

GIORNATE DI GEOLOGIA E STORIA

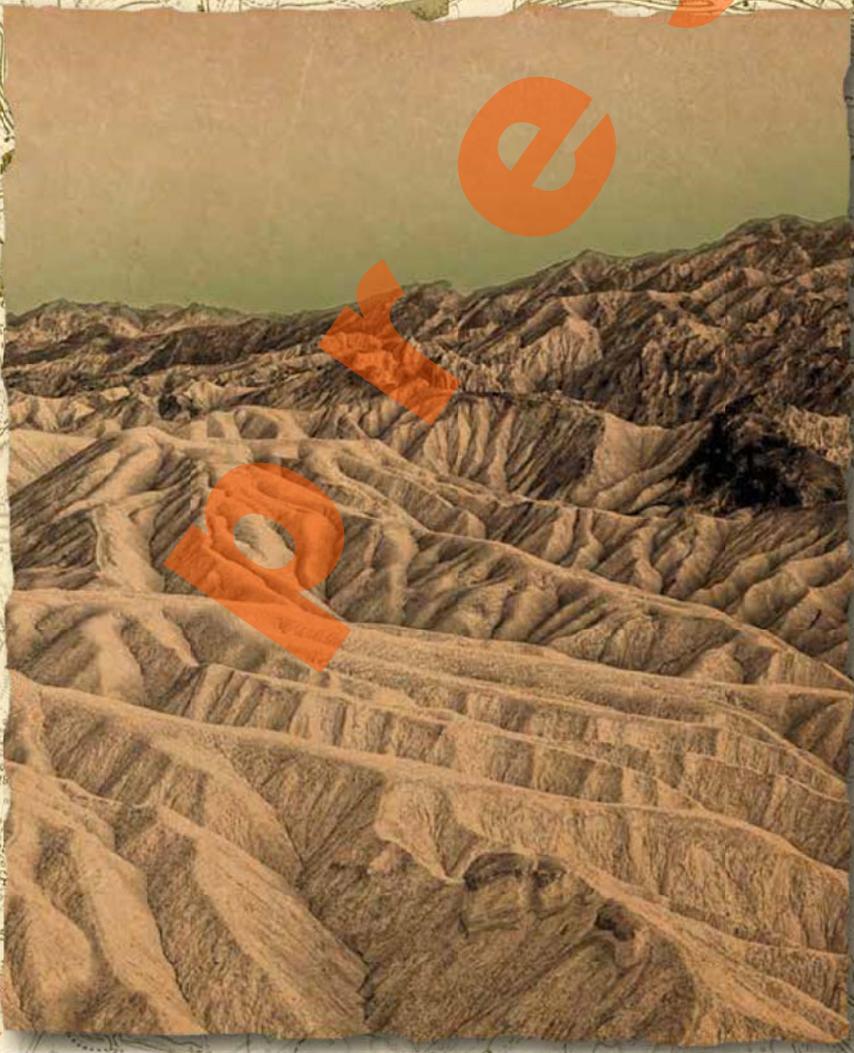
28 ottobre 2020



SOCIETA' GEOGRAFICA ITALIANA ONLUS



L'antica rappresentazione cartografica del territorio e i processi geomorfologici



*Giornate di Geologia e Storia
ISPRA
Sala Conferenze
Roma, Via Vitaliano Brancati 48*

**5ª Giornata di geologia e storia “L'ANTICA
RAPPRESENTAZIONE CARTOGRAFICA
DEL TERRITORIO E I PROCESSI GEO-
LORFOLOGICI”**

Comitato organizzatore:

STEFANIA NISIO Responsabile per ISPRA
ANTONELLO FIORE Responsabile SIGEA
GIUSEPPE GISOTTI SIGEA
ROSSELLA BELLUSO Responsabile Società Geografica Italiana

Segreteria Organizzativa

PAOLA GIAMBANCO ISPRA
MARIA CRISTINA TITTAFFERRANTE Società Geografica Italiana
PAOLO MORETTI ISPRA
GIUSEPPE ZARBO SIGEA

Comitato Tecnico Scientifico

ISPRA

STEFANIA NISIO (Coordinamento), CLAUDIO CAMPOBASSO, ROBERTO GRACIOTTI, EUTIZIO VITTORI, MARCO PANTALONI

SIGEA

ANTONELLO FIORE, GIUSEPPE GISOTTI, EUGENIO DI LORETO, MAURIZIO LANZINI, GIOACCHINO LENA, FRANCESCO DRAMIS, PIERO BELLOTTI

Società Geografica Italiana

ROSSELLA BELLUSO, FILIPPO BENCARDINO (Presidente)

Dipartimento Protezione Civile Nazionale

PAOLO GALLI

INGV

GIANLUCA VALENSISE, MARCO MARCHETTI, GIUSEPPE ETIOPE

EEDIS

EMANUELA GUIDOBONI

CNR

FABIO LUINO (CNR-IRPI Torino), GIANCARLO CIOTOLI (CNR-IGAG Roma), MAURIZIO LAZZARI (CNR-ISPC Potenza)

Università Sapienza

MAURIZIO DEL MONTE

Università Tor Vergata

LUISA CARBONE

Università Roma Tre

ROBERTO MAZZA, DONATELLA DE RITA

Università Tuscia Viterbo

SERGIO MADONNA

Università LUMSA

Prof. ANTONIO CIASCHI

Università Gabriele D'Annunzio Chieti

ALESSANDRO PAGLIAROLI

Università di Firenze

NICOLA CASAGLI

Società Geologica Italiana – Sezione Storia delle GeoScienze

ALESSIO ARGENTIERI

Variazioni del livello marino nel Mediterraneo: evidenze passate e scenari attesi nei prossimi anni

Sea level changes in the Mediterranean: past evidences and expected scenarios for the next years

ANZIDEI MARCO(*), VECCHIO ANTONIO(**)

RIASSUNTO - Il livello del mare non rimane costante ma cambia nel tempo da luogo a luogo in modo variabile. Le sue variazioni hanno modificato più volte la geografia delle coste globali e hanno influenzato le civiltà umane nel passato. Attualmente, sta aumentando con ritmo accelerato a causa del rapido riscaldamento globale e secondo gli scenari dell'IPCC per la fine di questo secolo potrà essere anche 1.1 m più alto di oggi. Per comprendere la variabilità presente e futura del livello marino è necessario prima di tutto individuare le variazioni passate. Le oscillazioni delle temperature globali, i fattori glacio-idro-isostatici e le deformazioni tettoniche, hanno un ruolo rilevante per delineare i cambiamenti passati e futuri. Diviene quindi importante analizzare le cause che contribuiscono alle variazioni osservate in modo da poter sviluppare modelli predittivi necessari per supportare i decisori politici in una pianificazione territoriale consapevole delle coste

PAROLE CHIAVE: livello del mare, deformazioni crostali, clima, IPCC

ABSTRACT - The sea level does not remain constant but changes over time from place to place in a variable way. Its variations have repeatedly changed the geography of global coasts and influenced human civilizations in the past. Currently, it is rising at an accelerated rate due to rapid global warming. According to the IPCC scenarios by the end of this century it could be up to about 1.1m higher than today. To understand the present and future variability of the sea level it is first necessary to identify

and understand past variations. Global temperature fluctuations, glacio-hydro-isostatic factors and tectonic deformations play an important role in delineating past and future changes. It is therefore important to analyse the causes that contribute to the observed changes in order to be able to develop predictive models necessary to support policy makers in a conscious territorial planning of the coasts.

KEY WORDS: Sea level, crustal deformations, climate, IPCC

1. - INTRODUZIONE

Nel 1802 James Hutton propose il principio dell'uniformitarismo, cioè che il passato è la chiave per comprendere il presente e che una trasformazione geologica avviene attraverso un lento e continuo processo. Nello stesso tempo, Charles Lyell, aveva intuito che il livello del mare era cambiato più volte nel passato e per questo nel suo libro *Principles of Geology* (1832), raffigurò le colonne romane del Macellum di Pozzuoli erose dai molluschi marini durante un periodo in cui questo era sommerso dal mare. Nel XIX secolo venne ipotizzata l'esistenza di periodi glaciali e cambiamenti

(*) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

(**) Radboud Radio Lab, Department of Astrophysics/IMAPP-Radboud University, P.O. Box 9010, 6500 GL Nijmegen, The Netherlands.

LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 Place Jules Janssen, 92195 Meudon, France

climatici globali in connessione con le variazioni dell'orbita terrestre, (AGASSIZ, 1840; CROLL, 1864, 1875; SUESS, 1906). Poiché l'orbita della Terra subisce variazioni periodiche di eccentricità, obliquità e precessione degli equinozi, MILANKOVITICH (1941) formulò la teoria astronomica delle ere glaciali, durante le quali variazioni astronomiche potevano produrre effetti significativi sulle temperature terrestri, influenzando l'estensione delle calotte glaciali. Vennero quindi calcolate periodicità di 100.000 anni per l'eccentricità, di 41.000 anni per l'obliquità e di 22.000 anni per la precessione durante le quali si sarebbero verificate oscillazioni delle temperature terrestri con conseguenze sul livello dei mari (BERGER, 1992; DALY, 1910, 1915, 1925). La presenza di fossili marini posti a quote diverse sulle coste del Mediterraneo, supportarono le ipotesi sulla correlazione tra livelli marini e glaciazioni (ZEUNER, 1945) mentre DALY (1934) e GUTENBERG (1941) intuirono che il sollevamento isostatico poteva essere associato alla fusione dei ghiacci. Negli anni '70, i sedimenti estratti dai fondi oceanici misero in evidenza l'esistenza di fluttuazioni periodiche degli oceani in relazione alle ere glaciali e le analisi dei rapporti isotopici dell'ossigeno nei foraminiferi mostrarono l'esistenza di oscillazioni sincrone tra volume degli oceani ed estensione di ghiacci continentali nel Quaternario (HAYS *et alii*, 1976; CHAPPELL & SHACKLETON, 1986; COLONNA *et alii*, 1996; EDWARDS *et alii*, 2004b).

Più recentemente, attraverso modelli geofisici (NAKADA & LAMBECK, 2005), è stato definito il contributo dell'effetto isostatico alle variazioni di livello marino. Da una parte agisce la parte glacio-isostatica, corrispondente agli effetti deformativi e gravitazionali sul livello del mare dal mutevole peso dei ghiacci; mentre dall'altra la parte idro-isostatica, corrispondente alle variazioni del carico oceanico. La prima è dominante nelle aree dove i ghiacci si sono ritirati. In assenza di processi tettonici, la causa principale del cambiamento globale dei passati livelli del mare è quindi associata alla crescita e al depauperamento delle calotte glaciali associate alle deformazioni della terra a causa dei mutevoli carichi superficiali di ghiaccio e acqua, che inducono anche un cambiamento di forma dei bacini oceanici (LAMBECK *et alii*, 2002a).

2. - I PASSATI LIVELLI MARINI NEL MEDITERRANEO

Durante gli ultimi 125.000 anni circa, l'area mediterranea è stata intensamente modellata dai processi geologici e dai cambiamenti climatici avvenuti nell'ultimo interglaciale (stadio climatico MIS 5e). In questo periodo, le coste hanno subito profondi cambiamenti a causa delle forti variazioni del livello marino causate primariamente dall'accrescimento e depauperamento delle calotte glaciali terrestri, che hanno avuto un culmine circa 20.000 anni fa (ALLEY,

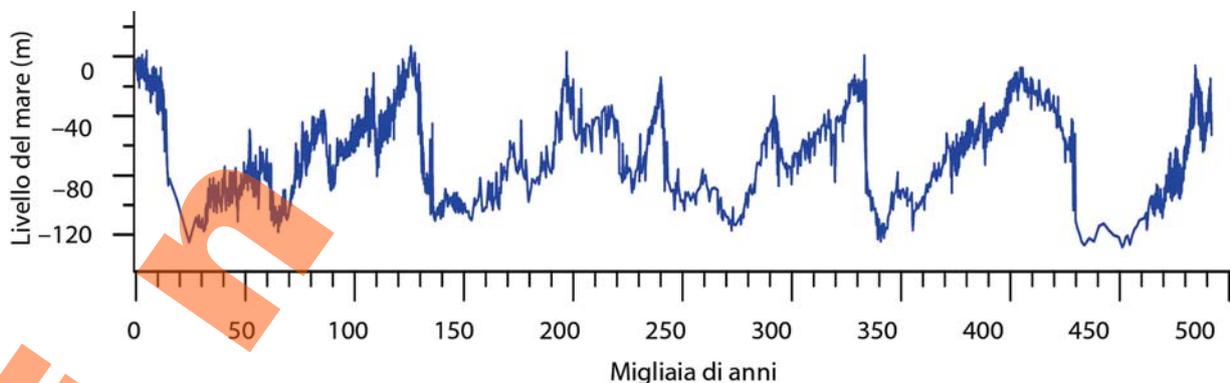


Fig. 1 - Variazioni del livello marino negli ultimi 500.000 anni, avvenute durante gli ultimi cinque cicli glaciali-interglaciali con fluttuazioni di oltre 100 metri. I picchi positivi corrispondono ai periodi caldi, quando il mare era più alto per la fusione dei ghiacci terrestri e dell'espansione termica della massa d'acqua oceanica. Si nota come durante l'ultimo interglaciale, tra 129.000 e 116.000 anni fa, il livello dei mari era circa 6-9 m più alto dell'attuale (Modificato da ANZIDEI *et alii*, 2019a).
 - Sea level changes in the last 500,000 years, during the last five glacial-interglacial cycles with fluctuations of over 100 meters. The highest peaks correspond to the warm periods, when the sea level was higher than today due to the melting of ice sheets and the thermal expansion of the oceanic water mass. It is worth noting that during the last interglacial, between 129,000 and 116,000 years ago, the sea level was about 6-9 m higher than today (Modified from ANZIDEI *et alii*, 2019a).

2005; HALLAM *et alii*, 1984; LAMBECK & CHAPPELL, 2001) (fig.1).

Durante l'ultimo massimo glaciale (LGM), circa 20.000 anni fa, il livello del mare era circa 130 m più basso di oggi a causa della grande quantità d'acqua assorbita dalle calotte glaciali (LAMBECK *et alii*, 2002b; PELTIER & FAIRBANKS, 2006). La ricostruzione delle coste globali in questo periodo è stata desunta da evidenze morfologiche sommerse e da analisi di

depositi biologici marini (JONGSMA, 1970; VEEH & VEEVERS, 1970). Dopo il picco dell'ultima glaciazione, la rapida fusione delle calotte polari ha portato a sommergere vaste aree continentali (YOKOYAMA *et alii*, 2000; CLARK *et alii*, 2004).

Le variazioni di livello marino si possono desumere lungo le coste da indicatori geomorfologici, biologici, archeologici e storici, che forniscono misure relative e danno informazioni sui rapporti esi-

