

Le variazioni del livello del mare connesse ai cambiamenti climatici ed il rischio per le aree costiere

Le ricerche interdisciplinari sviluppatesi nell'ultimo ventennio hanno messo in evidenza come gran parte delle pianure costiere italiane sia soggetta al rischio di erosione e di allagamento per ingressione marina dovuta alla risalita relativa del livello del mare. Tale rischio è la conseguenza dell'interazione tra la presenza di elementi antropici e fenomeni di diversa natura, quali il riscaldamento globale, l'eustatismo (variazione del volume dell'acqua marina e dei bacini oceanici), la subsidenza (abbassamento del livello del suolo per cause tettoniche, per costipazione di sedimenti, per attività antropiche come emungimenti, glacio-idro-isostasia, ecc.), l'alterazione dei sistemi naturali litoranei, lo smantellamento degli apparati dunari e la realizzazione di opere aggettanti. I fenomeni di erosione e di potenziale allagamento che ne conseguono possono essere ricondotti alla peculiare storia del recente sviluppo geologico e morfologico del nostro territorio: l'ampia deforestazione connessa all'intensificazione delle attività industriali, commerciali ed agricole operata prima dai popoli italici e poi dai romani, ha innescato un'accelerazione nei processi erosivi del suolo nelle campagne e nei territori collinari, favorendo il trasporto fluviale di ingenti quantitativi di sedimenti verso il mare. Molte foci fluviali deltizie hanno così beneficiato di una grande disponibilità di sedimenti; quest'ultima ha permesso lo sviluppo di delta ampi e ramificati, ha favorito la strutturazione delle pianure costiere nonché la progradazione rilevante delle spiagge. La recente regimazione dei corsi d'acqua, l'urbanizzazione dei litorali con lo smantellamento e l'irrigidimento degli apparati dunari, un uso del suolo attento a ridurre la perdita di terreno fertile e la stabilizzazione dei versanti hanno fatto mancare questo grande apporto di sedimenti, favorendo la regressione delle spiagge e, quindi, l'innescare di fenomeni erosivi lungo tutta la penisola italiana. La costipazione dei sedimenti litorali connessa all'emungimento dell'acqua per usi irrigui ed alle opere di bonifica, che hanno reso salubri e popolabili molte fasce costiere, hanno contribuito a creare vaste aree depresse ed inondabili, oggi sotto il livello del mare.



Lungo il territorio italiano il rischio connesso all'arretramento della linea di riva si ripercuote, oltre che su infrastrutture ed attività produttive, anche sul prezioso e delicato patrimonio storico ed archeologico (Grotta di Tiberio, Sperlonga, Lazio meridionale).

Per comprendere la rilevanza del problema sul territorio nazionale è utile ricordare che dei circa 7500 km di litorale italiano, il 47% è rappresentato da coste alte e/o rocciose e il 53% da spiagge; di queste ultime il 42% circa è attualmente in erosione.

L'accelerazione recente del sollevamento del livello marino connesso al riscaldamento globale ha aggiunto un ulteriore fattore di incremento dei processi erosivi. Nei prossimi decenni quest'accelerazione potrebbe essere ancora più rilevante, con effetti devastanti sui sistemi costieri. Dunque, quale futuro climatico ci attende? Sull'attuale e futura tendenza del livello degli oceani rimangono ancora molte incertezze. Infatti, i dati storico-geologici dell'Olocene (ultimi 10000 anni) e le sincrone evidenze climatiche non mostrano un segnale univoco.

Le misure del livello marino forniscono indicazioni diverse da area ad area, a volte anche alla scala chilometrica; esse fanno sì che sia impossibile la definizione di una curva eustatica valida globalmente (se non a carattere descrittivo del passato), dovendo essere valutate curve specifiche per ogni singola unità geologica, fisiografica, ecc.

I dati indicano nel Mediterraneo una generale tendenza al raffreddamento da 8000 anni fa ad oggi, al cui interno si sono sviluppati periodi più freddi (quale la Piccola Età Glaciale fra la metà del XIV e del XIX secolo) e fasi più calde (come il Periodo Caldo Medioevale e l'Optimum Moderno); queste evidenze però non trovano riscontro nella continua risalita eustatica, dove il livello del mare nel Mediterraneo è risalito con tassi a volte superiori ai 10 mm/anno.

