

Le beachrock mediterranee: dai lavori pionieristici del Prof. Giuliano Fierro ai recenti progressi scientifici nel loro utilizzo per le ricostruzioni paleoclimatiche

Matteo Vacchi

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa
E-mail: matteo.vacchi@unipi.it

Riassunto

Lo studio delle beachrock Mediterranee ha rappresentato uno strumento fondamentale per la ricostruzione delle variazioni del livello del mare a partire dall'ultimo massimo glaciale (ca 21.000 BP). Questi depositi si formano in aree litorali grazie alla precipitazione di cementi carbonatici risultanti dal mixing di acqua marina e meteorica. Questo contributo vuole analizzare i recenti avanzamenti scientifici dello studio delle beachrocks Mediterranee a partire dai primi studi guidati dal Prof. Giuliano Fierro in Liguria e Sardegna, con particolare riferimento alla loro importanza per definire la riposta climatica delle coste alle modificazioni climatiche degli ultimi 12000 anni.

Parole chiave: beachrocks; depositi costieri; livello del mare; Mar Mediterraneo

Abstract

The study of Mediterranean beachrocks has been a fundamental tool for the reconstruction of sea level variations since the Last Glacial Maximum (LGM ca 21.000 BP). These deposits are formed in coastal areas thanks to the precipitation of carbonate cements resulting from the mixing of seawater and meteoric water. This paper aims to analyze the recent scientific advances in the study of Mediterranean beachrocks starting from the first studies led by Prof. Giuliano Fierro. His contributions have been focused both the geochemical analysis of beachrock outcrops and their contribution to the understanding of the postglacial evolution of sea level. In particular, Prof. Fierro carried out an analysis of the pH variations in the depressions present in the beachrock of Capo Noli (Savona) indicating the biochemical processes (photosynthesis and respiration) as the main driver of these changes. Furthermore, this study provided the first radiocarbon dating (3330 ± 35) of the Ligurian beachrocks and, in particular, of those that develop between Capo Noli and Pietra Ligure.

Another important pioneering contribution is that linked to the discovery of a beachrock positioned at great depths (70 m) in the Strait of Bonifacio). This report was in fact the first in a coastal sector that has been extensively investigated starting from this discovery which, to date, remains one of the deepest beachrocks ever sampled in the Mediterranean. More recent studies, corroborated by new C14 dating, have allowed the beachrocks of the Sardinian-Corsican massif to be used to reconstruct 12.000 years of paleo-sea level evolution in this key sector of the western Mediterranean. Indeed, the relative tectonic stability of Corsica and Sardinia has made it possible to use their

paleo sea level datasets to test and refine a series of predictive geophysical models of sea level evolution as well as to reconstruct with statistical approaches the variability of Mediterranean sea level rise rates in response to climate changes that have occurred since the LGM. The future scientific challenges in the use of beachrock are certainly linked to understanding the mobility of the shoreline in response to climate changes. Indeed, these deposits, currently relict even at great depths, represent a snapshot of the position of the shoreline in a given period. In different coastal sectors, the position of different generations of beachrocks with respect to the current shoreline could provide important insights into the response of coastlines to climate changes such as changes in sea level rise rates or in river sediment transport in the pre-industrial period (e.g., pre 1850). These data would be fundamental to define the future of our coasts in the context of the current climate change.

Keywords: beachrocks, coastal deposits; sea level; Mediterranean Sea

Introduzione

Le beachrocks sono una tipologia di deposito litoraneo che si sviluppa prevalentemente nei far fields (ovvero le regioni costiere posizionate distante dalle calotte glaciali). Il processo di litificazione di questi depositi costieri avviene quasi istantaneamente registrando la posizione della linea di costa corrispondente (Hopley, 1986; Mauz et al., 2015). Per questo motivo, le beachrocks rappresentano un indicatore molto interessante per ricostruire la riposta del livello del mare e, più in generale, del sistema costiero alle modificazioni del clima.

Questo contributo si concentrerà soprattutto sulle beachrocks mediterranee che sono state studiate a partire dagli anni 60. In particolare, gli studi di Giuliano Fierro in Liguria e Sardegna, hanno rappresentato i primi lavori pionieristici su questi depositi collocati a differenti profondità della piattaforma continentale.

Caratteristiche dei depositi e tipologie di cementazione

Le beachrock si presentano classicamente in forma allungata parallela alla linea della riva attuale (Fig. 1A). Non è raro trovare diverse generazioni di beachrocks nello stesso settore costiero (Fig. 1B,C).

