

«Beachrocks» Holocenos de la Isla de la Reunión, Océano Índico

Y. FONT* y F. CALVET**

* Departament de GDGP. Facultat de Geologia,
Universitat de Barcelona.08028.

** Departament de GPPG. Facultat de Geologia,
Universitat de Barcelona.08028.

RESUMEN

La isla de la Reunión está situada en la parte occidental del Océano Índico, y conforma la parte emergida de un complejo volcánico interplaca. El desarrollo de los «beachrocks» está relacionado con las playas de arenas carbonatadas, las cuales se desarrollan en la parte interna de las plataformas arrecifales. Los «beachrocks» estudiados se localizan entre el Cap de Champagne y el Port de Saint Gilles, constituyendo una franja continua de unos 3 Km de longitud.

Los «beachrocks» estudiados, de algunas decenas de metros de ancho, están constituidos por cuatro horizontes de 10-15 cm de potencia, que buzan de 10 a 15° hacia el mar. Los «beachrocks» están constituidos por calcarenitas. Los componentes de las calcarenitas son: fragmentos de corales (entre un 30 a un 70% de los granos), algas rodofíceas (entre un 10 y un 30%), y en menor proporción litoclastos de rocas volcánicas, intraclastos, foraminíferos (Amfistegínidos, Peneróplidos, Rotálidos, aglutinados, y Homotremátidos), moluscos y equinodermos. La porosidad de los «beachrocks», principalmente intergranular y en menor proporción intragranular, varía entre un 6 y un 25%. La porosidad está ocluida en parte por distintos tipos de cementos y también por sedimento interno.

Los cementos de estos «beachrocks» son de calcita magnesiana (HMC) o de aragonito. Los principales cementos de HMC son el cemento micrítico, el cemento peletoidal y el cemento «bladed». Los principales cementos de aragonito son el cemento prismático y el cemento fibroso.

El cemento micrítico de HMC (con un contenido de CO_3Mg que varía de un 3% a un 17%) constituye la primera etapa de cementación en la que jue-

gan un papel destacado los microorganismos. Esta primera etapa se desarrolló en el medio supramareal y/o en la parte alta de la zona intermareal, en un régimen hidrológico marino vadoso. Los cementos aragoníticos, los cuales presentan contenidos muy altos de estroncio y altos de sodio, y el cemento «bladed» de HMC, constituyen la segunda etapa de cementación. Esta segunda etapa se desarrolló en el medio intermareal y submareal, en un régimen hidrológico marino freático.

Palabras clave: «Beachrocks», diagénesis, cementos, elementos traza, Holoceno.

ABSTRACT

The island of Reunion is located in the western part of the Indian Ocean. The beachrock development is related to the carbonate sandy beaches located in the inner part of the reefal platforms. The beachrocks under study are situated between the Champagne Cape and Saint Gilles harbour, and constitute a continuous fringe up to 3 Km in length.

These beachrocks attain some tens of metres in width, and consist of four horizons 10-15 cm in thickness, dipping 10-15° seaward. The beachrocks are calcarenites. The components are: coral fragments (from 30 to 70%), red algae (from 10 to 30%), lithoclasts (volcanic rocks), intraclasts, foraminifera, molluscs and echinoderms. The porosity of the beachrocks varies from 6 to 25%. The original porosity, intergranular and intragranular, is partially occluded by cements and locally by internal sediment.

The beachrocks are cemented by different types of HMC (micritic, pelotoidal and bladed) and aragonite (prismatic and fibrose) cements. The HMC micritic cement (between 3 and 17 weight % CO_3Mg) constitutes the first cementation phase, where microorganisms play an important role. This phase takes place in the supratidal and/or the upper part of the intertidal zone. The hydrologic regime of this phase is vadose marine. The aragonitic cements, with a vary high content of strontium and high content of sodium, and the HMC bladed cement, constitute the second phase of cementation. This phase occurs in the intermareal zone and the upper part of the subtidal zone. The hydrologic regime of this phase is phreatic marine.

Key words: Beachrocks, diagenesis, cements, trace elements, Holocene

INTRODUCCIÓN

Las arenas de playa litificadas mediante cementos carbonatados dan lugar una roca que se denomina «beachrock» (Ginsburg, 1953). Las playas son un emplazamiento ideal para la precipitación de cementos marinos, ya que

las condiciones de alta energía (debida a la acción del oleaje y de las mareas) y de un sedimento tamaño arena con una alta porosidad y permeabilidad, aseguran volúmenes adecuados de agua sobresaturada capaz de circular a través del sedimento produciendo su cementación (Moore, 1989). En general, esta cementación ocurre en la zona intermareal, pero también puede ocurrir en la parte alta de la zona submareal (Alexandersson, 1972) y en la parte baja de la zona supramareal (Holail & Rashed, 1992).

Los «beachrocks» se disponen paralelos, y a veces perpendiculares, a la líneas de costa formando cuerpos continuos de hasta varias decenas de kilómetros a parches métricos discontinuos e incluso nódulos decimétricos (Bricker, 1971). Los «beachrocks», en general, no exceden del metro de potencia, aunque se han citado hasta los 5 metros de potencia (Amieux *et al.*, 1989), y buzan suavemente (con un máximo de 15°) en dirección al mar siguiendo la disposición de la playa, desarrollándose en la parte alta del «shoreface». A menudo, los «beachrocks» están constituidos por diversos horizontes («dalles», «beds», «bands», «horizons») de algunos centímetros o decímetros de potencia. Muchos autores consideran que los beachrocks se desarrollan preferentemente en climas tropicales y subtropicales (Bricker, 1971), aunque se han citado beachrocks en áreas con clima templado e incluso climas relativamente fríos.

Los «beachrocks» en áreas con clima tropical y subtropical son los que presentan mayor desarrollo, y entre estos destacan los desarrollados en las zonas tropicales del Océano Índico, como los de la Isla de la Reunión (Mondon, 1976 y Montaggioni, 1978), que son los analizados en este trabajo.

Los principales objetivos de este trabajo son: i) Caracterizar desde un punto de vista geométrico, petrográfico, geoquímico y diagenético los «beachrocks» de una de las mejores zonas de afloramientos de la isla de La Reunión; ii) Presentar las características texturales y geoquímicas de los distintos tipos de cementos y la estratigrafía de la cementación; iii) Interpretar el origen de los «beachrocks» y el de los distintos tipos de cementos.

La caracterización e interpretación de los «beachrocks» subactuales es básica para el reconocimiento de los «beachrocks» en el registro fósil. Además, muy a menudo se interpretan posibles «beachrocks» como «hardgrounds» en el registro geológico. Las distintas características de los «beachrocks» analizados en este trabajo permiten distinguir mediante criterios de campo, petrológicos, geoquímicos y diagenéticos entre los «beachrocks» y los «hardground».

CARACTERÍSTICAS DE LA ISLA DE LA REUNIÓN

La isla de La Reunión se encuentra en el Océano Índico Occidental, a unos 55° 32' de longitud Este y 21° 05' de latitud Sur. Junto con las islas de Mauricio y Rodríguez forman el archipiélago de las Mascareñas.

