



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente



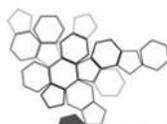
**L'INNALZAMENTO DEL
LIVELLO MEDIO DEL MARE
A VENEZIA:
EUSTATISMO E SUBSIDENZA**

RICERCA MARINA



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente

L'INNALZAMENTO DEL LIVELLO MEDIO DEL MARE A VENEZIA: EUSTATISMO E SUBSIDENZA

Informazioni legali

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e le persone che agiscono per suo conto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questa pubblicazione.

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma
www.isprambiente.gov.it

ISPRA, Quaderni - Ricerca Marina 10/2017
ISBN 978-88-448-0861-7

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica

ISPRA

Grafica di copertina: Franco Iozzoli

Foto di copertina: Paolo Orlandi

Coordinamento pubblicazione on line:

Daria Mazzella

ISPRA - Area Comunicazione

NOVEMBRE 2017

Da citare come:

Baldin G., Crosato F., (2017). L'innalzamento del livello medio del mare a Venezia: eustatismo e subsidenza. ISPRA, Quaderni - Ricerca Marina 10/2017, Roma.

Autori

Giorgio BALDIN (ISPRA - Centro Nazionale per la caratterizzazione ambientale e la protezione della fascia costiera, la climatologia marina e l'oceanografia operativa - Area Maree e Lagune)

Franco CROSATO (ISPRA - Centro Nazionale per la caratterizzazione ambientale e la protezione della fascia costiera, la climatologia marina e l'oceanografia operativa - Area Maree e Lagune)

Revisione

Marco CORDELLA (ISPRA - Dipartimento per la valutazione, i controlli e la sostenibilità ambientale - Area per la valutazione delle emissioni, la prevenzione dell'inquinamento atmosferico e dei cambiamenti climatici, la valutazione dei relativi impatti e per le misure di mitigazione e adattamento)

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Responsabile, Ing. Maurizio Ferla, per il sostegno ed il costante incoraggiamento nello sviluppo delle attività scientifiche in seno all'allora Servizio Laguna di Venezia, ora Area Maree e Lagune del Centro Nazionale per la caratterizzazione ambientale e la protezione della fascia costiera, la climatologia marina e l'oceanografia operativa di ISPRA.

INDICE

INTRODUZIONE	p. 1
1. Variazioni del livello medio mare a Venezia	p. 3
2. Eustatismo in Adriatico	p. 7
3. Subsidenza a Venezia da confronti mareografici	p. 9
4. Subsidenza a Venezia da analisi di recenti misure GPS	p. 11
5. Conclusioni	p. 15
BIBLIOGRAFIA	p. 17

INTRODUZIONE

La laguna veneta, i suoi centri urbani e praticamente tutto l'arco costiero alto Adriatico, sono caratterizzati da una scarsa elevazione del suolo rispetto al livello marino, con presenza di vaste aree soggiacenti allo stesso, bisognose di difese artificiali (argini, dighe, murazzi) e opere di bonifica (sollevamento rete acque basse, ecc.).

In questo contesto territoriale, il rischio inondazione-allagamento risulta elevato e direttamente proporzionale ai crescenti costi per il mantenimento delle opere di difesa, per il ripascimento degli arenili erosi e per il risanamento dai danni a strutture ed attività delle popolazioni residenti (es. *acque alte* a Venezia e nei centri lagunari minori). Questi rischi, provenienti da mare e da terra, ricorrono abitualmente in occasione di eventi meteorologici estremi e sono destinati a ripetersi con sempre maggiore frequenza per la somma degli effetti di eustatismo (innalzamento del livello del mare) e subsidenza (progressivo abbassamento del piano di campagna). Da un lato, le variazioni climatiche in corso a livello globale stanno producendo, tra gli altri effetti, un progressivo e continuo innalzamento del livello marino. Dall'altro, i più ampi movimenti crostali e la conformazione prevalente di suolo e sottosuolo del territorio sono tali da comportare localmente cedimenti di quota più o meno differenziati, in buona parte dovuti alla compattazione di strati sia superficiali che profondi, sia per cause naturali che antropiche (es. estrazione di gas e/o acqua).

Le tendenze di eustatismo e subsidenza che affliggono e coinvolgono in maniera diversa tutte le terre emerse sono particolarmente importanti nelle aree costiere caratterizzate da equilibri delicati tra terra e mare, in particolare se le aree sono soggiacenti al livello marino, o comunque a scarsa elevazione, ad alta densità di popolazione residente e/o elevata urbanizzazione, come tutto l'arco costiero Nord Adriatico, comprensivo delle sue lagune e del delta del Po.

In questa ottica, tutto il territorio in analisi deve essere considerato come un sistema unico ed integrato, come un sistema complesso che include lagune, litorali, fiumi e pianure collocate al di sotto del livello medio del mare e che quindi risulta esposto al duplice rischio di inondazione, sia da mare che da terra, sistema in cui il monitoraggio e lo studio degli effetti combinati di eustatismo e subsidenza giocano un ruolo fondamentale nella definizione del quadro di provvedimenti per la gestione e la sicurezza previsto dalla Direttiva Europea Alluvioni n. 2007/60/CE e dalla normativa italiana di recepimento (D.lgs. 49/2010 e s.m.i.).

Il presente rapporto propone un aggiornamento al dicembre 2016 della situazione dell'innalzamento del livello medio del mare a Venezia rispetto al piano di riferimento storico locale, enfatizzando le variazioni osservate nel corso dell'ultimo ventennio, suggerendone una separazione tra le componenti di eustatismo e subsidenza sulla base dei più aggiornati dati in possesso dell'odierno Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), già erede delle ormai secolari competenze e del patrimonio tecnico-scientifico dello storico Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia.

1. VARIAZIONI DEL LIVELLO MEDIO MARE A VENEZIA

Da ormai più di un secolo, Venezia e la sua laguna sono sottoposte ad un monitoraggio continuo sia dal punto di vista idraulico, che ambientale. È infatti dal 1872 che si registrano e archiviano misurazioni mareografiche relative ai livelli di marea rilevati nel centro storico veneziano [Dorigo, 1961]. Pur con il susseguirsi del passaggio delle competenze tra enti diversi nel corso degli anni, gli archivi mareografici sono arrivati intatti ai giorni nostri, costituendo un indubbio tesoro di conoscenza. Essi vengono attualmente alimentati in modo continuo e capillare mediante la raccolta di dati meteo-marini in più punti della Laguna di Venezia, della Laguna di Marano-Grado e dell'arco costiero alto Adriatico attraverso le stazioni della Rete Mareografica della Laguna di Venezia e dell'arco costiero Nord Adriatico (RMLV).

