

# CLIMATE CHANGE E LIVELLO DEL MARE IN EMILIA-ROMAGNA

LE QUATTRO STAZIONI ARPAE E LA STAZIONE ISPRA COSTITUISCONO UN'IMPORTANTE RETE MAREOGRAFICA PER IL MONITORAGGIO DEL LIVELLO DEL MARE IN TEMPO REALE, FONDAMENTALE IN CASO DI MAREGGIATE DI FORTE INTENSITÀ E PER LO STUDIO E L'ANALISI DELL'ANDAMENTO DEL LIVELLO MEDIO MARE NELLE DIVERSE LOCALITÀ DELLA COSTA.

**I**l cambiamento climatico è ormai un fenomeno riconosciuto dalla grande maggioranza di scienziati ed esperti del clima e dell'ambiente in cui viviamo. Tra i principali effetti di questo fenomeno si possono annoverare, tra gli altri: l'innalzamento della temperatura media (il 2023 è stato l'anno più caldo di sempre), l'aumento della frequenza e intensità degli eventi estremi (uragani, alluvioni e siccità) e l'innalzamento del livello del mare. Quest'ultimo ha importanti conseguenze per le zone costiere, quali ad esempio: l'erosione delle coste, l'inondazione del territorio durante le ormai sempre più frequenti mareggiate con forti danni a infrastrutture, abitazioni e attività economiche, l'intrusione di acqua salata nei fiumi e nelle falde acquifere fino a decine di chilometri nell'entroterra e infine la perdita di habitat ed ecosistemi costieri. Naturalmente tutti questi effetti sono particolarmente evidenti e preoccupanti soprattutto nei territori costieri, caratterizzati da terreni con bassi valori di quota e da spiagge sabbiose come quelle della regione Emilia-Romagna. Inoltre, oltre agli aspetti sopraelencati, bisogna aggiungere anche un altro elemento che spesso viene trascurato: il livello medio del mare viene utilizzato come superficie di riferimento per le quote. Infatti quando viene fornita la quota di un qualunque punto sulla superficie fisica essa viene indicata come slmm: sul livello medio mare. Ad esempio, il Monte Bianco ha una quota ufficiale di +4.805,59 m slmm, cioè la sua cima (considerando anche il ghiaccio con misura del 2023 [1]), si trova a +4.805,59 m sul livello medio mare assunto come superficie di quota zero<sup>1</sup>. Il riferimento al livello medio mare non è usato solo per descrivere le quote dei punti della superficie fisica ma anche quando si realizza una qualunque opera, manufatto o infrastruttura, dove tutti i dati altimetrici sono riferiti allo zero delle quote. Questo è particolarmente

