

## IL CONTRIBUTO DELLE *BEACH-ROCK* NELLO STUDIO DELLA RISALITA DEL MARE OLOCENICO. LE *BEACH-ROCK* POST - GLACIALI DELLA SARDEGNA NORD-ORIENTALE

S. De Muro - P. Orrù

Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Cagliari, Via Trentino n. 51, Italia

**RIASSUNTO** - *Il contributo delle beach-rock nello studio delle modalità di risalita del mare olocenico. Le beach-rock post glaciali della Sardegna Nord-Orientale* - Viene esaminato lo stato delle conoscenze sulle *beach-rock* in Mediterraneo, in particolare sono stati discussi gli ambiti, le problematiche e le limitazioni legate all'utilizzo delle *beach-rock* nella costruzione di curve di risalita eustatica Pleistocene-Olocene. Particolarmente numerosi sono stati gli studi e le segnalazioni di *beach-rock* per la piattaforma continentale della Sardegna; tali ricerche, sulla base di evidenze geomorfologiche, sedimentologiche e paleo-ambientali attribuivano queste linee di riva a interstadi della trasgressione versiliana. Recenti studi sulle *beach-rock* della Sardegna Nord-orientale consentono di precisare meglio l'ambiente deposizionale, le facies di precipitazione dei cementi, in particolare è stata documentata l'importanza dell'attività batterica nella precipitazione iniziale dei carbonati. Sugli stessi depositi nuove analisi isotopiche, compiute sia sui cementi che sui bioclasti, hanno consentito di collocarle cronologicamente nell'ambito dell'Olocene, e di integrare con nuovi contributi la curva di risalita costruita esclusivamente con dati di *beach-rock* per il Mediterraneo occidentale.

**ABSTRACT** - *Beach-rock's contribution in the study of the modalities of the olocenic sea rising. Post-glacial beach-rocks of the North-East Sardinia*. - As a part of multidisciplinary research studies aimed at the reconstruction of the modalities and mechanisms of Mediterranean sea level rise in the past 20,000 years, we believe it is useful to concentrate our attention on the contribution that may derive from the study of *beach-rocks*. This work represents a critical re-examination of the existing information framework, both published and unpublished, having the objective of contributing to integrate the curve of post-glacial sea level rise, as regard the centre-western Mediterranean Sea. The complicated issue of the use of *beach-rocks* as marine palaeo-levels has reduced their role, in the past years, in reconstructing the curves of eustatic rise; despite the wide scientific production on submerged *beach-rocks* in the Mediterranean. Numerous studies and surveys on *beach-rock* in the Sardinian continental shelf have found several evidences of stationary levels of the Holocene sea, both in the deposition facies, beach rocks and relict littoral sediments, and in the erosion facies, abrasion surfaces and ledges cutting the substrate. From the recent bibliography it can be deduced that during the Holocene the whole Island reached remarkable tectonic stability; the marine deposits related to the Middle and Upper Pleistocene lie at consistent and correlative levels except for a few rare sites where mild vertical blocks are observed. On one hand, this may justify the particularly conservative characters of the Sardinian continental shelf compared to the shorelines, whilst on the other one it qualifies Sardinia as a key area in redrawing the post-glacial sea rise in the western Mediterranean. In the Italian seas, the first shorelines related to the Versilian transgression and, among these, the relict submerged sandbanks at - 40 m in the Golfo di Palmas (south-western Sardinia) were found by Segre in 1969. Subsequently, after surveying the *beach-rock* at - 70 m in the Straits of Bonifacio a complex system of perfectly preserved submerged shorelines along the Sardinian north-eastern continental shelf (between - 55 and - 145 m) was observed. This evidence of the variation of the deglacial sea level therefore enables the bypass between Sardinia and Corsica up to the present level (- 75m) to be recognised. The economic significance of the relict littoral sediments as heavy minerals-bearing sediments has increased the interest of researchers (involved in the "Oceanografia e Fondi Marini - Risorse Minerarie - Placers" Project of C.N.R.) on submerged shorelines. The geophysical prospecting techniques were refined, the first cartographic experiences were accomplished for the south-western Sardinia and the first underwater samplings of a *beach-rock* was collected at -33 m offshore Cala Liberotto. The wide geophysical prospecting and sampling on the entire continental shelf have completed the present knowledge on the geographical and bathymetric distribution of the *beach-rocks*, and have suggested the eastern part of the shelf as more conserving than the western one. The set of data was represented in the first geomorphological-cartographic synthesis of the entire Sardinian continental shelf. The early results obtained with in the mining Project stimulated a specific research activity along the submerged shorelines. The detailed cartography methods, the underwater prospecting techniques and the procedures of sedimentological and mineralogical analysis were developed on the perfectly preserved *beach-rock* in the sample area of Fontanamare in south-western coast. The contribution of the underwater survey in supplementing the geophysical data was of a great impulse to geomorphologic cartography of the sea bottoms. Consequently, a detailed mapping of *beach-rocks* in the south-eastern continental shelf at -40 and -55 m, in the Ria of Arzachena (north-eastern sector) at -2 and -10, in the Gulf of Asinara at -45 m, and in the Straits of Bonifacio at -30m was performed. Littoral-transitional depositional complexes characterised by *beach-rocks* in different arrangements have been observed: the Gulf of Cagliari at -25, -40, -55 m; the northern sector of the Gulf of Orsei at - 35, -40 e -55 m; and the Canale di San Pietro at - 5 m. At the same time, on the western Sardinian continental platform, relict sedimentary bodies related to the Versilian transgression have been studied and their geometries and sedimentological aspects analysed. The lack of information on the occurrence of *beach-rocks* on the -10 to 30 m bathymetric range in the Sardinian seas seems to depend on the masking of the outcrops by *Posidonia oceanica*. A part of the surveys aimed at establishing Marine Reserves; detailed mapping of the marine phanerogam meadows shows *beach-rocks* discontinuously outcropping out of vegetable bioconstructions in the Bay of Tavolara at -5, -25, - 28 m, in the area of Capo Carbonara and in Sinis - Gulf of Oristano. This paper shows the methodological evolution of the geophysical surveys by Side Scan Sonar and Sub-bottom profiler; the scuba diving and remote operate vehicle survey; the analysis of sediments and cements: mineralogical and geochemical - S.E.M. Both classic and accelerator mass spectrometry A.M.S. isotopic C14 methodology was particular emphasised. The research proceeded uninterruptedly increasing the detail on both geomorphological s.s and geochemical-sedimentological aspects. Further geochronological studies have shown the comparison between radiometric data globally obtained on the *beach-rocks*. From a palaeoclimatic and palaeoenvironmental point of view, it has been possible to read the isotopic ratios of both Oxygen and Carbon in the *beach-rock* cements of north-eastern Sardinia and southern Corsica. By these data results, it has been possible to draw the first curve of the Holocenic rise based on the *beach-rock* data only. From the analysis of the cements, supported by the new elements from the A.M.S. radiometric age of the *beach-rock* of Cala Liberotto (- 33 m), it has been possible to justify the curve of rise of the post Late Glacial Maximum sea. Moreover, the depositional characters and the facies of cement precipitation were better define. In particular, the impor-

tance of the bacterial activity in the initial precipitation of Mg-calcite was recognised. The notable scientific interest of these outcrops in reconstructing the Holocene eustatic curve is related to the possibility of correlating the data obtained in these studies with those from the south-eastern basin of the Mediterranean. The regional scale view of the problem would thus lead to a reliable reconstruction of the palaeogeography of the Holocene sea of the central-western area of the Mediterranean Sea. The most significant limiting factors in using the beach rock data in the sea-level rise curve have proved to be the discontinuity of the outcrops, the often bad condition of conservation, genetic characteristics (that are not always clear), the distribution in continental shelves of different origin and often characterised by significant depositional processes or their location in neotectonically active areas, and the difficulty in dating *palaeo-beach sediments* (apart from a few particular cases). These factors require:

- A detailed analysis of the coastal and shelf geomorphological context;
- Great care in dating both the cements, which can bear different mineralogical, genetical, chronological and diagenetic features, and the bioclasts, which could be subjected to a polycyclical elaboration.

However, to date, the data belonging to *beack-rocks* do not allow us to determine the paleo sea level with a detail greater than 5 m.

Parole chiave: *Beach-rock*, geomorfologia, sedimentologia, linee di riva sommerse, Olocene, piattaforma continentale, Sardegna.  
Key words: Beach-rock, geomorphology, sedimentology, submerged sea-level, Holocene, continental shelf, Sardinia.

## 1. SCOPO DEL LAVORO

Nell'ambito di ricerche multidisciplinari finalizzate alla ricostruzione delle modalità di risalita del livello marino del Mediterraneo negli ultimi 20.000 anni, si è ritenuto opportuno precisare le problematiche relative ai contributi forniti dallo studio delle *beack-rock*.

Nonostante le numerose segnalazioni di *beack-rock* sommerse in Mediterraneo (Higgins, 1969; Stefanon, 1971; Alexandersson, 1972; Fierro *et al.*, 1974; Sanlaville, 1984; Mary, 1984; El Sayed, 1987) la complessa problematica connessa all'utilizzo delle *beack-rock* quale paleo-livelli marini ne ha sino ad ora ridotto l'importanza nella costruzione delle curve di risalita eustatica (fig.1).

I fattori limitanti si sono dimostrati la discontinuità degli affioramenti, le spesso cattive condizioni di conser-

vazione, i caratteri genetici non sempre chiari, la distribuzione in piattaforme continentali con processi deposizionali importanti o neotettonicamente attive.

In questo quadro si discosta per singolarità la piattaforma continentale sardo-corsa, in termini di conservazione di numerosissime *beack-rock* a differenti quote e con notevole continuità degli affioramenti (Ulzega *et al.*, 1980; Nesteroff, 1984; Ulzega *et al.*, 1986; Brambati & De Muro 1992c); ciò suggerisce di approfondire le possibilità di utilizzo di queste formazioni litorali sommerse per ricostruire le relative linee di riva, definendone con precisione gli ambiti spazio-temporali.

Sono state attivate quindi nuove indagini, geomorfologiche, sedimentologiche e geocronologiche sulle formazioni di *beack-rock* sommerse lungo la piattaforma continentale della Sardegna nord-orientale.

Lo studio, prendendo l'avvio dal riesame critico

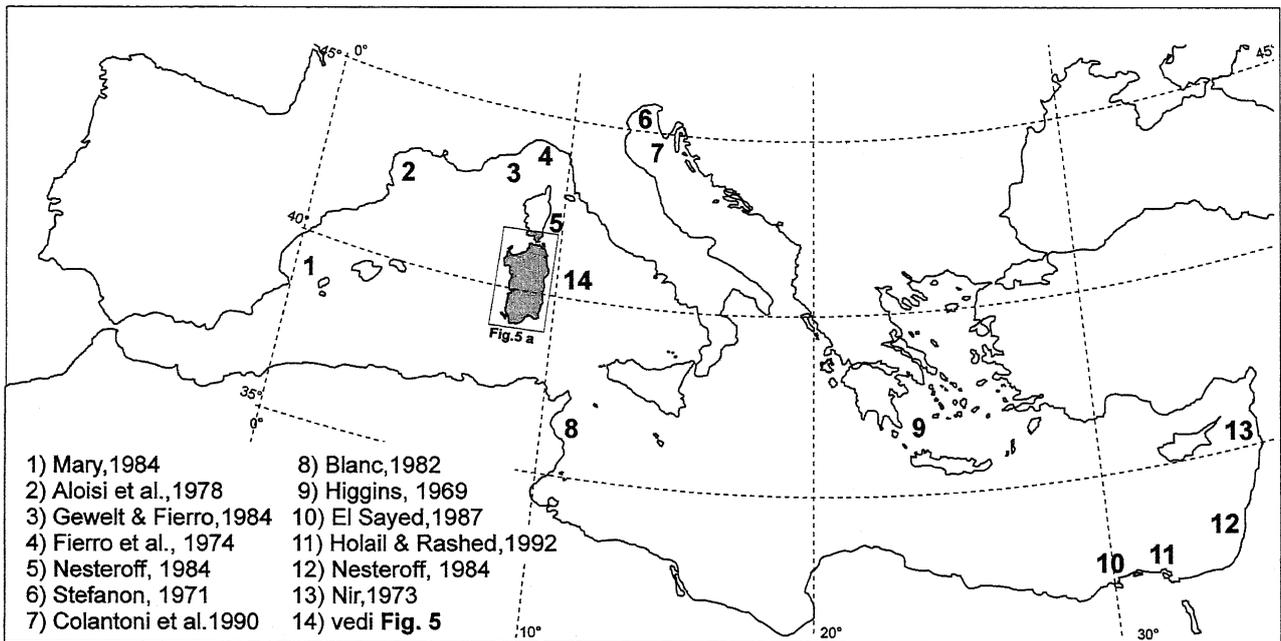


Fig. 1- Distribuzione degli studi sulle *beack-rock* nel Mediterraneo.

*Distribution of beach-rock studies in Mediterranean sea*

delle informazioni esistenti, edite ed inedite, si propone di superare i fattori limitanti propri dell'ambiente di *beach-rock* attraverso l'incrocio di metodiche complementari nella elaborazione dei nuovi dati, finalizzate alla costruzione di una curva di risalita post-glaciale del livello marino, valida per il Mediterraneo centro-occidentale.

## 2. LE BEACH ROCK

Parametro base nella definizione dell'ambiente di spiaggia è il livello medio mare (Carobene & Brambati, 1975), tuttavia, a causa della notevole dinamicità del sistema, non è sempre facile definire con precisione la linea di riva sia in termini planimetrici che altitudinali in una spiaggia attuale.

Notevolmente più difficoltoso risulta il riconoscimento e la mappatura della linea di riva in antiche spiagge, i cui sedimenti si sono conservati in piattaforma a seguito di processi di sommersione allo stato inconsolidato (spiagge relitte) o allo stato cementato (*beach-rock*).

Un primo censimento delle spiagge relitte per i mari italiani è stato realizzato da Segre (1969); in tempi recenti studi di dettaglio hanno interessato un complesso di cordoni litorali relitti a profondità comprese tra -43 e -49 m in Medio Adriatico, per i quali viene proposta una età di 7.700 anni BP (Colantoni et al, 1990), datazione che, tenendo conto dei processi di subsidenza attivi nella zona, ben si accorda con le curve di risalita del mare olocenico proposte da Pirazzoli (1991).

Più frequente è la conservazione di paleo-spiagge allo stato consolidato (*beach-rock*), ad opera di processi di cementazione avvenuti sia in condizioni subaeree che sottomarine.



Fig. 2 - Golfo di Cagliari. Immagine del fondo a -55 m. L'affioramento di *beach-rock* è interessato da cedimenti differenziali e basculamenti di blocchi, a causa di processi di scalzamento alla base, che alterano sensibilmente l'assetto geometrico-giaciturale del corpo deposizionale originale.

*Cagliari Gulf: image of the sea bottom at -55m. The beach-rock outcrop is a result of differential sinking and tilting of blocks, created by undermining processes, which alter, in a very tangible way, the geometrical-lying order of the original depositional body.*

Ne consegue una relativa facilità di riconoscimento, di rilevamento e di mappatura cui corrispondono, però nuove problematiche proposte dalla estrema variabilità di scenari geomorfologici, geochimici e biochimici in grado di controllare i meccanismi della cementazione. Su questi argomenti il dibattito scientifico è ancora in corso (Holail & Rashed, 1992).

Tutti gli Autori sono concordi nel definire *beach-rock* stricto sensu un deposito clastico litorale, arenaceo o conglomeratico cementato da carbonati calcitico-magnesiaci o aragonitici precipitati in ambito intertidale. Ne consegue l'esclusione di tutti i litotipi dovuti a cementazione di sedimenti supralitorali (dune, sabbie colluviali, sabbie alluvionali, ecc.) o i depositi litorali consolidati da cementi non carbonatici (silicati e ossidi) o esclusivamente biogenici (biocostruzioni ad alghe rosse, a coralli ecc.).

Il concetto di *beach-rock* s.s. prevede che sia l'ambiente di elaborazione e di deposizione del sedimento che l'ambito di cementazione primaria corrisponda alla zona di riva, intendendo altitudinalmente i limiti tidali e, trasversalmente, i limiti di espansione dei massimi frangenti.

Pur essendo note in letteratura *beach-rock* cenozoiche e giurassiche (Bernier 1984), questi depositi sono caratteristici di ambienti litorali sub-attuali o recenti, particolarmente rappresentate sono le *beach-rock* relative all'ultima risalita del livello marino.

### 2.1. Caratteri geomorfologici

L'aspetto d'insieme degli affioramenti di *beach-rock*, caratterizzati spesso da evidenti forme di erosione sia sulla superficie sommitale che ai bordi dell'affioramento, ne ha suggerito ai primi studiosi una genesi erosionale (Agassiz, 1938).

In realtà la giacitura in "bancate" debolmente inclinate verso il largo, tipica di questi affioramenti, riprende i caratteri giaciturali del corpo sedimentario di spiaggia; le strutture sedimentarie rappresentate sono quelle tipiche di ambiente litorale (quali laminazione piano-parallela, cuneiforme, sigmoidale ed inclinata) (figg. 3, 7); queste strutture sedimentarie sono in genere troncate da superfici erosionali di interstrato.

Alcune forme di erosione delle *beach-rock* concordano con il modello di sommersione e conservazione di cordoni litorali in piattaforma continentale secondo il processo di *transgressive submergence* (Penland et al., 1988); tale meccanismo prevede la rielaborazione sottomarina del corpo sedimentario litorale, in assenza di cementazione, fino a produrre lo spostamento verso terra della paleo-spiaggia (Colantoni et al, 1990).

