

Procida Mediterranea 2022

Paesaggio costiero attuale ed antico dell'isola di Procida (Golfo di Napoli)

Aucelli Pietro P.C.¹, Caporizzo Claudia¹, Gagliardi Ernesto², Mattei Gaia¹, Napolitano Francesco², Nappi Raffaella², Pappone Gerardo¹, Pennetta Micla^{3*}, Tursi Maria Francesca¹

(1) Università degli Studi di Napoli Parthenope, Napoli, Italy

(2) Liberi professionisti

(3) Già professore Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italy, pennetta@unina.it

- Autore corrispondente



Micla Pennetta, titolare di cattedra di Dinamica e difesa delle coste.

Introduzione

L'isola di Procida (Campania, Italia) si inserisce nel distretto vulcanico dei Campi Flegrei; la sua genesi è da correlare a numerose eruzioni vulcaniche a carattere esplosivo legate all'attività flegrea iniziata oltre 60.000 anni or sono.

L'isola di Procida è per buona parte bordata da coste alte ripide e rocciose (falesie costiere), spesso articolate in un alternarsi di promontori e cale (Pennetta et al., 2018). Tra queste ultime si distinguono le spiagge di Ciraccio-Ciracciello e Chiaia che rappresentano importanti attrazioni turistiche dell'Isola. Le falesie sono generalmente intagliate in depositi piroclastici e presentano un'altezza da 10 fino a circa 40 m e un'inclinazione di oltre 40°; in alcuni casi sono bordate da piattaforme di abrasione sommerse debolmente inclinate verso il mare. L'individuazione di altre

piattaforme a profondità crescenti verso mare testimonia che nell'area si sono verificati differenti stazionamenti del livello del mare cui ha corrisposto in epoche passate un modellamento della fascia costiera. La cartografazione dettagliata di queste piattaforme, unitamente all'interpretazione archeologica e geomorfologica dei markers derivanti da dati di letteratura, ha permesso quindi di ricostruire l'evoluzione morfologica della fascia costiera dell'isola di Procida avvenuta negli ultimi 6.500 anni e quindi l'antica morfologia della fascia costiera determinata dal sollevamento relativo del livello del mare.

Metodologia

Il settore costiero di Procida è stato analizzato utilizzando un approccio multidisciplinare, basato sull'uso di metodi sia diretti che indiretti. Le numerose indagini in sito sono state integrate con lo studio geomorfologico di foto aeree e l'elaborazione di cartografia tematica in ambiente GIS.

A. Analisi Geomorfologica e GIS

L'elaborazione tridimensionale dei dati topo-batimetrici dell'Isola di Procida è stata eseguita valutando la distribuzione delle quote di un territorio. Il calcolo del DTM (*Digital Elevation Model*) emerso e sommerso è stato ottenuto grazie all'interpolazione dei dati Lidar (Ministero dell'Ambiente, 0-200 m s.l.m) e dai dati batimetrici (progetto CARG, Fedele et al., 2010) utilizzando l'interpolatore "Topo to Raster" (griglia 1x1). E' stata poi eseguita l'analisi di pendenza del DTM sommerso, allo scopo di individuare e poi distinguere le aree sommerse sub-orizzontali e quelle a forte pendenza. Successivamente, integrando l'analisi GIS con i dati provenienti dalle indagini dirette, sono state cartografate numerose superfici sub-orizzontali sommerse (con una

pendenza 0-5%), interpretate quindi come antiche piattaforme di abrasione. Invece, i settori a pendenza più elevata (pendenza > al 20%), adiacenti alle superfici sub-orizzontali, sono state interpretate come relative paleofalesie. Infine, le piattaforme di abrasione cartografate sono state suddivise in tre classi in base alla loro profondità e successivamente datate grazie alle evidenze archeologiche provenienti dai dati di letteratura e ad un'accurata interpretazione geomorfologica.

E' stata infine eseguita un'analisi morfometrica di tali forme al fine di valutare sia i tassi di arretramento delle falesie che i movimenti verticali che hanno interessato il settore costiero dell'isola di Procida negli ultimi 6.500 anni.

B. Le piattaforme di abrasione come indicatori del livello del mare

In questo lavoro ci si è avvalsi delle piattaforme di abrasione come indicatori di antichi livelli del mare. Secondo Kennedy (2015) il margine esterno, ovvero la terminazione della piattaforma verso mare, è il punto in cui termina l'erosione attiva della terra emersa. Tuttavia, la caratteristica più importante per le ricostruzioni del livello del mare è certamente il margine interno delle piattaforme (Fig.1) considerando che esso è posizionato allo stesso livello della media alta marea (MHHW).