A Venezia l'andamento della marea è da sempre parte integrante del vissuto cittadino e della sua laguna. Fin dalla seconda metà del XIX secolo si è provveduto a monitorarne l'andamento sia nel breve che nel lungo periodo, rappresentando ad oggi una delle più lunghe e complete serie mareografiche del Mar Mediterraneo, assieme a Trieste, Genova e Marsiglia.

La stazione mareografica veneziana con la serie storica più completa e lunga (145 anni) è quella di Punta della Salute, la quale rappresenta al meglio la situazione mareografica del centro storico veneziano [Battistin e Canestrelli, 2006]. È proprio per la sua posizione e rilevanza che Punta della Salute risulta essere la stazione mareografica di tutta la RMLV che viene maggiormente e costantemente tenuta sotto stretta osservazione, sia mediante controlli incrociati con il Centro Previsioni e Segnalazioni Maree del Comune di Venezia (CPSM), titolare di un idrometro alloggiato all'interno della stessa cabina mareografica, sia mediante l'esecuzione di livellazioni di precisione periodiche della rete di capisaldi topografici che circondano l'*insula* dove è ubicata la stazione stessa. Inoltre, come per le restanti serie mareografiche registrate presso le stazioni della RMLV, i dati vengono sottoposti a rigorosi controlli di qualità in accordo con i requisiti della norma UNI EN ISO 9001:2008 nell'ambito del Sistema Gestione per la Qualità di ISPRA.

I valori medi annuali contenuti nella tabella 1, e rappresentati graficamente in figura 1, evidenziano il noto andamento crescente del livello medio del mare (di seguito l.m.m.) osservato a Venezia negli ultimi 145 anni [ISPRA, 2016]. Tutti i valori di marea sono riferiti al piano di riferimento veneziano, denominato Zero Mareografico di Punta della Salute (di seguito ZMPS), piano adottato come riferimento convenzionale per la misura dei livelli di marea in tutta la Laguna di Venezia, il quale rappresenta il livello medio del mare a Punta della Salute nel 1897 (calcolato mediando 25 anni di osservazioni, dal 1885 al 1909).

In figura 1, l'osservazione della media mobile evidenzia una crescita del l.m.m. a Venezia non sempre costante e uniforme nel tempo, bensì particolarmente marcata in alcuni periodi e nulla o quasi in altri (tasso di crescita per l'intero periodo 1872-2016: 2.51 mm/a).

Decadi \ Anni	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Media decennale (cm)
1870	-	-	0.3	-1.5	-9.2	-9.0	-1.2	0.5	-0.4	4.5	-2.0
1880	-5.9	-1.5	-5.4	-4.3	-7.8	0.0	0.1	-3.6	-0.8	-0.4	-3.0
1890	-2.3	-2.2	3.2	-1.0	-3.2	7.2	-1.2	2.2	0.7	-2.7	0.1
1900	4.9	3.1	3.5	0.8	2.1	3.3	3.1	0.8	-2.5	6.3	2.5
1910	11.4	4.3	1.3	-0.6	8.1	15.5	13.9	5.6	4.1	9.5	7.3
1920	7.0	-3.5	3.3	6.8	3.7	4.3	7.9	7.6	5.6	0.8	4.3
1930	8.3	10.0	4.7	8.4	9.6	10.1	14.5	17.7	6.3	12.7	10.2
1940	13.7	15.7	10.9	6.2	11.4	11.0	12.9	15.3	10.7	5.0	11.3
1950	11.5	21.7	16.3	12.5	14.6	18.9	15.2	14.0	18.8	15.8	15.9
1960	25.1	21.2	20.3	22.9	14.5	21.5	24.9	19.5	21.9	26.8	21.9
1970	24.4	23.0	21.4	18.1	20.7	18.9	19.5	21.2	22.7	25.4	21.5
1980	22.7	22.9	21.7	20.3	24.4	21.9	23.1	25.8	22.1	16.5	22.1
1990	16.8	19.1	18.4	18.9	22.7	22.5	27.6	24.4	24.3	25.6	22.0
2000	25.8	28.2	27.7	23.8	27.5	25.4	25.7	24.1	27.8	33.4	26.9
2010	40.5	29.5	29.5	36.5	40.0	31.6	33.0				34.4

Tabella 1. Valori medi annuali e decennali del livello medio mare elaborati per la stazione mareografica di Venezia - Punta della Salute rispetto allo ZMPS per il periodo 1872-2016.

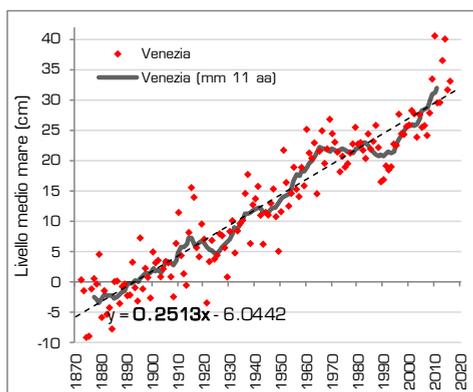


Figura 1. Andamento del l.m.m. annuale a Venezia - Punta della Salute, relativa media mobile (passo 11 anni) e retta di regressione lineare.

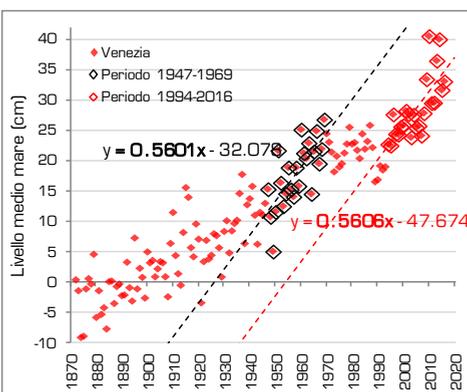


Figura 2. Andamento del l.m.m. annuale a Venezia - Punta della Salute e rette di regressione lineare per i periodi 1947-1969 e 1994-2016.