La isla de la Reunión aparece como la parte emergida de un complejo vol-

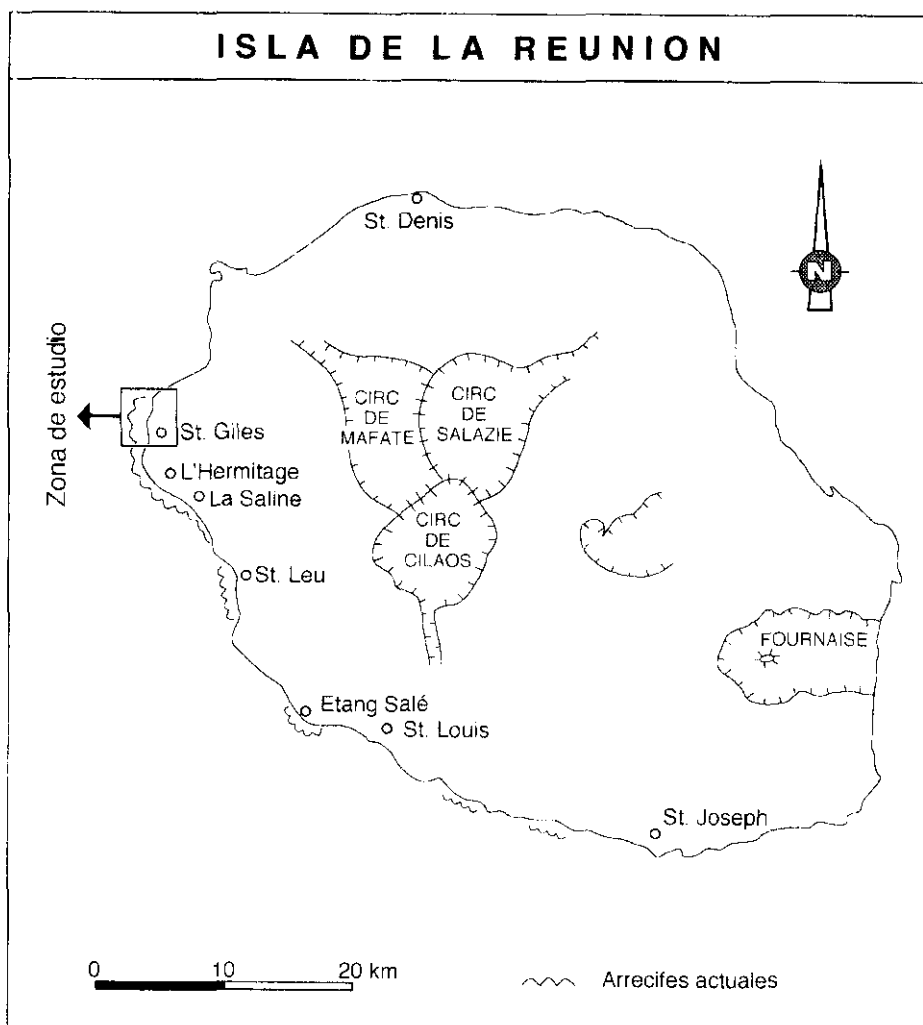


Fig. 1- Mapa de la Isla de la Reunión y situación de la zona de estudio.

Fig. 1- The island of Reunion map and studied zone location.

cánico intraplaca que se ha individualizado sobre fondos oceánicos de más de 4.000 m de profundidad y prácticamente no presenta plataforma continental. Esta isla tiene forma de elipse, y está orientada según una dirección NNW-SSE (Fig. 1), con un eje mayor de unos 72 Km. y un menor de 52 Km, y tiene un perímetro de 208 Km. El relieve de la isla viene determinado por la existencia de dos macizos volcánicos (Fig. 1). El macizo del Piton des Neiges

ocupa toda la parte NW de la isla. Actualmente, este volcán es inactivo, y forma los circos de Cilaos, Mafat y Salazie. En la parte SE de la isla se localiza el Piton de la Fournaise, aún activo.

Gran parte del litoral reunionés esta formado por acantilados (93 Km) o por playas de cantos rodados (70 Km). Las playas arenosas ocupan 35 Km de los cuales 21 Km lo son de playas con sedimentos carbonatados, mientras que los 14 Km restantes lo son de arenas basálticas.

Los arrecifes coralinos recientes están situados al oeste y sur de la isla (Figs. 1 y 2), y constituyen un cinturón de unos 25 Km de longitud. Las playas localizadas en el interior de las plataformas arrecifales son las que presentan un desarrollo preferencial de «beachrocks».

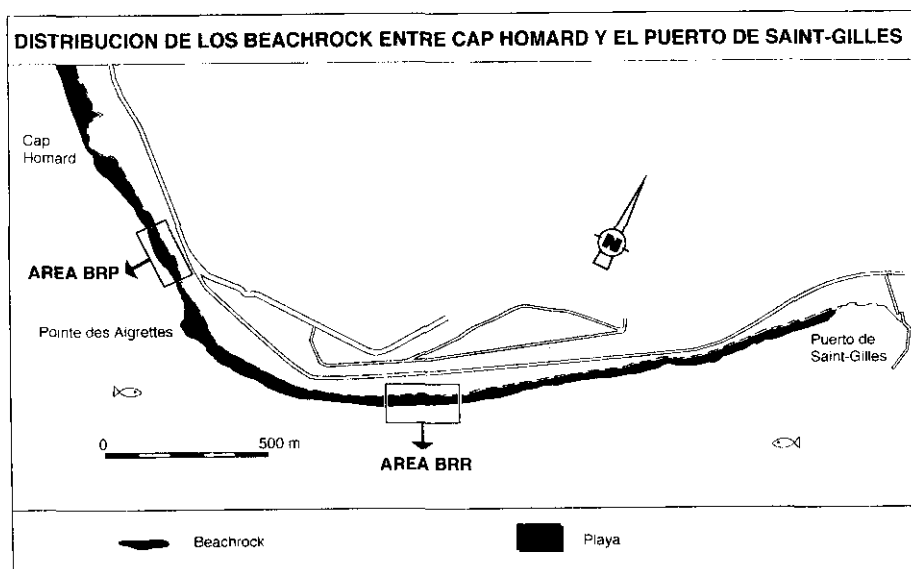


Fig. 2- Cartografía y situación de las áreas BRR y BRP.

Fig. 2- Areas BRR and BRP mapping and location.

SITUACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LOS «BEACHROCKS» DE LA ISLA DE LA REUNIÓN

Los «beachrocks» de la isla de la Reunión están siempre relacionados con las playas de arenas carbonatadas, y especialmente con las playas desarrolladas en la parte interna de las plataformas arrecifales (Fig. 1).

Los «beachrocks» se localizan en la costa oeste y sur de la Isla de la Reunión, en concreto entre el Cap Champagne y Saint Pierre, distinguiéndose

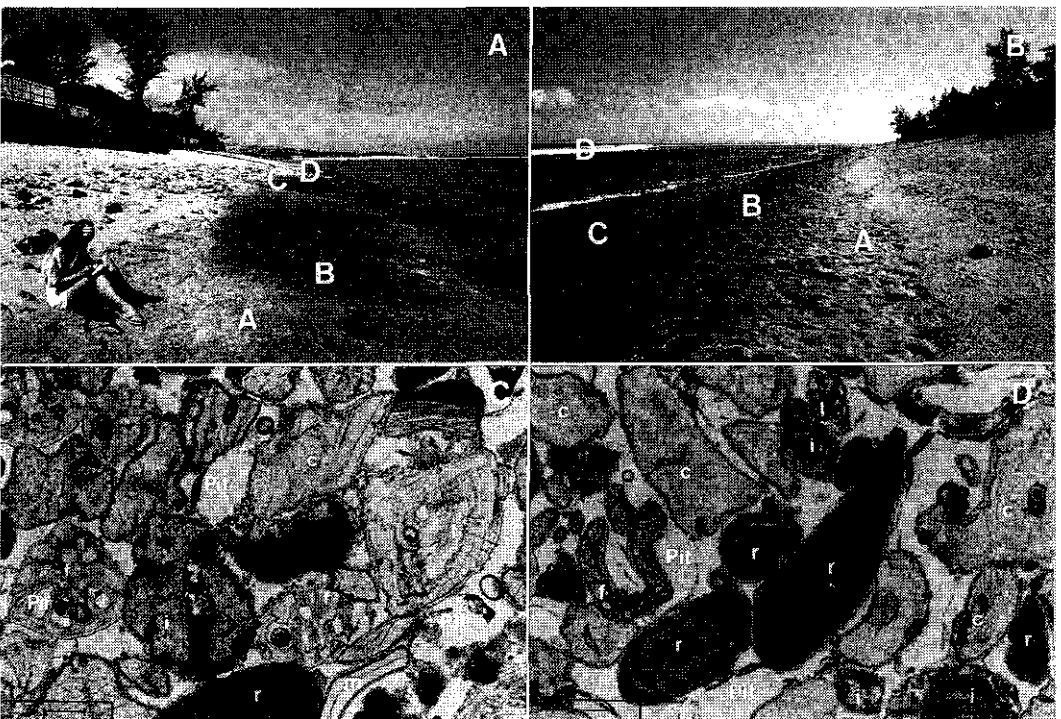


Fig. 3.- A) «Beachrock» del área BRR donde se observan los horizontes A, B, C y D. B) Superficie de erosión, debida en gran parte a la acción bioerosiva de los equinodermos, de la parte superior del «beachrock». C) y D) Componentes y porosidad (muestra BRR-2). c = Corales; r = Algas rodófiticas; f = Foraminíferos; i = Intraclastos; l = Litoclastos volcánicos; Pht = Porosidad intragranular; Pht = Porosidad intragranular.