Il processo di litificazione delle beachrocks è funzione della concentrazione di ioni CO_3^{2-} nell'acqua di mare, dell'attività microbica e della degassificazione di CO_2 dalle falde acquifere in direzione del mare (Mauz et al., 2015). Esperimenti in laboratorio e osservazioni sul terreno suggeriscono che la cementazione avviene entro pochi decenni laddove una determinata morfologia costiera possa fornire un adeguato ambiente di sedimentazione (Hopley, 1986).

I sedimenti più idonei al processo di litificazione su una scala temporale medio breve (decennale a centennale) devono fornire sufficiente porosità intergranulare per la precipitazione e la crescita dei cristalli di carbonato. In genere, le classi tipiche delle beachrocks vanno dalle sabbie fini a quelle grossolane (Fig. 1D) anche se sono segnalate beachrocks caratterizzate da ghiaie o addirittura ciottoli (Vousdoukas et al., 2007). Le beachrocks sono inoltre spesso caratterizzate da abbondanti bioclasti (Fig. 1E). Il tasso di sedimentazione deve essere limitato affinché la precipitazione dei cementi carbonatici avvenga senza troppe perturbazioni. Il tasso di cementazione deve quindi superare il tasso di sedimentazione affinché la roccia si formi (Mauz et al., 2015).

Il tipo di stratificazione delle beachrocks è indicativo dell'ambiente sedimentario di formazione (Fig. 2). L'ambiente di upper shoreface-foreshore è tipicamente caratterizzato da ripple foreset asimmetrici, da foreset a basso angolo che si immergono verso il mare o ancora da strati pianoparalleli, a seconda dell'inclinazione del profilo spiaggia e dall'energia della spiaggia (Vieira et al., 1997; Ghandour et al., 2021).

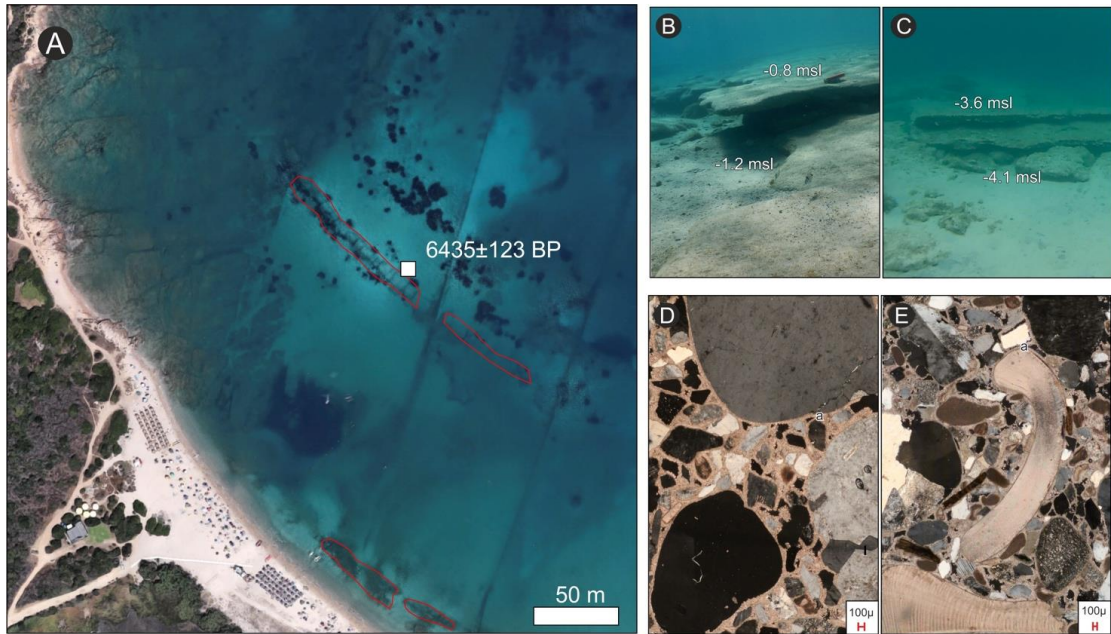


Figura 1. A) Affioramenti multipli beachrocks sommersi presso la spiaggia di Tanca Manna (Sardegna). La generazione più profonda è stata datata a circa 6500 anni BP (Vacchi et al., 2020) B,C) Distribuzione batimetrica delle diverse generazioni di beachrocks di Tanca Manna. D,E) Sezioni sottili delle beachrocks di Tanca Manna (modificata da Vacchi et al., 2020).



