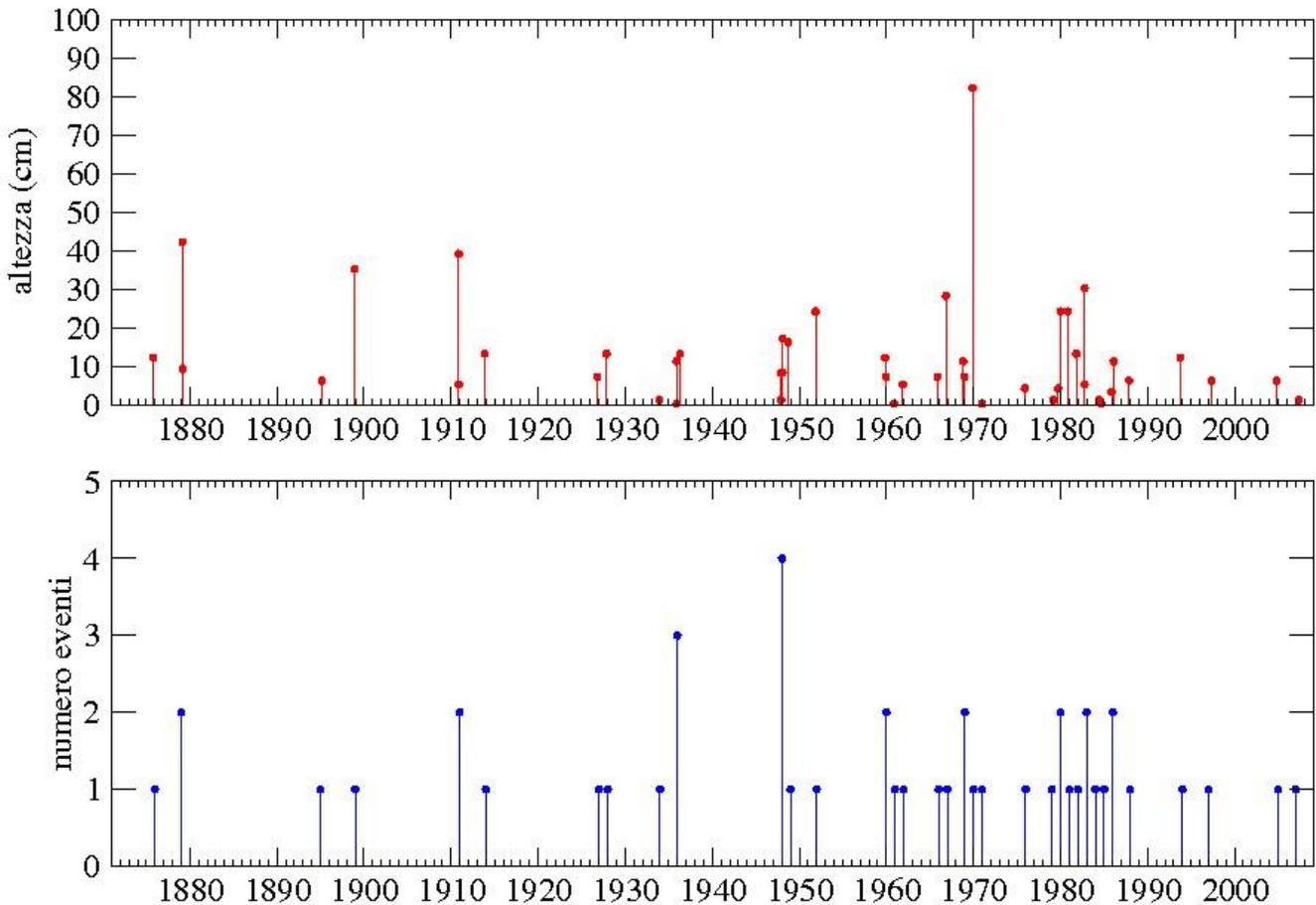
Nel Mediterraneo (escluso il Mar Nero) esistono solo cinque stazioni con almeno 80 anni di dati, cioè Trieste (inizio nel 1875), Genova (1884), Marsiglia (1885), Venezia (1872) e Marina di Ravenna (1896), le ultime due affette da marcata subsidenza di origine antropica.

Nel grafico sotto è illustrato l'andamento del livello medio annuo a Trieste dal 1875 insieme con le tendenze su vari periodi. Si noti la variabilità, e quindi la scarsa attendibilità, di queste ultime quando il periodo analizzato è breve. Il periodo dal 1992 è quello coperto dall'altimetria da satellite.