Nel caso della sommersione di una *beach-rock* il complesso sedimentario mantiene la posizione originale, ma viene sottoposto a processi ero-

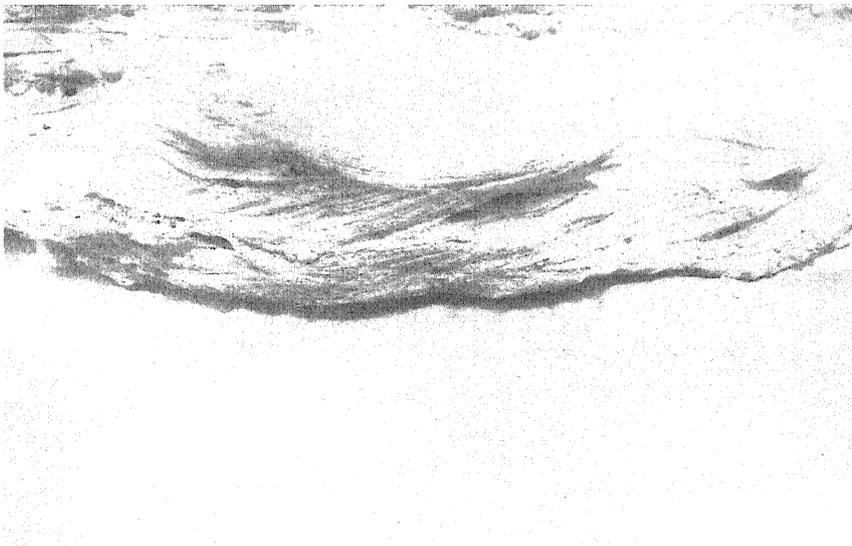


Fig. 3 - Dettaglio delle arenarie-microconglomeratiche di *beach-rock* affioranti a -1,5 m nel Golfo di Cagliari. Le evidenti strutture sedimentarie a laminazione sigmoidale con foreset troncati, consentono di identificare con relativa precisione la zona di battigia nel corpo deposizionale della paleo-spiaggia.

*Particular of beach-rock's sandstone-microconglomerate at 1,5m in the Gulf of Cagliari. The evident sedimentary structures, with a sigmoidal lamination and cut off foreset, allow a precise identification of the shore-line zone in the depositional body of the paleo-beach.*

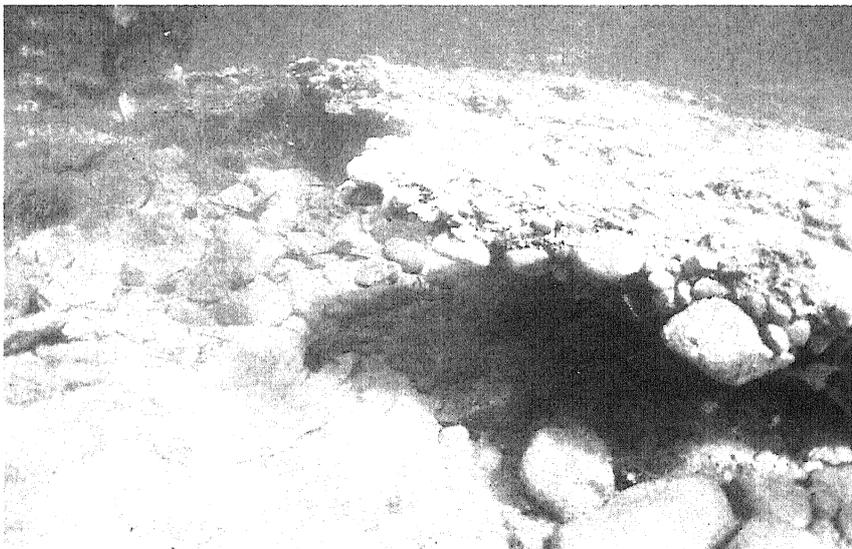


Fig. 4 - Granulometricamente le *beach-rock* variano da peliti sabbiose fino a ruditi; la foto subacquea mostra l'esempio di una *beach-rock* conglomeratica a -2 m (Golfo di Cagliari).

*From the textural point of view beach-rock varying from sandy-pelites to pebbles; the bottom photo show the example of a conglomeratic beach-rock -2 m (Cagliari Gulf)*

sivi che ne modificano in parte i caratteri geometrici; spesso le superfici di strato sono troncate da una superficie di erosione sommitale a canali e marmitte di evorsione, testimoniando la parziale asportazione della parte superiore dello stock sedimentario originale.

I processi di erosione lungo i bordi seguono modalità differenti: l'assetto giaciturale espone in maggior misura all'arretramento le testate dei banchi lungo il limite interno (verso terra), mentre lungo il limite esterno fenomeni di scalzamento alla base, con migrazione verso il largo di sedimenti, provocano fratture di asse-

stamento cui sono collegati cedimenti differenziali e basculamenti di blocchi (figg. 2, 7, 11).

I processi di scalzamento possono produrre inoltre inclinazioni apparenti degli strati particolarmente accentuate, o scivolamenti di bancate sulle sottostanti.

Il corpo sedimentario originale può subire quindi una sensibile riduzione sia in spessore che in estensione trasversale e mostra una caratteristica rete sub-ortogonale di fratturazione. In alcuni casi processi erosivi particolarmente spinti possono alterare completamente la geometria originale della *beach-rock*, fino alla evoluzione in placche residuali, in blocchi disarticolati o alla interruzione di continuità degli affioramenti.

Lungo le fratture principali si possono verificare dislocazioni, dovute al cedimento di sedimenti compressibili sottostanti; tale processo, può evolvere secondo una strutturazione a gradoni (fig. 2) portando ad un cedimento complessivo di circa 10 m (Orrù & Ulzega, 1986). Situazioni simili sono estremamente diffuse, registrazioni ecografiche a bassa frequenza documentano la prosecuzione sotto le *beach-rock* da depositi pelitico-sabbiosi transizionali o l'esistenza di paleo-alvei colmati da sedimenti fini e torbe (Orrù & Ulzega, 1987).

Singolari convergenze morfologiche caratterizzano a volte gli affioramenti sommersi di *beach-rock* e delle eolianiti; spesso la superficie di erosione sommitale maschera differenze litologiche anche importanti, mentre a volte arenarie di alta spiaggia sfumano in arenarie eoliche senza soluzione di continuità (DeMuro, 1990).

## 2.2. Modalità di cementazione

I processi di cementazione della *beach-rock* richiedono l'immobilizzazione almeno temporanea di un corpo sedimentario di spiaggia,

generalmente (estremamente) dinamico; d'altra parte non appare necessaria la fossilizzazione completa della spiaggia per lunghi periodi, sono note in letteratura *beach-rock* sub-attuali sepolte sotto un velo di sabbia e cementanti bottiglie di Pepsi Cola (Sanlaville, 1984).

I processi di cementazione responsabili della formazione delle *beach-rock* attuali si sviluppano tra i limiti inferiore e superiore della marea, infatti la potenza complessiva degli strati cementati è di alcuni metri nelle zone ad elevate escursioni di marea, 4 metri per le *beach-rock* della Grande Barriera australiana (Davies & Kinsey, 1973) mentre in aree microtidali come il

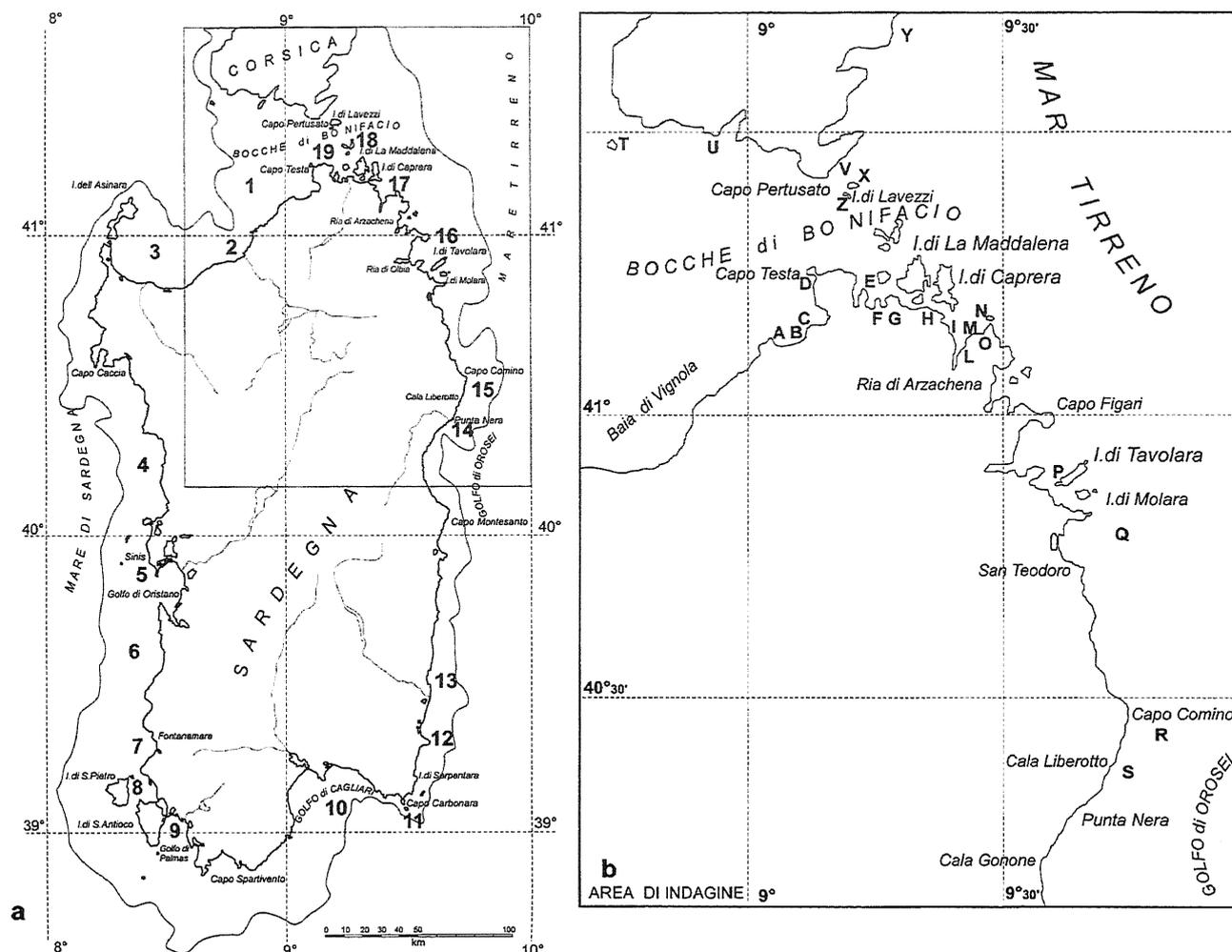


Fig. 5a - Distribuzione degli studi sulle beach-rock nella piattaforma continentale sarda: 1) Fanucci et al., 1974; Ozer et al., 1980; 2) Ozer et al., 1983; 3) Ulzega et al., 1984; 4) Carboni e Lecca, 1993; 5) Forti e Orrù, 1995; 6) Carboni et al., 1989; 7) Ulzega e Orrù, 1984; 8) Orrù e Ulzega, 1989; 9) Segre, 1969; 10) Ulzega et al., 1986; 11) Orrù et al., 1994; 12) Ulzega et al., 1984; 13) Lecca et al., 1979; 14) Orrù e Ulzega, 1987; D'Angelo et al., 1996; 15) Ulzega et al., 1980; Grillo et al., 1984; 16) Orrù e Pasquini, 1992; 17) De Muro e Ulzega, 1985; De Muro, 1994; De Muro et al., 1996; 18); De Muro et al., 1996; Cespuglio 1996; Camin, 1997 pers.com.; 19) De Muro e Ulzega, 1988; De Muro; 1990; Brambati e De Muro, 1992; De Muro 1994; De Muro et al., 1996.

*Distribution of beach-rocks studies in sardinian continental shelf: 1) Fanucci et al., 1974; Ozer et al., 1980; 2) Ozer et al., 1983; 3) Ulzega et al., 1984; 4) Carboni and Lecca, 1993; 5) Forti and Orrù, 1995; 6) Carboni et al., 1989; 7) Ulzega and Orrù, 1984; 8) Orrù and Ulzega, 1989; 9) Segre, 1969; 10) Ulzega et al., 1986; 11) Orrù et al., 1994; 12) Ulzega et al., 1984; 13) Lecca et al., 1979; 14) Orrù and Ulzega, 1987; D'Angelo et al., 1996; 15) Ulzega et al., 1980; Grillo et al., 1984; 16) Orrù and Pasquini, 1992; 17) De Muro and Ulzega, 1985; De Muro, 1994; De Muro et al., 1996; 18); De Muro et al., 1996, Cespuglio 1996; Camin, 1997; 19) De Muro and Ulzega, 1988; De Muro; 1990; Brambati and De Muro, 1992; De Muro 1994; De Muro et al., 1996.*

Fig. 5b - Distribuzione delle beach-rock in corso di studio avanzato, ubicate nel settore Nord-orientale nella Sardegna e nella Corsica meridionale: A) Baia di Vignola; B) Naracu Nieddu; C) Capo di Monti Russu; D) Capo Testa; E) Isola di Spargi; F) Isola dei Gabbiani; G) Palau; H) Poltu Mannu; I) Barca Brusciata; L) Cannigioni; M) Poltu Cuatu; N) Liscia di Vacca; O) Cala Ghiaia; P) Tavolara; Q) San Teodoro; R) Capo Comino; S) Cala Liberotto; T) Moines; U) Figari; V) Cala Lunga; Z) Lavezzi; X) San Bainzo; Y) Palumbaggia.

*Distribution of advanced studies about beach-rocks, located in north-east Sardinia and southern Corsica: A) Baia di Vignola; B) Naracu Nieddu; C) Capo di Monti Russu; D) Capo Testa; E) Isola di Spargi; F) Isola dei Gabbiani; G) Palau; H) Poltu Mannu; I) Barca Brusciata; L) Cannigioni; M) Poltu Cuatu; N) Liscia di Vacca; O) Cala Ghiaia; P) Tavolara; Q) San Teodoro; R) Capo Comino; S) Cala Liberotto; T) Moines; U) Figari; V) Cala Lunga; Z) Lavezzi; X) San Bainzo; Y) Palumbaggia.*

Mediterraneo gli affioramenti presentano modesti spessori, in genere inferiori al metro (Alexandersson, 1972; El Sayed, 1988). Non sembra rispondere alla stessa regola la gran parte delle beach-rock rilevate lungo la piattaforma sarda ove la potenza dei depositi è mediamente compresa tra 4 e 5 metri (Ulzega et al., 1984), pur tro-

vandosi in ambito microtidale; la spiegazione, escludendo ipotesi di variazioni tidali durante la trasgressione olocenica, può essere ricercata in processi di cementazione sinsedimentari che seguono la trasgressione; in questo caso la beach-rock non rappresenterebbe una sola linea di riva ma una serie di linee di battigia

sovrapposte.

La formazione attuale di *beach-rock* è in genere limitata a latitudini comprese a 30° nord e sud, al di sopra degli ambiti latitudinali delle formazioni coralline viventi (Hopley, 1982).

La distribuzione latitudinale delle *beach-rock* sommerse, legate alla risalita del mare olocenico, si estende fin oltre il 45° parallelo (Fanucci *et al.*, 1974; Stefanon, 1971), la formazione di questi affioramenti appare comunque legata a temperature medie più elevate delle attuali.

La precipitazione dei cementi avviene in zona di interfaccia falda freatica vadosa - falda freatica marina - aria, con carattere polifasico e polimorfico, e può avere una evoluzione eccezionalmente rapida, anche dell'ordine di dieci anni (Frankel, 1968; Alexanderson, 1972; Guo & Friedman, 1990).

La cementazione carbonatica in una *beach-rock*. (Milliman, 1974) segue generalmente le seguenti fasi: (figg. 12, 13b)

- concrezionamento dei granuli da parte di un film criptocristallino a composizione calcitica o calcite magnesiaca
- seconda generazione fibrosa o aciculare a calcite magnesiaca o aragonite
- riempimento micritico o globulare biogenico, calcite magnesiaca

La precipitazione appare localizzata nella zona di interfaccia acqua dolce ed acqua salata e particolarmente importante è spesso il ruolo dell'attività biogenica; la calcite magnesiaca precipita al contatto con filamenti algali e "feltri" o "trame a ciano-batteri" (Trichet, 1965) (figg. 14ab).

Anche la formazione dei cristalli aragonitici, per soprassaturazione delle acque marine, è correlabile sia alle modificazioni dei parametri evaporazione e temperatura che alle fluttuazioni del Ph correlate all'attività batterica intergranulare (Morita R.Y., 1976).

La cementazione si presenta prevalentemente aragonitica nei mari tropicali, mentre domina la calcite magnesiaca in Mediterraneo (Blanc, 1984), in precedenza altri autori indicavano per la cementazione calcitico-magnesiaca una origine prevalentemente diagenetica, per alterazione della aragonite (Taylor & Illing, 1971).

Tuttavia gli studi geochemici su alcune *beach-rock*, sia in condizioni subaffioranti lungo la costa mediterranea dell'Egitto (El Sayed, 1987) che sommerse a -6, -8, -11, -14 m presso l'isola di Rodi (Alexandersson, 1972), mostrano che la composizione mineralogica ed isotopica del cemento di precipitazione è strettamente marina.

Appare oggi maggiormente sostenuta da recenti studi, anche in relazione al più frequente utilizzo del microscopio elettronico a scansione SEM la cementazione primaria ad aragonite (Holail & Rashed, 1992), in facies fibroso-aciculare e criptocristallina, dovuta alla precipitazione di carbonati dell'acqua marina in zona di interfaccia con l'aria all'interno dei pori intergranulari, cui può succedere una precipitazione calcitica legata ad acque meteoriche (Milliman, 1974; Bernier & Dalongeville, 1996).