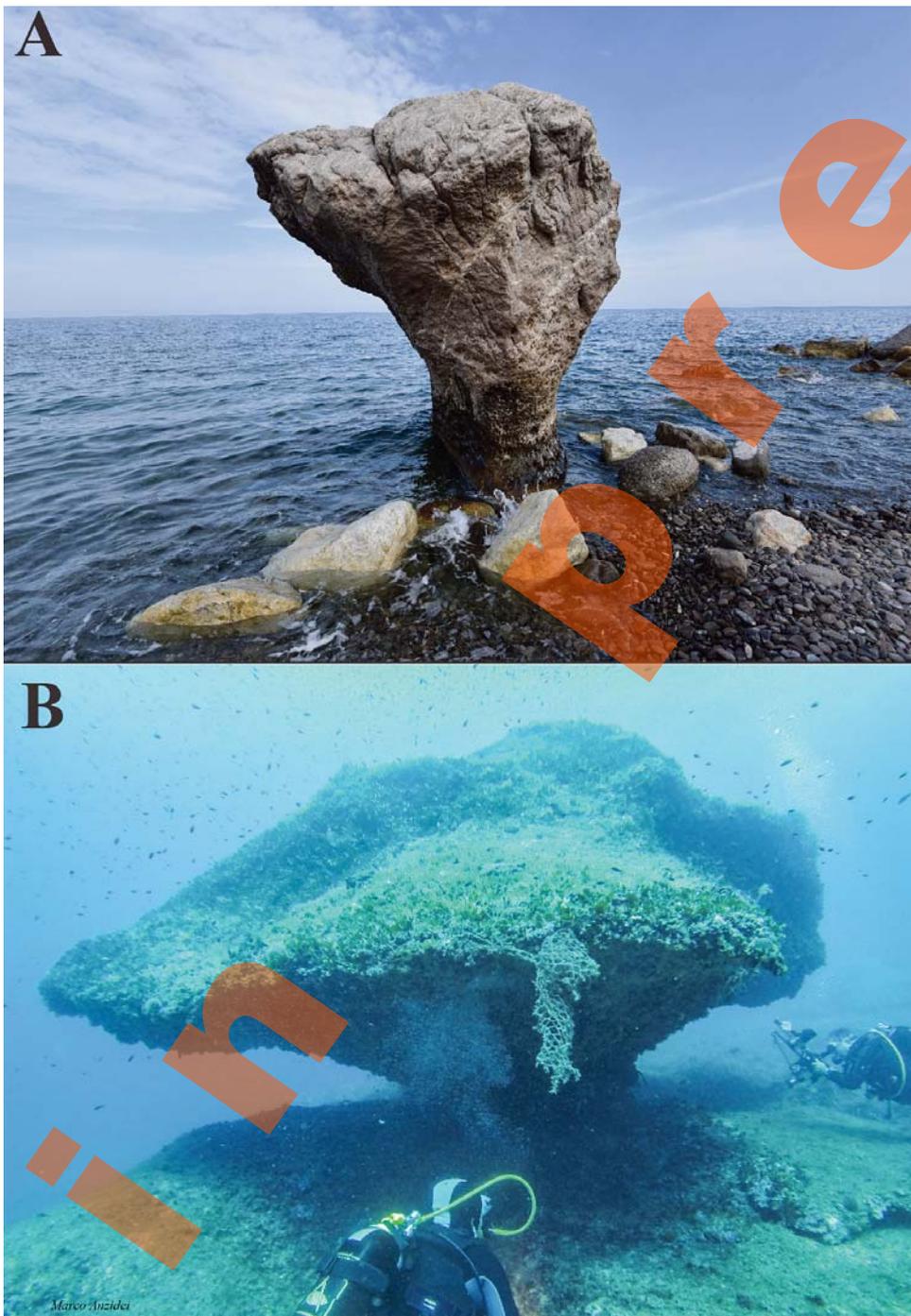


Fig. 2 - Passati e presenti livelli marini. Due morfologie di erosione sulla linea di costa: le rocce a fungo che si trovano in: a) Calabria, attualmente al livello del mare; b) isola di Tavolara (Sardegna), sommerso alla profondità di -24 m (ANTONIOLI *et alii*, 2017) (Foto Marco Anzidei).

- Past and present sea levels. Two forms of erosion on the coast line: the mushroom rocks found at: a) Capo Spulico, in Calabria, currently at sea level and b) Tavolara island (Sardinia), submerged at a depth of -24 m (ANTONIOLI *et alii*, 2017) (Photo Marco Anzidei).



Fig. 3 - Foto aerea della peschiera di Santa Liberata (Argentario). Si notano le spesse mura perimetrali atte a proteggere dai marosi la vasca interna dove veniva allevato il pesce. Lo scambio di acqua con il mare aperto avveniva attraverso un sistema di canali attraverso i quali fluiva l'acqua marina grazie alle oscillazioni di marea (Foto Marco Anzidei - Rai Linea Blu).

- Aerial photo of the Santa Liberata fish tank (Argentario). Note the thick external walls designed to protect the internal pool from the waves, where the fish were raised. The exchange of water with the open sea took place through a channel system through which sea water flowed thanks to tidal fluctuations (Photo Marco Anzidei - Rai Linea Blu).

stenti tra il livello medio del mare e la costa (fig. 2, 3). Queste dipendono da fattori globali, regionali e locali e contengono quindi informazioni sui movimenti tettonici verticali delle coste, le variazioni del geoide, sui cambiamenti di volume degli oceani e sulla distribuzione dell'acqua all'interno dei bacini oceanici (LAMBECK *et alii*, 2010; VACCHI *et alii*, 2016).

I movimenti tettonici verticali possono causare forti variazioni del livello del mare locale creando morfologie tipiche, come ad es. i terrazzi marini e i solchi di battente (che si formano per azione meccanica e chimica, come illustrato in ANTONIOLI *et alii*, 2015). Dei primi, sono esemplari quelli sollevati della Calabria. Dei secondi, quelli del Golfo di Corinto (PIRAZZOLI, 1994), Rodi (VILLY *et alii*, 2002) e Sicilia orientale (ANTONIOLI *et alii*, 2003). Solchi sommersi si trovano ad es. nella Francia meridionale, in Sicilia settentrionale e in Sardegna

(ANTONIOLI *et alii*, 2017). In alcuni casi, la deformazione tettonica verticale può essere misurata con precisione da resti archeologici, come il porto romano di Falasarna, a Creta (PIRAZZOLI *et alii*, 1992; SHAW *et alii*, 2008), oggi sollevato di circa 8 m sul livello del mare in seguito alle deformazioni cosismiche associate al forte terremoto del 365 d.C. Oltre ai sollevamenti tettonici, si possono verificare anche movimenti subsidenti, come nella laguna veneta (VECCHIO *et alii*, 2019; CARBOGNIN *et alii*, 2010), in Turchia (ANZIDEI *et alii*, 2011), Grecia (MOURTZAS *et alii*, 2016), ai Campi Flegrei (PARASCANDOLA, 1947; DVORAK & MASTROLORENZO, 1991; MORHANGE *et alii*, 1999, 2006) e alle isole Eolie (TALLARICO *et alii*, 2003; ANZIDEI *et alii*, 2014a, 2016).

I valori dei tassi di velocità verticale delle coste del Mediterraneo stimati da dati geodetici, sismici e

dalle osservazioni archeologiche (ANZIDEI *et alii*, 2014b), mostrano un buon accordo tra loro. Ad esempio, nell'area tettonica di Alicante (Spagna), il sollevamento tettonico è evidenziato allo stesso modo dai dati geodetici (GIMENEZ *et alii*, 2000) e dagli indicatori archeologici (ANZIDEI *et alii*, 2014b) su finestre temporali differenti. Un comportamento tettonico simile si verifica in Calabria meridionale, presso Briatico, dove si osserva un equilibrio tra sollevamento tettonico e cambiamento di livello marino, come desunto dalla peschiera romana dello Scoglio Galera che potrebbe essere funzionante ancora oggi (ANZIDEI *et alii*, 2013).

3. - INDICATORI

Gli indicatori di paleo-livello marino forniscono dati sulla entità di sommersione ed emersione delle coste. Questi possono essere formazioni sedimentarie, forme erosive, resti biologici, fossili e strutture archeologiche (LAMBECK *et alii*, 2010). Tra i vari indicatori disponibili nel Mediterraneo, le cui coste preservano i resti dell'attività umana dall'ultimo massimo glaciale, i dati archeologici hanno fornito dati dettagliati, in particolare per gli ultimi 2000 anni (LAMBECK *et alii*, 2010; ANZIDEI *et alii*, 2014b e relativi riferimenti bibliografici).

Durante il periodo interglaciale del MIS 5e (125.000 anni fa circa), il livello del mare globale era 5-7 m più alto di oggi (KOPP *et alii*, 2009; DUTTON & LAMBECK, 2012), sebbene con una certa variabilità spaziale dovuta ad effetti tettonici e glacio-idro-isostatici (LAMBECK *et alii*, 2012; FERRANTI *et alii*, 2010). Livelli marini del MIS 5e posti a quote più alte di quelle normali, si trovano nello Stretto di Gibilterra (ZAZO *et alii*, 1999), nel Golfo di Corinto (ROBERTS *et alii*, 2009), in Sicilia nord-orientale, in Calabria sud-occidentale e nel Golfo di Taranto (FERRANTI *et alii*, 2010). In altre parti del Mediterraneo, come in Africa settentrionale, dalla Tunisia alla Libia, in Sardegna e costa del Levante, il MIS 5e si trova entro 7 m sopra il livello del mare attuale, tranne che presso Monastir, in Tunisia, dove si rinviene fino a 32 m di quota in conseguenza di un sollevamento tettonico locale

(ANZIDEI *et alii*, 2011a; BOUAZIZ *et alii*, 2003; JEDOUÏ *et alii*, 2003a, b; GALILI *et alii*, 2007). Non si rinviene invece in altri luoghi, come nel Mar Egeo, in Adriatico (BRUCKNER, 2002; LAMBECK *et alii*, 2011) e in Turchia sud-occidentale, perché non si è conservato o è sommerso a causa della subsidenza tettonica (ANZIDEI *et alii*, 2011b). In Italia, il MIS 5e è posto nell'intervallo 3-7 m in molte località, come ad es. in gran parte della costa tirrenica. In altre zone si può discostare in modo significativo da questa quota, come in Calabria, dove i tassi di sollevamento sono i più elevati del Mediterraneo (FERRANTI *et alii*, 2010; ANTONIOLI *et alii*, 2015).