Fig. 3.- A) Beachrock of the BRR area where the horizons A, B, C and D are observed. B) Erosion surface due to the echinoderm bioerosive action in the upper part of the beachrock. C) and D) Components and porosity (sample BRR-2). c = Coral; r = Red algae; f = Foraminifera; i = Intraclasts; l = Volcanic lithoclasts; Pht = Intergranular porosity; Pht = Intergranular porosity.

cuatro zonas, en función de las características del «beachrock», y que de Norte a Sur son (Figs. 1 y 2): i) La zona comprendida entre Cap Champagne y el Puerto de Saint Gilles, donde los «beachrocks» constituyen una franja continua de unos 3 km. de longitud. Los dos principales afloramientos de «beachrock estudiados» (denominadas área BRP y área BRR) se localizan a esta zona. ii) La zona comprendida entre el Puerto de Saint Gilles y la Passe de l'Hermitage donde los «beachrocks» se presentan de forma discontinua. iii) En la zona de Saint Leu los «beachrocks» presentan un gran desarrollo, y han sido estudiados por Montaggioni (1978). iv) La zona comprendida entre el Etang-Salé y Saint Pierre.

El «beachrock» estudiado tiene unos 50 cm de potencia, unas decenas de metros de ancho, y buza ligeramente (entre 10 a 15°) hacia el mar (Figs. 3A y 3B). Este «beachrock» está situado entre la zona intermareal y submareal alta, y está recubierto de arenas mar adentro. El «beachrock» presenta cuatro horizontes, que han sido denominados informalmente A, B, C, D (Figs. 4 y 5). El horizonte A está situado en la parte inferior y se ha interpretado como el horizonte más antiguo, mientras que el horizonte D está situado en la parte más superior y se ha interpretado como el más moderno. Los horizontes tienen de 10-15 cm de potencia.

La superficie superior del «beachrock» presente una morfología irregular en gran parte debida a la actividad bioerosiva de equinodermos (Fig. 3B). Esta superficie es verde hacia mar, y gris-verde hacia tierra.

Los «beachrocks» de la isla de la Reunión tienen una edad comprendida entre los 5.000 y los 2.000 años (Montaggioni, 1978).

COMPOSICIÓN TEXTURAL DE LOS «BEACHROCKS»

La composición petrográfica de los «beachrocks» se ha realizado en base a un conteo de 2000 puntos en cada lámina delgada.

Texturalmente los «beachrocks» son calcarenitas. El tamaño medio de los granos varía de 1 a 4 mm de diámetro, aunque localmente presenta bloques decimétricos. Los componentes principales son los fragmentos de corales (en general casi un 50 % de los componentes) y algas rodofíceas, y los componentes secundarios son litoclastos volcánicos, intraclastos, foraminíferos, fragmentos de moluscos y de equinodermos (Fig. 3C).

Los corales son el componente más abundante, variando desde un 30 a un 70% del total de los componentes. Los corales se presentan siempre fragmentados, y los granos tienen formas de subangulares a subredondeados. Los principales tipos de corales pertenecen a las familias *Pocillopora*, *Acropora*, *Fungia*, *Leptoria* y *Montastrea*. Los fragmentos de corales presentan pocas microperforaciones. Las algas rodofíceas representan de el 10 a un 30% del total de los componentes. Los granos de algas rodofíceas tienen forma redon-

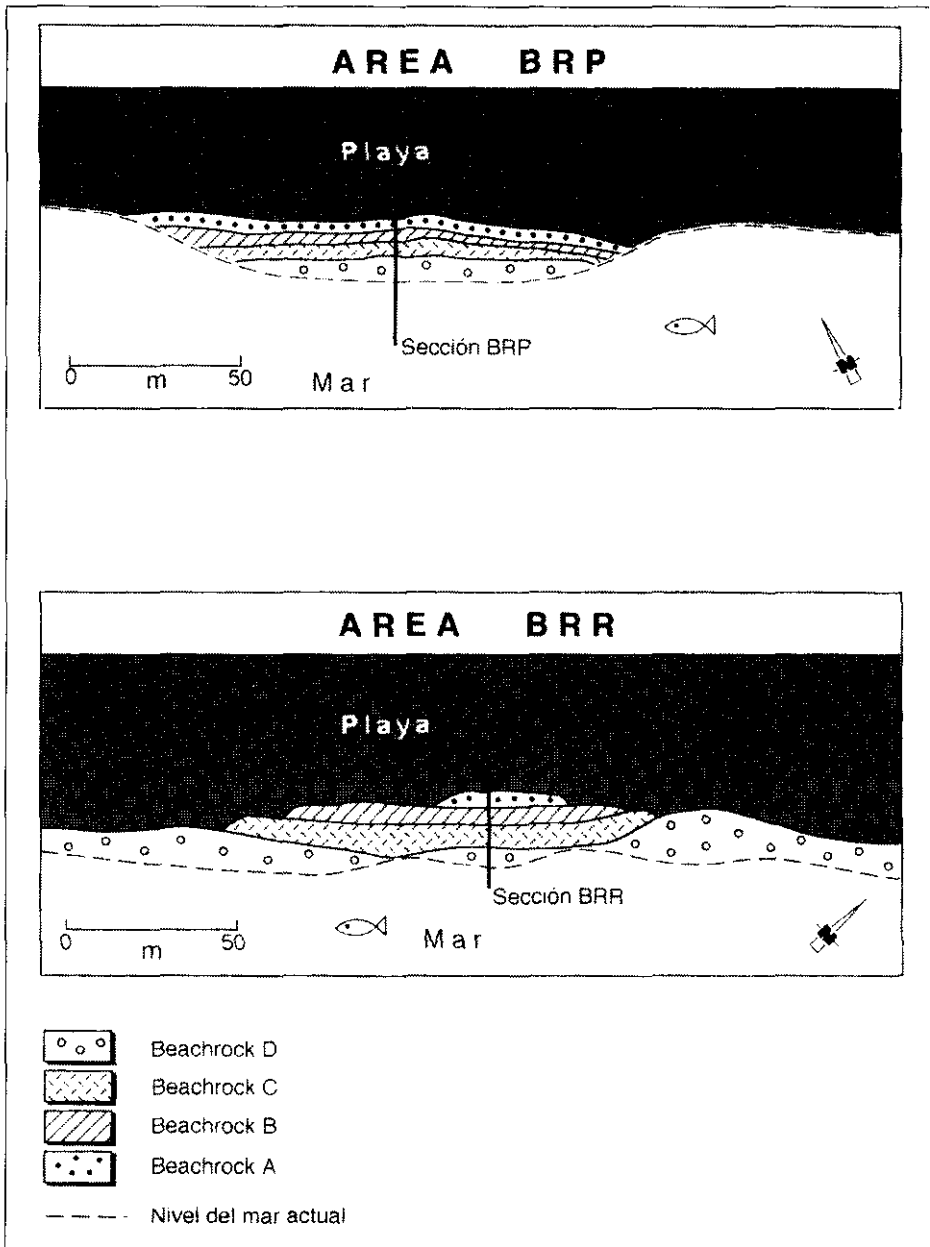


Fig. 4- Cartografía de las áreas BRR y BRP.

Fig. 4- BRR and BRP area maps..