Si individuano infatti 3 fasi caratterizzate da relativa stabilità, o addirittura controtendenza (decrescita del l.m.m.) approssimativamente tra il 1915 e il 1925, tra il 1935 e il 1945, e tra il 1965 ed il 1995; tali periodi, già individuati in diversi studi [Marcos e Tsimplis, 2008; Carbognin et al. 2011; Gomis et al., 2012], risultano influenzati da particolari cicli di

forzanti meteorologiche relative a variazioni inter-decadali connesse alla dinamica delle celle di circolazione atmosferica, in particolare la North Atlantic Oscillation (NAO) e la Mediterranean Oscillation (MO).

Possono inoltre essere individuate alcune fasi caratterizzate da una forte pendenza, superiore a quella generale di lungo periodo: ad esempio, tra gli anni '30 e '60, in corrispondenza del periodo di intensa estrazione delle acque dal sottosuolo per gli usi industriali di Porto Marghera, con pendenza simile a quella registrata dopo i primi anni '90, già indicata da alcuni autori come superiore ai 5 mm/a [Gomis et al., 2012].

In figura 2 si è quindi messa a confronto la pendenza dell'andamento del l.m.m. registrata a Venezia nell'ultimo ventennio (orientativamente dal 1994 al 2016) con quella del periodo precedente di pari lunghezza (23 anni) con una pendenza simile (1947-1969).

L'anno iniziale (1994) dell'intervallo preso in esame è stato individuato sulla base dei periodi utilizzati da diversi autori in recenti pubblicazioni: in [Carbognin et al., 2011] si individua un periodo di "...steady decrease between 1971 and 1993"; in [Gomis et al., 2012] viene individuato il 1993 come inizio del periodo coperto da altimetria satellitare, di breve durata, ma utile ad illustrare la variabilità dei cambiamenti; in [Tsimplis e Baker, 2000; Marcos e Tsimplis, 2008; Gomis et al., 2012] viene indicato un "...period of stability between 1960-1993" relativamente all'andamento del l.m.m. nel bacino Mediterraneo.

Dall'analisi risulta che il tasso di crescita dei due periodi, 1947-1969 e 1994-2016, è praticamente sovrapponibile: rispettivamente 5.60 mm/a e 5.61 mm/a, ad indicare che nell'ultimo ventennio la velocità di innalzamento del l.m.m. relativo a Venezia è tornata nuovamente ad assumere valori preoccupanti.

E' importante sottolineare che gli ultimi 8 anni (2009-2016) hanno fatto registrare i valori massimi di l.m.m. di tutta la serie storica, con due anni particolarmente rilevanti: il 2014 con 40.0 cm ed il 2010 con 40.5 cm sullo ZMPS [Cordella e Crosato, 2012].

È utile evidenziare che per Venezia e per gli altri centri abitati maggiori della laguna veneta (Chioggia e Burano su tutti), il trend in aumento del l.m.m. rappresenta un'enorme fonte di problemi e disagi dovuti principalmente alla esigua elevazione del piano di calpestio urbano rispetto al livello marino. A Venezia, basta un evento di marea con un picco massimo di +80 cm sullo ZMPS per allagare Piazza San Marco, cioè il punto più basso della Città. Con valori massimi intorno ai +110 cm si verifica un allagamento di circa il 12% dell'intera superficie cittadina, ma bastano +130 cm per arrivare ad allagarne quasi il 70%.

Nelle figure 3 e 4 vengono mostrati i casi di picchi di marea per due classi di altezza per singolo anno, rilevati presso Punta della Salute, rispettivamente per classi di altezza 80-109 cm (*acque medio-alte*) e maggiore/uguale a +110 cm (*acque alte*). L'andamento di queste due classi di altezza di marea consente di monitorare l'aumento della frequenza delle *acque medio-alte* e *alte*, utile a rappresentare la severità del problema legato agli allagamenti del centro storico veneziano.

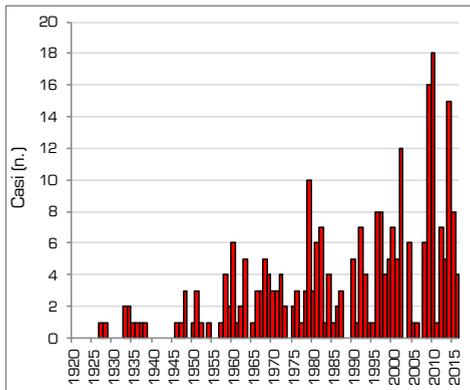
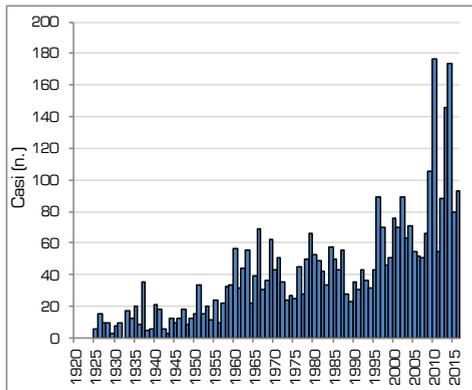


Figura 3. Venezia - Punta della Salute: numero di casi con massimi valori di marea tra 80 e 109 cm sullo ZMPS. **Figura 4.** Venezia - Punta della Salute: numero di casi con massimi valori di marea ≥ 110 cm sullo ZMPS.

Risulta evidente l'aumento della frequenza di tutte e due le classi di altezza. In particolare, nel 2010 si registra il record assoluto per entrambe le classi, in concomitanza con il raggiungimento del l.m.m. annuale record di 40.5 cm sullo ZMPS. L'aumento del l.m.m. annuale e l'aumento della frequenza dei casi di superamento delle soglie sono due fenomeni strettamente collegati [ISPRA, 2016].