Sebbene nel Mediterraneo esistano numerosi resti archeologici marittimi, solo una parte di questi può essere utilizzata per ottenere informazioni precise sul loro rapporto con il livello del mare antico, principalmente a causa del loro cattivo stato di conservazione o perché costruiti in zone geologicamente instabili. Quando in buono stato di conservazione, questi permettono la stima delle variazioni del livello del mare. In particolare, quelli che erano posti in terraferma ma che ora sono sommersi e quelli che sono stati costruiti con un preciso rapporto con il livello medio del mare ma che ora non sono più funzionanti. Alla prima categoria appartengono ad es. i dipinti rupestri nella grotta Cosquer, in Francia, (CLOTTE & COURTIN, 1994; CLOTTE *et alii*, 1997) e siti neolitici (ANTONIOLI *et alii*, 1996), ora allagati dal mare. Alla seconda, appartengono le peschiere romane, gli scivoli di alaggio, porti e cave, generalmente datati fino a 2.500 anni fa (BLACKMAN, 1973; FLEMMING & WEBB, 1986; LAMBECK *et alii*, 2010). Di questi, i più precisi sono le peschiere romane che vennero in gran parte costruite tra il I secolo a.C. e il I secolo d.C. in tutto il Mediterraneo, secondo un preciso rapporto con il livello medio del mare. Le loro caratteristiche costruttive e l'utilizzo sono ben documentate negli scritti degli autori latini come Plinio, Varrone e Columella, che ne descrissero l'uso come vasche per la piscicoltura che venivano costruite (*in litore constructa*) o scavate nella roccia costiera (*ex petra excisa*) fino alla profondità di 2.7 m (*in pedes novem defodiuntur piscina*). Il livello dell'acqua all'interno delle vasche era controllato dal flusso delle

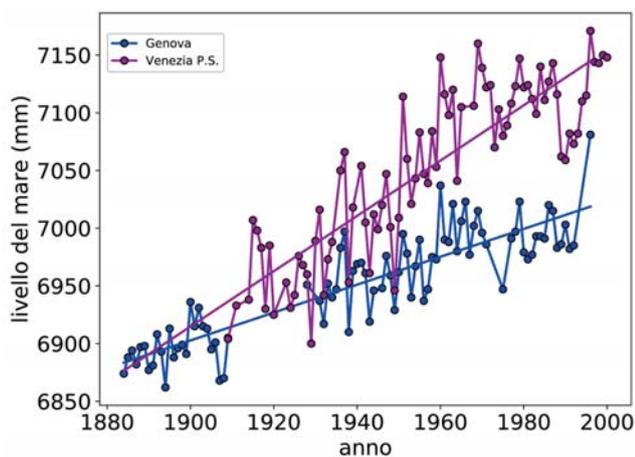


Fig. 4 - Andamento del livello marino ai mareografi di Genova e Venezia Punta della Salute, che hanno tra le più lunghe registrazioni del Mediterraneo. Si noti la differenza di trend, più marcata per quello di Venezia (2.5 mm/anno dal 1914 a oggi), a causa della subsidenza. Il mareografo di Genova (1.2 mm/anno a partire dal 1931), posto in zona stabile, è più rappresentativo dell'andamento eustatico del Mediterraneo. Le rette in figura mostrano le regressioni lineari sui dati, che rappresentano l'andamento medio del livello marino in questa due località (modificata da ANZIDEI *et alii*, 2019a).

- Sea level trend at the tide gauge of Genoa and Venice Punta della Salute, which have among the longest records in the Mediterranean. Note the difference in trend, more marked for that of Venice (2.5 mm/year from 1914 to today), due to land subsidence. The Genoa tide gauge (1.2 mm/year starting from 1931), placed in a stable area, is more representative of the Mediterranean eustatic trend. The lines in the figure show the linear regressions on the data, which represent the average sea level trend in this two locations (modified from Anzidei *et alii*, 2019a).

maree ed erano protette dai marosi da alti muri perimetrali (*Mox praeiaciuntur in gyrum moles, ita ut complectantur sinu suo et tamen excedant stagni modum*). I canali per lo scambio dell'acqua con la marea all'interno delle vasche, paratoie, soglie e altre caratteristiche costruttive, permettono di ricostruire il livello medio marino in epoca romana con un'incertezza di 20 cm (LAMBECK *et alii*, 2004b). Pozzi, come quelli sommersi al largo della costa di Israele, si limitano invece ad indicare un aumento graduale del livello del mare negli ultimi 8000 anni (SIVAN *et alii*, 2001; 2004). Il livello del mare antico può essere desunto dalle "quote funzionali". Queste sono definite dalla quota di specifiche parti architettoniche rispetto al livello medio del mare locale al momento del loro funzionamento e forniscono un piano di riferimento altimetrico per determinare la variazione del livello del mare. Dipendono dal tipo di struttura, dall'utilizzo e dall'ampiezza di marea locale (LAMBECK *et alii*, 2004b; LAMBECK *et alii*, 2019; AURIEMMA E SOLINAS, 2009).

Le evidenze archeologiche forniscono dati affidabili sulle variazioni del livello del mare in tutto il Mediterraneo (fig. 3). Ad esempio, in Tunisia (SLIM *et alii*, 2004; ANZIDEI *et alii*, 2011), Turchia (ANZIDEI *et alii*, 2011), Francia (MORHANGE *et alii*, 2001), Libano (MARRINER *et alii*, 2006) e Israele (ANZIDEI *et alii*, 2011; SIVAN *et alii*, 2004).

Le peschiere e i porti di epoca romana hanno quindi fornito i migliori dati sul livello del mare di circa 2000 anni fa lungo molte coste del Mediterraneo (AURIEMMA & SOLINAS 2009; LAMBECK *et alii*, 2004b; SLIM *et alii*, 2004; ANZIDEI *et alii*, 2011a; ANZIDEI *et alii*, 2011; MORHANGE *et alii*, 2001; PAVLOPOULOS 2010; MOURTZAS 2012; ANZIDEI *et alii* 2011b), oltre a dati sui movimenti tettonici verticali in aree vulcaniche come alle isole Eolie (TALLARICO *et alii*, 2003; ANZIDEI *et alii*, 2014; 2016) e ai Campi Flegrei (DVORAK & MASTROLORENZO, 1991; AUCELLI *et alii*, 2020). Nella prima, un molo sommerso di circa 2000 anni indica una subsidenza di circa 3,75 m, mentre nella seconda, la città di Baia venne sommersa dopo il IV secolo d.C. Negli altri siti il cambiamento del livello marino negli ultimi 2000 anni circa è stato molto minore. A Israele, ad esempio, i dati archeologici indicano che il mare ha raggiunto un livello vicino a quello attuale circa 2000 anni fa, come mostrato da alcune peschiere poste vicine alla loro quota originale rispetto al livello del mare (SIVAN *et alii*, 2001, 2004; TOKER *et alii*, 2011). Recenti scoperte hanno stimato che in Puglia il livello del mare locale è aumentato di circa 55 cm dal periodo caldo medievale (PAGLIARULO *et alii*, 2013), mentre porti dell'età del bronzo (3600 anni B.P.), situati nella costa del Levante del Mediterraneo (KRAFT *et alii*, 2003), indicano una sommersione di circa 3 m (MARRINER *et alii*, 2006). Le peschiere romane della costa tirrenica mostrano una generale sommersione e il livello del mare è aumentato localmente di circa 1.35 m negli ultimi 2000 anni. La maggior parte del cambiamento è stata attribuita al contributo isostatico mentre solo una parte al contributo eustatico (0.13 ± 0.09 m), indicando che il mare è iniziato ad aumentare solo 100 ± 50 anni fa circa (LAMBECK *et alii*, 2004b). L' aumento del livello del

Mediterraneo dal termine del LGM dipende dall'intensità e della variabilità spaziale dell'effetto isostatico. A tale riguardo, dati e modelli indicano che questo è dapprima salito velocemente per poi rallentare, aumentando di circa 3 m tra 7000 e 3000 anni fa. Negli ultimi secoli è rimasto abbastanza stabile per poi aumentare nuovamente con l'inizio dell'era industriale (LAMBECK & PURCELL, 2005; YU *et alii*, 2007; CHURCH *et alii*, 2013b).

4. - TREND ATTUALE E LIVELLO DEL MARE ATTESO NEL 2100

Le analisi dei dati mareografici e satellitari dei radar altimetri, mostrano che dopo alcuni secoli di relativa stabilità, dal 1880 in poi il livello marino ha iniziato ad aumentare costantemente, crescendo di 14-17 cm durante il XX secolo. Attualmente il livello marino sta salendo alla velocità di circa 3.2 - 3.4 mm/anno quindi di oltre 30 cm al secolo (CHURCH *et alii*, 2013b; OPPENHEIMER *et alii*, 2019; KOPP *et alii*, 2014). Nello stesso tempo, il mare Mediterraneo, sta aumentando di circa 2 mm/anno (18 cm per secolo) (VECCHIO *et alii*, 2019; ANZIDEI *et alii*, 2014; WOPPELMAN & MARCOS, 2012) (fig. 4). Gli aumenti osservati rappresentano un fattore di rischio per molte zone costiere che sono già in forte erosione.