Figura 2. Esempio di stratificazione incrociata in una beachrock sommerso presso l'isola di Naxos, Grecia (modificata da Karkani et al., 2017).

Anche la tipologia di cemento intergranulare è condizionata dalla zona di formazione lungo il profilo della spiaggia all'interfaccia tra l'acqua di mare e l'acqua meteorica. L'interfaccia è appunto la zona di miscelazione, chimicamente più attiva, dove si forma la beachrock ed è caratterizzata da fluidi che rappresentano una miscela di diverse soluzioni di elementi provenienti dagli ambienti adiacenti (ad esempio, acque ipersaline da sabkhas; acqua meteorica da falde acquifere). Le caratteristiche chimiche delle soluzioni, in particolare acidità e sottosaturazione o sovrasaturazione rispetto alla calcite, controllano la precipitazione del minerale carbonatico quando la pCO_2 iniziale diminuisce a causa del degassamento (Plummer, 1975; Meyers, 1987). Poiché un minerale carbonatico precipiterà solo da una soluzione che è sovrasatura rispetto a questo minerale, la miscelazione delle falde acquifere e dell'acqua di mare deve causare sovrasaturazione.

I cementi delle beachrock, soprattutto quelle Mediterranee, sono classicamente rappresentate da calcite ad alto contenuto di Magnesio (HCM) o Aragonite. Il cemento è tipicamente sparitico formando cristalli lamellari o aciculari. Nel caso la cementazione abbia una forte influenza microbica il cemento si presenta in facies micritica (Neumeier, 1998). Il cemento delle beachrocks può anche presentare diverse generazioni con fabrics molto differenti (Vacchi et al., 2012; Mauz et al., 2015).

Le Beachrocks Mediterranee: un indicatore fondamentale per ricostruire l'evoluzione dei sistemi costieri

Il Mediterraneo è stato sicuramente uno dei settori geografici più investigato dal punto di vista dello studio delle beachrocks. Queste si concentrano soprattutto (ma non esclusivamente) nell'Egeo, nel Tirreno oltre che nei mari di Corsica e di Sardegna e nel Golfo di Gabes in Tunisia. La loro distribuzione varia dai pochi metri fino al limite della piattaforma continentale (Giresse et al., 2023).

Il loro utilizzo come indicatore preciso del paleo livello del mare è stato molto dibattuto in letteratura. Una formazione puramente intertidale è stata proposta da numerosi autori (Neumeier, 1998, 1999, Desruelles et al. 2004, Turner 2005 e Voudoukas et al. 2007, Desruelles et al. 2009). Al contrario, Kellettat (2006) ha suggerito la possibile formazione delle beachrocks anche in zona sopratidale (spray zone) mentre altri autori hanno sollevato diverse problematiche circa l'utilizzo delle beachrocks come indicatori ad alta precisione del paleo livello del mare (Knight, 2007; Vött et al. 2010). Tuttavia, i recenti studi condotti in Mar Egeo, in Sardegna e Corsica hanno evidenziato l'importanza delle beachrock come indicatore del livello del mare soprattutto se confrontati con proxy morfologici e biologici trovati nelle medesime aree costiere (Desruelles et al., 2009; Karkani et al., 2017; Vacchi et al., 2012; 2020; Bar et al., 2024).

I contributi del Professor Fierro hanno riguardato sia l'analisi geochimica degli affioramenti delle beachrocks sia il loro contributo alla comprensione dell'evoluzione postglaciale del livello del mare. In particolare, Gewalt e Fierro (1984) hanno effettuato un'analisi delle variazioni di pH nelle depressioni presenti nella beachrock di Capo Noli (Savona) indicando i processi biochimici (fotosintesi e respirazione) come principale motore di questi cambiamenti. Inoltre, questo studio ha fornito la prima, e ad oggi unica, datazione al Carbonio 14 (3330 ± 35) delle beachrock liguri e, in particolare, di quelle che si sviluppano tra Capo Noli e Pietra Ligure.