Da ricordare che la crescita della frequenza delle *acque medio-alte e alte*, oltre ad avere effetti diretti sulla vita quotidiana nel centro storico veneziano, è causa anche di impatti ambientali rilevanti come la più intensa erosione dei litorali e delle barene interne alla laguna, la perdita di habitat naturali, nonché la risalita del cuneo salino, in grado questo di alterare il chimismo delle acque interstiziali delle argille superficiali, acutizzando il problema della subsidenza per collasso degli stati argillosi stessi [Carbognin e Tosi, 2003]. L'andamento della frequenza di tutte e due le classi di altezza risulta in netta crescita, in particolare dalla metà degli anni '90, acutizzandosi oltremodo negli ultimi 8 anni.

2. EUSTATISMO IN ADRIATICO

Com'è noto, a livello globale si sta assistendo ad un rapido aumento in atmosfera delle concentrazioni di gas ad effetto serra. In particolare, dal 1750 ad oggi le concentrazioni di CO₂, CH₄ e N₂O (i principali gas serra) sono aumentate rispettivamente di circa il 40%, 150% e 20%, raggiungendo i valori record degli ultimi 800.000 anni [IPCC, 2014].

L'effetto diretto dell'aumento delle concentrazioni di questi gas è rappresentato dal riscaldamento dell'atmosfera e dal conseguente innalzamento del livello del mare (eustatismo) dovuto da una parte alla dilatazione termica degli oceani per effetto dell'aumento della temperatura delle acque che li compongono, e dall'altra all'apporto di nuova massa liquida derivante dalla fusione delle calotte glaciali continentali (Groenlandia e Antartide su tutte).

Per provare a stimare gli effetti dell'eustatismo sul l.m.m. in Mediterraneo, si è deciso di analizzare le due serie mareografiche più complete e lunghe del bacino dopo Venezia, ovvero Trieste e Genova. Le due stazioni risultano confrontabili (figura 5), e quindi utili al nostro scopo, in quanto situate entrambe su di una piattaforma rocciosa che le rende esenti da quei fenomeni di costipamento naturale tipici degli strati argillosi e sabbiosi del sottosuolo delle lagune e delle pianure costiere alto Adriatiche. Inoltre, per esigenze legate alla confrontabilità, i valori di Trieste e Genova sono stati riferiti allo stesso piano di riferimento utilizzato per Venezia e cioè lo ZMPS.

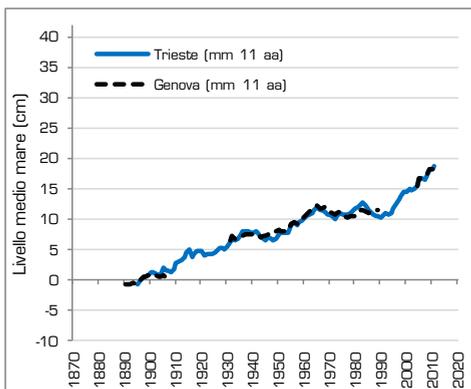


Figura 5. Andamento del l.m.m. (in media mobile a 11 anni) presso due stazioni del Mediterraneo con serie ultracentenaria (Trieste e Genova).

Fonte: elaborazioni ISPRA su dati CNR-ISMAR e PSMSL.

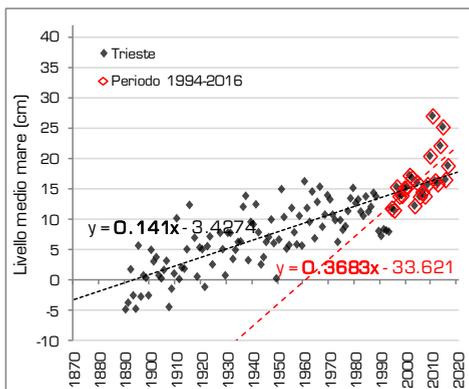


Figura 6. Andamento del l.m.m. annuale a Trieste - Molo Sartorio e rette di regressione lineare relative ai periodi 1890-2016 e 1994-2016.

Fonte: elaborazioni ISPRA su dati CNR-ISMAR.

Come risulta intuitivo in figura 5, ad eccezione di qualche fisiologico minimo scostamento, gli andamenti del l.m.m. di Trieste e Genova (media mobile con passo 11 anni) sono pressoché sovrapponibili e con caratteristiche abbastanza simili a quelle emerse per Venezia.

Inoltre, i trend di crescita del l.m.m. delle due serie si mostrano in linea con i valori a scala globale presentati dall'IPCC nell'ultimo rapporto pubblicato (AR5) [IPCC, 2014]. Si giunge quindi alla conclusione che le due serie mareografiche possano rappresentare entrambe una ragionevole e buona approssimazione dell'espressione del fenomeno dell'eustatismo in Mediterraneo e, di conseguenza, in Adriatico.

Vista la vicinanza al nostro territorio in analisi, si è scelto di porre l'attenzione sul trend di crescita del l.m.m. registrato presso la stazione di Trieste - Molo Sartorio in quanto il l.m.m. dei due siti nel breve e medio periodo è sottoposto alle medesime influenze meteo-climatiche.

In figura 6 sono stati quindi riportati i valori annuali del l.m.m. osservati nel capoluogo giuliano e si è posta l'attenzione sull'impennata riscontrata nel trend di crescita del l.m.m. dell'ultimo periodo che, per analogia e successivi confronti, è stato individuato tra il 1994 ed il 2016, periodo uguale a quello utilizzato nel precedente capitolo per le valutazioni relative a Venezia. A fronte di un trend di lungo periodo (1890-2016) pari a 1.4 mm/a, nel 1994-2016 si registra un valore di crescita del l.m.m. più che doppio, pari a 3.68 mm/a.

3. SUBSIDENZA A VENEZIA DA CONFRONTI MAREOGRAFICI

Per separare gli effetti dovuti all'innalzamento generale del livello del mare (eustatismo) da quelli della subsidenza propri dell'area veneziana, si è proceduto al confronto tra i dati di l.m.m. calcolati per Venezia - Punta della Salute e quelli relativi alle osservazioni raccolte, a partire dal 1890, presso la stazione di Trieste - Molo Sartorio, gestita oggi dal CNR-ISMAR di Trieste (figura 7).

Fino alla metà degli anni '20 le due curve (medie mobili a 11 anni) erano pressoché coincidenti. Dalla fine degli anni '20 fino alla fine degli anni '60 le due curve evidenziano una netta separazione, corrispondente ad una apparente crescita del l.m.m. a Venezia rispetto a Trieste, non riscontrabile nel periodo precedente e nel ventennio successivo.