Come per il passato, il riscaldamento climatico globale gioca un ruolo principale nell'aumento che stiamo osservando, causando la fusione dei ghiacci continentali e l'espansione termica degli oceani. Nell'ultimo rapporto dell'IPCC (SROCC 2019, OPPENHEIMER *et alii*, 2019), vengono illustrate le relazioni tra gas serra, aumento delle temperature globali e aumento del livello marino. In particolare, se non verranno ridotte le emissioni di gas serra, il livello del mare potrebbe salire fino a 1.1 m nel 2100 e di vari metri nei due-tre secoli successivi (fig. 5).

Le proiezioni di livello marino per i prossimi decenni per differenti scenari climatici definiti dall'Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC, www.ipcc.ch) (RCP 2.6, 6, 4.5, 8.5 cioè i Percorsi Rappresentativi di Concentrazione - *Representative Concentration Pathways* - , che indicano l'andamento

rappresentativo delle concentrazioni dei gas serra e degli aerosol per un determinato obiettivo climatico che dipende dal forzante radiativo ipotizzato nel 2100. Questo, a sua volta, dipende dall'andamento delle emissioni in atmosfera causate dalle attività umane), delineano a loro volta scenari di allagamento marino con conseguenti impatti sulle coste globali, in particolare quelle caratterizzate da bassa topografia e da subsidenza naturale o antropica, capace di accelerare il processo di aumento locale.

Nel Mediterraneo, i recenti progetti SAVE-MEDCOASTS (www.savemedcoasts.eu) e SAVE-MEDCOASTS2 (www.savemedcoasts2.eu), coordinati dall'INGV e finanziati dalla Unione Europea (DG-ECHO), stanno fornendo nuove informazioni sugli scenari attesi nel Mediterraneo. Sono

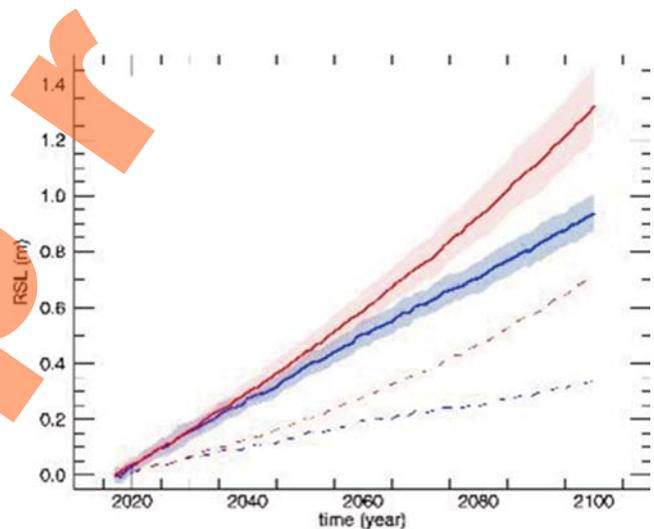


Fig. 5 - Esempio di proiezione relativa di livello del mare negli scenari climatici RCP2.6 (blu, meno critico) e 8.5 (rosso, più critico) per una zona costiera fittizia del Mediterraneo centrale. Il calcolo è rispetto alle proiezioni IUPCC del report SROCC 2019 e tiene in considerazione la velocità di subsidenza del sito in studio, stimata attraverso dati geodetici o geologici (in questo caso 5 mm/anno). Le bande colorate evidenziano l'intervallo di confidenza del 90%. Le linee tratteggiate corrispondono alle proiezioni SROCC grezze quando non è inclusa la subsidenza. Le variazioni su piccola scala osservate nei dati sono correlate al contributo della componente oceanica che tiene conto degli effetti dell'SSH dinamico, dell'anomalia termostericale globale dell'SSH e degli effetti barometrici inversi (Modificato da VECCHIO *et alii*, 2019).

- Example of relative sea level projection for RCP2.6 (blue, less critical) and 8.5 (red, more critical) climate scenarios for a fictitious coastal zone in the central Mediterranean. The calculation follows the IPCC projections of the SROCC 2019 report and takes into account the subsidence rate of the site under study, estimated through geodetic or geological data (in this case 5 mm / year). The colored bands highlight the 90% confidence interval. Dashed lines correspond to raw SROCC projections when subsidence is not included. The small-scale variations observed in the data are related to the contribution of the oceanic component which takes into account the effects of dynamic SSH, the global thermosteric anomaly of SSH and the inverse barometric effects (Modified from Vecchio *et alii*, 2019).

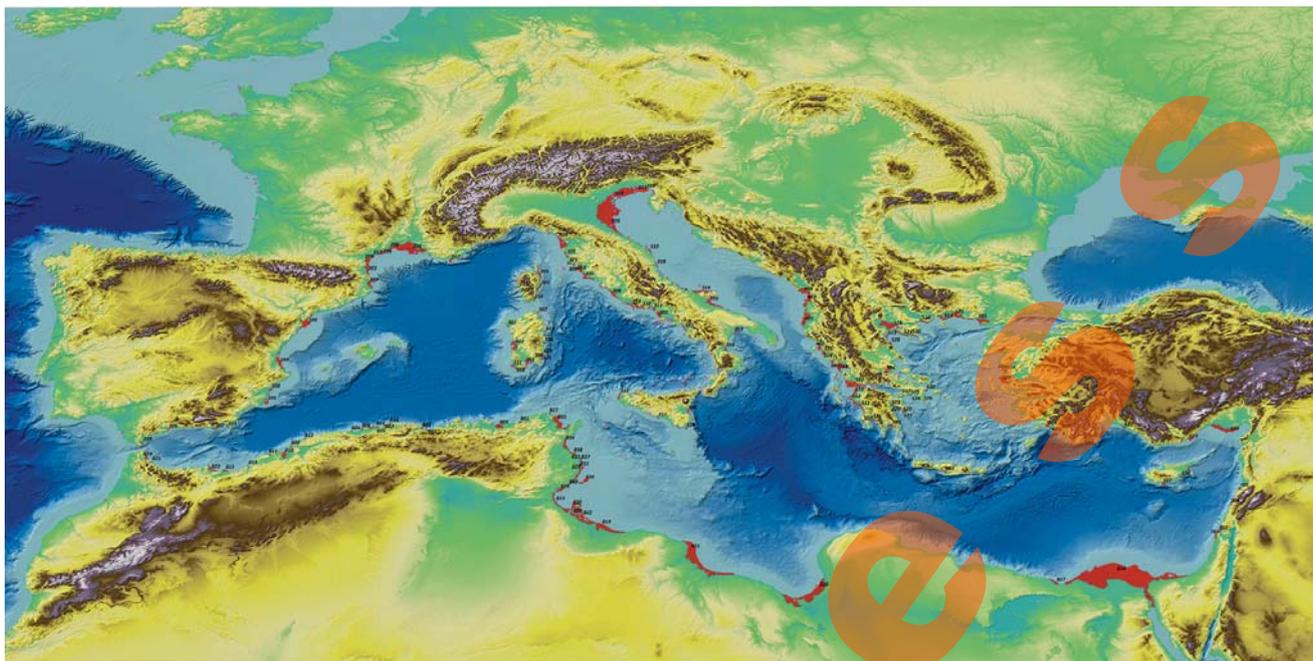


Fig. 6 - Le zone costiere a rischio inondazione marina nel Mediterraneo. Si tratta di 163 pianure costiere principali poste a meno di 2 m di quota sul livello del mare attuale (www.savemedcoasts.eu; ANZIDEI, 2018).

- SAVEMEDCOASTS has identified 163 main coastal plains (in red) located at less than 2 m above current sea level which are prone to be flooded by the sea in 2100 (www.savemedcoasts.eu; ANZIDEI, 2018),

state individuate 163 zone costiere principali poste a meno di 2 m sul livello del mare più esposte ai prossimi cambiamenti. La superficie totale che potrebbe essere sottratta alla terraferma corrisponde a 38500 Km² pari a circa 5.5 milioni di campi di calcio (ANZIDEI *et alii*, 2018) (fig. 6). Tra queste, sono state individuate zone a maggiore rischio (siti UNESCO e aree naturali in particolare soggette a subsidenza), che corrispondono ai maggiori delta fluviali (Ebro, Rodano, Po e Nilo), lagune costiere (laguna veneta) e aree di bonifica (Basento). L'obiettivo è di aumentare la consapevolezza del rischio costiero nelle popolazioni che vivono vicino al livello del mare, fornendo scenari multi-temporali e multi-rischio che derivano dai cambiamenti costieri attesi fino al 2100. Gli scenari si basano su modelli digitali ad alta risoluzione della fascia costiera, velocità di subsidenza calcolata da dati acquisiti da terra e dallo spazio e proiezioni di aumento locale del livello del mare. I risultati, che si stanno già distribuendo agli stakeholder, saranno di supporto per i responsabili decisionali al fine di individuare nuove strategie volte a mitigare gli ef-

fetti attesi nei prossimi anni lungo le coste, in particolare quelle densamente popolate e di alto valore economico, culturale e ambientale.