Nella figura seguente, invece, sono riportati gli eventi di tracimazione a Trieste dal 1875.

Tracimazioni - altezza sopra il piano del Molo Sartorio



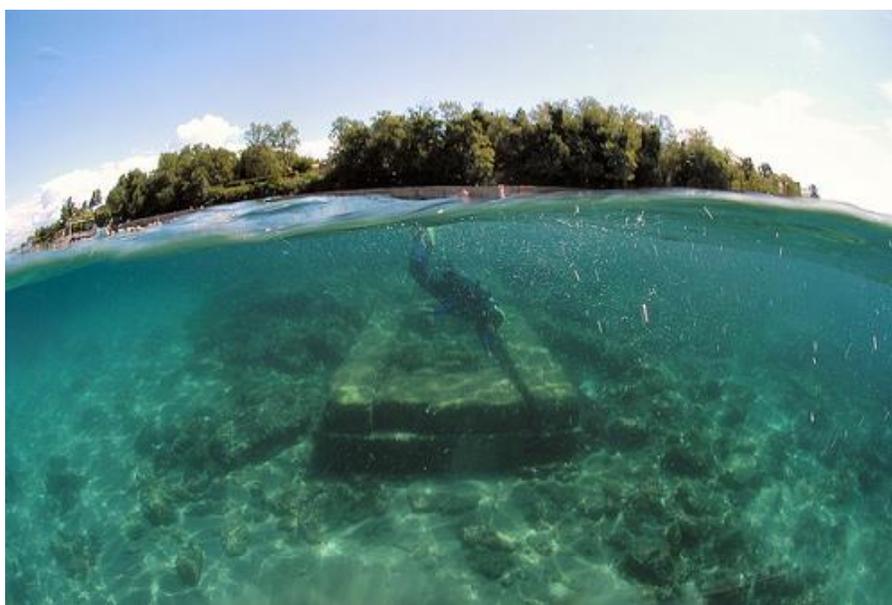
Secondo le proiezioni dell'IPCC per il XXI secolo il livello marino dovrebbe essere più alto di quello attuale (1980-1999) di circa 18 cm intorno al 2050 e 35 cm nel 2100. Nonostante ciò, analisi di osservazioni di Trieste e Venezia e simulazioni degli scenari futuri inducono a ritenere che la frequenza e l'intensità delle acque alte estreme non sia destinata ad aumentare rispetto al presente, per la contemporanea diminuzione della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici che le favoriscono.

Evoluzione del livello del mare a Trieste negli ultimi 2000 anni



Nel corso della storia della Terra, la superficie del mare ha più volte cambiato posizione, scendendo e risalendo rispetto ad oggi, scoprendo e ricoprendo vaste zone di costa. Lo studio di queste variazioni di livello del mare riveste un ruolo fondamentale in diversi settori delle scienze, dallo studio dei movimenti recenti del suolo alla caratterizzazione morfologica di un'area, dalla progettazione delle infrastrutture costiere alla ricostruzione del paesaggio antico. Esse sono il risultato della somma delle componenti eustatiche (dal geologo austriaco Suess), dovute all'alternanza delle fasi glaciali, isostatiche, legato all'equilibrio di carico dei ghiacci e tettoniche, legate ai movimenti della crosta terrestre. Mentre la prima dipende dal momento in cui viene misurata, l'isostasia e la tettonica variano a seconda della località. Le modalità e la velocità con cui si attuano queste variazioni si riflettono sulla dinamica di sedimentazione e sulle conseguenti successioni stratigrafiche. Anche se esistono molte teorie e ipotesi per spiegare queste modificazioni del livello del mare, esse sarebbero sostanzialmente riconducibili a due cause principali: una variazione del volume totale dell'acqua nei mari, o una variazione della capacità volumetrica dei bacini marini, e quindi una variazione della loro forma. L'unica teoria attualmente accertata è legata alle variazioni di volume dell'acqua contenuta nei ghiacciai, i quali, sciogliendosi, farebbero innalzare ed abbassare la superficie del mare, anche se non è escluso che possano avere agito contemporaneamente tutte e due o altre cause. La quantità d'acqua derivante dalla deglaciazione può essere calcolata mediante modelli matematici, che ricostruiscono dettagliatamente la componente eustatica e glacio-idro-isostatica in funzione delle diverse località. Il modello di risalita del mare attualmente più utilizzato in Italia è il modello di Lambeck, recentemente testato su numerosi siti lungo le coste adriatiche e