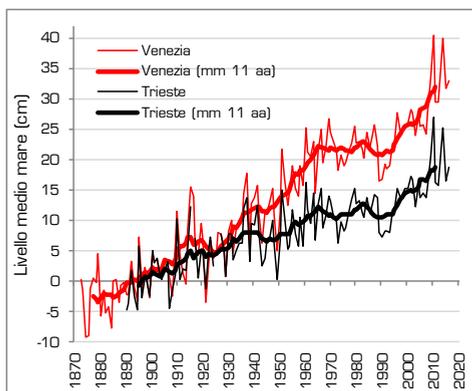


Figura 7. Confronto tra l'andamento del l.m.m. annuale registrato in alto Adriatico (Venezia e Trieste) e relative medie mobili a 11 anni.

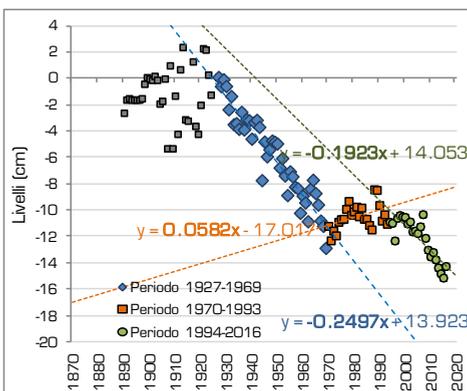


Figura 8. Differenza tra l.m.m. annuale di Trieste e Venezia (1890-2016) e rette di regressione di tre distinti periodi (1927-'69, 1970-'93 e 1994-2016).

Per rendere più semplice la lettura, si è posto in grafico l'andamento della differenza tra il l.m.m. di Trieste e quello di Venezia in modo da rendere esplicito il tasso di subsidenza di Venezia verificatosi nel corso del periodo esaminato (figura 8). Come risulta chiaro, la consistente crescita relativa del l.m.m. di Venezia nel quarantennio centrale del secolo (tra gli anni '30 e '60) è esplicitazione della subsidenza, generalmente attribuita quasi esclusivamente all'azione antropica, causata dalla massiccia estrazione di acqua dalle falde sotterranee nell'entroterra lagunare per le esigenze industriali di Porto Marghera (trend di subsidenza di -2.50 mm/a nel periodo 1927-1969). L'effetto della riduzione degli emungimenti idrici sotterranei, passati da 500 l/s a 200 l/s [Serandrei Barbero, 1972; Carbognin et al., 1974], avvenuta nel corso di un quinquennio a cavallo del 1970, si riflette positivamente sull'andamento del l.m.m. del ventennio

successivo, con una sostanziale stabilità del trend di subsidenza, se non in leggera controtendenza (+0.58 mm/a nel periodo 1970-1993). A partire dalla metà degli anni '90, le registrazioni mareografiche tornano a mostrare un brusco aumento del l.m.m. sia a Venezia che a Trieste, nuovamente in maniera differenziata. Infatti, analizzando l'ultimo periodo 1994-2016 si calcola una perdita di quota di Venezia di -1.92 mm/a.

4. SUBSIDENZA A VENEZIA DA ANALISI DI RECENTI MISURE GPS

Dall'applicazione del metodo di confronto mareografico tra Venezia e Trieste riportata nel precedente capitolo, risulterebbe dunque un trend "attuale" (dal 1994 al 2016) della subsidenza di Venezia centro storico (mareografo di Punta della Salute) pari a -1.92 mm/a, e tale valore risulta essere il più alto attribuito al fenomeno successivamente agli anni '60.

Il quadro delle conoscenze in merito alla subsidenza dell'area veneziana, progressivamente aggiornato col passare degli anni, così come emerge dalle numerose pubblicazioni scientifiche proposte successivamente al 1970, conduce in sintesi a valori del tasso di subsidenza che, in funzione dell'anno di pubblicazione e dell'estensione del periodo considerato, oscillano dalla "sostanziale stabilità" fino a valori prossimi a -1.6 mm/a. Successivamente, l'arresto delle estrazioni di acque sotterranee per l'industria di Porto Marghera ha portato alla registrazione di dati che hanno confermato "una sostanziale stabilità" del fenomeno, valutando ragionevolmente tassi di subsidenza inizialmente pari a 0 mm/a [Tosi et al., 2002; Teatini et al., 2007], e successivamente con valori sempre crescenti, anche se comunque inferiori a 1 mm/a [Tosi et al., 2010; Teatini et al., 2012; Strozzi et al., 2013].

Già nel 2012 però alcuni autori [Bock et al. 2012] cominciavano ad indicare per Venezia tassi di subsidenza compresi tra -1 e -2 mm/a, provocando spunti polemici all'interno del mondo scientifico e più o meno giustificati allarmismi sugli organi di stampa locali e nazionali. La più recente bibliografia che abbia iniziato a rilevare la ripresa del trend di subsidenza del suolo veneziano al termine del periodo di "sostanziale stabilità", così definito da numerosi autori per valori di trend inferiori a 1 mm/a, risale quindi agli anni 2012-2013 e proponeva ancora nel 2016 un valore medio intorno a -1 mm/a o -0.8 mm/a, basandosi per lo più su applicazioni delle più recenti tecniche di rilievo radar-satellitari (SAR).

Da oltre un decennio infatti, l'attenzione del mondo scientifico relativamente ai movimenti del suolo è stata attratta dalle più recenti tecniche radar-satellitari che, rispetto al puntuale rilievo basato sul GPS, consentono la valutazione del movimento reciproco di un enorme numero di punti all'interno dell'area indagata, consentendo di passare dall'informazione puntuale alla distribuzione areale della stessa. Tali recenti tecniche richiedono però una calibrazione/taratura puntuale, basata su informazioni certe di uno o più punti interni all'area, tipicamente punti attrezzati o comunque collegati con stazioni permanenti GPS.

E' proprio intorno ai primi anni successivi al 2010, forse per problemi inerenti alle crescenti difficoltà dei finanziamenti o forse a causa della diffusa convinzione del perdurare del periodo di "sostanziale stabilità" instauratosi dopo il '70, in concomitanza con la riduzione di estrazione dai pozzi di Marghera, che si è verificato l'abbandono e l'interruzione pressoché completa dei rilievi con tecnica GPS presso le numerose stazioni

permanenti sorte nei 10-15 anni precedenti, riducendo e limitando così il contributo puntuale di taratura delle applicazioni radar-satellitari.