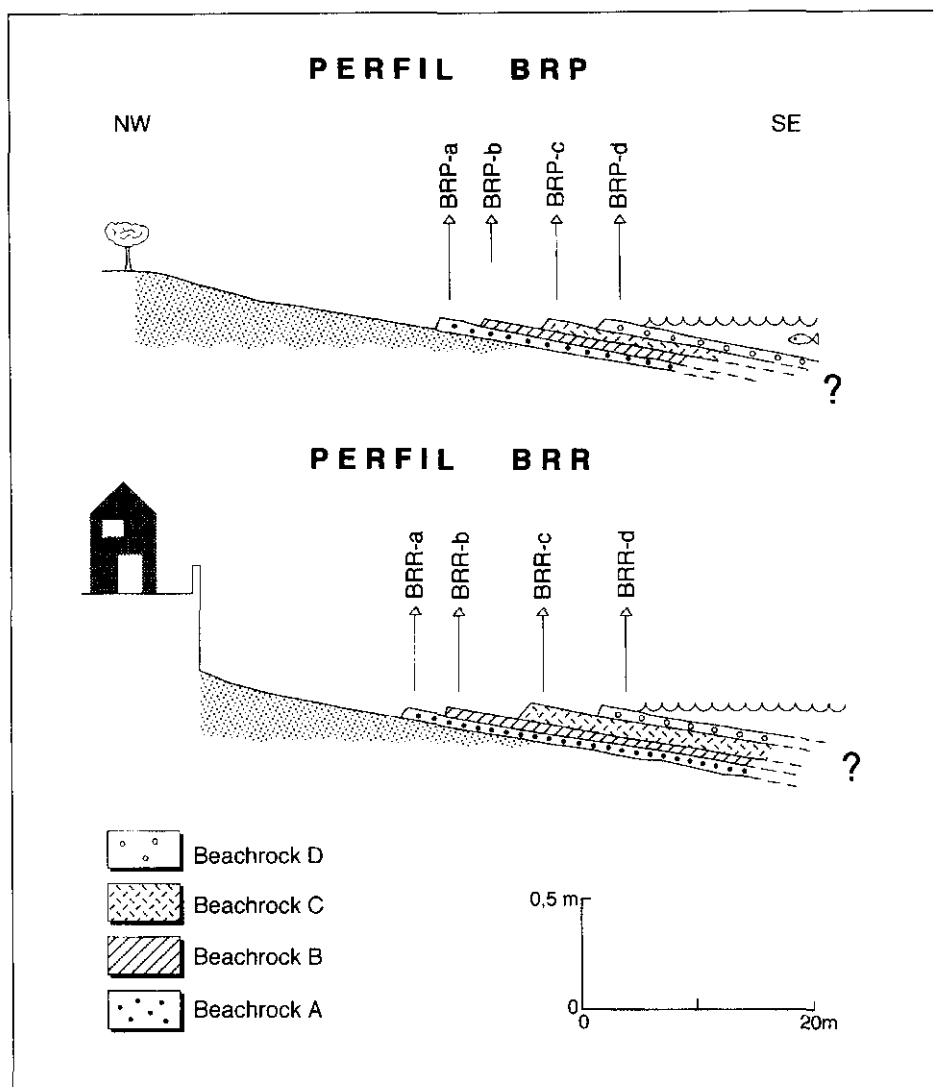


Fig. 5- Secciones de las áreas BRR y BRP.
Fig. 5- BRR and BRP sections.

deada a subredondeada (Figs. 3C y 3D). Montaggioni (1978) y Gabrie (1982) citan los géneros *Porolithon oncodes*, *Lithophyllum mollucense*, *Lithothamnium incrasatum* y *Lithothamnium lenormandii*.

Los litoclastos (Figs. 3C y 3D) constituyen de un 2.4 a un 16 % del total de los componentes. La mayoría de los litoclastos están constituidos por fragmentos de rocas volcánicas (vidrios y tobas), y en menor proporción por cristales de plagioclasa, olivino y piroxenos. Los foraminíferos (Figs. 3C y 3D) varían de un 1.5 a un 11 %. Los principales tipos de foraminíferos son los géneros siguientes: *Amphistegina*, que es el foraminífero más abundante, *Heterostegina*, *Homotrema*, *Gyroidina*, *Calcarina*, *Carpenteria*, *Elphidium*, *Borelis*, *Marginopora*, y *Textularia*. Los intraclastos varían de un 1.4 a un 6.7%. Los intraclastos (Figs. 3C y 3D) están constituidos por granos volcánicos y fragmentos esqueléticos carbonatados, ambos de tamaño «silt», y cementados-aglutinados por micrita. Posiblemente, los intraclastos sean el resultado de la fragmentación de niveles más antiguos de «beachrocks». Intraclastos muy similares han sido descritos en Hawai (Meyers, 1987). Los moluscos (bivalvos y gasterópodos) oscilan entre un 1 a un 6%, y los equinodermos (fragmentos de placas y puas) entre un 0.5 a un 4%.

El sedimento interno, que ocupa tanto porosidad intergranular como intragranular, está constituido por una matriz micrítica, de homogénea a peltoïdal, y por sedimento tamaño limo de fragmentos bioclásticos (diatomeas, foraminíferos planctónicos, detritus esqueléticos,...). La mineralogía de la matriz micrítica es aragonítica.

En resumen, la composición de los «beachrocks» estudiados presenta las siguientes características: i) existe un claro predominio de los componentes carbonatados (más de un 75% del total de los componentes); ii) los litoclastos de origen volcánico no sobrepasa un 16%; iii) los fragmentos de corales constituyen un promedio del 50% de los componentes; y iv) el sedimento interno, menos de un 2% del volumen total, corresponde a la última etapa de relleno de la porosidad de los «beachrocks».

POROSIDAD DE LOS «BEACHROCKS»

La porosidad se ha cuantificado mediante el conteo de 2000 puntos por lámina delgada. La porosidad total de los «beachrocks» varía de 7 a 27% del volumen total. Los principales tipos de porosidad son la porosidad intragranular y la porosidad intergranular (Figs. 3C y 3D). La porosidad intragranular, que varía entre 0 y un 5%, se presenta en las cámaras de los corales, foraminíferos y gasterópodos, así como en el interior de las células de las algas rodofíceas. La porosidad intergranular, varía de un 6 a un 24%.

Los distintos horizontes (A, B, C y D) de las áreas BRP y BRR muestran la misma tendencia en la variación de la porosidad. Los horizontes D,

que son los más modernos en cuanto a edad y los que están menos cementados, tienen unos valores altos de la porosidad (un 27 % en el corte BRR y un 15 % en el corte BRP), mientras que los horizontes A, que son los más antiguos y los que están más cementados, presentan unos valores relativamente bajos de porosidad (un 10 % en el corte BRR y un 12 % en el corte BRP).

CEMENTOS DE LOS «BEACHROCKS»

El principal rasgo diagenético de los «beachrocks» es la cementación. Los cementos de los «beachrocks» estudiados son de HMC (Fig. 6) y de aragonito (Fig. 7). Los principales cementos de HMC son el cemento micrítico, el cemento peletoidal y el cemento «bladed». Los principales cementos de aragonito son el cemento prismático y el cemento fibroso.

Cemento micrítico de HMC: El cemento micrítico de HMC es muy abundante y ocupa tanto porosidad intergranular como porosidad intragranular (corales, foraminíferos y localmente gasterópodos). El cemento micrítico presenta disposición «rim» discontinuo, de pocas micras a tener más de 100 μm de espesor, o «rim» continuo, con un espesor constante de 5 a 10 μm (Figs. 6, 8A y 8B). A menudo presenta disposición menisco. La disposición menisco de cementos micríticos de HMC ha sido señalada también por Meyers (1987) en «beachrocks holocenos» de Hawai. El cemento micrítico constituye la primera generación de cementación de los «beachrocks».

El cemento micrítico varía gradualmente de una textura homogénea, cuando el «rim» tiene pocas micras de espesor, a presentar un aspecto grumoso (Fig. 8D), cuando el «rim» es mucho más grueso. El cemento micrítico está constituido por cristales anhedrales de 1 a 4 μm a cristales en forma de huso y euhedrales de 3 a 8 μm de largo, los cuales pueden presentar aristas curvas. Localmente, los cristales en forma de huso se ordenan en pseudo-rosetas y rosetas de 10 a 15 μm de diámetro (Fig. 8C), las cuales dan al cemento este aspecto grumoso. En relación con el cemento micrítico se presentan abundantes filamentos de microorganismos, de 8-10 μm de diámetro, interpretados como cianobacterias (Fig. 8D).