### 2.3. La datazione della linea di riva

La precisa collocazione cronologica della linea di riva cui la *beach-rock* è riferibile apre la problematica connessa a due differenti alternative di datazione (età

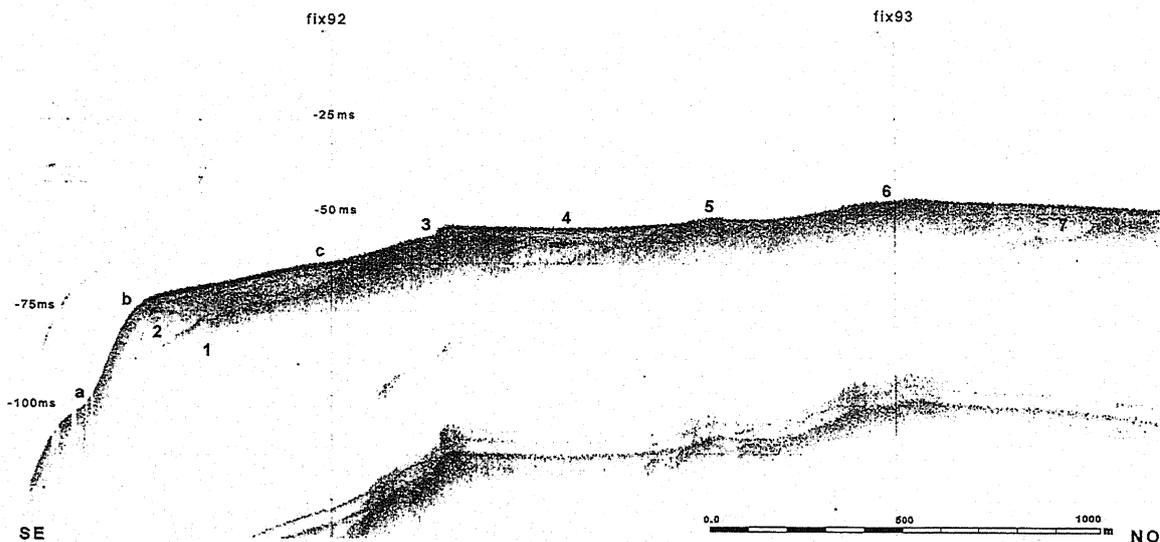


Fig. 6 - Golfo di Orosei. Settore al traverso di Cala Liberotto. Profilo Sub Bottom Profiler 3.5 Khz - La piattaforma continentale esterna conserva un complesso deposizionale cordone-laguna organizzato in diversi ordini. 1) substrato; 2) terrazzo deposizionale di low stand, a - limite inferiore, b - ciglio deposizionale, c - limite superiore; 3) cordone di beach-rock esterno a - 45 m; 4) depressione retrolitorale colmata da limi e torbe; 5) beach-rock di fondo baia a - 40 m; 6) cordone di beach-rock del secondo ordine a - 35 m; 7) colmata lagunare.

*Gulf of Orosei. Area of Cala Liberotto. Profile SBP 3.5 Khz. The external continental shelf retains a cord-lagune depositional complex, organized in different sequences: 1) bedrock; 2) depositional terrace of low stand, a) lower limit, b) depositional edge, c) higher limit; 3) beach-rock external cord at 45m; 4) retrolittoral hollow filled up; with mud and peat; 5) low bay's beach-rock at 40m; 6) beach-rock's cord of second order at 35 m; 7) lagoon filling.*

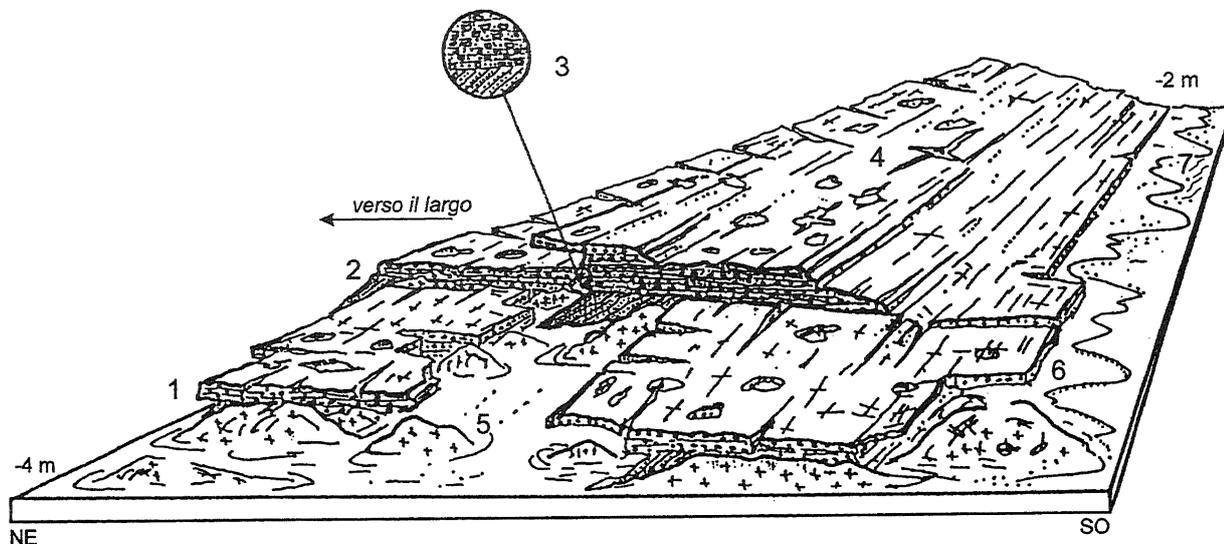


Fig. 7 - Barca Brusciata, da De Muro 1994 modificato. Blocco diagramma da rilevamento diretto in immersione. 1) cornici nette e superfici di strato con marmitte d'evorsione impostate su fratture ortogonali; 2) troncatura erosiva di lamine foreset (arenarie) e strutture laminari debolmente cuneiformi (conglomerato); 3) dettaglio delle strutture sedimentarie; 4) fratture a prevalente direzione NO-SE e NE-SO; 5) massi e blocchi granitici fortemente arrotondati; 6) sabbie attuali da fini a grosse; 7) area a ripple marks. Età radiometrica C14 calibrata, 2137 anni B.P.

*Barca Brusciata, according to De Muro, 1994 modifying. Block diagram from scuba dive survey. 1) sharp edges, eversion holes and layers surfaces, controlled by orthogonal fractures; 2) erosional truncation of foreset (sandstones) and lamination (conglomerates); 3) detail of sedimentary structures; 4) fractures in a prevalent NW-SE and NE-SW direction; 5) highly rounded granitic masses and boulders; 6) present fine to coarse sands; 7) ripples mark area. 14C radiometric calibrated age (2137 yr B.P).*

radiometriche): la datazione del contenuto paleontologico del corpo sedimentario e la datazione del cemento.

La datazione del guscio di un organismo attraverso i radioisotopi del carbonio indica la data di morte dell'organismo, cui si deve aggiungere il tempo di elaborazione del bioclasto, il tempo di trasporto e messa in posto entro lo stock sedimentario e di eventuali rielaborazioni. Ne consegue una possibilità di "invecchiamento" della linea di riva che nel caso di datazioni effettuate su organismi a scheletro particolarmente resistente (in grado di resistere a elaborazioni policicliche) può superare il migliaio di anni (Hopley, 1982).

La cementazione successiva alla stabilizzazione e parziale seppellimento dello stock sedimentario può essere in alcuni casi estremamente rapida (Sanlaville, 1984), ma i diversi scenari ambientali possibili e le conseguenti differenti modalità di cementazione, l'organizzazione della precipitazione in successione polifasica ecc., possono far incorrere in errori nella datazione di precipitazione dei cementi pari a diverse centinaia di anni rispetto alla reale età di costruzione del corpo di spiaggia (Milliman, 1974).

Si può quindi ipotizzare che l'età della linea di riva è successiva alla datazione del bioclasto ed anteriore alla datazione del cemento.

Ma per quanto riguarda una sommersione relativamente rapida del corpo di spiaggia, come quella conseguente alla trasgressione medio-olocenica, questo sfalsamento temporale risulterebbe considerevolmente compresso.

Questi problemi di interpretazione cronologica, unitamente agli altri di natura geomorfologica, sedimentologica, geochimica, e biochimica connessi con le beach-rock, hanno orientato i diversi autori verso un utilizzo

integrato di questi dati con altri provenienti da diversi ambienti: formazioni coralline, torbe e limi lagunari, depositi di fan-delta, ecc.

Così integrati i dati provenienti da *beach-rock* hanno contribuito alla elaborazione di curve sulla risalita del livello marino negli ultimi 20.000 anni: nell'Atlantico Nord-occidentale (Penland *et al.*, 1988), nell'Atlantico Sud-occidentale (Delibrias & Laborel, 1971) nel Mar della Cina (Zaho *et al.*, 1978) e nel Pacifico occidentale (Stearns, 1972) mentre non esistono curve di risalita eustatica costruite esclusivamente sulla base di beach-rock se non con significato locale (Laborel, 1984).

### 3. LE LINEE DI RIVA DELLA TRASGRESSIONE VERSILIANA IN SARDEGNA

Sulla piattaforma continentale sarda sono conservate numerose evidenze di stazionamento del livello marino olocenico sia in facies deposizionale, *beach rock* e sedimenti litorali relitti, che in facies erosiva, superfici di abrasione e cornici incise nel substrato. Dalla bibliografia recente si desume che durante l'Olocene, tutta l'isola abbia avuto una notevole stabilità tettonica; i depositi marini relativi al Pleistocene medio e superiore si mantengono a quote coerenti e correlabili (Ulzega & Ozer, 1982b) fatta eccezione per alcuni rari siti ove sono stati osservati blandi movimenti verticali a blocchi (Carobene, 1978); ciò da una parte può giustificare i caratteri particolarmente conservativi della piattaforma sarda, nei confronti delle linee di riva, dall'altra qualifica la Sardegna quale area chiave nella ricostruzione dei meccanismi di risalita del mare post-glaciale, per il Mediterraneo occidentale.

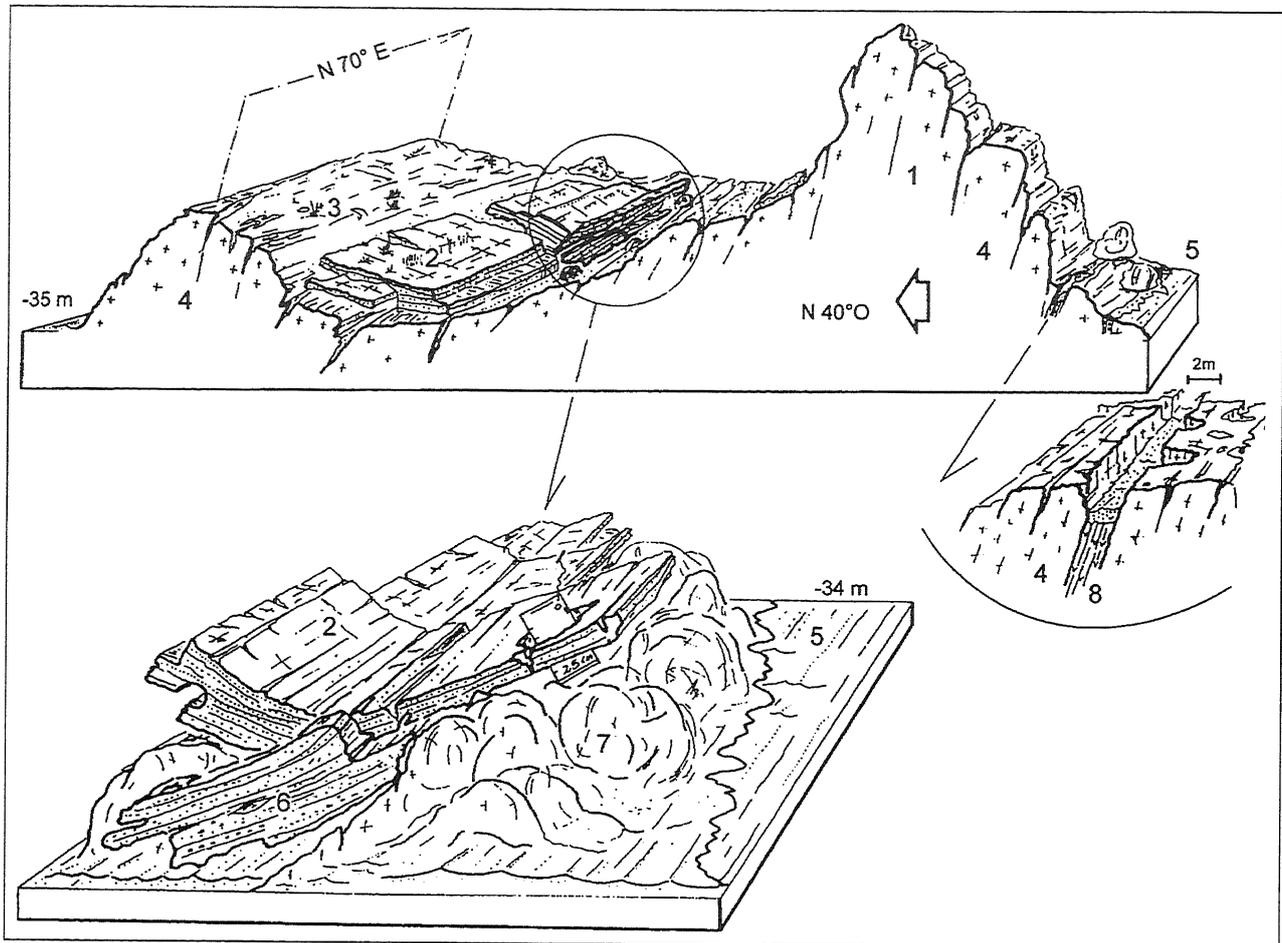


Fig. 8 - Capo Testa (Brambati e De Muro 1992). 1) Basamento granitico fortemente fratturato con evidenti diaclasi; 2) superfici di strato con marmite d'evorsione e fratture ortogonali (arenarie di spiaggia poligeniche a cemento carbonatico (*beach-rock*)); 3) piattaforma di abrasione in granito; 4) fratture a prevalente direzione N 70° E; 5) sabbie con ripple marks da fini a grosse; 6) dettaglio delle strutture sedimentarie; 7) massi e blocchi granitici fortemente arrotondati (- 30 m- -34 m). Età radiometrica C14 calibrata, 9783 anni B.P..

*Capo Testa according to Brambati and De Muro 1992. 1) Highly fractured basement granitic basement with deep, clearly visible diaclases; 2) layer surfaces with abrasion holes and orthogonal fracturing (polygenic arenaceous with carbonatic cement (*beach-rock*)); 3) granitic abrasion platform; 4) fractures in a prevalency N70° E direction; 5) fine to coarse sands with ripple marks; 6) detail of the position and plane parallel graded depositional structures; 7) highly rounded granitic masses and blocks; 8) depression lobes and fills (- 30 m- -34 m). <sup>14</sup>C radiometric calibrated age (9783 yr B.P.)*

### 3.1 Conoscenze precedenti

Le prime linee di riva, attribuite alla trasgressione versiliana (fig. 5a), furono segnalate per i mari italiani da Segre nel 1969, tra queste i cordoni litorali relitti a -40 m nel Golfo di Palmas (Sardegna sud-occidentale); successivamente, a seguito del ritrovamento di una *beach-rock* a -70 m nelle Bocche di Bonifacio (Fanucci et al., 1974), veniva rilevato un complesso sistema di linee di riva sommerse a quote comprese tra -55 e -145 m, perfettamente conservato lungo la piattaforma sarda nord-orientale; sulla base di tali evidenze di variazioni del livello marino della deglaciazione, veniva riconosciuto il passaggio tra la Sardegna e la Corsica fino alla quota attuale di -75 m (Ozer et al., 1976, Ulzega & Ozer, 1982). L'importanza geo-mineraria dei sedimenti litorali relitti quali luogo di concentrazione di minerali pesanti, accrebbe l'interesse dei ricercatori (impegnati nel P.F. "Oceanografia e Fondi Marini" S.P. "Risorse Minerarie" T. "Placers" del C.N.R.) nei confronti delle

linee di riva sommerse; furono messe a punto le tecniche di rilevamento geofisico (Lecca et al., 1979), realizzate le prime esperienze di cartografia (Carboni et al., 1979) e compiuti i primi campionamenti in immersione di una *beach-rock* a -33 m al largo di Cala Liberotto (Ulzega et al., 1980).

L'estensione dei rilievi geofisici e delle campionature su tutta la piattaforma completava il quadro conoscitivo sulla distribuzione geografica e batimetrica delle *beach-rock*, indicando la piattaforma orientale come maggiormente conservativa rispetto a quella occidentale (Palomba & Ulzega 1984; Grillo et al., 1984; Carta et al., 1986); il complesso dei dati è stato rappresentato nella prima sintesi cartografico-geomorfologica dell'intera piattaforma sarda (Ulzega, 1988).

I primi risultati, ottenuti nell'ambito del Progetto geominerario stimolarono attività di ricerca specifiche sulle linee di riva sommerse; nella *beach-rock* perfettamente conservata nell'area campione di Fontanamare (costa sud-occidentale) furono sviluppati i metodi di car-

tografia di dettaglio, le tecniche di rilevamento subacqueo e le procedure di analisi sedimentologica e mineralogica (Ulzega & Orrù, 1984). L'apporto del rilevamento subacqueo a integrazione dei dati geofisici (Colantoni & Taviani, 1980; Orrù & Ulzega, 1986) diede notevole impulso alle esperienze di cartografia geomorfologica dei fondi marini, ed alla conseguente mappatura di dettaglio di *beach-rock*, in piattaforma sud-orientale a -40 e -55 m (Ulzega *et al.*, 1984), nella Ria di Arzachena (settore nord-orientale) a -2 e -10 m (DeMuro & Ulzega 1985), nel Golfo dell'Asinara a -45 m (Ulzega *et al.*, 1986), nelle Bocche di Bonifacio (DeMuro & Ulzega 1988).

Complessi deposizionali di cordone-laguna, caratterizzati da *beach-rock* organizzate in diversi ordini, sono stati rilevati: nel Golfo di Cagliari a -25, -40, -55 m (Ulzega *et al.*, 1986); nel canale di San Pietro a -5 m (Orrù & Ulzega, 1989); nel settore settentrionale del Golfo di Orosei a -35, -40 e -55 m (Orrù & Ulzega, 1987; D'Angelo *et al.*, 1996).