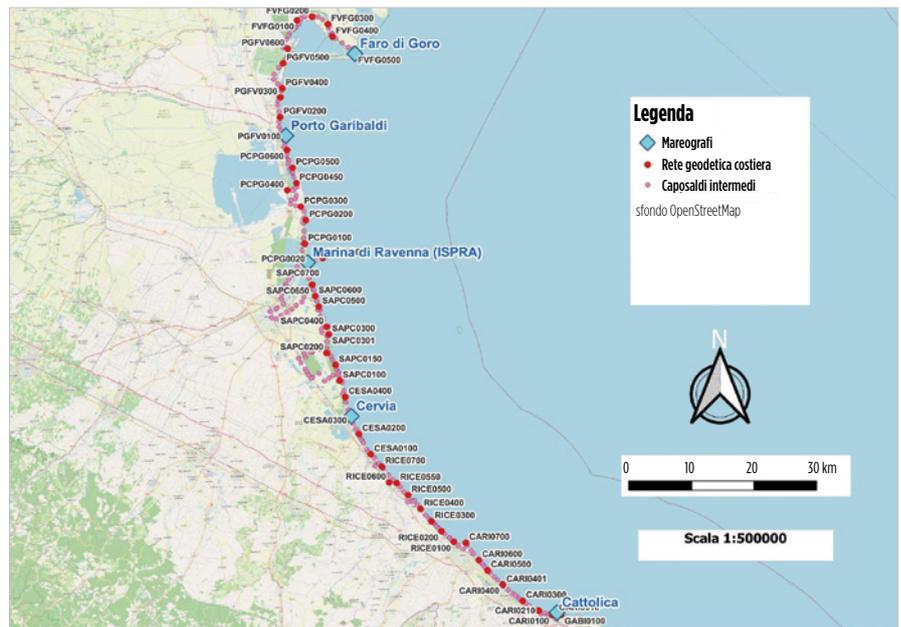


FIG. 1 RETE MAREOGRAFICA E RETE GEODETTICA COSTIERA (RGC) IN EMILIA-ROMAGNA  
Mareografi e vertici Rgc sono stati collegati altimetricamente tramite una livellazione geometrica di alta precisione realizzata nel 2023 da Arpae.

importante per il territorio, le infrastrutture e le opere di difesa che sono a contatto con il mare o nelle aree limitrofe. Se una barriera di protezione portuale viene progettata a +2,00 m, questa sarà realizzata a +2,00 m rispetto al livello medio mare.

## Come viene misurato e definito il livello medio mare

Tradizionalmente la misura avviene per mezzo di un mareografo, cioè di uno strumento che misura di continuo il livello del mare rispetto a un punto assunto come riferimento sulla terraferma (caposaldo di riferimento). Dal momento che il livello medio mare può variare a seconda delle località e varia nel tempo, ogni nazione ha scelto un proprio livello medio mare come riferimento per le quote. In Italia, per la parte peninsulare, la superficie zero delle quote (geoide nazionale) è il livello medio mare

“Genova 42”, definito tramite le misure del mareografo di Genova (ex Ponte Morosini) dell'Istituto idrografico della Marina. Come intervallo temporale sono stati scelti 10 anni, dal 1937 al 1946 (giorno centrale 1° gennaio 1942, da cui il nome Genova 42). Partendo da Genova, dal caposaldo di riferimento del mareografo, l'Igm (Istituto geografico militare) ha successivamente realizzato la Rete altimetrica nazionale, costituita da circa 20.000 capisaldis con dislivelli relativi ottenuti per mezzo della livellazione geometrica di alta precisione. Questi capisaldis (materializzati e misurati in epoche differenti) rappresentano un insieme di punti di quota nota da utilizzare per inquadrare, nel sistema altimetrico nazionale Genova 42, qualunque lavoro, opera e infrastruttura sul territorio peninsulare, ma anche qualunque modello di descrizione del terreno, di monitoraggio del territorio, di previsione e protezione civile. Negli ultimi anni, di fronte al costante aumento dei fenomeni legati al

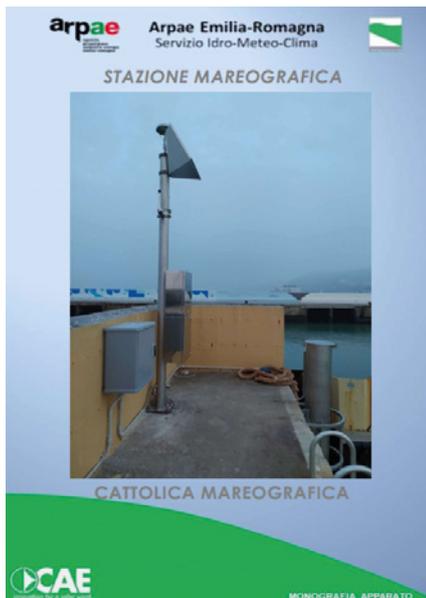


FIG. 2 MAREOGRAFO

Stazione mareografica integrata di Porto Garibaldi (FE). L'antenna Gns è co-locata direttamente sul tetto della stazione (zero-distance).

*climate change*, al loro effetto sulla costa e all'ipotesi di un preoccupante innalzamento del livello del mare, è diventato sempre più rilevante definire e monitorare nel tempo un livello medio mare locale, ponendolo ovviamente in relazione allo zero nazionale. Per raggiungere questo obiettivo, l'Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna (Arpa) ha realizzato una rete di stazioni e sensori mareografici distribuiti lungo l'intera costa regionale (figura 1).