Dati morfologici, stratigrafici e *marker* geologici collocano il livello marino di 5-6000 anni fa approssimativamente a circa -3.5 m: il mare aveva raggiunto una quota prossima all'attuale dopo essere risalito di oltre 100 metri in 15 mila anni. Duemila anni fa altre evidenze geologiche (per esempio nel Mediterraneo i Serpulidi su speleotemi sommersi ed i *reef* a Vermetidi) e *marker* archeologici, quali le strutture portuali e gli elementi architettonici delle peschiere romane, collocano il livello marino a circa -1.5 metri sotto l'attuale.

Negli ultimi due secoli sono invece presenti misure strumentali, quali le serie mareografiche e, negli ultimi decenni, i dati da satellite, che mostrano, una volta calibrati, una risalita media di circa 1 ÷ 1.5 mm/anno. Le previsioni di quanto si alzerà il livello marino nel prossimo futuro (anno 2100) sono basate sulle ricostruzioni paleoclimatiche, sui dati mareografici, sulle variazioni storiche della temperatura media della Terra, sulle masse di ghiaccio potenzialmente in scioglimento e sull'effetto dell'espansione termica degli oceani connesse al riscaldamento globale.

Il rapporto dell'IPCC del 2001 (Intergovernmental Panel on Climate Change, organo tecnico-scientifico del WMO, World Meteorological Organization, e UNEP, United Nations Environment Programme, che ha come compiti lo studio dei cambiamenti climatici in atto, la definizione della vulnerabilità dei sistemi naturali e sociali, nonché stabilire le strategie di adattamento e di mitigazione) mette in evidenza come la temperatura superficiale media globale è prevista aumentare nel 2100 fra 1.4 e 5.8 °C secondo tutti gli scenari di emissione proposti dallo Special Report on Emission Scenarios (SRES). Anche il livello globale del mare è previsto sollevarsi, per lo stesso periodo, tra 0.09 e 0.88 metri (scenario pessimistico; tale fenomeno appare dovuto essenzialmente all'espansione termica delle acque e alla perdita di massa delle calotte e dei ghiacciai continentali).

Il livello nel Mediterraneo dovrebbe risalire con tassi diversi da quelli globali, come verrà espresso dal prossimo rapporto IPCC in uscita nel 2007. Qui la situazione è complicata dai molteplici fattori che agiscono a scala di bacino e che possono agire anche in modo opposto, ma che complessivamente potrebbero portare anche a valori leggermente minori: lo scambio delle masse d'acqua attraverso lo stretto di Gibilterra ed il canale di Sicilia, la riduzione dell'afflusso di acqua da parte dei fiumi nel bacino, le variazioni della pressione atmosferica media e l'espansione termica delle acque sono i principali.

Le previsioni dell'INQUA (International Union for Quaternary Research) del 2004, che si basano su dati geologici osservati per un periodo sufficientemente lungo da permettere di escludere, dalle evidenze di campagna e dai dati strumentali, il rumore dovuto ad alterazioni e/o variazioni non permanenti, indicano che il livello marino nel 2100 dovrebbe essere di 5 ± 15 cm superiore a quello del 2000.

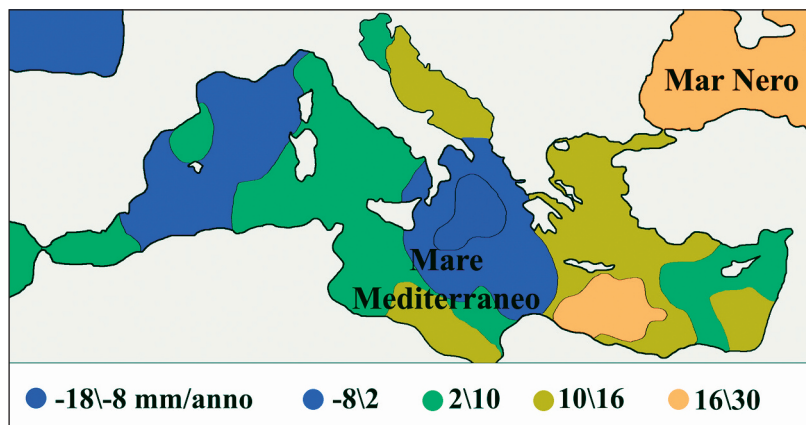
Appare comunque evidente dagli approcci di IPCC e INQUA che le curve e i tassi di risalita marina per il futuro dovranno tenere conto di diverse componenti: i trend geologici naturali (tettonica, glacio-idro-isostasia, subsidenza geologica), l'aumentato effetto serra, la componente antropica sul territorio (subsidenza indotta, cambiamento del regime idrodinamico costiero e del bilancio sedimentario dei litorali), nonché l'evoluzione climatica (variazioni nell'irraggiamento solare, modificazione nell'intensità e nella frequenza dei campi di pressione, ecc.).