Texturas similares al cemento micrítico de HMC han sido descritas en numerosos «beachrocks», como «cryptocrystalline cement» en el Mediterráneo y Mar Rojo (Friedman & Gavish, 1971), «micrite» en el Mediterráneo (Alexandersson, 1972), «micrite crust» en la isla Grand Cayman (Moore, 1973), «high-magnesian cryptocrystalline calcite cement» (Meyers, 1987), «micrite cement» en Egipto (El-Sayed, 1988), «enrobage micritique» en Grecia (Bernier & Dalongeville, 1988), «micritic cement» en Túnez (Strasser, Davaud & Jedoui, 1989), «liseré micritique» en la Polinesia francesa (Bernier *et al.*, 1990), «cryptocrystalline rim» en el Mediterráneo y Mar Rojo (Holail & Ras-

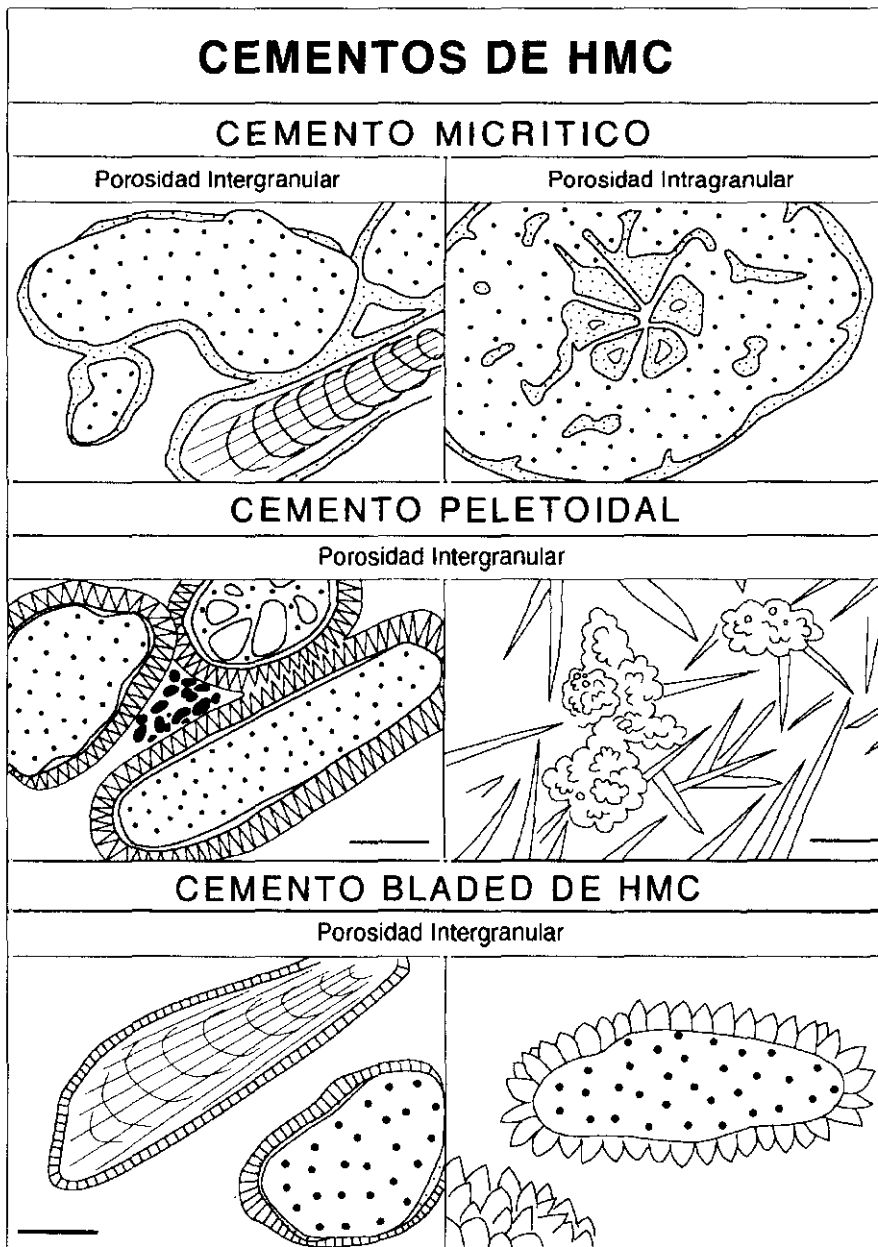


Fig. 6- Morfologías y disposiciones de los cementos de HMC: Micrítico, Peletoidal y «Bladed».
 Fig. 6. Micritic, Peletoidal and Bladed HMC micritic cements.



Fig. 7- Morfologías y disposiciones de los cementos aragoníticos: prismático y fibroso.
Fig. 7- Prismatic and fibrous aragonitic cements.

hed, 1992). Otros autores citan texturas similares constituidas por aragonito y materia orgánica (Davaud & Strasser, 1984).

El contenido de CO_3Mg del cemento micrítico de los «beachrocks» estudiados varía desde un 3% a un 17%. Estos valores son relativamente parecidos a los citados en la literatura. Tietz & Müller (1971) citan valores del 10 al 13% en Fuerteventura; Moore (1973) presenta valores comprendidos entre 10.9 a un 13.7%; Magaritz *et al.*, (1979) obtienen valores de un 10% en el Mediterráneo; y Meyers (1987) cita valores del 15.5%, aunque localmente varían de un 4 a un 10%.

Cemento peletoidal: El cemento peletoidal es muy poco abundante, ocu-

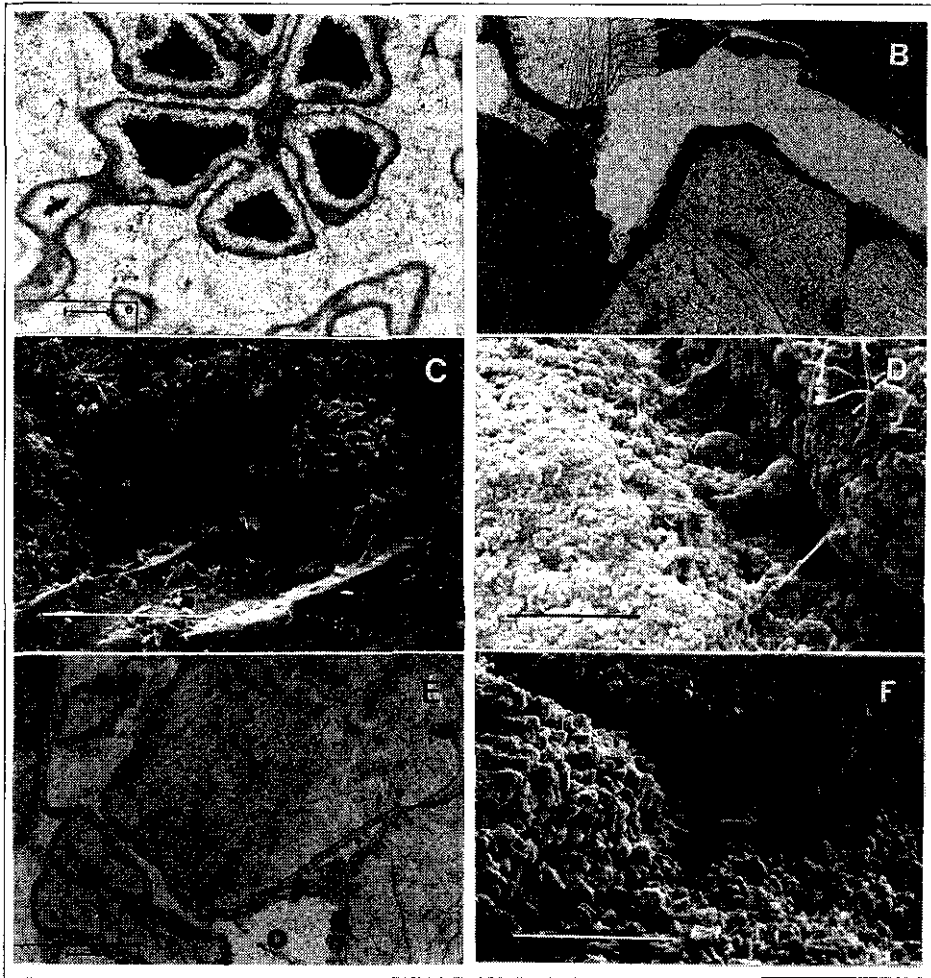


Fig. 8- A) Cemento micrítico de HMC rellenando la porosidad intragranular de un coral, donde también se observa una segunda generación de cemento fibroso de aragonito (muestra BRR-3). B) Cemento micrítico de HMC ocupando porosidad intergranular (muestra BRP-1). C) Cemento micrítico de HMC constituido por rosetas. SEM. Barra = 50 μ m (muestra BRP-1). D) Cemento micrítico de HMC ocupando porosidad intergranular. Presencia de filamentos de microorganismos. SEM. Barra = 50 μ m (muestra BRR-0). E) Cemento «bladed» de HMC en disposición «rim» ocupando porosidad intergranular. (muestra BRR-2). F) Detalle de los cristales de cemento «bladed» de HMC. SEM. Barra = 50 μ m (muestra BRR-2).