Un altro importante contributo pionieristico è quello legato al ritrovamento di una beachrock posizionata a grandi profondità (70 m) nelle bocche di Bonifacio (Fanucci et al., 1974). Questa segnalazione è stata infatti la prima in un settore costiero che è stato largamente investigato a partire proprio da questa scoperta che, ad oggi, rimane una delle beachrock più profonde mai campionate in Mediterraneo. Studi più recenti, corroborati da nuove datazioni C14, hanno permesso di utilizzare le beachrocks del massiccio sardo-corso per ricostruire 12000 anni di evoluzione del paleo livello del mare in questo settore chiave del Mediterraneo occidentale (Ozer et al., 1984; Demuro e Orrù, 1998; Vacchi et al., 2020). Infatti, la relativa stabilità tettonica di Corsica e Sardegna ha reso possibile utilizzare le loro serie di dati di paleo livelli del mare per testare ed affinare una serie di modelli geofisici predittivi dell'evoluzione del livello del mare (Lambeck et al., 2011; Vacchi et al., 2016;

2018) oltre che ricostruire con approcci statistici la variabilità dei tassi di risalita del livello del mare Mediterraneo in risposta alle variazioni climatiche che sono occorse a partire dall'ultimo massimo glaciale (Vacchi et al., 2021).

Le prossime sfide scientifiche nell'utilizzo delle beachrock sono sicuramente legate alla comprensione della mobilità della linea di riva in risposta alle modificazioni climatiche. Infatti, questi depositi, attualmente relitti anche a grandi profondità, rappresentano un'istantanea della posizione della linea di riva in un determinato periodo (Fig. 3).



Figura 3. Modello Digitale del Terreno (DTM) e foto aerea della porzione di litorale situato a sud della Foce del Fiumorbu (Corsica centro-orientale). Il DTM e la foto aerea mostrano le diverse generazioni di beachrocks. Foto aerea di Matthieu Ghilardi (CNRS CEREGE, Francia).

In diversi settori costieri, la posizione rispetto alla linea di riva attuale di diverse generazioni di beachrocks, potrebbe fornire importanti spunti per comprendere la risposta dei litorali a modificazioni climatiche come cambi nei tassi di risalita del livello del mare oppure nel trasposto solido dei fiumi nel periodo pre-industriale (e.g., pre 1850). Questi dati sarebbero fondamentali per definire il futuro delle nostre coste nel contesto del cambiamento climatico attualmente in atto.

Bibliografia

- Bar A., Zviely D., Roskin J., Galili E., Porat, N., Bookman R., 2024. Beachrock: A chronological benchmark for Late Holocene build-up on the coast of Israel. *Geomorphology*, 465, 109408.
- De Muro S., Orrù P., 1998. Il contributo delle Beach-Rock nello studio della risalita del mare olocenico. Le Beach-Rock post-glaciali della Sardegna nord-orientale. *Il Quaternario*, 11(1), 19-39.
- Desruelles S., Fouache É., Ciner A., Dalongeville R., Pavlopoulos K., Kosun E., ... Potdevin J. L., 2009. Beachrocks and sea level changes since Middle Holocene: Comparison between the insular group of Mykonos-Delos-Rhenia (Cyclades, Greece) and the southern coast of Turkey. *Global and Planetary Change*, 66(1-2), 19-33.
- Desruelles S., Fouache É., Pavlopoulos K., Dalongeville R., Peulvast J. P., Coquinot, Y., Potdevin, J. L., 2004. Beachrocks et variations récentes de la ligne de rivage en Mer Egée dans l'ensemble insulaire Mykonos-Délos-Rhénée (Cyclades, Grèce)/Beachrock and recent sea-level changes on