A tale riguardo, alla presenza cioè sul territorio di stazioni permanenti GPS in ambito veneziano e lagunare, si deve purtroppo prendere atto che a fronte di quasi una ventina di stazioni installate a partire dai primi anni '90 da Enti, Istituti di ricerca ed Amministrazioni Locali, attualmente ne risultano attive e divulgate pubblicamente solo 4 (VEN1 dal 2008, VENI divulgata su web solo dal 2016, CGIA dal 2011 e PSAL, divulgata sul web dal 2015). La maggior parte delle stazioni installate ha smesso di funzionare intorno al 2011, con una vita media inferiore al decennio, disegnando un quadro poco confortante in merito all'interesse ed al contributo scientifico dei risultati ottenibili con l'applicazione delle tecniche GPS alle stazioni permanenti (Continuous Global Position System, in seguito CGPS).

Una recente ricerca, svolta presso Istituzioni locali che operano tutt'oggi nel comprensorio lagunare, ha consentito di individuare un certo numero di installazioni CGPS, operative da oltre una decina di anni, la cui esistenza non era stata sufficientemente pubblicizzata ed i cui dati non erano mai stati resi pubblici e divulgati.

Tali stazioni permanenti, afferenti ai due enti "Centro Previsione e Segnalazione Maree" (CPSM, organo tecnico operativo del Comune di Venezia) e "Servizio Laguna di Venezia" di ISPRA, costituivano con i loro archivi di registrazioni satellitari non divulgate un prezioso e non utilizzato compendio di informazioni sul fenomeno della subsidenza cittadina e lagunare.

Si è quindi proceduto nel corso del 2016 ad avviare una analisi in post-processing dei dati satellitari relativi a n. 7 stazioni CGPS dislocate lungo il perimetro ed all'interno del bacino lagunare per il periodo da giugno 2010 a dicembre 2015 (circa 5.5 anni). Nel rapporto conclusivo [Baldin, 2017], attraverso l'elaborazione dei dati GPS relativi in particolare a 4 stazioni ubicate all'interno del centro storico (figura 9), si è valutato che una attuale stima del trend di subsidenza attribuibile al centro storico di Venezia, per il periodo 2010-2015, possa essere prossima a -1.5 mm/a.

Per completezza di informazione, vengono qui di seguito riportate le stazioni permanenti GPS ubicate in Venezia utilizzate per la stima del trend di subsidenza nel periodo 2010-2015:

- PSA2 = Punta della Salute, lato Canal Grande; strumentazione TRIMBLE TRM 29659.00 CHOKE RING; IERS Dome Number: NONE; registrazione dati a cura del CPSM, senza divulgazione automatica (web);
- PCAV = Palazzo Cavalli; strumentazione TRIMBLE TRM29659.00 CHOKE RING; IERS Dome Number: NONE; registrazione dati a cura del CPSM, senza divulgazione automatica (web);
- PSAL = Punta della Salute, lato Canale della Giudecca; strumentazione LEICA GRX1200PRO + LEIAT504; IERS Dome Number: 19513MOO2; registrazione dati ISPRA, divulgazione tramite web: Rete GPS Regione del Veneto (<http://147.162.229.63/Web/index.php>);

- VEN1 = Riva degli Schiavoni; strumentazione LEICA GRX1200GGPRO + LEIAT504GG; IERS Dome Number: 19513MOO1; registrazione dati CNR-ISMAR, divulgazione tramite web: EUREF Permanent GNSS Network (http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationlist.php).

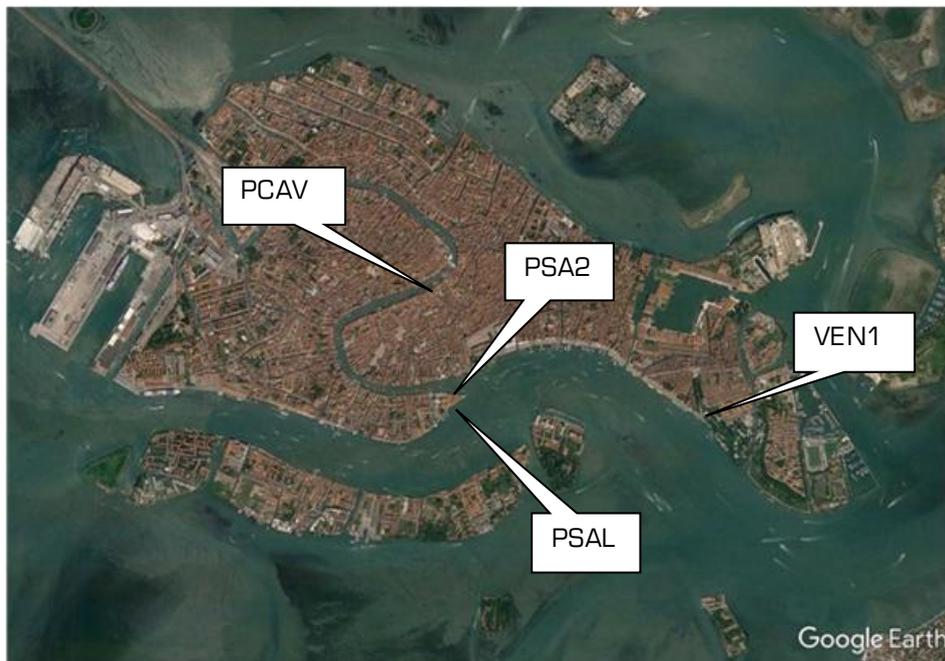


Figura 9. Stazioni permanenti GPS utilizzate per la stima del trend di subsidenza nel periodo 2010-2015. Fonte: elaborazioni ISPRA su immagine GoogleEarth.