Allo stesso tempo la piattaforma occidentale sarda, è stata sede di ricerche sui corpi sedimentari relitti attribuiti alla trasgressione versiliana, dei quali sono state approfondite le geometrie e gli aspetti sedimentologici (Carboni *et al.*, 1989; Ferrara *et al.*, 1993).

La scarsità di segnalazioni di *beach-rock* per la fascia batimetrica compresa tra -10 e -30 m appare legata, per i mari della Sardegna, al mascheramento degli affioramenti ad opera della Posidonia oceanica; nell'ambito delle indagini finalizzate alla istituzione delle Riserve Marine, le mappature di dettaglio delle praterie a fanerogame hanno consentito di rilevare *beach-rock* discontinuamente affioranti dalle biocostruzioni vegetali, nella Baia di Tavolara a -5, -25, -28 m (Orrù & Ulzega, 1991; Orrù & Pasquini, 1992), nella zona di Capo Carbonara (Orrù *et al.*, 1994), nel penisola del Sinis, Golfo di Oristano (Forti & Orrù, 1995).

In parallelo le ricerche proseguivano affrontando sempre con maggiore approfondimento aspetti sia geomorfologici s.s., che geochimico-sedimentologici (De Muro, 1990; Brambati & DeMuro, 1992a; Brambati *et al.*, 1992). Analisi radiometriche sui cementi attribuiscono un'età di  $9060 \pm 130$  a B.P. ad una *beach-rock* a -30 m nelle Bocche di Bonifacio (Brambati & DeMuro, 1992b). Recentemente ulteriori studi geo-cronologici (DeMuro, 1994) hanno evidenziato una buona confrontabilità dei dati radiometrici ottenuti sulle *beach-rock* con la curva di risalita del mare olocenico costruita per il Tirreno da analisi su speleotemi (Alessio *et al.*, 1994).

Attualmente in seguito al progresso delle conoscenze, a livello globale, sui meccanismi di risalita del livello marino post-glaciale e dei relativi interstadi, è stata possibile la lettura dei rapporti isotopici dell'Ossigeno e del Carbonio in chiave paleoclimatica e paleoambientale nei cementi delle *beach-rock* della Sardegna nord-orientale e della Corsica meridionale. Questi studi hanno portato alla redazione di una curva di risalita del mare olocenico, costruita con soli dati di

*beach-rock*, proposta per il Tirreno centrale (De Muro *et al.*, 1996)

### 3.2. Metodi di rilevamento indiretto

La mappatura delle linee di riva in piattaforma continentale è stata realizzata in prevalenza sulla base di indagini geofisiche: indagini ecografiche ad alta frequenza (KRUPP-ATLAS DESO 20, 33 KHz e ELAK LAZ 51, 66 KHz) finalizzate alla ricostruzione batimetrica di dettaglio; indagini ecografiche a bassa frequenza (Sub Bottom Profiler EDO 3,5 KHz) consentono di evidenziare, per i corpi deposizionali non consolidati, i caratteri geometrici e le facies di sedimentazione, permettendo quindi di risolvere i rapporti tra la *beach-rock* (risposta acusticamente sorda) e paleoambienti associati (paleo-lagune, paleo-alvei e fan-delta) o i prismi sedimentari del bordo in progradazione; rilievi ecografici a scansione laterale (Side Scan Sonar KLEIN 150 KHz) sono finalizzati alla mappatura degli affioramenti, al riconoscimento delle forme (fig. 13), alla ricostruzione dei reticoli di fratturazione ed alla definizione planimetrica dei rapporti tra le diverse facies sedimentarie. In genere tutti i rilievi geofisici vengono compiuti contemporaneamente lungo profili pre-impostati; la densità delle rotte di rilevamento e l'accuratezza delle procedure di posizionamento (in genere LORAN C o MOTOROLA) definivano il livello di dettaglio dell'indagine.

Le tecniche utilizzate nel rilevamento delle linee di riva oggetto della presente nota sono in prevalenza quelle sopra descritte, mentre nuovi rilievi si stanno realizzando attraverso tecnologie avanzate. Il ventennio trascorso dalle prime indagini sulle *beach-rock* ha visto infatti un notevole progresso delle tecnologie di rilevamento elettroacustico, sia per quanto riguarda gli strumenti di acquisizione di posizionamento dei dati (G.P.S.), che soprattutto nelle tecniche e nelle procedure di trattamento computerizzato dei sonogrammi. Al

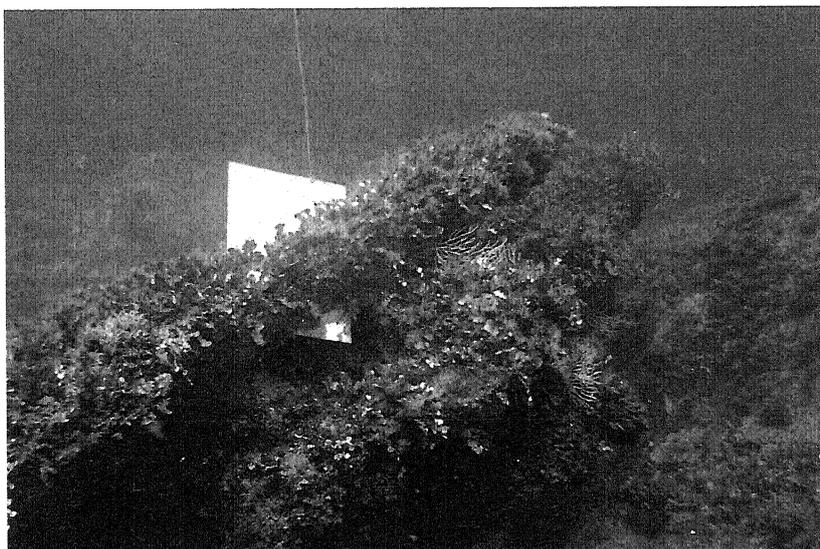


Fig. 9 - La foto illustra un dettaglio delle testate di strato descritte in figura 10. La tavoletta da rilevamento (30 x 40 cm) è inserita in una marmitta circolare ben evoluta (- 30 m).

Photo detail of the layer head on scaled blocks, described in fig. 10. The sampling table (30x40 cm) is inserted in a well-evolved subcircular evorsion hole (depth - 30 metres).

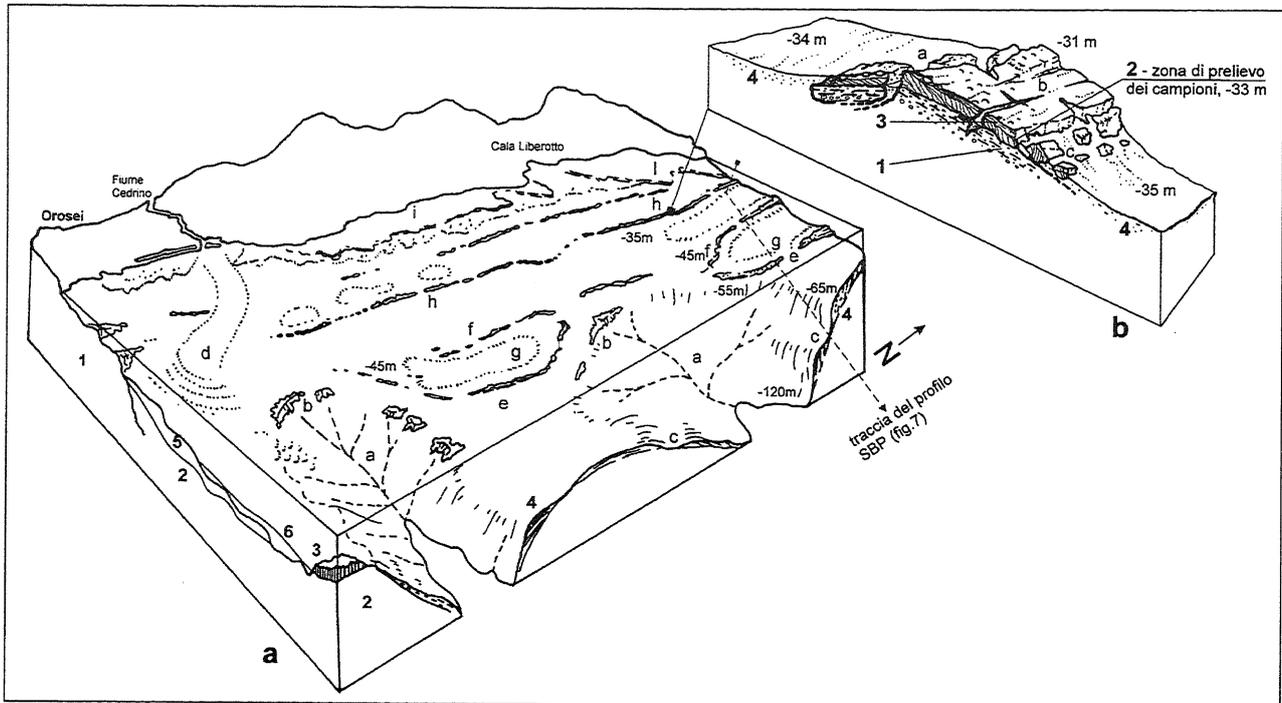


Fig. 10 - Golfo di Orosei, settore settentrionale. **a** - Bloccodiagramma geomorfologico della piattaforma continentale: 1) calcari e dolomie (Mesozoico); 2) marne ed argille Miocene-Pliocene); 3) basalti (Plio-Quaternario); 4) limi e argille in progradazione (Pleistocene sup.); 5) depositi di delta (Olocene); 6) sabbie limose ad elevata componente organogena (Attuale); a) incisioni dei canyons delle Baronie; b) testate in arretramento; c) terrazzi deposizionali di low-stand; d) alveo e delta sommerso; e) sistema cordone-laguna, *beach-rock* esterna -55m; f) *beach-rock* di fondo baia; g) paleo-laguna; h) *beach-rock* a -35 m -31 m; i) piattaforma di abrasione in basalti; l) piattaforma di abrasione in graniti). **b** Particolare: Bloccodiagramma della *beach-rock* campionata, -33 m. 1) conglomerati poli-genici ed eterometrici in matrice arenacea; 2) arenarie microconglomeratiche di battigia, a laminazione inclinata e sigmoidale contenenti livelli bioclastici (età radiometrica calibrata 9949 anni; 3) arenarie fini di alta spiaggia, a laminazione parallela; 4) sabbie bioclastiche attuali; a) cornice verso terra a blocchi franati per scalzamento alla base; b) superficie sommitale a canali e diaclasi; c) cornice minore, verso il largo.

*Gulf of Orosei, northern area. a - Geomorphological block-diagram of continental shelf: 1) limestone and dolomite (Mesozoic); 2) marl and clay (Miocene-Pliocene); 3) basalts (Plio-quaternary); 4) prograding mud and clay (upper Pleistocene); 5) delta deposits (Olocene); 6) muddy sands mainly biogenic; a) Baronie's canyons; b) withdrawal heads; c) low-stand depositional terraces; d) submerged river and delta; e) external beach-rock (-55m), bar and lagoon system; f) bay beach-rock; g) paleo-lagoon; h) beach-rock at 35-31m; i) wave-cut platform on basalts; l) wave-cut platform on granite. b - Particular: block-diagram of sampled beach-rock at -33m: 1) polygenic and heterometric conglomerates with arenaceous matrix; 2) littoral microconglomerate sandstones with sigmoidal and inclined lamination and biogenic levels (radiometric age 9949 Calib. B.P.); 3) upper littoral sandstones with parallel lamination; 4) actual biogenic sands; a) landward cliff with failed in blocks created by undermining processes; b) furrows and fractures on top face; c) seaward little cliff.*

Sub Bottom Profiler (DATASONIC CHIRP 1000 a frequenza variabile) sono stati applicati filtri digitali in grado di sfumare automaticamente gli echi multipli (fattore limitante dell'uso di questo strumento in acque basse) inoltre alle risposte monotoni sono stati applicati programmi di trattamento di immagine computerizzata a gamma cromatica. I nuovi sonar laterali (E.G. & G. a frequenza variabile) hanno superato i problemi legati alle distorsioni nella geometria dei sonogrammi attraverso correzioni computerizzate; vengono così prodotte immagini isometriche utilizzabili nella costruzione di fotomosaici georeferenziati. Nella configurazione a 100 Khz questi strumenti esplorano una fascia massima di 800 m, mentre a 500 Khz, per una fascia di rilevamento ridotta a 100 metri, sono in grado di distinguere morfologie di dimensioni decimetriche; grazie a queste nuove capacità di risoluzione è stato possibile distinguere le banche di *beach-rock* all'interno della prateria a *Posidonia oceanica* (Orrù *et al.*, 1994; D'Angelo *et al.*, 1996). Sono attualmente applicate ai sonogrammi a scansione late-

rale le tecniche e i programmi di trattamento d'immagine in uso nel remote sensing. La tecnologia di posizionamento satellitare (G.P.S. differenziale) ha decisamente sostituito le tecniche di radioposizionamento sia regionale (LORAN C - disattivato) che locale (SYLADIS e MOTOROLA).

### 3.3. Metodi di indagine diretta

L'esigenza di rilevare e campionare direttamente le *beach-rock* in immersione apparve evidente ai primi ricercatori (Stefanon, 197; Ozer *et al.*, 1980); i campionamenti di *beach-rock* realizzati tramite benne o draghe presentavano infatti ambiti di indeterminazione (batimetrica, giacitura, ecc.) non compatibili con le esigenze della ricerca. Per la piattaforma continentale sarda prime esperienze di ispezione e campionamento in immersione di una *beach-rock* furono compiute utilizzando sommozzatori professionisti (Ulzega *et al.*, 1980); i modesti risultati soprattutto nell'attendibilità del rileva-

mento consigliarono l'impiego di geologi subacquei (Orrù & Ulzega, 1986). Il progredire delle tecniche di rilevamento subacqueo ha consentito la parallela evoluzione dei metodi di cartografia geomorfologica di dettaglio prima in piattaforma prossimale (Orrù & Ulzega, 1984; DeMuro & Ulzega, 1985) successivamente estesa alle fasce batimetriche più profonde (Ulzega *et al.*, 1984; Orrù & Ulzega, 1986; De Muro, 1990). La recente possibilità di ispezione visiva tramite le telecamere di veicoli sommergibili teleguidati (R.O.V.) si è dimostrata estremamente utile, nel caso di affioramenti particolarmente estesi (Orrù *et al.*, 1994), ma meno ricca di risultati rispetto al rilevamento compiuto dal geologo sul fondo; infatti non appare possibile diversamente individuare nell'affioramento livelli guida caratterizzati da strutture sedimentarie di battigia (Brambati & DeMuro, 1992) o escludere settori interessati da processi di crollo o disturbati da locali dislocazioni (Orrù & Ulzega, 1986). Nel rilevamento geomorfologico subacqueo notevole è il contributo metodologico mediato da altre discipline, in particolare la stereo ripresa fotografica per restituzione

3D nata in campo archeologico e il fotorilevamento con reticolo di riferimento in uso nel rilevamento biocenotico.

### 3.4. Metodi analitici

La procedura analitica seguita per i campioni di *beach-rock* si articola secondo due linee principali: analisi sedimentologiche, esoscopiche e mineralogiche sulla frazione clastica; analisi mineralogiche e geochimiche sui cementi. La determinazione delle associazioni faunistiche contenute è in genere resa difficoltosa dalla relativa scarsità e dalle cattive condizioni di conservazione dei bioclasti ma attuabile attraverso lo studio di foraminiferi e ostracodi.

#### 3.4.1. Analisi sui sedimenti

Il campione di *beach-rock* disgregato viene nella prima fase studiato sotto il profilo granulometrico attraverso il metodo classico della setacciatura a secco o attraverso analisi con bilancia di sedimentazione, ven-

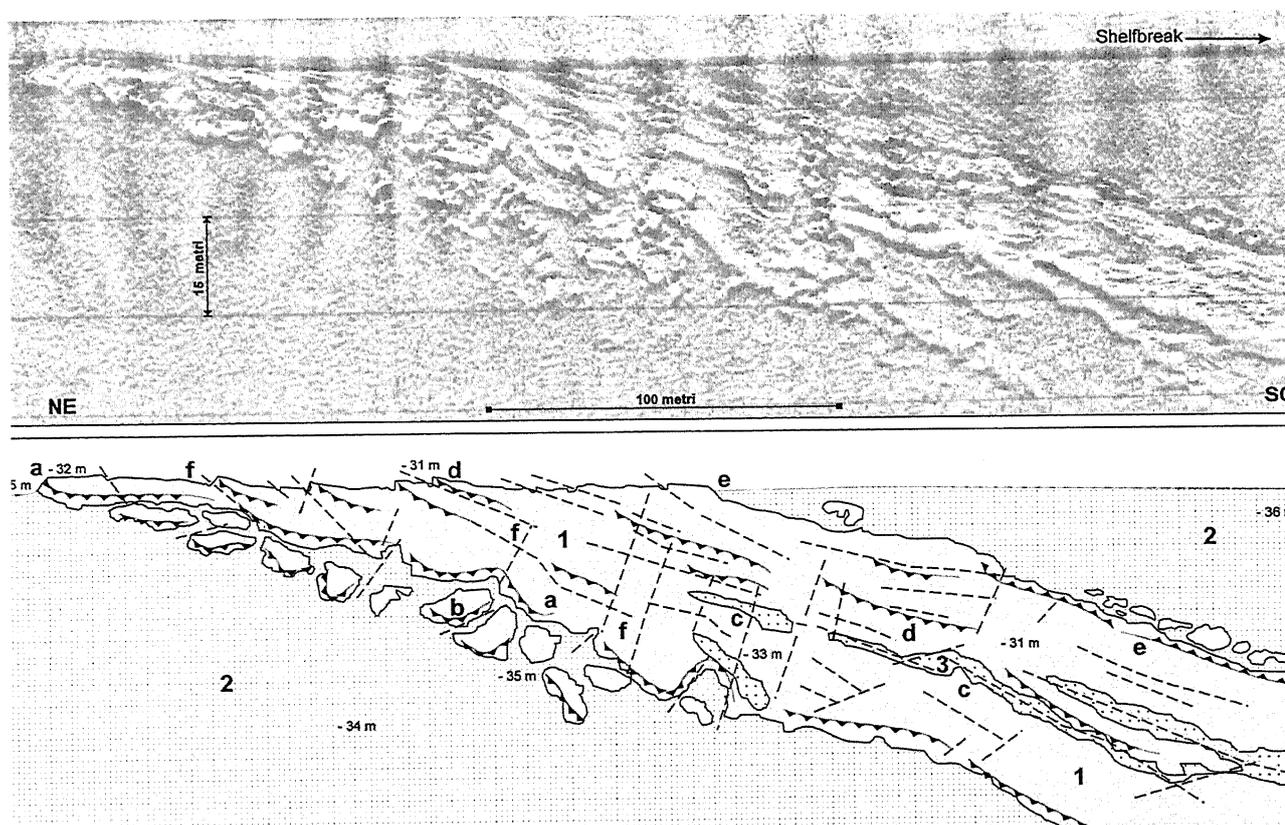


Fig. 11 - Golfo di Orosei. *beach-rock* di Cala Liberotto - 33 m. Schema di rilevamento dai dati geofisici e da rilievi in immersione. **a** - Registrazione ecografica a scansione laterale, Side Scan Sonar 150 KHz, (immagine del canale di dritta) in piattaforma esterna. **b** - Interpretazione: 1) arenarie e conglomerati in facies di *beach-rock*; 2) sabbie medie prevalentemente bioclastiche; 3) sabbie grossolane organogene eterometriche; a) cornice netta verso la piana prossimale,  $h = 2-3$  m; b) blocchi isolati per arretramento della cornice; c) canali di erosione evoluti lungo linee di frattura longitudinali; d) testate degli strati in rilievo sulla superficie sommitale; e) cornice verso la piattaforma esterna,  $h = 0,5-1$  m; f) linee di frattura organizzate secondo un reticolo subortogonale.