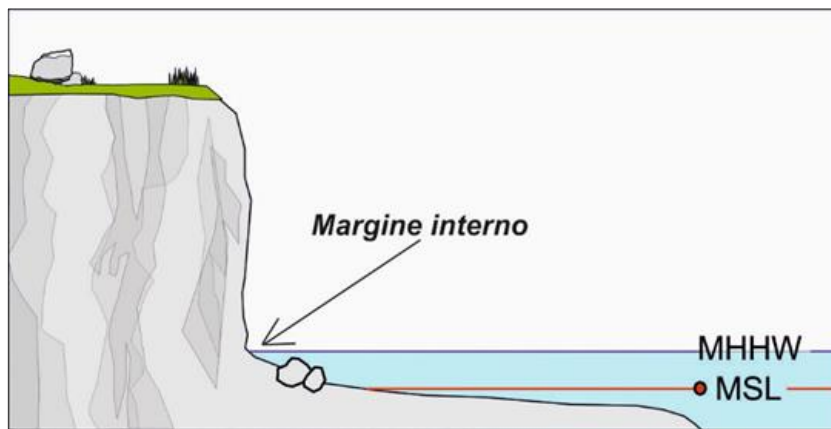


Fig.1. Piattaforma di abrasione utilizzata come indicatore del livello del mare

Risultati

Sono stati riconosciuti almeno tre ordini di piattaforme di abrasione sommerse che hanno consentito di ricostruire la presenza di altrettanti paleostazionamenti del livello del mare (Fig. 2). Il primo ordine di piattaforme individuato è posizionato tra -25 e -23 m sotto il livello medio del mare. Tali piattaforme sono intagliate nella formazione vulcanica del Tufo di Solchiaro (Putignano & Schiattarella, 2010) messo in posto durante l'ultima fase eruttiva dell'isola di Procida, avvenuta circa 22.000 anni fa. Pertanto, la genesi di queste piattaforme è da ricondurre ad un periodo immediatamente successivo. Analizzando la curva eustatica del livello del mare (Benjamin et al., 2017) relativa agli ultimi 22.000 anni, le condizioni morfogenetiche più favorevoli alla formazione di queste piattaforme si sono verificate circa 6.500 anni fa, quando la decrescita dei tassi di sollevamento del livello del mare era compatibile con la genesi delle piattaforme di abrasione cui corrispondeva un arretramento delle falesie. Di conseguenza, l'età del primo ordine di piattaforme è compresa tra 6.500 e 4.000 anni dal presente, quando presumibilmente iniziò la formazione del secondo ordine di piattaforme. Il livello del mare relativo calcolato per questo periodo è stato posizionato a -23.2 ± 1 m sotto il livello medio del mare. Il secondo ordine di piattaforme è posizionato tra -20 e -11 m sotto il livello medio del mare; è stato datato a circa 4.000 anni dal presente grazie ai dati di sondaggio effettuati nel Golfo di Genito, dove sono stati rinvenuti abbondanti resti archeologici, vincolati cronologicamente da Putignano et al., 2009. Inoltre, sono stati individuati resti di

beachrocks tra -13 e -11.8 m sotto il livello medio del mare, che hanno contribuito alla ricostruzione dell'antica linea di riva. Il livello del mare relativo ricostruito per tale periodo è stato posizionato a -11.2 ± 1 m sotto il livello medio del mare. Il terzo ordine di piattaforme, posizionato tra -10 e -4 m sotto il livello medio del mare, è stato datato utilizzando i resti di alcune bitte di ancoraggio (*ring bollards*) rilevate a una profondità di -4.5 m sotto il livello medio del mare e datate da Putignano et alii (2014) tra i 2.000 e i