I valori del trend di subsidenza calcolati per le 4 stazioni ubicate nel centro storico veneziano (PCAV, PSAL, PSA2 e VEN1) nel periodo 2010-2015 oscillano tutti tra -1.33 e -1.56 mm/a, con valore medio di -1.45 mm/a; l'omogeneità dei risultati e la distribuzione delle ubicazioni può consentire di affermare che il centro storico cittadino è sostanzialmente ben rappresentato dalle quattro stazioni CGPS e che lo stesso è attualmente caratterizzato da un moto di subsidenza la cui velocità media riferita al periodo 2010-2015 è compresa tra -1.4 e -1.5 mm/a.

Ferma restando la considerazione della estrema variabilità di un valore di trend calcolato su un periodo di pochi anni, a ulteriore conferma comunque del recente incremento della velocità di subsidenza di Venezia, si può segnalare che utilizzando per la stazione VEN1 le soluzioni giornaliere proposte per periodi diversi (comunque tra maggio 2010 ed agosto 2016) dal Nevada Geodetic Laboratory, il valore di trend oscillerebbe tra -1.6 e -1.9 mm/a (rete MAGNET, <http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations/VEN1.sta>).

5. CONCLUSIONI

Il presente rapporto, sulla base dell'aggiornamento dei dati mareografici provenienti dalla rete strumentale di ISPRA e da quella del CNR-ISMAR di Trieste, integrati dalle recenti elaborazioni dei dati geodetici propri e del CPSM di Venezia, si pone come obiettivo quello di mettere in evidenza le recenti variazioni individuate nell'innalzamento del livello medio del mare a Venezia, proponendo anche valutazioni in merito alla scomposizione nelle componenti di eustatismo e subsidenza.

I risultati del presente studio sono di seguito sinteticamente descritti:

- L'innalzamento del l.m.m. relativo a Venezia, come somma delle due componenti di eustatismo e subsidenza, nell'ultimo periodo (1994-2016) risulta pari a 5.6 mm/a. Il valore si presenta in netta ripresa dopo il periodo di relativa stabilità tra il 1970 e l'inizio degli anni '90. Esso infatti tende ad assumere nuovamente valori elevati, prossimi a quelli che hanno caratterizzato il periodo antecedente al 1970 durante il quale l'estrazione idrica dal sottosuolo ad uso industriale aveva destato serie preoccupazioni e suggerito la necessità di individuare urgenti interventi per mitigarne gli effetti.
- L'innalzamento del l.m.m. relativo a Trieste, sulla base della stabilità geodetica dell'area costiera su cui insiste il mareografo di Molo Sartorio, è rappresentativo del solo eustatismo manifestatosi in alto Adriatico (compresa Venezia e la sua laguna). Nel periodo 1994-2016 esso risulta pari a 3.7 mm/a, in recente aumento a partire dai primi anni '90, specie se confrontato con il valore di lungo periodo stimato in 1.4 mm/a (ultimi 127 anni).
- La componente di subsidenza del centro storico di Venezia (calcolata in maniera indiretta mediante l'applicazione del tradizionale metodo di confronto mareografico con Trieste), nel periodo 1994-2016 risulta pari a -1.9 mm/a, in netta ripresa rispetto alla stabilità del ventennio precedente.

Il recente incremento della velocità di subsidenza del suolo veneziano viene confortato dalle ultime analisi aggiornate dei dati satellitari (GPS) condotte su dati inediti provenienti da quattro stazioni concentrate all'interno del centro storico veneziano, che sembrano indicare una perdita di quota nel periodo 2010-2015 con velocità prossima a -1.5 mm/a.

BIBLIOGRAFIA

Altamimi Z., Collilieux X. and Métivier L., (2011). "ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame". *J Geod*, 85(8):457-473. doi: 10.1007/s00190-011-0444.

Altamimi Z., Métivier L. and Collilieux X., (2012). "ITRF2008 plate motion model". *Journal of Geophysical Research* 2012, 117, B07402, doi: 10.1029/2011JB008930.

Baldin G., (2017). "Laguna di Venezia - Trend di subsidenza da analisi dati GPS". Rapporto Luglio 2017.
http://www.venezia.isprambiente.it/ispra/index.php?action=download&upload_id=173860.

Battistin D. and Canestrelli P., (2006). "1872-2004 - La serie storica delle maree a Venezia". IPCSM - Comune di Venezia.

Bock Y., Wdowinski S., Ferretti A., Novali F. and Fumagalli A., (2012). "Recent Subsidence of the Venice Lagoon from Continuous GPS and Interferometric Synthetic Aperture Radar". *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13, 1-13. doi : 10.1029/2011GC003976.

Bondesan A., Bassan V. and Vitturi A., (2006). "La subsidenza del Veneziano (Sintesi dei risultati)". Atti del Convegno Geologia Urbana di Venezia, Mestre - Venezia, 24 Novembre 2006.

Carbognin L., Gatto P. and Mozzi G., (1974). "Ricostruzione degli acquiferi soggetti a sfruttamento sulla base dei dati relativi ai pozzi artesiani". CNR-ISMAR, Rapporto tecnico n. 32, Venezia, Giugno 1974.

Carbognin L. and Tosi L., (2002). "Interaction between Climate Changes, Eustacy and Land Subsidence in the North Adriatic Region, Italy". *Marine Ecology*, 23, 38-50. doi: 10.1111/j.1439-0485.2002.tb00006.x.

Carbognin L. and Tosi L. (2003). "Il Progetto ISES per l'analisi dei processi di intrusione salina e subsidenza nei territori meridionali delle Province di Padova e Venezia". Progetto ISES (ed), 12 Tav FT. Grafiche Erredici, Padova, 95 pp.

Carbognin, L., Teatini, P. and Tosi, L., (2004). "Eustacy and Land Subsidence in the Venice Lagoon at the Beginning of the New Millennium". *Journal of Marine Systems*, 51, 345-353. doi: 10.1016/j.jmarsys.2004.05.021.

Carbognin L., Teatini P. and Tosi L., (2005). "Land subsidence in the Venetian area: known and recent aspects". *Giornale di Geologia Applicata*, 1, 5-11. doi: 10.1474/GGA.2005-01.0-01.0001.

Carbognin L., Rizzetto F., Teatini P., Tosi L. and Strozzi T., (2006). "La subsidenza della pianura costiera veneta. Indagini e Risultati recenti. In: Problemi di Geoingegneria: estrazioni di fluidi e subsidenza". Geofluid, Piacenza, 7 ottobre 2006.