tirreniche. Secondo questo modello, l'innalzamento del livello marino a Trieste dall'epoca romana ad oggi varia da qualche centimetro a poche decine di centimetri. Anche nel Golfo di Trieste sono stati studiati, osservati e misurati numerosi indicatori degli antichi livelli del mare. Tali indicatori, sia quelli geomorfologici, come i solchi marini (*notch*), che quelli archeologici (moli romani, piscine, strutture portuali, ecc) hanno consentito di descrivere in dettaglio le variazioni della linea di riva dal I sec. d.C. ad oggi. Particolarmente interessante è la presenza di un solco marino sommerso, la cui profondità aumenta considerevolmente verso nord-ovest: tra Miramare e Duino sono state misurate le quote di 11 solchi sommersi: la loro profondità varia tra -0.65 m sugli olistoliti (i blocchi di calcare) di Miramare a -0.90 m a Canovella de' Zoppoli; nella zona tra Sistiana e Duino la loro profondità sale da -1.30 m, poco a nord della Baia di Sistiana, fino a -2.55 m sotto il castello di Duino. E' interessante che in corrispondenza dello stesso settore costiero è completamente assente il solco attuale. Purtroppo, nella stessa area non ci sono resti archeologici di strutture costiere, le quali sarebbero utili al confronto.



A parte la zona tra Sistiana e Duino, dove affiorano i calcari, in tutto il settore

orientale del Golfo, tra Trieste e Isola d'Istria, affiora il Flysch, costituito da un'alternanza di arenarie e marne. Si tratta di una litologia estremamente friabile, che non permette la conservazione dei solchi marini. In queste zone, i solchi sono delle forme effimere la cui evoluzione dura tutt'al più qualche decennio, per poi sottostare agli incipienti processi di arretramento della falesia costiera. Anche le piattaforme sommerse (shore platforms) di Punta Sottile e Punta Grossa, relitti di antiche posizioni del mare, per quanto testimoni inequivocabili e molto affascinanti di passati livelli del mare, non forniscono informazioni databili certe; a causa della regolarità dei blocchi di arenaria della piattaforma, sono state spesso erroneamente scambiate per un "lastricato romano". Accurati confronti con i vicini affioramenti di Flysch hanno risolto questo problema a favore della naturalità della struttura. Le informazioni relative alle variazioni di livello marino sono state, in questo caso, ricavate da 5 siti archeologici. I valori medi di profondità (corretti con la marea e la pressione) delle strutture archeologiche indicano che, duemila anni fa, il livello del mare si trovava ad una profondità di -1.6 ± 0.25 m (Epoca romana - I secolo dopo Cristo, datata con un'anfora alla base del molo), circa 60 cm più bassa della sommità delle strutture.

L'età delle strutture costiere può quindi essere dedotta dai reperti archeologici (anfore, vasellame ecc), mentre più complessa è la datazione del solco marino, essendo quest'ultimo sommerso. Recentemente sono stati eseguiti alcuni sondaggi in Istria, a poca distanza dai solchi, i quali hanno suggerito l'idea che la loro età di formazione è compresa tra cinquecento e mille anni fa.

Le profondità dei solchi marini hanno messo in evidenza una generale inclinazione (tilting) in direzione sudest-nordovest, confermato anche dai dati mareografici (oltre 110 anni). Recenti studi condotti dal Dipartimento di Scienze della Terra di Trieste (dott.ssa Carla Braitenberg), basati sul movimento del pendolo della Grotta Gigante negli ultimi 30 anni, sembrerebbero confermare che il tilting sia ancora attivo.

Dalla comparazione delle quote delle strutture archeologiche romane con i modelli matematici di sollevamento del livello del mare elaborate dall'australiano Lambeck e la profondità dei solchi sommersi, possiamo ipotizzare:

un movimento tettonico negativo (abbassamento della terraferma) post-romano nel Golfo di Trieste, il cui tasso, mediato nell'arco di 2000 anni, è di circa 0.55 mm/anno (quindi 1.1 m totali), ma sussistono forti indizi che si tratti della sommatoria di eventi co-sismici (prodotti dai terremoti) con periodi di stabilità

(come quello attuale) e momenti di abbassamenti co-sismici di grande entità (fino a 50 cm)

un *tilting* con direzione sudest-nordovest i cui tassi di abbassamento aumentano notevolmente tra Sistiana e Duino.