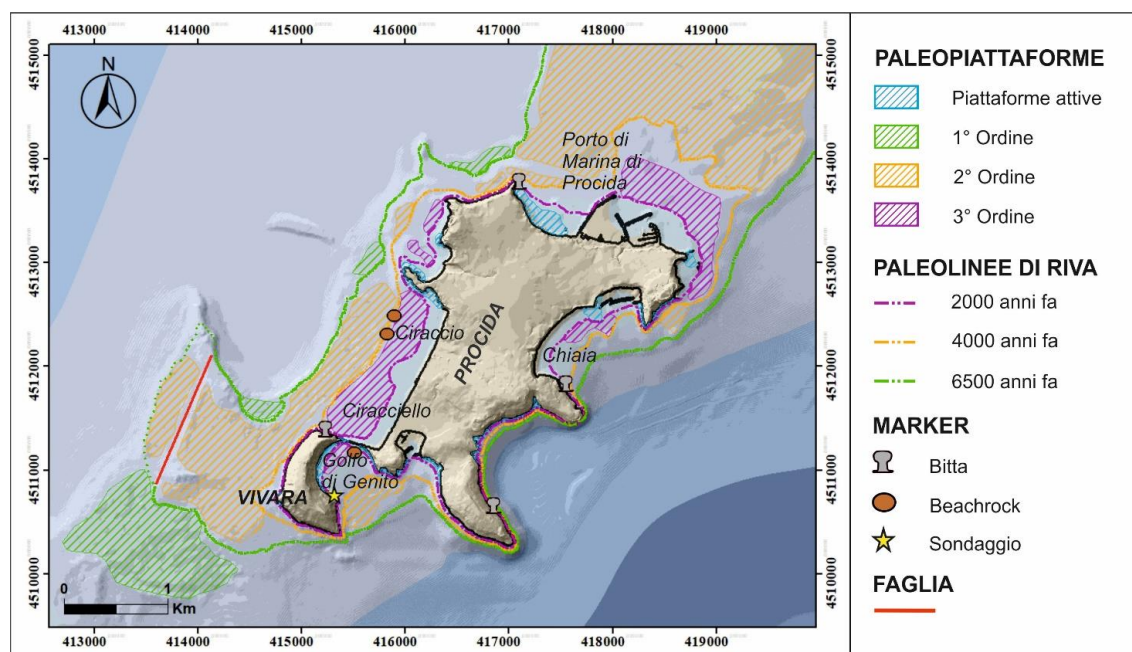


Fig. 2. Paesaggio costiero attuale dell'isola di Procida ed ubicazione a mare a profondità crescenti dei tre ordini di piattaforme, delle paleolinee di riva ricostruite e dei marker utilizzati

1.000 anni fa. Inoltre, sono stati individuati i resti di una beachrock a una profondità di -6,2 m sotto il livello medio del mare, che hanno contribuito al posizionamento del livello del mare relativo a -4.2 ± 1 m per tale periodo. Infine, attraverso l'analisi geomorfologica delle forme attuali sommerse, sono state cartografate le piattaforme di abrasione attive lungo la costa dell'Isola Procida e vincolate cronologicamente agli ultimi 1.000 anni. Generalmente tali piattaforme sono localizzate tra 0 e -3 m e sono caratterizzate da un'estensione molto ridotta. L'individuazione delle piattaforme di abrasione, impiegate come indicatori di antichi livelli del mare, ha permesso di ricostruire le variazioni relative del livello del mare e i movimenti verticali che hanno interessato l'area durante gli ultimi 6.500 anni. A tale scopo, la comparazione tra i livelli del mare relativi dedotti dalle piattaforme rilevate e i modelli GIA (*Glacio-Hydro-Isostatic adjustment*) disponibili per l'area di studio (Vacchi et al., 2019) hanno dimostrato che una subsidenza intermittente ha certamente interessato l'area, portando alla sommersione graduale delle piattaforme studiate (Fig. 3). Sono stati calcolati i tassi di subsidenza pari a 0.005 m/a negli ultimi 4.000 anni, 0.005 m/a negli ultimi 2.000 anni e 0.004 m/a negli ultimi 1.000 anni nell'area di studio. Al fine di ricostruire l'evoluzione geomorfologica dell'Isola di Procida a partire dall'Olocene medio, sono stati ricostruiti quattro scenari morfoevolutivi, rispettivamente relativi agli intervalli 6.500-4.000 anni fa (Fig. 4A), 4.000-2.000 anni fa (Fig. 4B) e 2.000-1.000 anni fa (Fig. 4C). Infine, attraverso la ricostruzione delle antiche linee di riva effettuata grazie al margine interno dei tre ordini di piattaforme, sono stati anche valutati i tassi di arretramento (RR) delle falesie che bordano l'isola di Procida, utilizzando la procedura illustrata nella sezione metodi. In particolare, sono stati determinati tassi di arretramento pari a 0.33 m/a per l'intervallo 6.500-4.000 anni fa, 0.61 m/a per l'intervallo 4.000-2.000 anni fa e 0.30 m/a per l'intervallo 2.000-1.000 anni fa.