La prima in ordine di tempo è la stazione di Porto Garibaldi in provincia di Ferrara (figura 2), realizzata nel 2009 su una struttura appositamente costruita, a circa 10 metri dalle banchine del porto canale. La stazione è dotata di: due sensori mareografici (il principale a galleggiante con *encoder* digitale all'interno di un tubo di calma, il secondario esterno di tipo radar), sensori meteo (barometro, anemometro, termometri e pluviometro), una sonda multiparametrica per il monitoraggio di alcuni parametri di qualità dell'acqua di mare. Inoltre la stazione è integrata con un ricevitore Gns co-locato con un'antenna montata direttamente sul tetto della stazione stessa (*zero-distance*). I sensori di livello e l'antenna Gns sono stati inquadrati nel sistema altimetrico Genova 42, in tal modo la misura in tempo reale del livello del mare è direttamente confrontabile con le quote della costa e del territorio circostante.

I dati di livello del mare di Porto Garibaldi, raccolti e gestiti da Arpa, vengono anche elaborati dal Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara che periodicamente, attraverso una procedura analitica basata sull'applicazione di filtri passa-basso (per eliminare alcune frequenze di disturbo),

calcola in successione i livelli orari, giornalieri (con applicazione del filtro X0 di Doodson), mensili e annuali.

Da luglio 2009, i livelli medi mensili e annuali costituiscono una serie temporale con ormai più di 14 anni di dati. La figura 3 illustra l'andamento dei livelli medi mensili di Porto Garibaldi da luglio 2009 a dicembre 2023.

Per quanto riguarda la componente Gns, la stazione di Porto Garibaldi (con site name GARI00ITA) fa parte fin dal 2009 della rete Epn (*Euref permanent Gns network*) dell'Euref (*Reference frame sub-commission for Europe*) e come tale rappresenta uno dei vertici che realizzano sul territorio nazionale il sistema geodetico europeo Etrs89 (*European terrestrial reference system*). Coordinate e velocità di Porto Garibaldi, nella realizzazione Etrf2000, sono calcolate e monitorate nel tempo da 5 diversi centri di calcolo europeo *Euref permanent Gns network*<sup>2</sup>.

Nel corso del 2023 Arpa ha installato altre due stazioni mareografiche integrate: la stazione di Cattolica (RN), al confine con la regione Marche, e la stazione di Cervia (RA). Entrambe queste stazioni sono dotate di due sensori di livello (un sensore radar a guida d'onda e uno a pressione) all'interno di un tubo in acciaio inox fissato rigidamente alle strutture delle banchine del porto. Nelle immediate vicinanze (a pochi metri di distanza) è stato installato un ricevitore Gns con antenna su un apposito palo (figura 4). La rete mareografica di Arpa comprende anche la stazione Faro di Goro (FE) che si trova nel limite nord della costa regionale: si tratta di un singolo sensore radar che misura già da diversi anni il livello dell'acqua su un ramo di collegamento tra il Po di Goro

e la Sacca di Goro, in pratica sul retro dell'omonimo faro.

Oltre alle stazioni mareografiche di Arpa, sulla costa dell'Emilia-Romagna, è presente anche la stazione di Marina di Ravenna, appartenente alla Rete mareografica nazionale (Rmn) dell'Istituto superiore per la protezione e ricerca ambientale (Ispra), realizzata nel 2013 nello stesso sito di una precedente stazione (ex Porto Corsini).

L'insieme delle quattro stazioni Arpa e della stazione Ispra costituisce un'importante Rete mareografica per il monitoraggio del livello del mare in tempo reale, fondamentale in caso di mareggiate di forte intensità, e lo studio e l'analisi dell'andamento del livello medio mare nelle diverse località della costa regionale. Per avere però un dato di livello preciso e affidabile è stato necessario stabilire un riferimento altimetrico aggiornato e univoco per tutte le stazioni e, naturalmente, collegare tale riferimento a Genova 42.