A titolo di esempio, basta ricordare come molti studi indicano che nel

Mare Mediterraneo, durante gli ultimi 44 anni, i forzanti vento e pressione hanno portato ad una variabilità del livello medio marino tale da evidenziarne una riduzione statisticamente significativa di circa $0.4 \div 0.6$ mm/anno nell'intero bacino.

Questi andamenti, correlabili all'indice NAO (North Atlantic Oscillation), sono riconducibili all'azione dei forzanti meteorologici a cui, nell'ultima decade, si sono sostituiti quelli sterici (porzione orientale del bacino).

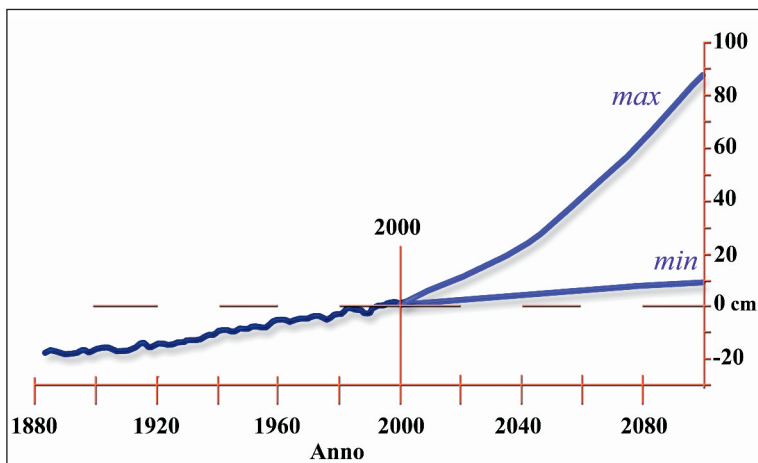
Analizzando le variazioni termosteriche negli ultimi 50 anni sul Mediterraneo, si individua una netta risalita dovuta all'espansione termica.



Le variazioni del livello marino del Mediterraneo misurate dal satellite Topex-Poseidon fra il 1993 ed il 1998: la differenza nei diversi settori dipende soprattutto da condizioni meteorologiche locali.

oceaniche globali sono insufficienti per dirci di più sul grado di riscaldamento globale che potrebbe essere occorso durante lo stesso periodo e, quindi, non sono forse bastevoli a prevedere con precisione il loro effetto sul livello del mare (effetti termosterici) nel medio termine (50 ÷ 100 anni).

Nella regione mediterranea, inoltre, un'aliquota dell'innalzamento relativo del livello marino è imputabile alla glacio-idro-isostasia. Tale fenomeno, che consiste nell'adattamento, con spostamenti verticali lenti, della crosta terrestre alle variazioni del volume (e peso) delle coltri glaciali e delle masse d'acqua oceaniche, è tuttora attivo nel Mediterraneo e varia da una località all'altra.



Il sollevamento del livello marino misurato da oltre 23 mareografi nel corso del secolo scorso e le previsioni dell'IPCC per il 2100.

Anche l'andamento del livello marino registrato dal sistema satellitare Topex/Poseidon durante il periodo 1993 ÷ 2003, è principalmente dovuto all'espansione termica ed è con molta probabilità una caratteristica non permanente. Queste osservazioni complicano la capacità di formulare ipotesi sul futuro osservando dati recenti, seppure di dettaglio: in altri termini non è possibile estrapolare il livello marino nel passato o nel futuro usando tipologie di dati univoche (ad esempio quelli satellitari). Di conseguenza, anche le misure relative agli ultimi 50 anni delle temperature

L'andamento recente del livello marino nel Mediterraneo deve quindi essere corretto dall'influenza del segnale meteorologico e dalla componente verticale dei movimenti della crosta terrestre, diversi in ogni singola zona: così facendo il livello marino appare essere risalito con tassi di $1.03 \div 1.26$ mm/anno a Genova, Venezia e Trieste, 0.97 mm/anno a Dubrovnik e 0.56 mm/anno a Bakar. Nonostante le correzioni apportate, i valori esposti mostrano come il sollevamento nel Mediterraneo sia ancora al di sotto delle stime di quello globale.