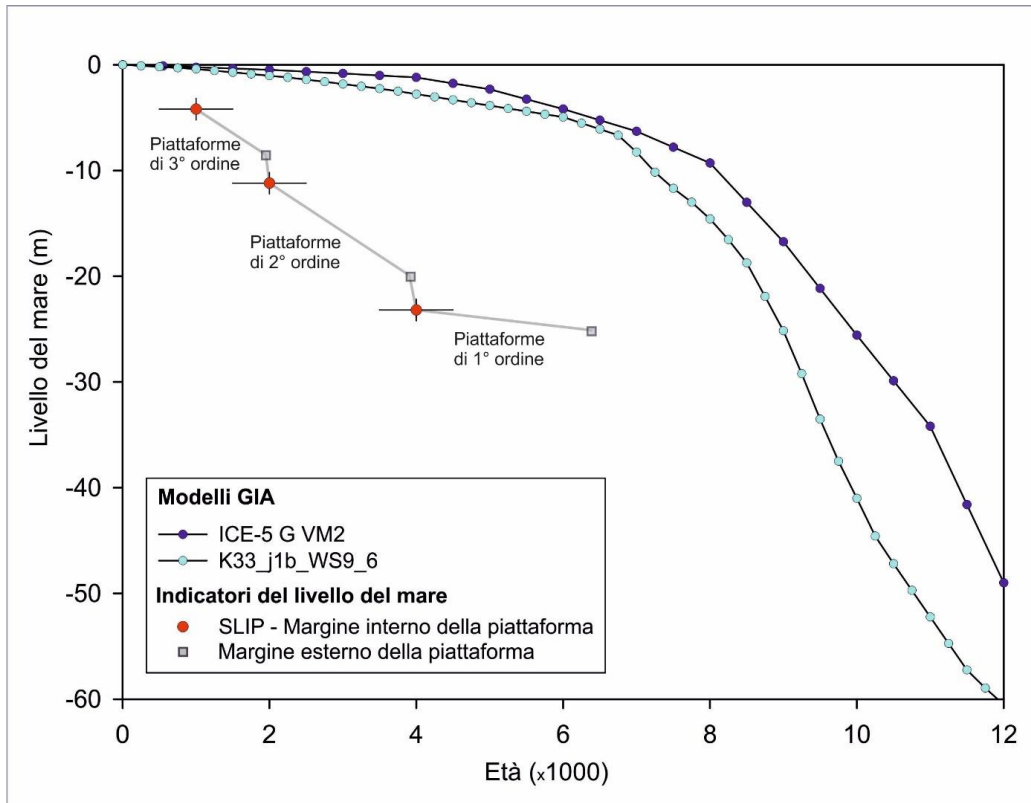


Fig. 3. Confronto tra i RSL dedotti dai tre ordini di paleopiattaforme studiati e le previsioni GIA disponibili per il Golfo di Napoli (da Vacchi et al., 2019).