Normalmente per raggiungere questo obiettivo i sensori di livello vengono inquadrati tramite collegamento altimetrico al più vicino caposaldo della Rete di livellazione di alta precisione dell'Istituto geografico militare (Igm). In questa fase possono esserci due difficoltà: la distanza tra la stazione mareografica e i capisaldi Igm può essere anche di diversi chilometri (il che comporta la realizzazione di una livellazione *ad hoc* di alta precisione), e le quote dei capisaldi Igm possono essere state rilevate dall'istituto in anni differenti (quindi con una diversa data di aggiornamento) e possono non essere più attendibili in caso di subsidenza del territorio. Nelle aree della costa dell'Emilia-Romagna o nelle aree limitrofe, vi sono

diversi capisaldi Igm, ma con date di rilievo dal 1999 al 2005 e quindi con valori di quota purtroppo non più validi per effetto della subsidenza che, dal 1999-2005 a oggi, ha comportato un abbassamento delle quote in modo differenziato soprattutto sulla costa<sup>3</sup> e comunque di quantità che non possono più essere trascurate.

Per risolvere questi problemi Arpae ha deciso di:

- realizzare una nuova linea di livellazione geometrica di alta precisione lungo la costa;
- adottare come riferimento assoluto una quota basata sulla stazione integrata di Porto Garibaldi.

La linea di livellazione è stata realizzata nel 2023 [2] e ha permesso di collegare altimetricamente tutte le stazioni della rete mareografica di Arpae, da Cattolica al Faro di Goro, passando anche per il caposaldo di riferimento della stazione Ispra di Marina di Ravenna. In tal modo, si sono misurati con precisione millimetrica i dislivelli tra le diverse stazioni, cioè le differenze di quota tra i capisaldi di riferimento delle stazioni medesime<sup>4</sup>. Per passare dai “semplici” dislivelli alle quote è necessario assumere un caposaldo e una sua quota come riferimento per l’intera linea costiera, cosa non banale nel territorio in esame dati i problemi sopramenzionati. Dopo varie analisi è stato deciso di utilizzare la stazione integrata di Porto Garibaldi. Infatti, dato che il ricevitore Gnss della stazione fa parte della rete europea Epn-Euref, le coordinate geografiche Etrf 2000, tramite i parametri ufficiali di velocità, sono state attualizzate al 2023 (eliminando l’effetto della subsidenza); il passaggio dalla quota ellissoidica alla quota geoidica riferita a Genova 42 è avvenuto applicando il modello di ondulazione nazionale Italgeo2005. Il riferimento altimetrico regionale così definito è stato denominato Rgc 2023<sup>5</sup>.

Tutte le stazioni mareografiche dell’Emilia-Romagna sono state quindi inquadrare nel riferimento Rgc 2023; in tal modo, il valore del livello in tempo reale (con connessione online alle stazioni mareografiche) e il calcolo del livello medio mare nelle diverse località avvengono con il medesimo riferimento altimetrico, aggiornato al 2023, e con l’eliminazione dell’effetto della subsidenza.

Nel prossimo futuro, i dislivelli tra le stazioni mareografiche di Porto Garibaldi, Cervia e Cattolica potranno sempre rimanere aggiornati e corretti tramite l’elaborazione delle stazioni