Alla luce di quanto discusso, le componenti che devono essere valutate per determinare con realistica approssimazione i possibili scenari di sollevamento del mare in una località sono:

Eustatismo	Subsidenza (geologica ed antropica)
Neotettonica	Distribuzione delle masse d'acqua
Glacio-idro-isostasia	Parametri meteomarini
Espansione termica	

Gli scenari climatici che si prospettano per il prossimo secolo, hanno spinto i ricercatori che operano nel campo degli studi costieri a valutare il rischio che tali variazioni possono comportare sui litorali italiani: attraverso l'applicazione di modelli numerici ed analisi statistiche, si tenta di prevedere quali porzioni di costa potranno essere sommerse o abbassarsi sotto il livello del mare. Ciò consentirà di considerare con maggiore certezza e dettaglio quali aree potranno subire dissesti connessi alla rimonta del livello marino, all'incremento degli eventi estremi e del sovrizzo delle onde, e quali saranno altresì soggette all'incremento dei fenomeni erosivi.

Principali componenti e relativi valori di innalzamento del mare utilizzabili per la previsione degli scenari al 2100.

Componente	Validità scala	Sollevamento previsto per il 2100 (cm)
Eustatismo, isostasia, espansione termica	Globale	+47±39
Cause geologiche ed eustatismo	Globale	+5 ±15
Espansione termica	Globale	+21.5±8.5
Glacio-ido-isostasia	Locale	Variabile da zona a zona
Tettonica	Locale	Variabile da zona a zona
Subsidenza	Locale	Variabile da zona a zona

Quale futuro attende le coste italiane?

Come osservato nella descrizione generale, la pericolosità connessa al cambiamento climatico è strettamente dipendente dalla suscettibilità delle diverse aree costiere a subire il fenomeno ingressivo. Tale entità sarà perciò maggiore nelle aree a forte subsidenza, nei settori neotettonicamente attivi e in abbassamento, e sarà differente, a parità di altre condizioni, a seconda dell'entità del *rebound* glacio-idro-isostatico del sito.

Dal punto di vista neotettonico i numerosi dati a disposizione permettono di osservare come i settori ligure e tirrenico presentino tratti di costa con bassi valori di subsidenza (dalla Toscana settentrionale sino alla Campania) dove i promontori carbonatici, generalmente stabili, si alternano alle pianure costiere con tassi di dislocazione verticale sino a -2 mm/anno, ad esclusione dell'area centro tirrenica corrispondente agli apparati vulcanici laziali (in sollevamento).

La Sardegna, ad eccezione del Golfo di Orosei da considerarsi come stabile, è debolmente subsidente (sino a circa -2 mm/anno), così come la Sicilia nord-occidentale e sud-orientale.

L'area della Sicilia corrispondente alle province costiere di Catania e Messina, così come la Calabria meridionale sono in forte sollevamento, sino a 1.4 mm/anno, mitigando od annullando in tal senso l'effetto eustatico di risalita del livello marino (risalita relativa prossima a zero o negativa). Il particolare assetto geologico della costa Adriatica, con la presenza dell'Avampaese Apulo e dell'Avanfossa Bradanica, non permette un dettaglio dell'evoluzione neotettonica comparabile con il resto del territorio nazionale. Il settore pugliese è generalmente considerato circa stabile o in sollevamento (Gargano e Salento sud-orientale), così come l'ampia fascia costiera del Molise e dell'Abruzzo. Nelle Marche settentrionali la neotettonica indica una costa in sollevamento con tassi sino a 0.4 mm/anno. In sostanziale subsidenza tettonica appaiono l'Emilia Romagna (-1 mm/anno), il Veneto (-0.8 mm/anno) ed il Friuli (-0.4 mm/anno).



Solco di battente olocenico sollevato nelle vicinanze di Taormina (Catania): quest'area della Sicilia orientale mostra elevati tassi di sollevamento tettonico.

Lungo la costa italiana sono oltre 30 le pianure che presentano una intrinseca vulnerabilità ai fenomeni connessi alle variazioni del livello marino ed all'incremento degli eventi estremi.

Molti di questi settori rappresentano aree ad elevato valore naturalistico e paesaggistico, nonché sedi di attività produttive di rilevanza nazionale. Sul lato tirrenico e ligure i settori principalmente vulnerabili sono rappresentati a nord dalla costa versiliese, dal delta del Fiume Ombrone, dall'area della Laguna di Orbetello e dalla porzione centrale della Campagna Romana, dal litorale pontino con i numerosi laghi costieri, nonché dall'area delle foci del Volturno (litorale domiziano-flegreo) e del Sele (Golfo di Salerno). In Adriatico i settori particolarmente vulnerabili sono rappresentati nella parte meridionale dai laghi costieri di Lesina e Varano, mentre nel settore centro settentrionale è a rischio tutto il tratto costiero che dall'Emilia Romagna raggiunge il confine con la Slovenia, comprendente, oltre alla Laguna di Venezia, anche le lagune di Grado e Marano.