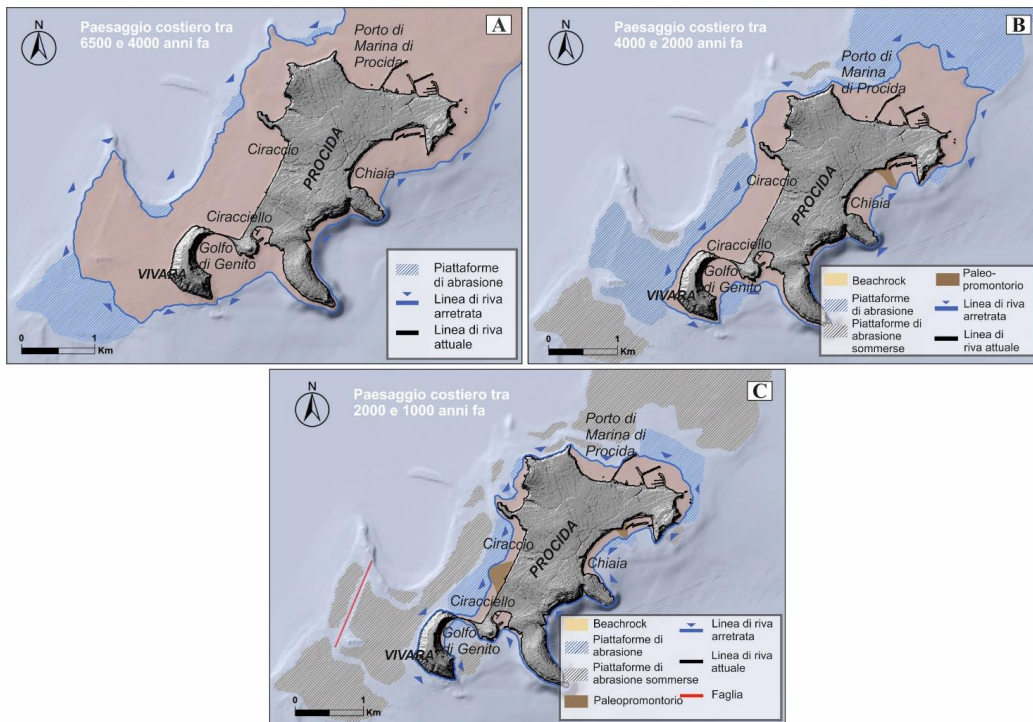


Fig. 4. Paesaggio costiero dell'Isola di Procida modificatosi nel tempo (da 6.500 anni fino all'attuale).

Conclusioni

Sono state analizzate le modificazioni morfologiche del settore costiero dell'Isola di Procida a partire da 6.500 anni (Olocene Medio). A tale scopo sono stati utilizzati come marker morfologici di antichi stazionamenti del livello del mare tre differenti ordini di paleopiattaforme di abrasione.

L'interpretazione geomorfologica di questi tre ordini di antiche piattaforme, che si sono formate tra 6500 e 1000 anni fa, ha permesso la ricostruzione di altrettante antiche linee di riva. Inoltre, sono stati calcolati anche i tassi di arretramento che si sono verificati negli ultimi 6.500 anni lungo le falesie che bordano le aree costiere di Ciraccio-Ciracciello e Chiaia. La cartografazione dettagliata di queste antiche piattaforme, poste a varie profondità, ha permesso di stabilire che una subsidenza generale ha certamente contribuito all'evoluzione costiera Olocenica dell'isola, la quale è stata caratterizzata da tre principali fasi di stabilità relativa del livello del mare (o forte diminuzione dei tassi di sollevamento del livello del mare) che si sono susseguiti durante gli ultimi 6.500 anni.

Un'origine vulcano-tettonica, legata all'attività dei Campi Flegrei, può essere assunta come la principale causa di questa subsidenza, anche se l'analisi dei dati di telerilevamento attuali dimostra che l'isola è oggi stabile. Non è da escludere che la subsidenza osservata sia stata influenzata dalle eruzioni avvenute nell'area flegrea negli ultimi 6.500 anni. Tuttavia, questa ipotesi necessita di ulteriori accurate valutazioni.

Bibliografia

Benjamin, J., Rovere, A., Fontana, A., Furlani, S., Vacchi, M., English, R.H., Galili, E., Antonioli, F., Sivan, D., Miko, S., Mourtzas, N., Felja, I., Meredith-Williams, M., Goodman-Tchernov, B., Kolaiti, E., Anzidei, M., Gehrels, R. 2017. *Late Quaternary sea-level changes and early human societies in the central and eastern Mediterranean Basin: An interdisciplinary review*. Quaternary International, 1-29.

Fedele, L., Morra, V., Perrotta, A., Scarpati, C., Putignano, M.L., Orrù, P. & Schiattarella, M. [A cura di]. 2010. *Note illustrative della Carta Geologica Regionale alla scala 1: 10.000. Isole di Procida e Vivara*. Regione Campania, Settore Difesa Suolo, Napoli.

Kennedy, D.M. 2015. *Where is the seaward edge? A review and definition of shore platform morphology*, *Earth Sci. Rev.* 147, 99–108.

Pennetta, M., Assante di Panzillo, M., Mattei, G., Rizzo, A., Aucelli P. 2018. *Historical morphoevolution of the high rocky coast in the southern west sector of Procida island. IGCP Project 639 "Sea-Level Change from Minutes to Millennia"*, Third Annual Meeting, Crossing Southern Italy. Taranto (Puglia).

Putignano, M.L. & Schiattarella, M. 2010. *Geomorfologia strutturale e domini di frattura dei fondali marini pericostieri dell'Isola di Procida (Campi flegrei insulari, Italia meridionale)*. *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*, 23 (2 Bis), 229-242.