Fig. 8- A) HMC micritic cement filling the intragranular porosity in a coral fragment, and the second phase of cementation made up of fibrous aragonite cement (sample BRR-3). B) HMC micritic cement filling intergranular porosity (sample BRP-1). C) HMC micritic cement. SEM. Bar = 50 μ m (sample BRP-1). D) HMC micritic cement filling intergranular porosity. Presence of filaments. SEM. Bar = 50 μ m (sample BRR-0). E) Rim bladed HMC cement filling intergranular porosity. (sample BRR-2). F) Detail of bladed HMC crystals. SEM. Bar = 50 μ m (sample BRR-2).

pa solamente porosidad intergranular (Fig. 6), y se desarrolla a continuación de los cementos aragoníticos. La presencia del cemento peletoidal es independiente de los distintos horizontes de los «beachrocks» estudiados.

Los peloides, de 20 a 40 μm de diámetro, están formados por cristales de 1 a 4 μm de anhedrales a subhedrales. Los peloides están cementados entre sí por cemento micrítico constituido por cristales anhedrales, de 1 a 2 μm , que gradan a cristales sub-euhedrales alargados («bladed» a huso) de 2 a 8 μm . Asociados a los peloides se presentan filamentos (posiblemente cianobacterias). Cementos peletoidales similares han sido descritos en distintos «beachrocks» (Moore, 1973; Meyers, 1987; y Amieux *et al.*, 1989).

El contenido de CO_3Mg del cemento peletoidal de los «beachrocks» estudiados varía desde un 8% a un 12%.

Cemento «bladed» de HMC: El cemento «bladed» de HMC es poco abundante, y ocupa porosidad intergranular (Figs. 6 y 8E). Este cemento presenta disposición isópaca, de 10 a 30 μm de espesor, aunque localmente adopta disposición menisco y gravitacional. El «rim» está constituido por una generación de cristales que se disponen con el eje *c* perpendicular a los granos. Los cristales tienen morfología «bladed» y miden de 10 a 30 μm de largo y de 4 a 10 μm de ancho en la base (Fig. 8F). La terminación de los cristales es «triangular» con las aristas ligeramente curvadas.

Cementos similares han sido descritos en «beachrocks» como «fringes» (Alexandersson, 1972), «clear bladed-equant crust» (Moore, 1973), «HMC palissade cement» en Kenia (Schroeder, 1979), «fringe cement crystals» (El-Sayed, 1988), «ciment aciculaire» (Bernier & Dalongeville, 1988), «fringes of HMC» (Holail & Rashed, 1992).

El contenido de CO_3Mg del cemento «bladed» de los «beachrocks» estudiados varía desde un 4% a un 19%, con una media del 12%. Moore (1973) cita valores de un 15.7%, Nair (1975) de un 15% en beachrocks de la India, Schroeder (1979) entre un 7 y 17%, y Strasser *et al.*, (1989) entre 7 y 10%.

Cemento prismático de aragonito: El cemento prismático de aragonito es muy abundante y ocupa tanto porosidad intergranular como porosidad intra-granular (Figs. 7 y 9A). El cemento prismático de aragonito, conjuntamente con el cemento fibroso de aragonito, conforma la segunda etapa de cementación de los «beachrocks» estudiados, y se desarrolla preferentemente en los horizontes A y B, que son los más antiguos.

Este cemento presenta disposición isópaca y localmente pseudobotroidal (Fig. 9B). Los cristales son de morfología prismática con maclas en secciones hexagonales, y miden de 10 a 30 μm de largo por 2 a 8 μm de ancho (Fig. 9C). Cristales morfológicamente similares han sido descritos como cristales con terminaciones «lath-like shapes» (Strasser *et al.*, 1989).

Cemento fibroso de aragonito: El cemento fibroso de aragonito está muy desarrollado, y ocupa porosidad intra e intergranular (Figs. 7, 9D, 9E y 9F). En general, este cemento precipita primero en la porosidad intra-granular

(básicamente en los fragmentos de corales, pero también en las cavidades de los gasterópodos).

Este cemento presenta disposición isópaca (Fig. 9E) y localmente pseudobotroidal (Fig. 9D), y está constituido por cristales aciculares de 20 a 80 μm de largo. El «rim» del cemento fibroso de aragonito está formado, a menudo, por dos generaciones. La primera generación, poco abundante, y que se dispone después del cemento micrítico de HMC, tiene un espesor máximo de 20 μm , y está constituido por cristales básicamente aciculares de unas 10 μm de largo. La segunda generación de cemento fibroso, puede constituir un «rim» de 20 a 40 μm , pero puede llegar hasta las 80 micras de espesor, y localmente presenta morfologías pseudobotroidales. Esta segunda generación está formada por cristales aciculares (Fig. 9D).

Cementos similares han sido reconocidos en «beachrocks» de Dry Tortugas, Florida (Ginsburg, 1953), del Golfo Pérsico (Taylor & Illing, 1969, 1971), de la isla Gran Cayman (Moore, 1971, 1973), de la India (Nair, 1975), de Mozambique (Siesser, 1974), de la isla de San Salvador, Bahamas (Beier, 1985), de Isla de Moorea, Polinesia francesa (Bernier *et al.*, 1990).

GEOQUÍMICA DE LOS CEMENTOS

El estudio geoquímico de los distintos tipos de cementos de los «beachrocks» se ha realizado mediante la Microsonda. Se han realizado un total de 122 puntos de análisis en los distintos tipos de cementos y en el sedimento interno. En cada punto se han analizado los elementos Ca, Na, Mg, Sr, Mn y Fe. Los contenidos de Fe y Mn, en todos los puntos analizados, están por debajo de los límites de detección de la Microsonda.

Cemento micrítico de HMC (17 puntos analizados): En este cemento, los contenidos de estroncio varían desde 1.000 a 12.000 ppm, pero la mayoría de resultados están comprendidos entre 1.000 y 4.500 ppm. Los valores de sodio varían desde 590 a 3.000 ppm, pero el valor medio es de 1.000 ppm. Moore (1973) proporciona valores de estroncio comprendidos entre 1182 y 2736 ppm, y Strasser *et al.*, (1989) citan valores de estroncio comprendidos entre 970 y 2230 ppm. Ambos valores son relativamente similares a los encontrados en la isla de la Reunión.

Cemento peletoidal de HMC (3 puntos analizados): Los valores de estroncio de este tipo de cemento varían de 1.600 a 2.100 ppm, y los del sodio entre 448 y 4.000 ppm.

Cemento bladed de HMC (21 puntos analizados): Los valores del estroncio de este cemento oscilan entre 700 y 13.000 ppm, pero la media es de 2.700 ppm, y los valores del sodio varían entre 1.000 y 2.000 ppm, siendo la media de 1.500 ppm.