*Gulf of Orosei. Beach-rock of Cala Liberotto at -33 m. Survey scheme from geophysical data and scuba divers surveys. a - Side scan sonar (150 KHz) image (right channel image) of external continental shelf. b - Interpretation: 1) beach-rock's sandstone-conglomerate; 2) prevailing bioclastic middle sands; 3) biogenic coarse sands; a) cliff towards proximal plain  $h = 2-3$  m; b) isolated blocks due to withdrawal edge; c) erosion furrows developed on longitudinal fractures; d) head strata on the top face; e) cliff towards external platform  $h = 0.5-1$  m; f) orthogonal fractures reticle.*

gono poi ricavati i parametri statistici standard.

Al contrario risulta difficoltosa l'analisi tessiturale per i livelli a grossi ciottoli ( $F > 5$  cm), a causa della difficoltà di prelievo di un campione volumetricamente valido a fini statistici; in questi casi (i più diffusi per *beach-rock* profonde della Sardegna) è possibile una valutazione tessiturale in situ (granulometria dei ciottoli e rapporto ciottoli-matrice) utilizzando fotoriprese e reticoli di riferimento, riservando le analisi granulometriche classiche alla sola matrice pelitico-sabbiose, dopo averla disaggregata ad ultrasuoni.

Analisi petrografiche al microscopio ottico su sezioni sottili sono state utilizzate sia per la determinazione della litologia dei ciottoli che per la determinazione della composizione mineralogica della frazione sabbiosa. Le immagini al microscopio ottico a luce polarizzata, consentono inoltre di valutare il rapporto tra frazione clastica e matrice di cementazione carbonatica. L'assortimento modale mineralogico per le sole sabbie di matrice può essere determinato sul campione disaggregato o in sezione sottile, effettuando il conteggio al microscopio ottico; con lo stesso strumento è stata realizzata una prima definizione dell'ambiente e del grado di elaborazione sulla base di analisi esoscopiche. Con maggior dettaglio le immagini al microscopio elettronico a scansione (S.E.M.) hanno consentito di rilevare, sulla superficie dei granuli di quarzo, i segni di elaborazione propri dei diversi ambienti: infralitorale, intertidale, (fig. 13ab) di alta spiaggia o eolico (Brambati *et al.*, 1992), e di evidenziare fenomeni di ricristallizzazione o di dissoluzione della silice (indizi di immobilizzazione, di seppellimento e di esumazione) dovuti ad elaborazione policiclica (Forti & Orrù 1995).

### 3.4.2 Analisi sui cementi

Le analisi preliminari sui cementi di *beach-rock* sono rappresentate dall'esame di sezioni sottili al microscopio ottico, in genere a luce polarizzata; le immagini consentono di riconoscere le diverse generazioni e le facies di precipitazione dei cementi. Al riconoscimento ottico della composizione mineralogica del cemento si è ritenuto opportuno affiancare dati più precisi utilizzando metodi diffrattometrici (Brambati & DeMuro, 1992c). L'esame al S.E.M. ha consentito di evidenziare in dettaglio l'abito

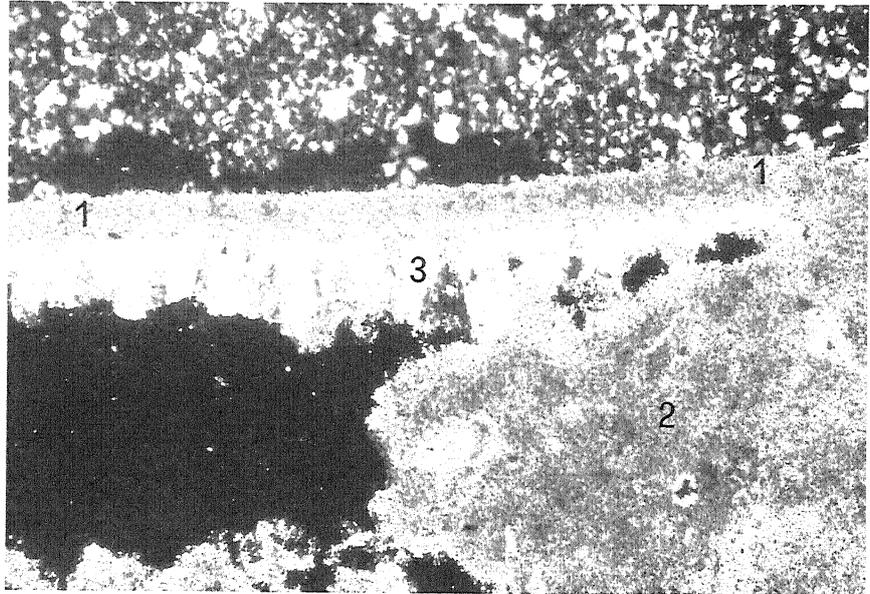


Fig. 12a - *Beach-rock* di Cala Liberotto -33 m. Sezione sottile (120 x). Facies di cementazione: 1) sottile rivestimento del clasto a calcite magnesiaca aciculare; 2) riempimento micritico; 3) accrescimento cristallino in calcite con tendenza stalattitica.

*Beach-rock* of Cala Liberotto at 33m. Thin section. Facies of cementation: 1) thin covering of the granule of acicular high Mg-calcite; 2) micritic filling; 3) crystalline calcite increase with a stalactitic tendency

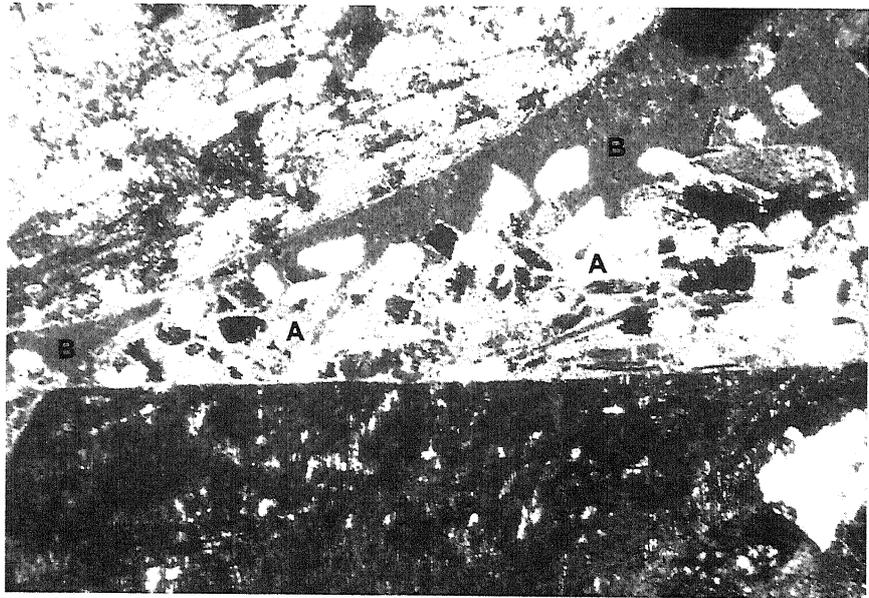


Fig. 12b - *Beach-rock* di Cala Liberotto -33 m. Sezione sottile. (120x) . Nella zona di contatto tra due clasti è evidente la selezione della frazione siltitica della matrice, che sottolinea la polarità del deposito. Un successivo riempimento micritico chiude quasi completamente i vuoti.

*Beach-rock* of Cala Liberotto. Thin section. In the area of contact of the two granules it is noticeable the selection of the matrix siltitic fragment, which underlines the polarity of the sediment. A subsequent micritic filling closes the gap almost completely

cristallino delle differenti facies di precipitazione, facilitandone la determinazione mineralogica che in questo caso è stata completata dai dati di microsonda. L'uso del S.E.M. ha permesso inoltre di evidenziare tracce di attività batterica intergranulare, prima non documentate.

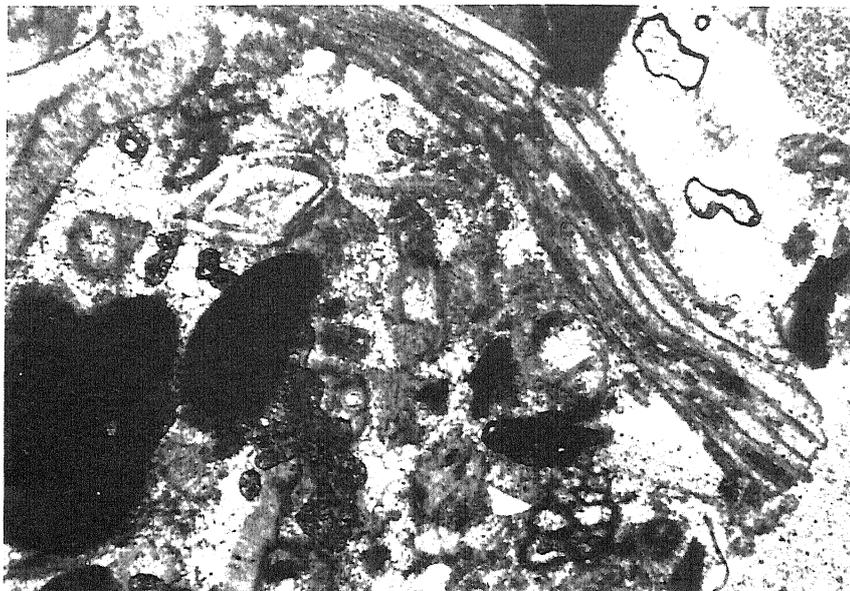


Fig. 12c - *Beach-rock* di Los Alinos -4m. Sezione sottile (120 x). Il contenuto bioclastico è abbondante, rappresentato da frammenti di lamellibranchi, di echinidi, da alghe corallinacee e da corallinacee e da foraminiferi litorali.

*Beach-rock* di Los Alinos -4m. Thin section. The bioclastic content is plentiful, it is represented by shells or red algae fragments and by littoral foraminifera.

### 3.4.3 Analisi isotopiche

Le datazioni sul C14 effettuate sui cementi, riportate nel presente lavoro, sono state eseguite presso i laboratori di Geocronologia del Departement Géologie Dynamique Université Pierre et Marie Curie di Parigi, Francia e presso il Laboratorio di Geochimica Isotopica dell'Università di Trieste (campioni della Corsica meridionale e della Sardegna settentrionale), mediante attacco chimico del carbonato e conteggio con contatore a liquido di scintillazione LKB-Quantulus. Il complesso della matrice carbonatica presente è stata considerata di prima generazione Mg-calcitico in quanto le *beach-rock* trattate sono caratterizzate da una prevalente componente terrigena quarzoso-feldspatica che faceva escludere possibilità di ricristallizzazione o inquinamento del dato radiometrico da parte di bioclasti o frammenti provenienti da rocce carbonatiche antiche (Nesteroff, 1984).

Allo scopo di verificare l'attendibilità delle determinazioni geocronologiche su due *beach-rock* a -30, -33 m, rilevate in aree geografiche differenti, sono state seguite le due alternative possibili nella condotta analitica (Plassche O. Van de, 1986); sul campione della *beach-rock* di Capo Testa è stata datata sui cementi, sul campione di Cala Liberotto è stato datato il guscio di un organismo.

La necessità di evitare che il bioclasto da datare potesse aver subito una elaborazione policiclica, ha guidato la scelta verso il frammento di un organismo a guscio molto sottile (certamente attribuibile ad un lamellibranco, probabilmente della famiglia *Tellinidae*). Il modesto peso del campione disaggregato, di circa 3 g, ha richiesto l'analisi isotopica attraverso lo spettrometro ad acceleratore di massa A.M.S. che è stata eseguita presso i laboratori Geochron - Krueger Enterprise, Inc.

Masachusetts U.S.A. La superficie del frammento è stata ripulita con ultrasuoni, quindi è stata rimossa la patina superficiale, suscettibile di alterazioni, utilizzando una soluzione di HCl molto diluito; il nucleo del bioclasto è stato quindi idrolizzato in HCl, sotto vuoto, e la CO<sub>2</sub> risultante è stata avviata all'analisi isotopica A.M.S.

La calibrazione dell'età <sup>14</sup>C è stata eseguita per tutti i campioni all'Università di Trieste con il metodo di STUVIER & REIMER (1993).

### 3.4.4 Determinazioni radiometriche delle *beach-rock* con il <sup>14</sup>C.

Ad esclusione del campione di Cala Liberotto (analizzato con AMS), le analisi riportate sono state eseguite con un contatore a liquido di scintillazione del tipo LKB-Quantulus che mediante una lunga preparazione e un complesso processo chimico di trasformazione del CaCO<sub>3</sub> e l'utilizzo di un programma di calcolo fornisce direttamente le "età radiocarbonio" del campione. La preparazione per il conteggio prevede, a monte, la trasformazione del carbonato di calcio in benzene. Il campione dopo essere stato trattato in un bagno ad ultrasuoni, viene finemente macinato ed una quantità di circa 25 grammi della sua polvere viene introdotta nell'ampolla di reazione. Il benzene così formato viene introdotto in un contenitore al teflon per in conteggio del-

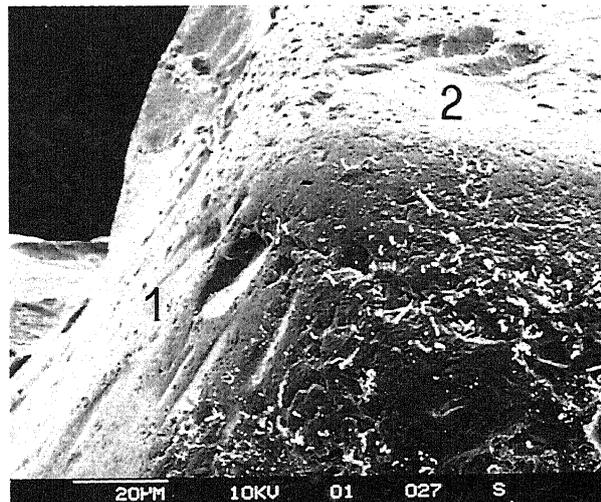


Fig. 13a - *Beach-rock* di Cala Liberotto -33. Immagine esoscopica di un quarzo al S.E.M. Superficie interessata da striature e solchi cuneiformi da urto in ambiente intertidale (1), superiormente si notano tracce di fratturazione concoide tipiche degli ambienti ad alta energia (2).

*Beach-rock* of Cala Liberotto at 33m. Exoscopic image of a granule of qz at the SEM. The surface presents striations and cuneiform furrows created by collision in a intertidale environment (1), on the upper side we can note breackade .traces, typical of high energy environment.

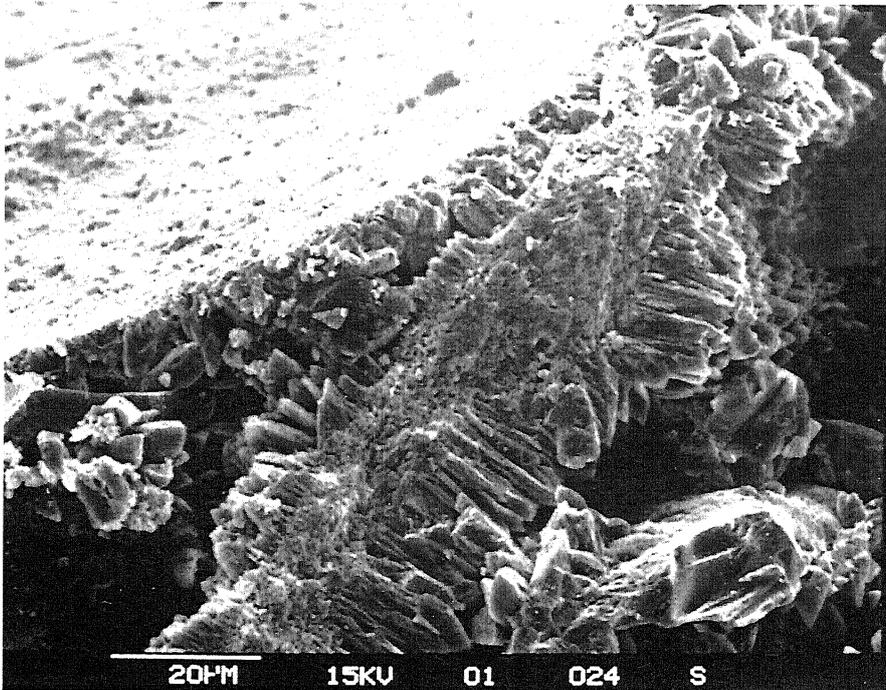


Fig. 13b - Beach-rock di Cala Liberotto -33. Immagine al S.E.M delle facies di cementazione. Particolare dei ricoprimento calcitico-magnesiaco a cristalli in abitus scalenoedrico.