Putignano, M.L., Cinque, A., Lozej, A., Mocchegiani Carpano, C. 2009. *Late Holocene ground movements in the Phlegrean Volcanic District (Southern Italy): new geoarchaeological evidence from the islands of Vivara and Procida*. *Mediterranée* 112, 43-50.

Vacchi, M., Russo Ermolli, E., Morhange, C., Ruello, M., Di Donato, V., Di Vito, M., Giampaola, D., Carsana, V., Liuzza, V., Cinque, A., et al. 2019. *Millennial variability of rates of sea-level rise in the ancient harbour of Naples (Italy, western Mediterranean Sea)*. *Quat. Res.* 93, 284–298.

Morphological responses to relative sea-level changes along Procida coast (Gulf of Naples, Italy) during the last 6.5 Ky

Introduction

This study aims to reconstruct the coastal response of Procida Island to relative sea-level rise since the mid-Holocene, by analysing the submerged features of the coast. Procida Island belongs to the insular part of the Campi Flegrei (CF) volcanic area and owes its formation to several explosive eruptions related to the CF volcanic activity started more than 60 ky BP. The Campi Flegrei volcanic area represents one of the two main hazardous volcanic areas in the Gulf of Naples (Southern Italy). In detail, the island is characterized by steep cliffed coasts, articulated in a succession of headlands and small embayments (Pennetta et al., 2018) and characterized by small and narrow pocket beaches such as Ciraccio - Ciracciello and Chiaia. The cliffs are generally cut into pyroclastic deposits showing a height of 10 to 40 m and an inclination of over 40° and, in some cases, they are connected to narrow shore platforms sloping slightly towards the sea. The presence of different orders of submerged paleo-shore platforms suggests different phases of sea-level stand and related coastal response. Mapping these platforms, together with the interpretation of archaeological and geomorphological markers allowed defining the shoreline evolution of Procida Island during the last 6.5 ky.

Methods

The coastal sector of the study area was investigated by using a multi-techniques approach based on direct and indirect methods. Several on-site investigations were integrated with the geomorphological study of aerial photos. The 3D elaboration of the topo-bathymetric data, concerning Procida coastal area, followed a specific procedure. The first step was the calculation of an onshore-offshore DTM by interpolating the LIDAR (from the Ministry of Environment, 0 – 200 m MSL) and bathymetric data (from the CARG project, 0 – 20 m MSL), with a Topo to Raster interpolator (1 × 1 m grid). The second step was the slope analysis of the above-mentioned DTM to classify the submerged area in sub-horizontal and steep slope sectors. By integrating the above-mentioned GIS analysis with data derived from direct surveys, several sub-horizontal submerged surfaces (0-5% of slopes) were detected and interpreted as ancient shore platforms. Consequently, the higher sloping sectors (slope > 20%) adjacent to the sub-horizontal surfaces were interpreted as related paleo-cliffs. Finally, the mapped paleo-shore platforms were reclassified depending on their depth in three orders and, subsequently, dated by means of archaeological evidence and our geomorphological interpretations. The last step was the morphometric analysis of these landforms to evaluate the retreating rates of the sea cliffs and quantify the vertical displacements (VDs) that have affected Procida coastal sector in the last 6.5 ky. In this work, we used paleo-shore platforms as indicators ancient sea levels. According to Kennedy (2015), the outer margin (i.e. the termination point of the platform towards the sea) is the point where active erosion of the bedrock ends. However, the most relevant feature useful for sea-level interpretations certainly is the inner margin of the platform (Fig. 1),¹ considering that it is located at the same level of the mean higher high water (MHHW - average of the higher high-water height of each tidal day observed over a Tidal Datum Epoch).

Results

The presence of three orders of submerged paleo-shore platforms highlights as many paleo sea-level stands. The first-order platforms are positioned between -25 and -23 m MSL, cut in the volcanic formation of Tufo di Solchiaro (Putignano & Schiattarella, 2010) emplaced during the last most important eruptive phase of Procida (22 ky BP). Therefore, these platforms were modelled after that date. In fact, by analyzing the eustatic sea-level

¹ Fig. 1: Sketch of a shore platform interpreted as sea-level index point (SLIP).