Cemento prismático y cemento fibroso de aragonito (50 puntos analiza-

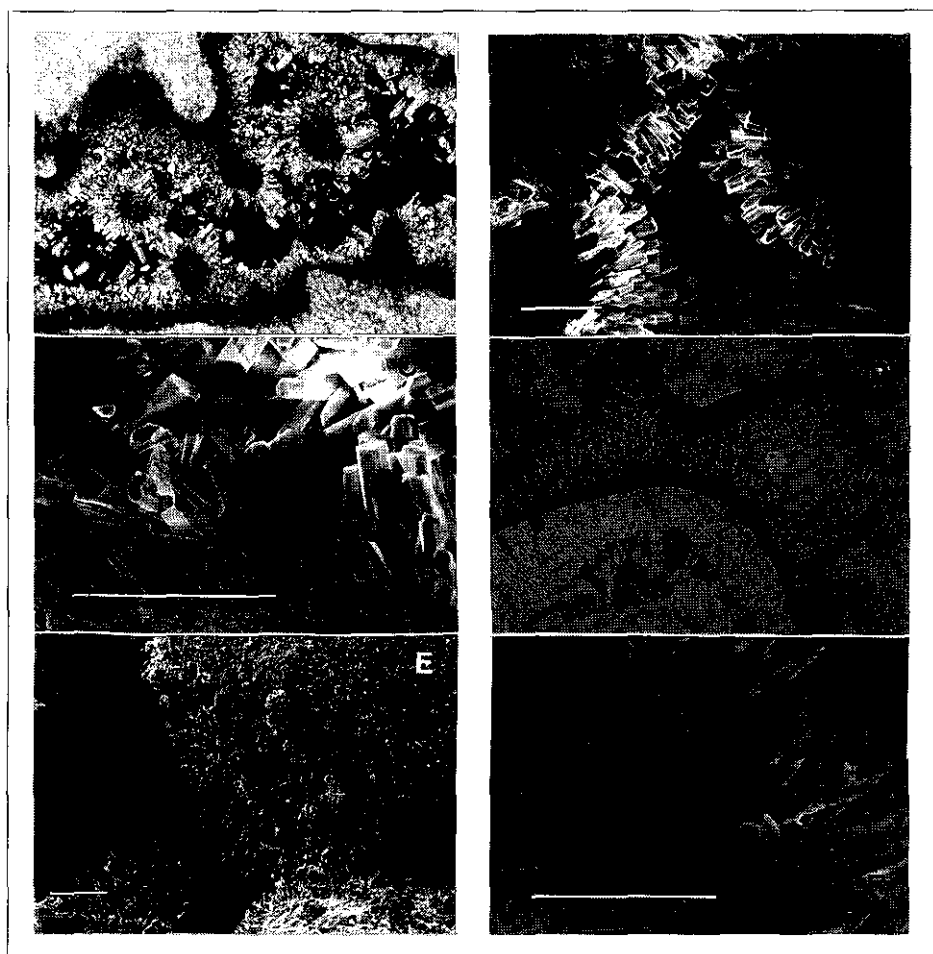


Fig. 9- A) Cemento prismático de aragonito ocupando porosidad intergranular. (muestra BRP-4). B) Disposición pseudobotroidal del cemento prismático de aragonito. SEM. Barra = 50 μm (muestra BRP-2). C) Detalle de los cristales prismáticos. SEM. Barra = 50 μm (muestra BRP-2). D) Cemento fibroso de aragonito ocupando porosidad intergranular. Primera generación de cemento constituida por el cemento micrítico de HMC. SEM. Barra = 50 μm (muestra BRP-2). E) Cemento fibroso de aragonito ocupando porosidad intergranular y cemento pelotoidal de HMC. SEM. Barra = 100 μm (muestra BRP-3). F) Cristales fibrosos de aragonito que coexisten con cristales prismáticos de aragonito con sección hexagonal. SEM. Barra = 25 μm (muestra BRR-4).

Fig. 9- A) Prismatic aragonitic cement filling intergranular porosity (sample BRP-4). B) Prismatic aragonitic cement with pseudobothroidal disposition. SEM. Bar = 50 μm (sample BRP-2). C) Prismatic crystals detail. SEM. Bar = 50 μm (sample BRP-2). D) Fibrous aragonitic cement filling intergranular porosity. The first phase of cementation phase is made up of HMC micritic cement. SEM. Bar = 50 μm (sample BRP-2). E) Fibrous aragonitic cement filling intergranular porosity and HMC pelotoidal cement. SEM. Bar = 100 μm (sample BRP-3). F) Fibrous and prismatic aragonitic crystals. SEM. Bar = 25 μm (sample BRR-4).

dos): Los valores del estroncio varían entre 6.400 y 16.000 ppm, con una media de 10.000 ppm (que equivale a un aragonito con un 1% de CO_3Sr). El contenido de sodio oscila entre 257 y 3.500 ppm, con una media de 3.000 ppm. En la mayoría de los puntos analizados en los cementos aragoníticos el contenido de hierro está por debajo del límite de detección de este elemento en la Microsonda. Los valores de estroncio en cementos fibrosos de aragonito encontrados por Moore (1973) oscilan entre 7.452 y 9.249 ppm y los aportados por Strasser *et al.*, (1989) varían entre 6.830 y 13.000 ppm. Ambos valores son muy similares a los de la isla de La Reunión.

Sedimento interno (31 puntos analizados): El contenido de estroncio en el sedimento interno varía de 4.600 a 14.000 ppm, con una media de 9.000 ppm, y el contenido de sodio oscila entre 448 y 3.000 ppm, con una media de 1.200 ppm.

En síntesis, los cementos de HMC presentan valores valores relativamente bajos de estroncio y sodio, mientras que los cementos de aragonito y el sedimento interno presentan valores muy altos en estroncio y relativamente altos en sodio.

DISCUSIÓN: ORIGEN DE LOS «BEACHROCKS»

La primera etapa de cementación de los «beachrocks» estudiados está constituida por el cemento micrítico de HMC, en el cual juegan un papel importante la actividad de microorganismos e interpretados como cianobacterias. Debido a la presencia de estos microorganismos, la génesis de este cemento implica que se ha realizado en condiciones de luz, y por lo tanto en la parte alta del perfil del «beachrock». La relación entre cemento micrítico de HMC y microorganismos en «beachrocks» ha sido puesto de relieve por numerosos autores (Moore, 1973; Bernier & Dalongeville, 1988; Amieux *et al.*, 1989; Bernier *et al.*, 1990; Bernier & Dalongeville, 1993). Asimismo, esta primera etapa de cementación produciría la estabilización de los granos mediante la acción cementante y «binding» de los microfilamentos de las cianobacterias, a pesar de la alta energía del medio (Bernier & Dalongeville, 1988). La presencia de la disposición irregular, así como la disposición tipo menisco del cemento micrítico, sugieren que este cemento se ha originado preferentemente en la parte alta de la zona intermareal. La formación del cemento micrítico es un proceso muy rápido. Este proceso es relativamente similar al descrito en la formación de las denominadas envueltas micríticas constructivas originadas en medio meteórico-edáfico (Calvet, 1982). La mineralogía del cemento micrítico es de HMC, con un contenido de CO_3Mg que varía desde un 3 a un 17 % y con valores relativamente altos del contenido de sodio (entre 448 y 3.000 ppm), que sugiere que este cemento se originó a partir de aguas marinas.

La segunda etapa de cementación, constituida básicamente por cementos fibrosos y/o prismáticos de aragonito, y localmente por cemento «bladed» de HMC, se generaría en condiciones de una cierta estabilización del sedimento, ya que estos cementos, y a pesar de que su desarrollo puede ser relativamente rápido, necesitan un cierto tiempo para crecer. Asimismo, la disposición «rim» de estos cementos, implica que el sistema poroso este totalmente ocupado por agua, y por lo tanto los cementos precipitan en un sistema hidrológico freático. La formación de estos cementos requiere un importante bombeo de agua que percole a través de los granos. Para la precipitación de los cementos en disposición «rim» es necesario que el sedimento esté estabilizado, y que los granos no se muevan, lo cual fue logrado por el cemento micrítico de la primera etapa de cementación. Localmente, estos cementos presentan disposiciones tipo gravitacional, atribuibles a bajadas excepcionales del nivel de la marea, implicando que parte del «beachrock» quedase en un régimen hidrológico vadoso.

Los cementos de la segunda etapa de cementación presentan mayoritariamente una mineralogía aragonítica, y en menor proporción de HMC. Los cementos aragoníticos (prismáticos y fibrosos) presentan valores muy altos del contenido de estroncio (de 6.400 a 16.000 ppm) y altos de sodio (de 257 a 3.500 ppm), lo que permite deducir que este cemento ha precipitado a partir de aguas marinas. El cemento «bladed» de HMC, con valores de CO_3Mg que oscilan entre un 8 % a un 12 %, y valores relativamente altos de sodio (de 460 a 1.291 ppm), permiten deducir también que este cemento ha precipitado a partir de aguas marinas.