*Beach-rock of Cala Liberotto at 33m. Image at the SEM of the facies of cementation. Particula of the high Mg-calcite recovering with crystal in scalenoedric habitus*

1993 oggi sono disponibili sia delle curve di calibrazione che un programma di correzione che permettono di correggere le età radiocarbonio: le età così ottenute vengono dette "calibrate" e sono ovviamente quelle a cui sarebbe bene fare sempre riferimento.

#### 4. LE BEACH-ROCKS POST- GLACIALI DELLA SARDEGNA NORD- ORIENTALE

La scelta dell'area di indagine è stata guidata dall'esigenza di fornire un quadro rappresentativo sulle linee di riva deposizionali dell'intera piattaforma sarda (fig. 5b). E' stata presa in esame da una parte l'area delle Bocche di Bonifacio e della Gallura, ove la piattaforma continentale conserva un gran numero di linee di riva sommerse ben conservate sino alla profondità di -120 m (Ozer *et al.*, 1980). In questo settore le beach-rock sono spesso associa-

l'attività b'. Per una buona misura dell'attività radiocarbonio mediante un contatore a scintillazione, è necessario raggiungere quantità minime di almeno 2ml di benzene.

Uno degli inconvenienti nell'uso di tale strumento di misura è proprio l'elevata quantità di carbonato necessaria all'origine.

L'uso corretto delle età radiometriche implica che:

- esista uno stato di equilibrio tra il C14 prodotto nell'atmosfera e quello che continuamente decade (livello costante);

- si utilizzi come tempo di dimezzamento il valore di 5568 anni (valore questo inesatto ma universalmente accettato per omogeneità dei risultati);

- sia stata eseguita la correzione dell'attività radiocarbonio in base al frazionamento isotopico ( $^{13}C/^{12}C$ );

- ci si riferisca all'anno 1950 come anno base, cioè età espresse in anni BP, dove il presente è l'anno 1950.

Grazie ai lavori di Stuiver & Braziunas e Stuiver & Reimer nel

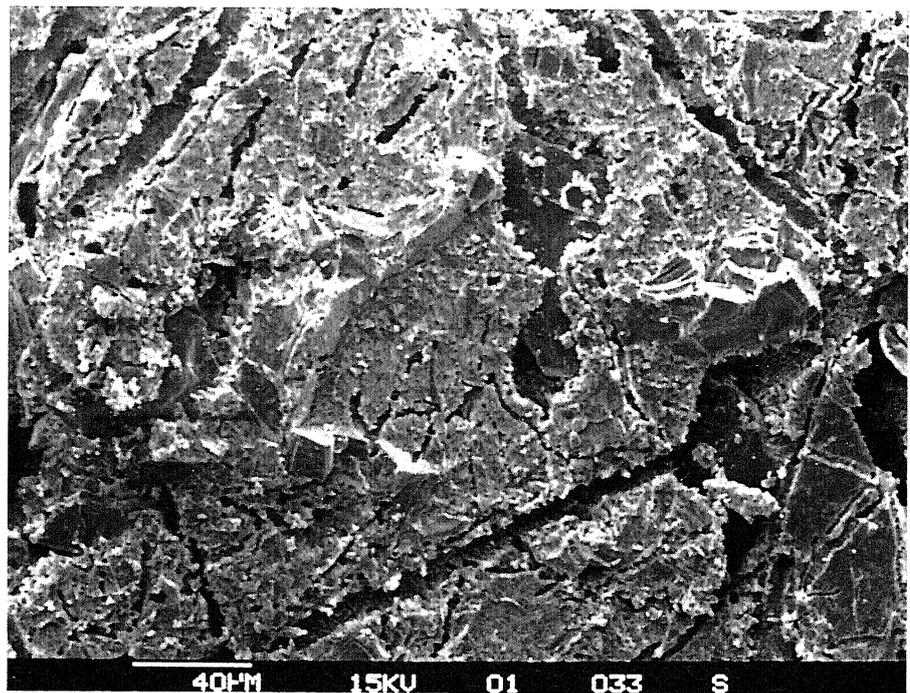


Fig. 14a - Beach-rock di Cala Liberotto -33. Immagine al S.E.M delle facies di cementazione. L'esame della superficie di contatto granulo - cemento rivela tracce di attività biocenica contemporanea alla prima precipitazione; l'immagine mostra le impronte del feltro batterico.

*Beach-rock of Cala Liberotto at 33m. Image at the SEM of the facies of cementation. The survey of the contact surface granule-cement, reveals traces of biologic activity contemporary at the first precipitation; the image shows the marks of the batteric felt.*

te a morfologie litorali erosive (paleofalesie, paleopiattaforme d'abrasione, paleosolchi di battente ecc.) e spesso le arenarie e i conglomerati di spiaggia poggiano su superfici erosionali incise nel basamento cristallino. Differentemente nella piattaforma prossimale del Golfo di Orosei le *beach-rock* sono inserite in sistemi deposizionali di cordone-laguna e in piattaforma distale si evidenziano i rapporti tra linee di riva più profonde e i terrazzi deposizionali del bordo.

#### 4.1 La Piattaforma delle Bocche di Bonifacio

A diverse profondità comprese tra lo 0 attuale e -55 metri sono state campionate, con il metodo diretto (mediante immersione subacquea) su tutta la piattaforma prossimale della Sardegna *beach-rock* associate a linee di riva sommerse caratterizzate da morfologie erosive non attive (paleofalesie, paleopiattaforme d'abrasione, paleosolchi di battente ecc.).

Altre paleolinee di riva sono state ben individuate e campionate con metodi indiretti (dragaggi) a maggiori profondità, sulla piattaforma continentale distale (Fanucci et alii, 1974; Ulzega et alii, 1980; Ozer et alii, 1980; Ulzega & Ozer, 1982; Lecca, 1982; Lecca et alii, 1983; Ulzega et alii, 1984; Ulzega, 1985; Ulzega et alii, 1985; Ulzega et alii, 1986; Carboni et alii, 1989), a testimonianza di importanti rallentamenti e stazionamenti del livello marino successivamente al Late Glacial Maximum e caratterizzanti la risalita eustatica Pleistocenico-Olocenica.

Le *beach-rock* più importanti, per estensione e continuità morfologica, con caratteristiche sedimentologico-geochimiche tali da consentire di eseguire datazioni

14C sono ubicate prevalentemente nel settore sardo delle Bocche di Bonifacio, della Corsica meridionale e della Sardegna orientale (fig. 5b) (Nesteroff, 1984; De Muro et al 1996).

Dal punto di vista sedimentologico, i campioni analizzati risultano classificabili, in prevalenza, come conglomerati poligenici eterometrici, con locali terminazioni fino ad arenarie.

Sotto il profilo mineralogico si inquadrano nel campo delle quarzoareniti ed arcose con frequenti e locali passaggi a litoareniti. Tuttavia non sempre assumono l'aspetto di areniti "pulite" in senso classico, ma talvolta presentano deboli percentuali di matrice interstiziale, mentre raramente si osservano bioclasti, gusci e/o scheletri di organismi bentonici e microplanctonici.

Sono spesso caratterizzate da passaggi laterali di facies, rimarcati sia da variazioni nella granulometria, sia da una variazione compositiva a cui si associa una differente coesione e cementazione degli strati.

Il cemento più diffuso è caratterizzato da calcite magnesiacca criptocristallina (micrite) la quale lega clasti da ben arrotondati a debolmente spigolosi.

Tra le numerose descrizioni geomorfologiche dell'area sarda delle Bocche di Bonifacio, quelle di Barca Brusciata (figg. 6b, 8, 9), e di Capo Testa (figg. 6b, 10, 11), sono certamente le più rappresentative. La *beach-rock* di Barca Brusciata è disposta ad una profondità media tra -2 e -4 metri parallelamente alla spiaggia attuale. Potente da uno a due metri, poggia sui litotipi granitici di età ercinica. Estese fratture ortogonali all'asse di allungamento e normali alla direzione degli strati (N-E S-E, N-E S-O) la attraversano. Sulla superficie di strato sommitale, si sono sviluppate marmitte con dimensioni variabili da 30 cm di diametro fino al metro.

La morfologia dell'affioramento è, caratterizzata da una netta cornice verso monte e da blocchi e bancate di arenarie dislocati per assestamento in situ della *beach-rock*. Le cornici delimitano la struttura anche verso la spiaggia sommersa alla quale si raccorda, verso il largo, con inclinazione intorno ai 5°-10°.

Si tratta di un conglomerato eterometrico con prevalenza di elementi quarzoso-feldspatici e frammenti di roccia in gran parte granitici, ben classati. Nella parte basale presenta lamine foreset e nella parte sommitale strutture laminari debolmente cuneiformi. I termini più grossolani si presentano gradati con passaggio verso l'alto a quarzoareniti e arcose, talvolta localmente a litoareniti.

I singoli clasti presentano elaborazione spinta e cemento Mg-calcitico criptocristallino (micrite). Dal un punto di vista mineralogico si ha sensibile predominanza di quarzo sui feldspati e subordinatamente, associati alla frazione bioclastica, biotite e muscovite.

L'analisi morfoscopica dei granuli

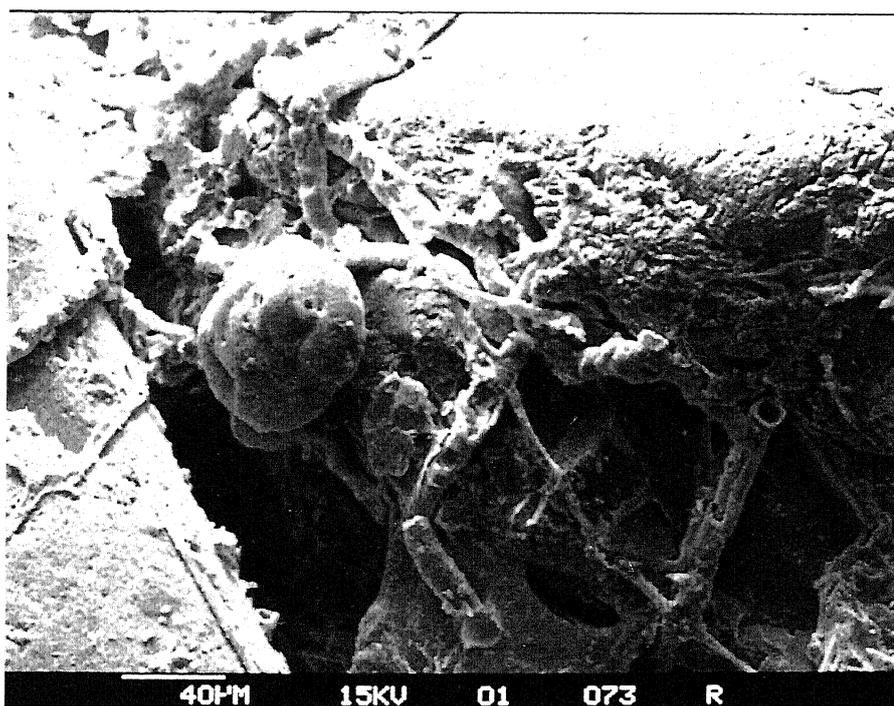


Fig. 14b - *Beach-rock* di Cala Liberotto -33. Immagine al S.E.M delle facies di cementazione. Il particolare di una zona intergranulare conserva i modelli esterni dei tubuli algali.

*Beach-rock* of Cala Liberotto at 33m. Image at the SEM of the facies of cementation. The particular of an intergranule area retains the external model of the little tubes of the algae.

mostra una miscela di elementi sub-arrotondati di origine litorale, di granuli di origine eolica, e granuli poco elaborati e a spigolo vivo di origine locale.

Le età C14 risultano essere di  $2507 \pm 68$  B.P., minima di 2062, massima 2276 e 2137 B.P. quella calibrata (Stuvier & Reimer, 1993).

Nel settore nord orientale (fig. 10, 11), alla profondità di -28 m, è stata campionata e datata la *beach-rock* di Capo Testa. Si tratta prevalentemente di un'arenaria compatta quarzoso-feldspatica inglobante rari frammenti di lamellibranchi cementata da micrite a composizione Mg-calcitica. Poggia su un substrato granitico, dislocato lungo linee con direzione  $N340^\circ E$  e  $N70^\circ E$ . Con ancora ben visibili i segni di una morfogenesi avvenuta in ambiente continentale (tafoni, conche, alveoli ecc.).

La *beach-rock*, fratturata sia in senso longitudinale che trasversale, presenta profonde marmitte d'evorsione non attive e dislocazioni in lastroni o bancate che rendono la morfologia del fondo particolarmente accidentata (Brambati & De Muro 1992 c, De Muro 1994). Questo deposito si dispone a gradoni generati dalla fratturazione longitudinale e trasversale (rispetto all'asse di allungamento) immergendo verso il largo.

L'età radiometrica al C14 di  $9080 \pm 130$  B.P. (Brambati & De Muro 1992 c) è stata calibrata applicando il metodo di Stuvier & Reimer (1993) ottenendo il risultato di un'età minima di 9526, massima di 9884 e calibrata di 9783 B.P. (fig. 18)

#### 4.2 La piattaforma settentrionale del Golfo di Orosei

Il settore settentrionale del Golfo di Orosei (fig. 5b) non appare interessato dai movimenti neotettonici rilevati nel settore costiero centro-meridionale (Carobene, 1978), nella piana costiera di Orosei i depositi marini del Pleistocene superiore (Stadio 5e) si mantengono alla quota di + 6 m (Ulzega & Ozer, 1982). La piattaforma continentale compresa tra Capo Comino e Punta Nera presenta un'estensione media di circa 8 miglia; è stata oggetto di crociere oceanografiche PL79/1, LM84, GO86, SAR90, con la N/O Bannock e SGI94 con mezzi minori. Il bordo, inciso dalle due testate in arretramento del Canyon di Orosei è sede di corpi deposizionali in progradazione; lungo la scarpata la copertura a sedimenti dà luogo a movimenti in massa di creep e slumplings. In piattaforma sono ben conservate linee di riva sommerse in facies deposizionale emergenti dal fondo a profondità comprese tra - 4 e - 55 m (Ulzega *et al.*, 1980); *beach-rock* più profonde sono in parte mascherate dai sedimenti fini del bordo. Maggiormente esposte sono le *beach-rock* della piattaforma distale; qui sono distinguibili due ordini, organizzati in sistemi deposizionali di cordone laguna (Orrù & Ulzega, 1987); sia l'andamento batimetrico che le registrazioni Sub Bottom Profiler documentano l'esistenza di ampie paleo-lagune a ridosso delle spiagge sommerse (fig. 6). Particolarmente sviluppato si dimostra il sistema più profondo, -50 m, che conserva sia le spiagge di fondo baia che i cordoni litorali a chiusura della laguna, sono ancora ben riconoscibili le bocche lagunari e alcuni paleo-alvei fluviali; la ricostruzione paleogeografica risultante disegna la linea di costa corrispondente al Paleolitico superiore, profondamente diversa dall'attuale (Orrù, 1988). Le *beach-rock* a 45 m riprendono lo stile

delle più profonde, l'andamento è però maggiormente rettilineo e le paleo-lagune si presentano nettamente allungate parallelamente alla costa (fig. 10a); gli affioramenti si presentano parzialmente sepolti dalla sedimentazione attuale, non è stato quindi possibile rilevarne la potenza; sotto il profilo sedimentologico si distingue il livello basale conglomeratico a ciottoli poligenici, una superficie di erosione su cui poggia un livello microconglomeratico a composizione prevalentemente quarzosa passante verso l'alto a un'arenaria arcocosa a laminazione parallela (Ulzega *et al.*, 1984) (fig. 10b). Singolarmente la superficie sommitale di questi affioramenti non appare interessata da forme di erosione e le superfici di strato conservano l'inclinazione propria del corpo di spiaggia. La *beach-rock* a -30 m 33 m si sviluppa senza soluzione di continuità a circa 1,5 miglia parallelamente alla riva risultando talvolta mascherata nella zona di limite inferiore della *Posidonia oceanica* (D'Angelo *et al.*, 1995); l'affioramento, al largo di Cala Liberotto, si estende trasversalmente per circa 30 m con debole inclinazione verso il largo, la potenza complessiva è di circa 5m; litologicamente si distingue un conglomerato poligenico basale a grossi ciottoli prevalentemente granitici in matrice arenacea quarzoso felspatica; una superficie di erosione al passaggio con il livello superiore, quarzo-areniti passanti lateralmente a microconglomerati a laminazione inclinata e sigmoidale di battigia (*foreset*); questo livello, alla profondità di -33 m (figg. 12b, 13ab) è stato analizzato in dettaglio ai fini della datazione della linea di riva. Sono state riconosciute tre generazioni di cementazione: un sottile film di Mg-calcite aciculare ricopre i clasti; una matrice globulare o criptocristallina con frazione micro-clastica; una formazione tardiva in calcite ad abitus idiomorfo si sviluppa nei vuoti (figg. 12abc, 13a). Al S.E.M. si evidenzia l'esistenza di un feltro batterico alla superficie di contatto granulo-cemento (fig. 14ab).

L'età radiometrica al C14 - A.M.S. è di  $9290 \pm 70$  B.P.; è stata calibrata applicando il metodo di Stuvier & Reimer (1993) ottenendo il risultato di un'età minima di 9880 BP, massima di 9996 e calibrata di 9942 B.P. (fig. 16).

Il livello sommitale è rappresentato da areniti a composizione arcocosa a laminazione piano-parallela, per una potenza di circa 2 m. La superficie sommitale presenta evidenze di erosione post-cementazione, canali lungo frattura e marmitte di evorsione.