5. - CONCLUSIONI

Nell'Eocene (40 milioni di anni fa), si stima che la temperatura globale fosse di circa 19°C e il livello marino era circa 70 m più alto di oggi. Intorno a 3 milioni di anni fa (nel Pliocene) la temperatura media del pianeta era più alta di circa 3°C rispetto a quella odierna (15°C) e il mare era anche 40 m più alto di oggi. Durante il MIS 5e, 125.000 anni fa, la temperatura era simile a quella odierna (solo 1°C più alta) ma il livello marino era 6-9 m più alto di oggi. Durante l'ultimo massimo glaciale di 20.000 anni fa, la temperatura era invece circa 6°C più bassa di oggi (9°C) e il mare era ben 120 m più basso di oggi (DUTTON *et alii*, 2015). Dopo quest'ultima fase climatica, il livello del mare è aumentato rapidamente insieme all'aumento delle temperature, avvicinandosi al livello attuale. Nel periodo compreso tra 7000 e

2000-3000 anni fa il livello del mare è salito di 2-3 m ed è rimasto circa costante tra 2000 e 3000 anni fa, prima di iniziare ad aumentare nuovamente dal 1880 (CHURCH *et alii*, 2013). E' quindi evidente la stretta relazione esistente tra temperatura media globale e livello marino. Ciò appare di nuovo dal confronto tra i dati archeologici e quelli strumentali dei mareografi. Da questi è stato possibile stimare che l'attuale aumento è iniziato 100 ± 50 anni fa con velocità maggiore rispetto agli ultimi secoli.

Le proiezioni dell'aumento globale del livello del mare per il 2100 fissate dall'IPCC entro il limite massimo di 1.1 m, costituiscono un fattore di rischio per molte zone costiere, anche in assenza di subsidenza (ma secondo alcuni studi questa proiezione potrebbe essere troppo conservativa e il mare potrebbe salire tra 62 e 238 cm nel 2100 se la temperatura globale aumentasse fino a 5 °C). Tuttavia, si deve considerare che se anche riuscissimo a contenere le emissioni di gas serra in atmosfera, il livello del mare continuerebbe a crescere con impatti importanti lungo le coste, inondando vaste aree costiere (la concentrazione di CO₂ ha raggiunto i livelli più alti negli ultimi 3 milioni di anni, pari a oltre 408 ppm rispetto ai 410 ppm del Pliocene). Anche per proiezioni di aumento più contenute, i movimenti subsidenti produrranno un importante contributo al livello del mare locale. Gli scenari per il 2100, calcolati considerando solamente i tassi di subsidenza desunti dai dati geologici di lungo periodo (MIS 5e), possono portare a sottostimare gli scenari di allagamento. Oggi è infatti più efficace avvalersi di dati geodetici di stazioni GNSS possibilmente co-locate con stazioni mareografiche per monitorare le velocità relative al livello del mare, anche in combinazione con i dati spaziali di radar altimetri e satelliti InSAR, per realizzare proiezioni locali e scenari di aumento di livello marino ad alta risoluzione temporale e spaziale.

Mappe ad alta risoluzione di scenari multi-temporali di inondazione marina basate su questi dati, possono infatti descrivere in modo più realistico gli scenari attesi per il 2100 per quelle zone costiere più esposte al fenomeno (ANZIDEI *et alii*, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021; ANTONIOLI *et alii*, 2017, 2020; LAMBECK *et alii*, 2011; RAVANELLI *et alii*, 2019). Ad

es., nella laguna veneta, dove la subsidenza sta aumentando localmente il livello del mare, diviene importante tenere conto dei dati di velocità verticali del suolo misurate in quest'area dai sistemi osservativi geodetici (reti GNSS, mareografiche, dati telerilevati). Le analisi mostrano che il livello del mare relativo potrà superare 1 m nel 2100 per lo scenario RCP8.5.

Il contributo di effetti locali, come la variabilità naturale del livello marino e la subsidenza, giocano un ruolo chiave nelle proiezioni locali. Gli effetti sono ancora più rilevanti per le zone costiere basse, dove l'ingressione marina può rappresentare un potenziale pericolo per l'ambiente e le attività umane. Anche nello scenario più ottimistico, l'aumento stimato del livello del mare avrà un impatto importante su molte aree costiere, aumentando la pericolosità legata a eventi di inondazioni, mareggiate e tsunami. In aree subsidenti, si possono ragionevolmente prevedere importanti impatti ambientali con conseguente perdita di valore economico già prima del 2100. A questo proposito, i pianificatori territoriali dovrebbero tenere conto gli studi scientifici per una gestione consapevole delle coste.

BIBLIOGRAFIA

- AGASSIZ L. (1840) - *On glaciers and the evidence of their having once existed in Scotland, Ireland and England*. Proceedings of the Geological Society of London **3**, 327-332.
- ALLEY R.B., CLARK P.U., HUYBRECHTS P. & JOUGHIN I. (2005) - *Ice-sheets and sea-level changes*. Science **310**, 456-460.
- ANTONIOLI F., DE FALCO G., PRESTI V.L., MORETTI L., SCARDINO G., ANZIDEI M., BONALDO D., CARNIEL S., LEONI G., FURLANI S., MARSICO A., PETITTA M., RANDAZZO G. & SCICCHITANO G. (2020) - *Relative Sea-Level Rise and Potential Submersion Risk for 2100 on 16 Coastal Plains of the Mediterranean Sea*. Water **12**, 2173. doi:10.3390/w12082173.
- ANTONIOLI F., FERRANTI L., DEIANA G., LO PRESTI V., FURLANI S., MARINO C., ORRÙ P., SCICCHITANO G., TRAINITO E., ANZIDEI M., BONAMINI M., SANSÒ P. & MASTRONUZZI G. (2018) - *Morphometry and elevation of the last interglacial tidal notches in tectonically stable coasts of the Mediterranean Sea*. Earth Science Reviews, 185, 600-623. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.017>.
- ANTONIOLI F., ANZIDEI M., LO PRESTI V., SCICCHITANO G., SPAMPINATO C.R., TRAINITO E. & FURLANI S. (2017) - *Ano-*