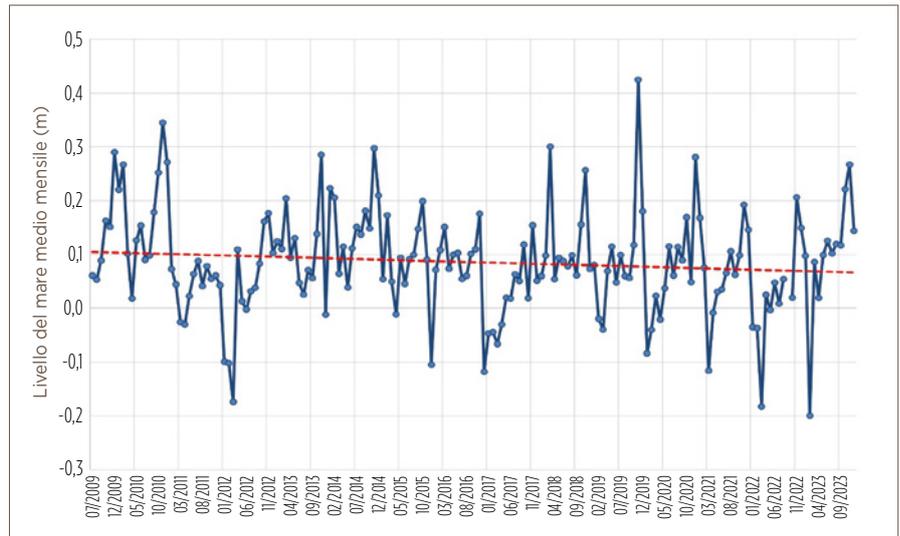


FIG. 3 LIVELLO MARE

Livelli medi mensili della stazione mareografica di Porto Garibaldi (FE) da luglio 2009 a dicembre 2023. I livelli sono stati depurati dall’effetto della subsidenza tramite le misure della stazione Gnss co-locata con il mareografo; la linea di tendenza in rosso mette in evidenza che, a causa di livelli significativamente alti all’inizio della serie temporale (2010), nel periodo indicato la variazione del livello medio presenta un trend in lieve diminuzione (circa -2,7 mm/anno).

Gnss co-locate, e questo garantirà un continuo e corretto monitoraggio anche dell’eventuale variazione del livello del mare nelle diverse località, argomento di grande interesse perché come detto legato ai fenomeni di *climate change*. Sul monitoraggio del livello del mare, grazie alle misure della stazione integrata di Porto Garibaldi, operativa come detto dal luglio del 2009, è già oggi possibile calcolare la variazione rispetto al riferimento nazionale Genova 42. Mediando le misure di livello mensile per il periodo ormai pluridecennale 2010-2023 (anno centrale 2017, 75 anni dopo il 1942) e contemporaneamente eliminando l’effetto della subsidenza a Porto Garibaldi, si ottiene un livello medio mare di +0,086 m su Genova 42, cioè circa +1,15 mm/anno: dato in linea con quanto riportato in letteratura anche per altri mareografi, come ad esempio per quello di Trieste (Molo Sartorio) nel nord dell’Adriatico [3].

#### Alberto Pellegrinelli

Professore associato di Topografia e cartografia, Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara

#### NOTE

<sup>1</sup> Nelle applicazioni geodetiche-topografiche la superficie di riferimento per l’altimetria è un modello del geoide che può essere definito come la superficie equipotenziale del campo di gravità terrestre coincidente con il livello medio mare (supposto in quiete e prolungato al di sotto delle terre emerse) misurato in un determinato punto.

<sup>2</sup> [www.epncb.oma.be/\\_networkdata/siteinfo4onestation.php?station=GARI00ITA](http://www.epncb.oma.be/_networkdata/siteinfo4onestation.php?station=GARI00ITA)

<sup>3</sup> [www.arpae.it/it/temi-ambientali/suolo/subsidenza](http://www.arpae.it/it/temi-ambientali/suolo/subsidenza)

<sup>4</sup> Oltre alle stazioni mareografiche la livellazione ha collegato anche circa 50 vertici della Rgc ([www.arpae.it/it/temi-ambientali/mare/costa/rete-geodetica-costiera](http://www.arpae.it/it/temi-ambientali/mare/costa/rete-geodetica-costiera)) utilizzati da Arpae per l’analisi e il monitoraggio dell’evoluzione costiera.

<sup>5</sup> L’utilizzo del modello di ondulazione Italgeo 2005 (che consente il passaggio dalle quote ellissoidiche alle quote geoidiche) comporta in definitiva che le quote sono comunemente nel riferimento altimetrico nazionale Genova 42: l’Rgc 2023 è da considerarsi come una realizzazione regionale di Genova 42.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Luigi Mastrodonato, 2023, “Il Monte Bianco si è abbassato di oltre due metri in due anni”, [www.lifegate.it/monte-bianco-altitudine](http://www.lifegate.it/monte-bianco-altitudine)

[2] De Nigris N., Pellegrinelli A., Sistilli F., 2024, “Rete geodetica costiera e mareografica. Livellazione di alta precisione e inquadramento geodetico. Relazione finale”, [www.arpae.it/it/temi-ambientali/mare/costa/rete-geodetica-costiera](http://www.arpae.it/it/temi-ambientali/mare/costa/rete-geodetica-costiera)

[3] Raichich F., 2023, “The sea level time series of Trieste, Molo Sartorio, Italy (1869-2021)”, *Earth. Syst. Sci. Data*, 15. 1749-1763.