Nelle baie più riparate si conservano depositi di *beach-rock* a quote basse; nella Cala Los Alinos il movimento della barra espone periodicamente alla quota di -3,-4 m una *beach-rock*; si tratta di arenarie sottili, prevalentemente quarzose, a laminazione inclinata resa più evidente da livelli di concentrazione a minerali pesanti; singolarmente abbondante la frazione bioclastica rappresentata in prevalenza da foraminiferi e radioli di echinidi (fig. 12 c). La debole cementazione, che non consente di distinguere le fasi di precipitazione, appare legata a processi di dissoluzione in corso.

#### 5. DISCUSSIONE DEI RISULTATI GEOCRONOLOGICI

Recentemente in seguito ad approfondimenti sulla cronologia degli interstadi nella risalita del mare oloce-

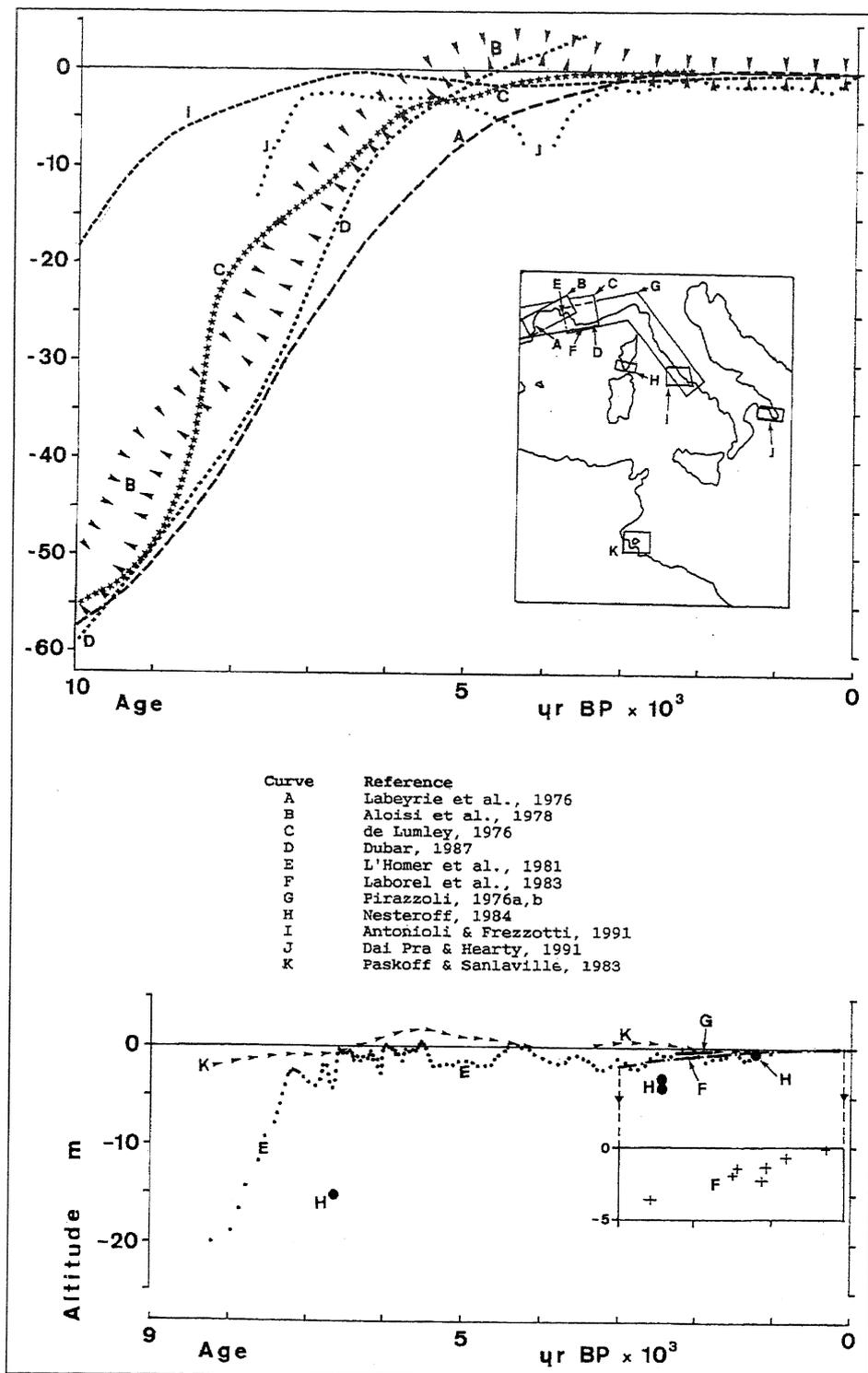


Fig. 15 - Curve di risalita olocenica per il Mediterraneo centrale (da Pirazzoli, 1991).  
*Holocene sea-level rise curve in central Mediterranean Sea (according to Pirazzoli, 1991).*

nico, resi possibili dallo studio dei radio isotopi dell'Ossigeno e del Carbonio analizzati nei cementi (che vanno a costituire l'interesse "di punta" per questi affioramenti per i risvolti paleoclimatici e paleoambientali), DE MURO *et al.*, 1996 hanno reso noti i risultati geochimici e radiometrici di nove nuovi campioni di *beach-rock* della Sardegna settentrionale e della Corsica meridionale portando alla costruzione della curva di risalita del

mare olocenico basata su soli dati di *beach-rock*. Questi dati integrati dal nuovo contributo in termini di età radiometriche delle B.R. di Cala Liberotto (-33 m) consentono di integrare la curva di risalita del mare post Late Glacial Maximum e di confrontarla con dati provenienti dalla stessa area geografica. Premesso che durante l'Olocene si ritiene che tutta l'Isola di Sardegna abbia avuto una notevole stabilità tettonica, si ritiene utile riportare il quadro aggiornato (figg. 15, 16). Il grande interesse scientifico, ai fini della ricostruzione della curva eustatica olocenica di questi affioramenti, è legato alla possibilità di correlare i dati di queste ricerche, con quelli provenienti dal bacino sud-orientale del Mediterraneo. La visione regionale della problematica porterebbe così alla ricostruzione con buona approssimazione della paleogeografia del mare olocenico del Mediterraneo e non solo dell'area centro-occidentale. La curva di risalita del mare tardo-olocenico (fig. 16) evidenzia una rapida risalita dalla profondità di -33 m fino ai -17 m. Da questa quota la risalita del mare olocenico appare meno rapida, con un rallentamento ulteriore dalla profondità di -8 m fino ai -5 m, una nuova accelerazione nella risalita fino -1 m di profondità può essere datata attorno ai 2000 anni BP.

## 6. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE DELLA RICERCA

L'utilizzo della *beach-rock* quale indicatore del livello marino presenta problemi ancora aperti: l'esatta collo-

geochimico. Allo stato attuale occorre tuttavia sottolineare che i dati cronologici provenienti da *beach-rock* di ambiente microtidale, nella migliore delle ipotesi (corretta misura della profondità di campionatura, mancanza di basculamento dei blocchi, cementazione uniforme del corpo sedimentario ecc.), devono essere considerati con un margine di errore, nella loro collocazione altimetrica, almeno dell'ordine dei due metri.

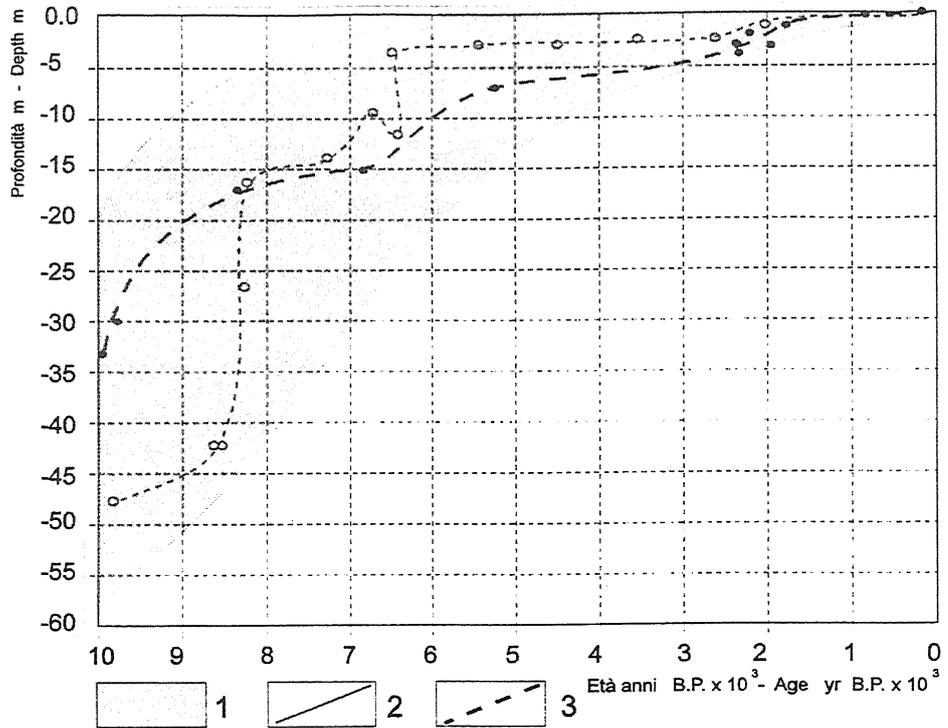
Una migliore definizione delle linee di riva in facies di *beach-rock* appare possibile attraverso le correlazioni con gli ambienti sedimentari spesso associati: le lagune, i fan delta e i cordoni dunari; in questo quadro particolare interesse rivestono i rapporti tra le *beach-rock* più profonde e i terrazzi deposizionali di *low stand*.

Nel processo di datazione radioisotopica delle *beach-rock* particolare rilievo assumono i criteri di selezione dei materiali da sottoporre ad analisi, discriminando i cementi nelle differenti composizioni geochimiche e mineralogiche, selezionando bioclasti di organismi a guscio sottile, utilizzando l'intera matrice carbonatica solo in casi particolari.

Le datazioni C14 scaturite dallo studio delle *beach-rock* della Sardegna Nord-orientale mostrano buona concordanza, con i dati riportati sulle curve delle figure 17 e 18 (Pirazzoli, 1991; Alessio *et al.*, 1994; DeMuro *et al.*, 1996). Tuttavia se le indagini sul campo sono già sufficienti per l'area esaminata, molto rimane da fare per una maggiore visione globale della problematica, non solo sotto il profilo della individuazione rilevamento e correlazione dei singoli affioramenti nell'ambito del Mediterraneo, ma soprattutto sotto il profilo della collocazione cronologica e del significato paleoclimatico e paleoambientale di tali depositi di spiaggia cementata.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Prof. Antonio Longinelli, Direttore del



| LOCALITA'          | PROF. (m) | ETA' B.P.  | MINIMA | MASSIMA | CALIBRATA | DATO | SIGLA    |
|--------------------|-----------|------------|--------|---------|-----------|------|----------|
| Figari             | 0         | 180 ± 50   | -      | -       | -         | *°   | 1        |
| Cala Lunga         | -0.3      | 1300 ± 70  | 747    | 913     | 843       | *°   | 2        |
| Isola Dei Gabbiani | -1        | 2200 ± 55  | 1710   | 1849    | 1791      | °    | 3(GS-x)  |
| Barca Brusciata    | -2        | 2507 ± 68  | 2062   | 2276    | 2137      | °°   | 4(T-2)   |
| Figari             | -3        | 2620 ± 100 | 2149   | 2363    | 2305      | *°   | 5        |
| Palumbaggia        | -3 + -4   | 2360 ± 60  | 1888   | 2038    | 1959      | °    | 6(GS-1)  |
| San Bainzo         | -4        | 2625 ± 100 | 2154   | 2372    | 2308      | *°   | 7        |
| Monti Russu        | -6 + -8   | 4850 ± 110 | 4963   | 5288    | 5130      | °°°  | 8(T-148) |
| Lavezzi Ovest      | -15       | 6325 ± 100 | 6668   | 6879    | 6767      | *°   | 9        |
| Moines             | -17       | 7945 ± 100 | 8430   | 8282    | 8354      | *°   | 10       |
| Capo Testa         | -28 + -30 | 9080 ± 130 | 9526   | 9884    | 9783      | °°°  | 11       |
| Cala Liberotto     | -33       | 9290 ± 75  | 9880   | 9996    | 9942      | *    | 12       |

(\*°) NESTEROFF, 1984; (°°°) DE MURO, 1990; (°°) DE MURO, 1994; (°) DE MURO *et al.*, 1996; (\*) ORRU', 1996 (nuovo dato)

Fig.16 - 1) Area di dispersione dei dati sulla risalita del livello marino olocenico nel Mediterraneo occidentale (da Pirazzoli, 1991); 2) curva di risalita del mare olocenico sulla base di dati provenienti da speleotemi del Tirreno centrale (da Alessio *et al.*, 1994); 3) curva di risalita del mare olocenico sulla base di dati provenienti da *beach-rock* (Sardegna Nord-orientale) (DeMuro *et al.*, 1996 modificata). Le età radiometriche C14 calibrate sono espresse in tabella riassuntiva.

1) Scattering data area about holocene sea-level rise in western Mediterranean Sea (according to Pirazzoli, 1991); 2) holocene sea-level rise curve from speleothems data (according to Alessio *et al.*, 1994). 3) holocene sea-level rise curve from beach-rock data (Northwest Sardinia) (according to DeMuro *et al.*, 1996, modified). The <sup>14</sup>C radiometric calibrated ages are shown in the summarized list.

Laboratorio di Geochimica Isotopica del Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine dell'Università di Trieste ed i Dott. Michela Dini e Gianluca Cespeglio Dottorandi in Scienze Ambientali Marine dell'Università di Trieste, per le analisi <sup>14</sup>C di alcuni campioni, per la proficua discussione scientifica ed il contributo alla calibrazione ed interpretazione dei dati.

Si ringrazia il Prof. Antonio Ulzega, Direttore del Dipartimento Scienze della Terra di Cagliari, per la rilettura critica del manoscritto.

## BIBLIOGRAFIA

- Alessio L., Allegri M., Antonioli F., Belluomini G., Improta S., Manfra L., & Preite M. (1994) - *La curva di risalita del Mar Tirreno negli ultimi 43 ky ricavata da datazioni su speleotemi sommersi e dati archeologici*. Volume Degli Abstract Di Geosub'94, Palinuro 8-10 giugno 1994. In Stampa (1997) *Sulle Memorie Descrittive del Servizio Geologico Nazionale*. Vol.52 (96) (in stampa)
- Alexandersson T., (1972) - *Intergranular growth of marine aragonite and Mg-calcite: evidence of precipitation from supersaturated seawater*. *Journal of Sedimentary Petrology*, 42, 441-460.
- Aloisi J.C., Monaco A., Planchais N., Thommeret J. & Thommeret Y. (1978) - *The Olocene transgression in the Golfe du Lion, southwestern France: paleogeographic and paleobotanical evolution*. *Géogr. phis. Quat.*, 32 (2): 145-162.
- Antonioli F. & Ferranti L. (1994) - *Holocene sea level data from the coast and shelf of Italian Tirrenian Sea. An historical review*. Riassunti 77° congr. Soc. Geol. It. Bari.
- Berner R.A. (1971) - *Bacterial processes affecting the precipitation of calcium carbonate in sediments*. In: *Carbonate cements*, ed. O.R. Bricker, (Johns Hopkins Press, Baltimore), 247-251.
- Bernier A. (1984) - *Les formations carbonatées du Kiméridgien et du Portlandien dans le Jura méridional (stratigraphie, micropaléontologie et sédimentologie)*. Thèse, 1983, Lyon, Université Claude Bernard, 963 pp dactyl.
- Bernier A. & Dalongeville R. (1996) - *Mediterranean coastal changes in beach-rock cementation*. *Z. Geomorph..N.F., Suppl.-Bd*, 185-198.
- Black M. (1933) - *The precipitation of calcium carbonate on the Great Bahama Bank*. *Geological Magazine*, 70, 455-466.
- Blanc J.J. (1982) - *Remarques sur l'origine et la cimentation de quelques témoins marins du Quaternaire tunisien*. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 24, n° 2, 179-185.
- Brambati A. & De Muro S (1992 c) - *Submerged coastlines in the sector between Capo Testa e Punta di li Francesi (Northern Sardinia-Italy): geomorphological and sedimentological aspect*. *Boll. Oceanol. Teor. Appl.*, 10.
- Brambati A. & De Muro S & Forti S. (1992) - *L'utilisation de la Microscopie Electronique à Balayage pour l'étude morphoscopique et exoscopique des quartz appliquée à l'identification des environnements de paléo-plages. Recherches dans le secteur compris entre Capo Testa et Punta di li Francesi (Sardegna Septentrionale)*. Atti XXXIII Congrès Assemblée plénière de la CIESM, Trieste
- Brambati A. & De Muro S. (1992 a) - *Notes on the Geomorphological map of the area between Capo Testa and Punta di li Francesi*. Northern Sardinia. *Boll. Oceanol. Teor. Appl.*, Vol. 10, pp.
- Brambati A. & De Muro S. (1992b) - *Morphology and Seismostratigraphy of The Proximal Shelf Between Capo Testa and Punta di li Francesi (Northern Sardinia) - Preliminary results*. Atti XXXIII Congrès Assemblée plénière de la CIESM - Trieste.
- Carboni S., Lecca L., Ferrara C. (1989) - *La discordanza versiliana sulla piattaforma continentale occidentale della Sardegna*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 108, 10 ff, 1 Tav.
- Carboni S., Lecca L., Leone F. & Ulzega A. (1979) - *La piattaforma continentale della Sardegna sud-occidentale della Sardegna*. (*Saggio di cartografia geomorfologica dei fondi marini*). 303 Istituto di Geologia Univ. di Cagliari
- Carobene L. & Brambati A. (1975) - *Metodo per l'analisi morfologica quantitativa delle spiagge*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 94, 479-493.
- Carobene L., (1978) - *Valutazioni di movimenti recenti mediante ricerche morfologiche su falesie e grotte marine del Golfo di Orosei*. *Mem.Soc.Geol.It.*, 19 (1978), 641-649, 14 ff., 1 tab.
- Carta M., Del Fa C., Ulzega A., Uras I. (1986) - *La piattaforma continentale della Sardegna*. In P.F. Oceanografia e Fondi Marini, Sottoprogetto Risorse Minerarie, Rapporto Tecnico Finale, 119-218.
- Colantoni P. & Taviani M. (1980) - *Esplorazione diretta dei fondali dell'alto Adriatico tra la foce del fiume Reno e la laguna veneta. Note di bionomia bentonica*. Risultati crociera 1978.
- Colantoni P., Gallignani P. & Lenaz R. (1979) - *Late pleistocene and Holocene evolution of the north adriatic continental shelf (Italy)*. *Marine Geology*, 33, 41-50
- Colantoni P., Preti M. & Villani B. (1990) - *Sistema deposizionale e linee di riva olocenica sommersi in Adriatico al largo di Ravenna*. *Gior.Geol.*, 52/1, 1-18, Bologna.
- Craig H. (1965) - *The measurement of oxygen isotope paleotemperatures*. In "Stable isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures" Ed. Tongiorgi, 161-182.
- Dai Pra G. and Hearty P.J. (1991) - *Variazioni del livello del mare sulla costa ionica salentina durante l'Olocene - Epimerizzazione dell'isoleucina in Helix sp.* *Mem. Soc. Geol. Ital.* (in stampa).
- Dalongeville R., Sanlaville P. (1982) - *Le beach-rock en Méditerranée*. In: *Archéologie du Levant, Recueil R. Saidah, Coll. Maison de l'Orient Méditerranéen 12, Série Archéologique*, 9, 9-20.
- D'Angelo S., Lembo P., Orru' P., Pantaleone N.A., Papisodaro F., Sacchi L., Ulzega A. (1994) - *Cartografia geomorfologica marina e continentale del settore settentrionale del Golfo di Orosei (Sardegna occidentale)*. Scala 1:50.000. *Boll. Serv. Geol. d'It.*, Vol. CXIII 25/38.
- D'Angelo S., Lembo P., Orru' P., Pantaleone N.A., Papisodaro F., Sacchi L., Ulzega A. (1995) - *Cartografia geomorfologica marina e continentale del settore settentrionale del Golfo di Orosei (Sardegna occidentale)*. Scala 1:50.000. Servizio Geologico Nazionale. In Spampa.
- Davies P.J. & Kinsey D.W. (1973) - *Organic and inorganic factors in recent beach-rock formation, Heron Island, Great Barrier Reef*. *Journal of Sedimentary Petrology*, 43, 59-81.
- Delibrias G., Laborel J. (1971) - *Recent variations of the sea level along the Brazilian coast*. *Quaternaria*, 14, 45-49
- De Lumley H. (1976) - *Les lignes de rivage*. in: *La préhistoire Française*. CNRS, Paris, vol. 3: 24-26.
- De Muro S (1994) - *Aspetti geomorfologici e cronologici di paleolinee di riva sommerse oloceniche nella piattaforma prossimale tra Capo Ferro e Capo di*