- molous multi-origin marine notch sites: Three case studies in the central Mediterranean Sea*, *Quaternary International*, **439**, 4-16. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.02.037>.
- ANTONIOLI F., ANZIDEI M., AMOROSI A., LO PRESTI V., MASTRONUZZI G., DEIANA G., DE FALCO G., FONTANA A., FONTOLAN G. & LISCO S. (2017) - *Sea-level rise and potential drowning of the Italian coastal plains: Flooding risk scenarios for 2100*. *Quat. Sci. Rev.* **158**, 29-43. doi:10.1016/j.quascirev.2016.12.021.
- ANTONIOLI F., LO PRESTI V., ROVERE A., FERRANTI L., ANZIDEI M., FURLANI S., MASTRONUZZI G., ORRU P.E., SCICCHITANO G., SANNINO G., SPAMPINATO C.R., PAGLIARULO R., DEIANA G., DE SABATA E., SANSÒ P., VACCHI M. & VECCHIO A. (2015) - *Tidal notches in Mediterranean Sea: a comprehensive analysis*. *Quaternary Science Reviews*, **119**, 66 - 84. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.016>.
- ANTONIOLI F., KERSHAW S., RUST D. & VERRUBBI V. (2003) - *Holocene sea-level change in Sicily, and its implications for tectonic models: new data from the Taormina area, NE Sicily*. *Marine Geology* **196**, 53-71.
- ANTONIOLI F., FERRANTI L. & LO SCHIAVO F. (1996) - *The submerged Neolithic burials of the Grotta Verde at Capo Caccia (Sardinia, Italy) implication for the Holocene sea-level rise*. *Mem. Descr. del Serv. Geol. d'Italia* **52**, 329-336.
- ANZIDEI M., SCICCHITANO G., SCARDINO G., BIGNAMI C., TOLOMEI C., VECCHIO A., SERPELLONI E., DE SANTIS V., MONACO C., MILELLA M., PISCITELLI A. & MASTRONUZZI G. (2021) - *Relative Sea-Level Rise Scenario for 2100 along the Coast of South Eastern Sicily (Italy) by InSAR Data, Satellite Images and High-Resolution Topography*. *Remote sensing*, in stampa.
- ANZIDEI M., VECCHIO A. & FLORINDO F. (2020a) - *Venezia Affonda*. *Le Scienze*, **619**, 36-43.
- ANZIDEI M., DOUMAZ F., VECCHIO A., SERPELLONI E., PIZZIMENTI L., CIVICO R., GRECO M., MARTINO G. & ENEI F. (2020b) - *Sea Level Rise Scenario for 2100 A.D. in the Heritage Site of Pyrgi (Santa Severa, Italy)*. *Journal of Marine Science and Eng.* **8**, 64, doi:10.3390/jmse8020064.
- ANZIDEI M., SCICCHITANO G., TARASCIO S., DE GUIDI G., MONACO C., BARRECA G., MAZZA G., SERPELLONI E. & VECCHIO A. (2019) - *Coastal retreat and marine flooding scenario for 2100: A case study along the coast of Maddalena Peninsula (southeastern Sicily)*. *Geografia Fisica Dinamica Quaternaria*, **41**, 5-16, doi:10.4461/GFDQ.2018.41.9.
- ANZIDEI M. (2018) - *SAVEMEDCOASTS. Un progetto europeo di protezione civile per la valutazione degli impatti di aumento del livello marino e dei rischi costieri nel Mediterraneo*. *Geomedia*, **22**, 6. <https://doi.org/10.48258/geo.v22i6.1612>.
- ANZIDEI M., BOSMAN A., CARLUCCIO R., CASALBORE D., CARACCILO F.D., ESPOSITO A., NICOLOSI L., PIETRANTONIO G., VECCHIO A. & CARMISCIANO C. (2017) - *Flooding scenarios due to land subsidence and sea-level rise: A case study for Lipari Island (Italy)*. *Terra Nova*, **29**, 44-51, doi:10.1111/ter.12246.
- ANZIDEI M., BOSMAN A., CASALBORE D., TUSA S. & LA ROCCA R. (2016) - *New insights on the subsidence of Lipari island (Aeolian islands, southern Italy) from the submerged Roman age pier at Marina Lunga*, *Quaternary International*, **401**, 2016, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.003>.
- ANZIDEI M., ESPOSITO A. & BENINI A. (2014a) - *Evidence of active subsidence at Basiluzzo island (Aeolian islands, southern Italy) inferred from a Roman age wharf*. *Quaternary International*, **332**, 143-150, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.03.019>.
- ANZIDEI M., LAMBECK K., ANTONIOLI F., FURLANI S., MASTRONUZZI G., SERPELLONI E. & VANNUCCI G. (2014b) - *Coastal Structure, Sea-level Changes and Vertical Motion of the Land in the Mediterranean*. Geological Society, London, p. 388. <http://dx.doi.org/10.1144/SP388.20>. Special Publications.
- ANZIDEI M., ANTONIOLI F., BENINI A., GERVAZI A. & GUERRA I. (2013) - *Evidence of vertical tectonic uplift at Briatico (Calabria, Italy) inferred from Roman age maritime archaeological indicators*. *Quaternary International*, **288**, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.01.019>.
- ANZIDEI M., ANTONIOLI F., LAMBECK K., BENINI A. & SOUSSI M. (2011a) - *New insights on the relative sea level change during Holocene along the coasts of Tunisia and western Libya from archaeological and geomorphological markers*. *Quaternary International*, **232**, 5-12.
- ANZIDEI M., ANTONIOLI F., BENINI A., LAMBECK K., SIVAN D., SERPELLONI E. & STOCCHI P. (2011b) - *Sea level change and vertical land movements since the last two millennia along the coasts of south western Turkey and Israel*. *Quaternary International*, **232**, 1-2, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.05.005>.
- AUCELLI P.P.C., MATTEI G., CAPORIZZO C., CINQUE A., TROISI S., PELUSO F., STEFANILE, M. & PAPPONE G. (2020) - *Ancient Coastal Changes Due to Ground Movements and Human Interventions in the Roman Portus Julius (Pozzuoli Gulf, Italy): Results from Photogrammetric and Direct Surveys*. *Water* **12**, 658. <https://doi.org/10.3390/w12030658>.
- AURIEMMA R. & SOLINAS E. (2009) - *Archaeological remains as sea level change markers: a review*. *Quaternary International*, **206**, 134-146. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.11.012>.
- BERGER A.L. (1992) - *Astronomical theory of paleoclimates and the last glacial-interglacial cycle*. *Quaternary Science Reviews* **11**, 571-580.
- BLACKMAN, D.J. (1973) - *Evidence of sea level change in ancient harbours and coastal installations*. *Marine Archaeology Colston pap.*, **23**, 114-117.
- CARBOGNIN L., TEATINI P., TOMASIN A. & TOSI L. (2010) - *Global change and relative sea level rise at Venice: What impact in term of flooding*. *Clim. Dyn.* **35**, 1039-1047.
- CHAPPELL J. & SHACKLETON N.J. (1986) - *Oxygen isotopes and sea level*. *Nature* **324**, 137-140.
- CHURCH J.A., CLARK P.U., CAZENAVE A., GREGORY J.M., JEVREJEVA S., LEVERMANN A., MERRIFIELD M.A., MILNE G.A., NEREM R.S., NUNN P.D., PAYNE A., PFEFFER W., STAMMER D. & UNNIKISHNAN A. (2013b) - *Sea-level rise by 2100*. *Science* **342**(6165):1445-1445.
- CLARK P.U., MCCABE A.M., MIX A.C. & WEAVER A.J. (2004) - *Rapid rise of sea level 19,000 years ago and its global implications*. *Science* **304**, 1141-1144.