curve relevant for the last 20 ky (Benjamin *et al.*, 2017), the most favourable morphogenetic conditions for the formation of the above-mentioned morphologies started about 6.5 ky BP when the decrease of the rate of sea-level rise was compatible with platform formation and related sea cliff retreat (Fig. 2).² Accordingly, the age of the first-order of paleo-shore platforms probably ranges between 6.5 ky BP and 4.0 ky BP, when the formation of the second-order began. The RSL here calculated was positioned at -23.2 ± 1 m MSL. The second-order platforms are positioned between -20 and -11 m MSL and dated to 4.0 ky BP based on both coring data coming from the Genito Gulf, where abundant fragments of archaeological finds were identified and chronologically constrained by (Putignano *et al.*, 2009), and several beachrocks detected between -13 m and -11.8 m MSL. The RSL calculated was positioned at -11.2 ± 1 m MSL. The third-order platforms, positioned between -10 and -4 m MSL, were dated by using a ring bollards detected at a depth of -4.5 m MSL and beachrocks detected at a depth of -6,2 m MSL and dating between 2000 and 1000 years ago. The RSL calculated was positioned at -4.2 ± 1 m MSL. Finally, through the geomorphological analysis of the present-day submerged morphologies, the active shore platforms dated from 1.0 ky and located along Procida coasts were detected and mapped. Generally, the actual shore platforms are located above -3 m MSL and characterized by narrow shape.

In addition, the interpretation of the above-mentioned shore platforms as SLIPs allowed the reconstruction of both the RSL variations and the VDs affecting the area during the last 6.5 ky BP. In this regard, the comparison between the obtained RSLs and the Glacio-Hydro-Isostatic adjustment (GIA) models available for the study area (Vacchi *et al.*, 2019) demonstrates that intermitting subsidence affected the area, leading to the submersion of the three orders paleo-shore platforms here studied (Figure 3).³ Indeed, different subsidence rates of 0.005 m/yr, 0.005 m/yr, and 0.004 m/yr were calculated for the last 4.0 ky BP, 2.0 ky BP and 1.0 ky BP, respectively.

In order to reconstruct the geomorphological evolution of Procida Island since the Middle Holocene, four morpho-evolutive scenarios were carried out, respectively related to 6.5-4.0 ky BP (Figure 4A), 4.0-2.0 ky BP (Figure 4B) and 2.0-1.0 ky BP (Figure 4C).⁴ Moreover, through the reconstruction of the ancient shoreline positions related to the inner margin of the three orders of platforms, the retreating rates (RR) of the Procida seacliffs were evaluated, by using the procedure explained in the Methods section. In particular, three retreating rate values of 0.33 m/yr, 0.61 m/yr, and 0.30 m/yr were evaluated for the time intervals ranging between 4.0/6.5 ky BP, 2.0/4.0 ky BP and 1.0/2.0 ky BP, respectively.

Conclusions

In this research, the morpho-evolutive trends of the Procida coastal area since the mid-Holocene were evaluated. For this purpose, three orders of submerged paleo-shore platforms were used as morphological markers of ancient sea-level stands. The geomorphological interpretation of these three orders of paleo-shore platforms, formed between 6.5 and 1.0 ky BP, provided the reconstruction of as many ancient shorelines. In addition, the cliff retreat rates over the last 6500 years along the Ciraccio-Ciracciello and Chiaia sectors were evaluated. The precise mapping of these ancient platforms at various depths allowed establishing that an overall subsidence has certainly contributed to the polyphasic Holocene coastal evolution of the island, which was characterized by

² Fig. 2. Location of the three orders of paleo-shore platforms.

³ Fig.3. Comparison between the RSL data derived from the three orders of Paleo-shore Platforms and the GIA prediction for the Gulf of Naples (after Vacchi *et al.*, 2019).

⁴ Fig.4. Morpho-evolution of Procida coastal sector since the mid-Holocene (6.5-4.0 ky BP, Figure 4A; 4.0-2.0 ky BP, Figure 4B; 2.0-1.0 ky BP, Figure 4C).

three main phases of relative sea-level stability (or strong decreasing in the rate of sea-level rise) that occurred during the last 6,5 ky.

A volcano-tectonic origin, related to the activity of the Campi Flegrei volcanic area, can be assumed as the main cause of this subsidence, even if the analysis of remote sensing data demonstrates that the island is nowadays stable. The observed subsidence cannot be excluded that was influenced by the eruptions occurred in the CF area in the same span, anyway this issue needs further accurate evaluation.

Ambiente e Cultura Mediterranea, giugno 2021