- Mykonos, Delos and Rhenia islands (Cyclades, Greece). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 10(1), 5-17.
- Fanucci F., Fierro G., Ozer A., Piccazzo M., 1974. Ritrovamento di una "Beach-Rock" a 70 metri di profondità nelle bocche di Bonifacio. *Studi sassaresi. Sezione III, Annali della Facoltà di agraria dell'Università di Sassari*, 2.
- Gewelt M., Fierro G., 1984. Le beach-rock de Capo Noli (Finale Ligure, Italie): datation ¹⁴C et variations diurnes du pH dans des cuvettes. *MOM Éditions*, 8(1), 55-66.
- Ghandour I.M., Al-Washmi H.A., Khan A.A., Mannaa, A.A., Aljahdali M.H., Jones B.G. 2021. Depositional setting and cementation pattern of Al-Mejarma beachrocks, Saudi Arabia: a proxy for the late Quaternary Red Sea coastal evolution. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9), 1012.
- Giresse P., Berné S., Certain R., Courp T., Hebert B., Raynal O., 2023. Beachrocks and lithified barriers in the Gulf of Lions (western Mediterranean Sea) as new markers of the last sea-level rise. *Sedimentology*, 70(2), 569-591.
- Hopley D., 1986. Beachrock as a sea-level indicator. In *Sea-level Research: a Manual for the Collection and Evaluation of Data* (pp. 157-173). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Karkani A., Evelpidou N., Vacchi M., Morhange C., Tsukamoto S., Frechen M., Maroukian H., 2017. Tracking shoreline evolution in central Cyclades (Greece) using beachrocks. *Marine Geology*, 388, 25-37.
- Kelletat D., 2006. Beachrock as sea-level indicator? Remarks from a geomorphological point of view. *Journal of Coastal Research*, 22(6), 1558-1564.
- Knight J., 2007. Beachrock Reconsidered. Discussion of: Beachrock as Sea-Level Indicator? Remarks from a Geomorphological Point of View. *Journal of Coastal Research*, 22 (6), 1558–1564. *Journal of Coastal Research*, 23(4), 1074-1078.
- 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. *Quaternary International*, 232(1-2), 250-257.
- Mauz B., Vacchi M., Green A., Hoffmann G., Cooper A., 2015. Beachrock: a tool for reconstructing relative sea level in the far-field. *Marine Geology*, 362, 1-16.
- Meyers W.J., 1974. Carbonate cement stratigraphy of the Lake Valley Formation (Mississippian) Sacramento Mountains, New Mexico. *Journal of Sedimentary Research*, 44(3), 837-861.
- Neumeier U., 1998. Le rôle de l'activité microbienne dans la cimentation précoce des beachrocks (sédiments intertidaux). Institut Forel, Département de minéralogie, Département de géologie et paléontologie, Section des sciences de la terre, Université de Genève.
- Neumeier U., 1999. Experimental modelling of beachrock cementation under microbial influence. *Sedimentary geology*, 126(1-4), 35-46.
- Ozer A., Tucci S., Ulzega A., 1984. Les beach-rocks de Sardaigne. Distribution et implications paléogéographiques. *Le Beach-Rock. Travaux de la Maison de l'Orient*, 8, 113-124.
- Plummer, L. N. (1975). Mixing of sea water with calcium carbonate ground water. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 142, 219-236.
- Turner R.J., 2005. Beachrock. *Encyclopedia of coastal science*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 183-186.
- Vacchi M., Rovere A., Zouros, N., Desruelles S., Caron V., Firpo M., 2012. Spatial distribution of sea-level markers on Lesbos Island (NE Aegean Sea): evidence of differential relative sea-level changes and the neotectonic implications. *Geomorphology*, 159, 50-62.
- 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.

- Vacchi M., Ghilardi M., Melis R.T., Spada G., Giaime M., Marriner N., ... Rovere A., 2018. New relative sea-level insights into the isostatic history of the Western Mediterranean. *Quaternary Science Reviews*, 201, 396-408.
- Vacchi M., Ghilardi M., Stocchi P., Furlani S., Rossi V., Buosi C., ... De Muro S., 2020. Driving mechanisms of Holocene coastal evolution in the Bonifacio Strait (Western Mediterranean). *Marine Geology*, 427, 106265.
- Vacchi M., Joyse K.M., Kopp R.E., Marriner N., Kaniewski D., Rovere A., 2021. Climate pacing of millennial sea-level change variability in the central and western Mediterranean. *Nature communications*, 12(1), 4013.
- Vieira M.M., De Ros, L.F., Bezerra, F.H.R., 2007. Lithofaciology and palaeoenvironmental analysis of Holocene beachrocks in northeastern Brazil. *Journal of coastal Research*, 23(6), 1535-1548.
- Vött A., Bareth G., Brückner H., Curdt C., Fountoulis I., Grapmayer R., ... Willershäuser, T., 2010. Beachrock-type calcarenitic tsunamites along the shores of the eastern Ionian Sea (western Greece)-case studies from Akarnania, the Ionian Islands and the western Peloponnese. *Zeitschrift für Geomorphologie. Supplementband*, 54(3), 1.
- Vousdoukas M. I., Velegrakis A.F., Plomaritis T.A., 2007. Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts. *Earth-Science Reviews*, 85(1-2), 23-46.

Manoscritto ricevuto il 10/03/2025, accettato il 30/03/2025.