- CLOTTES J. & COURTIN J. (1994) - *La Grotte Cosquer*, Editions du Seuil, Paris.
- CLOTTES J., COURTIN J., COLLINA-GIRARD J., ARNOLD M. & VALLADAS H. (1997) - *News from Cosquer Cave: climatic studies recording, sampling, dates*, *Antiquity* **71**, 321-326.
- COLONNA M., CASANOVA J., DULLO W.C. & CAMOIN G. (1996) - *Sea-level changes and ^{18}O record for the past 30,000 yr from Mayotte Reef, Indian Ocean*. *Quaternary Research* **46**, 335-339.
- CROLL J. (1864) - *On the physical cause of the change of climate during geological epochs*. *Philosophical Magazine* **28**, 121-137.
- CROLL J. (1875) - *Climate and time in their geological relations*. Daldy, Isbister & Co., London.
- DALY R.A. (1910) - *Pleistocene glaciation and the coral reef problem*. *American Journal of Science* **30**, 297-308.
- DALY R.A. (1915) - *The glacial-control theory of coral reefs*. *Proceedings of the American Academy of Arts and Science* **51**, 155-251.
- DALY R.A. (1925) - *Pleistocene changes of level*. *American Journal of Science* **10**, 281-313.
- DALY R.A. (1934) - *The changing world of the Ice Age*. Yale University Press, New Haven.
- DUTTON A., CARLSON A.E., LONG A.J., MILNE A., CLARK P.U., DECONTO R., HORTON B.P., RAHMSTORF S. & RAYMO M.E. (2015) - *Sea level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods*. *Science*, **349**, 6244, aaa4019. DOI: 10.1126/science.aaa4019.
- DVORAK J. & MASTROLORENZO G. (1991) - *The mechanisms of recent vertical crustal movements in Campi Flegrei caldera, southern Italy*. *Geological Society of America Special paper* **263**, 47pp.
- EDWARDS R.J., VAN DE PLASSCHE O., GEHRELS W.R. & WRIGHT A. (2004b) - *Assessing sea-level data from Connecticut, USA, using a foraminiferal transfer function for tide level*. *Marine Micropalaeontology* **51**, 239-255.
- FERRANTI L., ANTONIOLI F., ANZIDEI M., MONACO C. & STOCCHI P. (2010) - *The timescale and spatial extent of vertical tectonic motions in Italy: insights from relative sea level changes studies*. *J. Virtual Explor.* <http://dx.doi.org/10.3809/jvirtex.2009.00255>.
- FLEMMING N.C. & WEBB C.O. (1986) - *Tectonic and eustatic coastal changes during the last 10,000 years derived from archaeological data*. *Zeitschrift für Geomorphologie (Suppl. 62)*, 1- 29.
- GUTENBERG B. (1941) - *Changes in sea level, postglacial uplift, and mobility of the earth's interior*. *Geological Society of America Bulletin* **52**, 721-772.
- HALLAM A. (1984) *Pre-Quaternary sea-level changes*. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **12**, 205-243.
- HAYS J.D., IMBRIE J. & SHACKLETON N.J. (1976) - *Variations in the earth's orbit: pacemaker of the Ice Ages*. *Science* **194**, 1121-1132.
- IPCC *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. (2019) - PÖRTNER H.-O., ROBERTS D.C., MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., TIGNOR M., POLOCZANSKA E., MINTENBECK K., ALEGRÍA A., NICOLAI M., OKEM A., PETZOLD J., RAMA B., WEYER N.M. (eds.). Working Group II Technical Support Unit, 765.
- JONGSMA D. (1970) - *Eustatic sea level changes in the Arafura Sea*. *Nature* **228**, 150-151.
- KOPP R.E., HORTON R.M., LITTLE C.M., MITROVICA J.X., OPPENHEIMER M., RASMUSSEN D.J., STRAUSS B.H. & TEBALDI C. (2014) - *Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites*. *Earth's Future* **2**, 383-406. <https://doi.org/10.1002/2014EF000239>.
- KRAFT J.C., RAPP G.R., KAYAN I. & LUCE J.V. (2003) - *Harbor areas at ancient Troy: sedimentology and geomorphology complement Homer's Iliad*. *Geology* **31**, 163-166.
- LAMBECK K. & CHAPPELL J. (2001) - *Sea level change through the last glacial cycle*. *Science* **292**, 679-686.
- LAMBECK K. & PURCELL A. (2005) - *Sea-level change in the Mediterranean Sea since the LGM: model predictions for tectonically stable areas*. *Quaternary Science Reviews* **24**, 1969-1988.
- LAMBECK K., ESAT T.M. & POTTER E.K. (2002a) - *Links between climate and sea levels for the past three million years*. *Nature* **419**, 199-206.
- LAMBECK K., YOKOYAMA Y. & PURCELL A. (2002b) - *Into and out of the Last glacial Maximum Sea Level change during Oxygen Isotope Stages 3-2*. *Quaternary Science Reviews* **21**, 343-360.
- LAMBECK K., ANTONIOLI F., ANZIDEI M., FERRANTI L., LEONI G., SCICCHITANO G. & SILENZI S. (2011) - *Sea level change along the Italian coast during the Holocene and projections for the future*. *Quat. Int.* **2011**, 232, 250-257, doi:10.1016/j.quaint.2010.04.026.
- LAMBECK K., ANZIDEI M., ANTONIOLI F., BENINI A. & ESPOSITO E. (2004b) - *Sea level in Roman time in the central Mediterranean and implications for modern sea level rise*. *Earth and Planetary Science Letters* **224**, 563-575.
- LYELL C. (1832) - *Principles of Geology*. Murray, London.
- MARRINER N., MORHANGE C., DOUMET-SERHAL C. & CARBONEL P. (2006) - *Geoscience rediscovers Phoenicia's buried harbors*. *Geology* **34**, 1-4.
- MILANKOVITCH M. (1941) - *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*, 132. Royal Serbian Academy, Special Publication, Belgrade, 633 pp.
- MORHANGE C., LABOREL J. & HESNARD A. (2001) - *Changes of relative sea level during the past 5000 years in the ancient harbour of Marseilles, Southern France*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **166**, 319-329.
- MORHANGE C., BOURCIER M., LABOREL J., GIALLANELLA C., GOIRAN J.P., CRIMACO L. & VECCHI L. (1999) - *New data on historical relative sea level movements in Pozzuoli, Phlaegrean Fields, southern Italy*. *Physics and Chemistry of the Earth* **24**, 349-354.
- MOURTZAS N., KOLAITI E. & ANZIDEI M. (2016) - *Vertical land movements and sea level changes along the coast of Crete (Greece) since Late Holocene*. *Quaternary International*, **401**, 43-70. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.08.008>.
- NAKADA M. & LAMBECK K. (1987) - *Glacial rebound and relative sea-level variations: a new appraisal*. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* **90**, 171-224.
- OPPENHEIMER M., BRUCE G., JOCHEN H., VAN DE WAL R.S.W., ALEXANDRE A., ABD-ELGAWAD A., CAI R., CIFUENTES-JARA M., DE CONTO R., TUHIN G., et alii (2019) - *Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities*. In;

- 2019; Vol. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. PÖRTNER, D.C. ROBERTS, V. MASSON-DELMOTTE, P. ZHAI, M. TIGNOR, E. POLOCZANSKA, K. MINTENBECK, A. ALEGRÍA, M. NICOLAI, A. OKEM, J. PETZOLD, B. RAMA, N.M. WEYER (eds.)], p. 126
- PARASCANDOLA. (1947) - *I fenomeni bradisismici del Serapeo di Pozzuoli*. Naples. Privately published, 156 pp.
- PELTIER W.R. & FAIRBANKS R.G. (2006) - *Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record*. Quaternary Science Reviews **25**, 3322-3337.
- PIRAZZOLI P.A. (1994) - Tectonic coasts. In: CARTER R.W.G. & WOODROFFE C.D. (eds.) *Coastal evolution: late Quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge University Press, pp. 451-476.
- PIRAZZOLI P.A., AUSSEIL-BADIE J., GIRESSE P., HADJIDAKI E. & ARNOLD M. (1992) - *Historical environmental changes at Phalassarna harbour, West Crete*. Geoarchaeology **7**, 371-392.
- PIRAZZOLI P.A., LABOREL J. & STIROS S.C. (1996) - *Coastal indicators of rapid uplift and subsidence: examples from Crete and other eastern Mediterranean sites*. Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Suppl. -Bd. **102**, 21-35.
- RAVANELLI R., RIGUZZI F., ANZIDEI M., VECCHIO A., NIGRO L., SPAGNOLI F. & CRESPI M. (2019) - *Sea level rise scenario for 2100 A.D. for the archaeological site of Motya*. Rend. Fis. Accad. Lincei **30**, 747-757, doi:10.1007/s12210-019-00835-3.
- SHAW B., AMBRASEYS N.N., ENGLAND P.C., FLOYD M.A., GORMAN G.J., HIGHAM T.F.G., JACKSON J.A., NOCQUET J.-M., PAIN C.C. & PIGGOTT M.D. (2008) - *Eastern Mediterranean tectonics and tsunami hazard inferred from the AD 365 earthquake*. Nature Geoscience **1**, 268-276.
- SIVAN D., LAMBECK K., GALILI E. & RABAN A. (2001) - *Holocene sea-level changes along the Mediterranean coast of Israel, based on archaeological observations and numerical model*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology **167**, 101-117.
- SIVAN D., LAMBECK K., TOUEG R., RABAN A., PORATH Y. & SHIRMAN B. (2004) - *Ancient coastal wells of Caesarea Maritima, Israel, an indicator for sea level changes during the last 2000 years*. Earth and Planetary Science Letters **222**, 315-330.
- SLIM H., TRUSSET P., PASKOFF R. & OUESLATI A. (2004) - *Le littoral de la Tunisie*. Etude Géoarchéologique et Historique. CNRS Editions, Paris.
- SUESS E. (1906) - *The Face of the Earth*. vol. 2, F. Tempsky, Vienna.
- TALLARICO A., DRAGONI M., ANZIDEI M. & ESPOSITO A. (2003) - *Modeling long-term ground deformation cooling of a magma chamber, Aeolian Islands, Italy*. Journal of Geophysical Research **108** (No. B12), 2568.
- VACCHI M., MARRINER N., MORHANGE C., SPADA G., FONTANA A. & ROVERE A. (2016) - *Multiproxy assessment of Holocene relative sea-level changes in the western Mediterranean: Sea-level variability and improvements in the definition of the isostatic signal*. Earth Science Reviews, **155**, 172-197. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.02.002>.
- VECCHIO A., ANZIDEI M., SERPELLONI E. & FLORINDO F. (2019) - *Natural Variability and Vertical Land Motion Contributions in the Mediterranean Sea-Level Records over the Last Two Centuries and Projections for 2100*. Water, **11**, 1480. <https://doi.org/10.3390/w11071480>.
- VEEH H.H. & VEEVERS J.J. (1970) - *Sea level at -175 m off the Great Barrier Reef 13,600 to 17,000 years ago*. Nature **226**, 536-537.
- VILLY A.K., TSOULOS N. & STIROS S.C. (2002) - *Coastal uplift, earthquakes and active faulting of Rhodes island (Aegean Arc): modelling based on geodetic inversion*. Marine Geology **186**, 299-317.
- WÖPPELMANN G. & MARCOS M. (2012) - *Coastal sea level rise in southern Europe and the nonclimate contribution of vertical land motion*. Journal Geophysical Research Oceans, **117**, C01007. <https://doi.org/10.1029/2011JC007469>.
- YOKOYAMA Y., LAMBECK K., DE DECKKER P., JOHNSTON P. & FIFIELD K. (2000) - *Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima*. Nature **406**, 713-716.
- YU S.-Y., BERGLUND B.E., SANDGREN P. & LAMBECK K. (2007) - *Evidence for a rapid sea-level rise 7600 yr ago*. Geology **35**(10), 891-894.
- ZEUNER F.E. (1945) - *The Pleistocene Period*. Ray Society, London.