- Monti Russu (Sardegna nord-orientale). Atti convegno Internazionale di Geologia Subacquea 8-10 giugno 1994, Palinuro (Italia) In stampa (1996), Memorie descrittive del Servizio Geologico Nazionale 52.
- De Muro S, Cespuglio G., Dini M., Longinelli A.. (1996) - *Deglacial sea level records from dating intergranular cement of beach-rock in Sardinia and Bonifacio Strait, Italy*. Nature (in stampa).
- De Muro S. & Ulzega A. (1985) - *Il Golfo di Arzachena nella Sardegna settentrionale. Ricerche di geomorfologia costiera e sottomarina*. Boll. Soc. Geol. It., 104, 551-560, 9ff. 1 Tav.f.t.
- De Muro S. & Ulzega A. (1988) - *Ricerche Geomorfologiche sulle Bocche di Bonifacio: La piattaforma continentale ad ovest di Capo Testa*. Bull. Soc. de Liège, 57e année, 4-5, 403-413.
- De Muro S. (1990) - *Dinamica dei litorali e Geomorfologia della Piattaforma prossimale tra Capo Testa e Punta di li Francesi (Sardegna settentrionale)*. Tesi di Dottorato in Scienze ambientali marine -oceanografia geologica e risorse. 2 Volumi, 526 pp., Università di Trieste - Febbraio 1990.
- El Sayed M. (1988) - *beach-rock cementation in Alexandria, Egypt*. Marine Geology, 80, 29-35.
- Emrich K. Ehhalt D.H. and Vogel J.C. (1970). *Carbon isotope fractionation during the precipitation of calcium carbonate*. Earth and Planetary Scienc. Letters, V. 8, 363-371.
- Fanucci F., Fierro G., Ozer A., Piccazzo M. (1974) - *Ritrovamento di una beach-rock a 70 m di profondità nelle Bocche di Bonifacio*. Studi Sassaesi, Annali della Facoltà di Agraria dell'Univ. Di Sassari, XXII, 3-12.
- Ferrara C., Lecca L., & Carboni S. (1993) - *Late Pleistocene-Holocene sedimentary facies on the Sardinian continental shelf between Capo San Marco and Nebida*. In Estudios sobre cuaternario. A.E.E.C., Fumal M.P. & Bennabeu J. Valencia, 99-106.
- Fierro G., Piacentino G.B., Tucci S. (1974) - *Caratteri morfologici e litogenetici di una "beach-rock" della Liguria occidentale*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat. Pisa, A81, 89-102.
- Forti S. & Orrù P. (1995) - *Geomorfologia costiera e sottomarina della penisola del Sinis (Sardegna occidentale)*. Boll.Soc.Geol.It. 114, 3-21, 2 tavv.
- Frankel E. (1968) - *Rate of formation of beach-rock*. Earth and Planetary Science Letters, 4, 439-440
- Gewelt M., Fierro G. (1984) - *Le beach-rock di Capo Noli (Finale Ligure, Italia):datation 14C et variations diurnes du pH dans des cuvettes*. In:Le beach-rock, Actes du colloque de Lyon, 28 et 29 nov. 1983, T.M.O.. 8, 55-66.
- Grillo S.M., Lecca L., Leone A., Mazzella A., Palomba M., Porcu R., Ulzega A. & Uras I. (1984) - *La piattaforma continentale da Capo Comino a Capo Coda Cavallo (Sardegna NE): aspetti geomorfologici, mineralogico-sedimentologici e applicativi*. Mem. Soc. Geol. It., 27, 361-380, 9 ff, 6 tabb.
- Guo B. & Friedman G.M. (1990) - *Petrophysical characteristics of Holocene beach-rock*. - Carbonate Evaporites, 5: 223-243
- Higgins C.G. (1969) - *Investigations of beach rock in Greece*. Final Report. University of California, Dpt of Geology, 17 pp.
- Holail H. & Rashed M. (1992) - *Stable isotopic composition of carbonate cemented beach-rock along the Mediterranean and the Red Sea coast of Egypt*. Mar.Geol., 141-148.
- Hopley D. (1982) - *Geomorphology of the Great Barrier Reef: Quaternary development of coral reefs*. (John Wiley-Interscience, New York).
- Keeling C.D., Mook W.G. and Tans P.P. (1979). *Recent trends in the 13C/12C ratio of atmospheric carbon dioxide*. Nature 27, 121-122.
- Laborel J. (1984) - *Grès de plage (beach-rocks) et récifs corallines*. In: Le beach-rock, Actes du colloque de Lyon, 28 et 29 nov. 1983. T.M.O. 8. 77-97.
- Lecca L., Lenaz R., Leone F., Rossi S., Ulzega A. (1979) - *La piattaforma continentale della Sardegna sud-orientale: indicazioni metodologiche e primi risultati*. Conv. Scient. Naz. P.F. Oceanografia e Fondi Marini, Roma, 5-7 marzo 1979, 557-566.
- Mary G. (1984) - *Grès de Plage sur la cote espagnole*. In: Le beach-rock, Actes du colloque de Lyon, 28 et 29 nov. 1983. T.M.O. 8.
- Milliman J.D. (1974) - *Marine carbonates, recent sedimentary carbonates, 1*, (Springer-Verlag, Berlin).
- Mook W.G., Bommerson J.C. and Stauer W.H. (1974) - *Carbon isotope fractionation between biocarbonate and gaseous carbon dioxide*. Earth and Planetary Science Letters 22, 169-176.
- Moore C.H.Jr (1973) - *Intertidal carbonate cementation, Grand Cayman, West Indies*. Journal of Sedimentary Petrology, 43, n.3, 591-602.
- Morita R.Y. (1976) - *Anaerobic microbial calcite formation: Great Barrier Reef Studies: Abstracts of the Joint Oceanographic Assembly, Edinburgh 1976* FAO, Rome, 117.
- Nesteroff W.D. (1984) - *Etude de quelques gres de plage du sud de la Corse: datations 14C et implications neotectoniques pour le bloc corso sarde*. Proc. Colloque sur le gres de plage - Travaux de la Maison de l'Orient, (Lion), 8: 99-111.
- Nir D. (1973) - *Pleistocene shorelines of the Mediterranean coast of Israel*. In: 9th congress of the International Union for Quaternary Research, Abstracts, Christchurch, New Zeland, 269 pp.
- Orrù P. Cocco S. & Panizza V. (1994) - *Rilevamento geomorfologico subacqueo del settore compreso tra Capo Boi e Punta Is Cappuccinus (Sardegna Sud-orientale)* - Atti convegno Internazionale di Geologia Subacquea 8-10 giugno 1994, Palinuro (Italia) In stampa (1996), Memorie descrittive del Servizio Geologico Nazionale Vol. 52, 163-176.
- Orrù P. & Pasquini C. (1992) - *Rilevamento geomorfologico sottomarino della riserva marina di Tavolara e di Capo di Coda Cavallo (Sardegna nord-orientale)*. Giornale di geologia, ser. 3a, vol. 54/2, 1992, pp. 49-63, Bologna.
- Orrù P. & Ulzega A. (1984) - *Carta geomorfologica del settore costiero di Funtanamare (Sardegna sud-occidentale)*. - Scala 1:10.000. Tip. STEF, Cagliari.
- Orrù P. & Ulzega A. (1986 b) - *Ricerche sulla piattaforma continentale della Sardegna con immersioni subacquee*. - Atti 7° Congr. AIOL, Trieste, 525-536, 5 ff
- Orrù P. & Ulzega A. (1986 a) - *Geomorfologia costiera e sottomarina della baia di Funtanamare (Sardegna sud-occidentale)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 9, 59-67.

- Orrù P. & Ulzega A. (1987) - *Rilevamento geomorfologico costiero e sottomarino applicato alla definizione delle risorse ambientali (Golfo di Orosei, Sardegna orientale)*. Mem. Soc. Geol. It., 471-479, 8 ff.
- Orrù P. (1988) - *Paleogeografia della piattaforma continentale del Golfo di Orosei nel tardo glaciale (Sardegna Orientale)*. Convegno Internazionale "I primi uomini in ambiente insulare", Olinena (Abstract)
- Orrù P. & Ulzega A. (1989) - *Carta Geomorfologica della piattaforma continentale e delle coste del Sulcis (Sardegna sud-occidentale)*. 1:100.000. - Tip. STEF, Cagliari.
- Orrù P. & Ulzega A. (1991) - *Riserva marina di Tavolara-Capo Coda Cavallo. Carta Geomorfologica Marina e Continentale*. 1:25.000. - Tip. STEF Cagliari.
- Ozer A. (1976) - *Géomorphologie du versant septentrional de la Sardaigne*. Thèse de Doctorat, Univ. Liege, 3, 287 pp., 125 pp., 218 pp.
- Ozer A., Picazzo M. & Ulzega A. (1980) - *Osservazioni sulla paleogeografia delle Bocche di Bonifacio*. IV Conv. A.I.O.L., 1, 11, 4 ff.
- Ozer A., Tucci S., Ulzega A. (1983) - *Les Beach Rocks de Sardaigne distribution et implications paleo-geographiques*. Proc. Colloque su le gres de plage (Lion), 13 pp.
- Palomba M. & Ulzega A. (1984) - *Geomorfologia dei depositi quaternari del Rio di Quirra e della piattaforma continentale antistante (Sardegna orientale)*. Rend. Sem. Fac. Sc. Univ. Cagliari, 54 (2), 13 pp., 6 ff.
- Penland S., Boyd R. e Suter J.R. (1988) - *Transgressive depositional system of the Mississippi Delta Plain: a model for barrier shoreline and shelf sand development*. Journal Sedimentary Petrology, 58/6, 932-949.
- Pirazzoli P.A. (1991) - *World Atlas of Holocene Sea-level Changes*. Elsevier Oceanography Series, 58.
- Plassche O. van de, (1986). - *Sea Level Research: a manual for the collection and evaluation of data*. - Geo Books - Norwich - Galliard Ltd, England, 618 pp
- Sanlaville P. (1984) - *Le beach-rock de la cote libanaise*. In: Le beach-rock, Actes du colloque de Lyon, 28 e 29 nov. 1983, T.M.O. 8.
- Segre A.G. (1969) - *Linee di riva sommerse e morfologia della piattaforma continentale italiana relativa alla trasgressione marina versiliana*. Quaternaria, II, 141-154.
- Stearns H.T. (1972) - *C14 vs. uranium-series dating of late Pleistocene shore deposits, Oahu, Hawaii* (abstract). In: Cordilleran section 68<sup>th</sup> annual meeting, Geological Society of America. Abstracts, 4, n° 3, . 242 pp.
- Stefanon A. (1971) - *Submerged beach-rock in the Gulf of Venice (Italy), key to the knowledge of the local coastline evolution in the last few thousand years*. In: Les niveaux marins quaternaires, part 1, Holocène, Quaternaria, 14, 191-193.
- Stuvier M. & Reimer P.J. (1993) - *Extended 14 C data base and revised cali 3.0 14C age calibration program*. Radiocarbon, Vol. 35, No. 1, 1993, P. 215-230.
- Taylor J.C.M. & Illing L.V. (1971) - *Development of recent cemented layers within intertidal sand flats, Qatar, Persian Gulf*. In: Carbonate Cements. Ed. O.P. Bricker, (Johns Hopkins Press), 27-31.
- Trichet J. (1965) - *Essai d'explication de l'origine des grès de plage*. C.R. Ac. Sc. Paris, 261, gr. 9, 3176-3178.
- Ulzega A., Lecca L., Leone F. (1980) - *Niveaux marins submergés sur la plate-forme continentale de la Sardaigne orientale*. Rapp. Comm: Int. Mer Medit., 27, n° 8, 35-36.
- Ulzega A. & Ozer A. (1982) - *The versilian transgression in Sardinia. IGOP 61, Holocene sea level fluctuations, magnitude and causes*. 182-186.
- Ulzega A. & Ozer A. (1982) - *Compter-Rendus de l'Excursion-Table Ronde Tyrrhenien de Sardaigne*. - INQUA (Avril 1980), 110 pp., 22 ff., 1 tab
- Ulzega A. (1988) - *Carta Geomorfologica della Sardegna marina e continentale*. 1:500.000. - P.F. Oceanografia e Fondi Marini", CNR.
- Ulzega A., Leone F., De Muro S., Loi L., Orrù P., Panizza V., Porcu G.P., Sanna C. (1986) - *Linee di riva sommerse nel Golfo dell'Asinara (Sardegna settentrionale)*. Crociera oceanografica LM/MCS 85 Rend. Semm. Fac.Sc. Univ. di Cagliari. Vol. LVI, fasc. 1.
- Ulzega A., Fais S., Ferrara C., Lecca L, Leone F. (1980) - *Il significato delle linee di riva sommerse nella ricerca dei placers*. Atti del Conv. Scient. Naz. Sui Placers Marini.
- Ulzega A., Leone F. & Orrù P. (1984) - *Late Quaternary sea-level evidence in Sardinia: the submerged beach-rock of Serpentara*. - "Simposio internacional sobre cambios del nivel del mar y evolucion costera en el Cuaternario tardio" (abstract), Mar del Plata, 105-108, 4 ff.
- Ulzega A., Leone F. & Orrù P. (1986) - *Geomorphology of submerged late Quaternary shorelines of the south Sardinian continental shelf*. - Journ. of Coast. Res., S1 (1), 73-82, 12 ff.
- Ulzega A., Leone F. De Muro S., Fercia S., Franceschi G., Grimaldi F., Loi L., Lummerzheim M, Manunza A., Marongiu P., Orrù P., Porcu G.P., Rodriguez M., Sanna C. Sanna R. (1984) - *Primi risultati della crociera oceanografica L.M. 84 per lo studio del linee di riva sommerse della Sardegna*. Rend. Semm. Fac. Sc. Univ. di Cagliari.
- Ulzega A., Orrù P. (1984) - *Les beach-rocks de la baie de Funtanamare (Sardaigne sud-occidentale)*. In: Le beach-rock, Actes du colloque de Lyon, 28 e 29 nov. 1983, T.M.O. 8.
- Urey H.C. (1947). *Thermodynamic properties of isotopic substances*. Jour. Chem. Soc., 562-581.
- Uzdowski E. & Hoefs J. (1990). *Kinetic 13C/12C and 18O/16O effects upon dissolution and outgassing of CO2 in the system CO2-H2O*. Chemical Geology (Isotope Geoscience), 80, 109-118.
- Williams D.F., Thunell R.C., Tappa E., Raffi I. (1988) - *Chronology of the Pleistocene oxygen isotope record: 0-1,88 M.y. B.P.* Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol., 64, 221-240.
- Zhao Xitao, Sha Qingan, Feng Wenke (1978) - *Les beach-rocks holocènes dans l'île d'Hainan*. Sci. Geol. Simica, 2, 163-173.

Ms: ricevuto il: 16 maggio 1997  
 Inviato all'A. per la revisione il: 20 ottobre 1997  
 Testo definitivo ricevuto il: 17 novembre 1997

Ms received: May 16, 1997  
 Sent to the A. for a revision: October 20, 1997  
 Final text received: November 17, 1997