Carbognin L., Teatini P., Tosi L., Strozzi T. and Tomasin A., (2011). "Present Relative Sea Level Rise in the Northern Adriatic Coastal Area". *Coastal and marine spatial planning. Marine Research at CNR, DTA/O6*.

Cazenave, A., Dieng, H.-B., Meyssignac, B., von Schuckmann, K. and Decharme, B., (2014). "The rate of sea-level rise". *Nat. Clim. Chang.* 4, 358-361.

Cordella M. and Crosato F., (2012). "2010: un anno da ricordare per l'eccezionale crescita del livello medio mare a Venezia e nel Nord Adriatico". ISPRA, Quaderni - Ricerca Marina 4/2012, Roma.
<http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/quaderni/ricerca-marina>

Dorigo L., (1961). "Le osservazioni mareografiche in Laguna di Venezia". Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia, Rapporti preliminari, vol. I, 11-38.

Gomis D., Tsimplis M.N., Marcos M., Fenoglio-Marc L., Pérez B., Raicich F., Vilibić I., Wöppelmann G. and Monserrat S., (2012). "Mediterranean Sea-Level Variability and Trends", doi: 10.1016/B978-0-12-416042-2.00004-5.

Herring T.A., King R.W. and McClusky S.C., (2015). "GPS Analysis at MIT, GAMIT Reference Manual, Release 10.5". Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 2010a.
http://www-gpsg.mit.edu/simon/gtgk/GAMIT_Ref.pdf.

Herring T.A., King R.W. and McClusky S.C., (2015). "Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, GLOBK Reference Manual, Release 10.5". Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 2010b.
http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/GLOBK_Ref.pdf.

Hogarth P., (2014). "Preliminary analysis of acceleration of sea level rise through the twentieth century using extended tide gauge data sets". *Journal of Geophysical Research, Oceans* 119:7645-7659.
<http://dx.doi.org/10.1002/2014JC009976>.

IPCC, (2014). "Fifth Assessment Report - AR5".
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/index.shtml>.

ISPRA, (2016). "Annuario dei dati ambientali 2016". Roma.
<http://annuario.isprambiente.it/>

Marcos M. and Tsimplis M.N., (2007). "Forcing of coastal sea level rise patterns in the North Atlantic and the Mediterranean Sea". *Geophysical Research Letters*, vol. 34, L18604, doi:10.1029/2007GLO30641.

Marcos M. and Tsimplis M.N., (2008). "Coastal sea level trends in southern Europe". *Geophysical Research Letters*, Int. 175, 70-82.

Rebischung P., Griffiths J., Ray J., Schmid R., Collilieux X. and Garayt B., (2012). "IGS08: the IGS realization of ITRF2008. GPS Solut". doi: 10.1007/s10291-011-0248-2.

Serandrei Barbero R., (1972). "Indagine sullo sfruttamento artesiano nel Comune di Venezia, 1846-1970". CNR-ISMAR, Rapporto tecnico n. 31, Venezia, Novembre 1972.

Strozzi T., Teatini P., Tosi L., Wegmuller U. and Werner C., (2013). "Land subsidence of natural transitional environments by satellite radar interferometry on artificial reflectors". *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118. doi: 10.1002/jgrf.20082.

Teatini P., Tosi L., Strozzi T., Carbognin L., Wegmuller U. and Rizzetto F., (2005). "Mapping Regional Land Displacements in the Venice Coastland by an Integrated Monitoring System". *Remote Sensing of Environment*, 98, 403-413. doi: 10.1016/j.rse.2005.08.002.

Teatini P., Strozzi T., Tosi L., Wegmuller U., Werner C. and Carbognin L., (2007). "Assessing short- and long-time displacements in the Venice coastland by synthetic aperture radar interferometric point target analysis". *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, F01012, doi: 10.1029/2006JF000656.

Teatini P., Tosi L. and Strozzi T., (2012). "Comment on Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar by Y. Boch, S. Wdowinski, A. Ferretti, F. Novalli and A. Fumagalli". *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13, Q07008, doi: 10.1029/2012GC004191.

Tosi L., Carbognin L., Teatini P., Strozzi T. and Wegmuller U., (2002). "Evidence of the present relative land stability of Venice, Italy, from land, sea, and space observations". *Geophysical Research Letters*, vol. 29, NO. 12, 1562, doi: 10.1029/2001GLO13211.

Tosi L., Teatini P., Strozzi T., Carbognin L., Brancolini G. and Rizzetto F., (2010). "Ground Surface Dynamics in the Northern Adriatic Coastland over the Last Two Decades". *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 21, S115-S129.

Tosi L., Teatini P. and Strozzi T., (2013). "Natural versus anthropogenic subsidence of Venice". *Scientific Reports*, 3:2710, doi: 10.1038/srep02710.

Tosi L., Da Lio C., Strozzi T. and Teatini P., (2016). "Combining L- and X-Band SAR Interferometry to Assess Ground Displacements in Heterogeneous Coastal Environments: The Po River Delta and Venice Lagoon, Italy". *Remote Sensing*, 8, 308; doi: 10.3390/rs8040308.

Tsimplis M.N. and Baker T.F., (2000). "Sea level drop in the Mediterranean Sea: an indicator of deep water salinity and temperature changes?". *Geophysical Research Letters* 27:12. <http://dx.doi.org/10.1029/1999GL007004>.

Woodworth P.L., White N.J., Jevrejeva S., Holgate S.J., Church J.A. and Gehrels W.R., (2009). "Evidence for the acceleration of sea level on multi-decade and century timescales". *International Journal of Climatology* 29:777-789. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1771>.

Woodworth P.L., (2017). "Differences between mean tide level and mean sea level". *Journal of Geodesy* 91:69-90. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-016-0938-1>.

Wöppelmann, G. and Marcos M., (2012). "Coastal sea level rise in southern Europe and the nonclimate contribution of vertical land motion". *Journal of Geophysical Research*, 117, C01007, doi:10.1029/2011JC007469.

Zerbini S., Raicich F., Prati C.M., Bruni S., Del Conte S., Errico M. and Santi E., (2017). "Sea-level change in the Northern Mediterranean Sea from long-period tide gauge time series". *Earth-Science Reviews*, Volume 167, April 2017, 72-87.