Nelle Isole maggiori i settori più vulnerabili al sollevamento del livello marino sono rappresentati dalle aree umide di Cagliari ed Oristano e dalle spiagge settentrionali della Sardegna, mentre in Sicilia un'accelerazione dell'eustatismo potrebbe comportare un'alta pericolosità sull'ambiente a Vermetidi della costa nord-occidentale, sull'area costiera di Trapani e sulla pianura di Catania.

L'incremento dei fenomeni erosivi riguarda invece l'intero territorio nazionale costituito da coste basse e sabbiose, e dai relativi sistemi dunari già messi a dura prova dalla diffusa antropizzazione.

Lungo la Toscana settentrionale elaborazioni sugli scenari futuri connessi al sollevamento del livello marino hanno permesso di stimare arretramenti della linea di riva compresi fra 90 (minima previsione di sollevamento marino, la più probabile) e 300 metri (scenario pessimistico e meno probabile) nel 2100.

Dal punto di vista del comportamento glacio-idro-isostatico il territorio italiano si differenzia da area ad area con un gradiente nord-sud del *rebound*, connesso alla diversa distanza dalle coltri glaciali del nord Europa e delle Alpi (diminuzione dell'effetto glacio-isostatico spostandosi verso sud) ed al conseguente aumento dell'effetto della risalita della colonna d'acqua-abbassamento del fondale nel centro Mediterraneo (effetto idro-isostatico): lo scioglimento dei ghiacci ed il sollevamento del livello del mare durante l'Olocene hanno portato il nord Italia a sollevarsi maggiormente del sud come conseguenza della diminuzione del peso dei ghiacci e dell'abbassamento del fondale marino. I tassi di *rebound* (ancora attivo) lungo la costa tirrenica sono di circa -0.5 ± -0.6 mm/anno.

L'evoluzione geologico-strutturale recente (con potenze dei corpi sedimentari sino a diverse decine di metri) e l'assetto idrogeologico (sviluppo degli acquiferi) fanno sì che lungo la fascia costiera nazionale la subsidenza per costipamento dei sedimenti (naturale o antropica connessa alle bonifiche idrauliche, all'estrazione di fluidi, allo sfruttamento degli idrocarburi) costituisca un fattore importante nella valutazione del rischio: a titolo di esempio, l'abbassamento della fascia costiera emiliano-romagnola ha fatto registrare tassi sino a -70 mm/anno (delta del Po).

Considerando le varie componenti eustatica, di espansione termica, la subsidenza geologica ed antropica nonché l'isostasia, la Pianura Pontina (Lazio meridionale) potrebbe avere, come conseguenza dell'aumento relativo del livello marino nel 2100, un incremento del territorio a rischio di allagamento dal +6% (scenari di minima risalita) al +49% (scenari di massima risalita).

Lungo la fascia costiera emiliano-romagnola la componente subsidenziale antropogenica magnificherà il computo del sollevamento relativo del livello marino, comportando un effetto sull'arretramento della linea di riva: rispetto al 15% di territorio che si trovava sotto il livello del mare già alla fine degli anni '80, nel 2020 le aree depresse potrebbero raggiungere il 48% dell'intera fascia costiera.



Il sollevamento marino e l'erosione delle spiagge rappresentano fattori di rischio per il litorale Pontino, sede di un'intesa antropizzazione.

Il peculiare assetto territoriale italiano è quindi particolarmente vulnerabile ai cambiamenti globali. L'incremento atteso della frequenza e dell'intensità dei fenomeni estremi (alluvioni, mareggiate, ecc.) e l'accelerazione della risalita del livello marino e dei fenomeni erosivi comporteranno un aumento del rischio connesso alle catastrofi naturali, con la perdita di territorio, di infrastrutture e di beni economici. La capacità delle Istituzioni di far proprie con sollecitudine le informazioni e le previsioni scaturite dal mondo della ricerca attiva nel campo degli studi costieri, sarà fondamentale per adattare per tempo il territorio al clima del futuro, passando dall'ambito dell'emergenza a quello della prevenzione e minimizzando, quindi, gli impatti sulle attività produttive, sui beni e sul paesaggio.