Las diferencias del tipo de cemento entre las dos etapas de cementación implica deducir un cambio de las condiciones microambientales del «beachrock». La primera etapa se genera en condiciones fóticas y en la zona supramareal y/o la parte alta de la zona intermareal. La formación de los cementos de la segunda etapa requiere explicar que el agua percola fácilmente a través del «beachrock» en un régimen hidrológico freático. Por lo tanto el paso de la etapa primera a la segunda implica una cierta subsidencia del «beachrock» (Bernier & Dalongeville, 1988). Kindler & Bain (1993) citan velocidades de subsidencia de beachrocks en Bahamas del orden de 1.5 cm/10 años. Para Bernier & Dalongeville (1993) el cambio de condiciones entre las dos etapas de cementación de los «beachrocks», especialmente las de carácter hidrológico, podrían ser el resultado de variaciones del nivel del mar.

CONCLUSIONES

1. Los «beachrocks» de la Isla de la Reunión se localizan en las zonas internas de las plataformas arrecifales, y se desarrollan preferentemente en las playas de arenas carbonatadas.

2. Los «beachrocks» estudiados, de algunas decenas de metros de ancho, están constituidos por cuatro horizontes de 10-15 cm de potencia, que buzcan de 10 a 15° hacia el mar.

3. Los horizontes más antiguos (horizontes A y B) están más cementados que los horizontes más modernos (C y D), y por lo tanto la porosidad de los «beachrocks» disminuye desde el horizonte más moderno al más antiguo.

4. La importancia de la cementación también está controlada por la composición petrográfica de los distintos horizontes de los «beachrocks». Las áreas con un contenido medio de litoclastos volcánicos presentan una mayor cementación.

5. El proceso de cementación presenta tres etapas. El cemento micrítico de HMC constituye la primera etapa, en la que los microorganismos juegan un papel muy importante, y que se desarrolla en un medio marino vadoso. Los cementos aragoníticos y el cemento «bladed» de HMC forman la segunda etapa de cementación, que se originó en un medio marino freático. El cemento pelotoidal constituye la última etapa de cementación.

6. El cemento micrítico de HMC se desarrolla por igual en todos los horizontes del «beachrock». Los cementos aragoníticos se desarrollan preferencialmente en los horizontes más antiguos (A y B), mientras que el cemento «bladed» de HMC se localiza preferentemente en los horizontes más modernos (C y D).

7. Las causas de la distribución de estos cementos son: la i) antigüedad, y ii) los cambios de climáticos. Los horizontes más antiguos, que también son los situados en la parte inferior de los «beachrocks», presentan un gran desarrollo de cementos de aragonito, sugiriendo que han tenido más tiempo para cementarse y que estaban situados en el medio freático. Los horizontes más modernos, y situados en la parte superior del «beachrock», presentan un desarrollo medio de los cementos de aragonito y del cemento «bladed» de HMC, sugiriendo que han tenido menos tiempo para desarrollarse y que estaban situados en la zona de fluctuación del medio freático. Esta distribución de la cementación pudo verse favorecida por un cambio climático a lo largo de los últimos miles de años, desde un clima muy cálido (en el que precipitarían preferentemente cementos aragoníticos) a un clima menos cálido (precipitando también cementos de HMC, como el cemento «bladed» de HMC).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Beukelil, Dr. B. Robineau, Dr. J. Coudray, Dr. R. Troatec, Dr. J. Serra la posibilidad de realizar los trabajos de campo en la Isla de la Reunión de Y.F.

Agradecemos a Javier García-Veigas y Xavier Llovet la utilización y interpretación de los resultados de la Microsonda (Serveis Generals de la Universitat de Barcelona); a Ramon Fontarnau la utilización del SEM (Serveis Generals de la Universitat de Barcelona); a Josep Agulló (Servei de Dibuix i Cartografia de la Universitat de Barcelona) la delineación de los gráficos; a

Adolf Samper y Vicens Planella (Servei de Lámina Prima) la realización de las láminas delgadas; a Jordi Illa y a Julia Abad. Los autores agradecen los comentarios y opiniones de P. Bernier, Josep Serra-Kiel, Pere Busquets y Ramon Vaquer, y a M. Aurell la revisión del manuscrito.

Este trabajo ha sido subvencionado por el Proyecto CICYT PB91-0801.

BIBLIOGRAFIA

- ALEXANDERSSON, T. (1972): «Mediterranean Beachrock Cementation: Marine Precipitation of Mg-Calcite», en D. J. Stanley (ed.), *The Mediterranean Sea*, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsburg, Pa., 203-223.
- AMIEUX, P., BERNIER, P., DALONGEVILLE, R. y MEDWECKI, V. (1989): «Cathodoluminescence of carbonate-cemented Holocene beachrock from the Togo coastline (West Africa): an approach to early diagenesis», *Sedimentary Geology*, 65, 261-272.
- BEJER, J. A. (1985): «Diagenesis of Quaternary Bahamian Beachrock: Petrographic and Isotopic Evidence», *Jour. Sed. Petrol.*, 55, 755-761.
- BERNIER, P. y DALONGEVILLE, R. (1988): «Incidence de l'activité biologique sur la cimentation des sédiments littoraux actuels. L'exemple des Iles de Délos et de Rhénée (Cyclades, Grèce)», *C. R. Acad. Sci. Paris*, 307, 1901-1907.
- (1993): «Approches méthodologiques complémentaires des variations récentes du niveau marin: géomorphologie et cimentation littorale», *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, 53, 151-157.
- BONVALLOT, Y. y PRIEUR, A. (1990): «Le beach-rock de Temae (Ile de Moorea - Polynésie française). Signification géomorphologique et processus diagénétique», *Z. Geomorph. N.F.*, 34, 435-450.
- BRICKER, O. P. (1971): «Introduction: Beachrock and intertidal cement», en O. P. Bricker (ed.), *Carbonate Cements*, The Johns Hopkins Press, Baltimore y Londres, 1-3.
- CALVET, F. (1982): «Constructive micrite envelope developed in vadose continental environment in pleistocene eolianites of Mallorca (Spain)», *Acta Geológica Hispánica*, 17, 169-178.
- DAVAUD, E. y STRASSER, A. (1984): «Progradation, cimentation, érosion, évolution sédimentaire et diagénétique récente d'un littoral carbonaté (Bimini, Bahamas)», *Eclogae geol. Helv.*, 77, 449-468.
- EL-SAYED, M. KH., (1988): «Beachrock cementation in Alexandria. Egypt», *Marine Geology*, 80, 29-35.
- FRIEDMAN, G. M. y GAVISH, E. (1971): «Mediterranean and Red Sea (Gulf of Aqaba) Beachrocks», en O. P. Bricker (ed.), *Carbonate Cements*, The Johns Hopkins Press, Baltimore y Londres, 13-16.
- GABRIE, C. (1982): *Sédimentologie de quelques récifs coralliens frangeants de la Mer Rouge et de l'Océan Indien Occidental*, Marseille, Univ. d'Aix-Marseille, Tesis Doctoral.
- GINSBURG, R. N. (1953): «Beachrock in South Florida», *Jour. Sed. Petrol.*, 23, 85-92.
- HOLAIL, H. y RASHIED, M. (1992): «Stable isotopic composition of carbonate-cemented recent beachrock along the Mediterranean and the Red Sea coasts of Egypt», *Marine Geology*, 106, 141-148.

- KINDLER, P. y BAIN, R. J. (1993): «Submerged Upper Holocene beachrock on San Salvador Island, Bahamas: implications for recent sea - level history», *Geol. Rundsch.*, 82, 241-247.
- MAGARITZ, M., GAVISH, E., BACKLER, N. y KAFRI, U. (1979): «Carbon and oxygen isotope composition - indicators of cementation environment in Recent, Holocene, and Pleistocene sediments along the Coast of Israel», *Jour. Sed. Petrol.*, 49, 401-412.
- MEYERS, J. H. (1987): «Marine Vadose Beachrock Cementation by Cryptocrystalline Magnesian Calcite - Maui, Hawaii», *Jour. Sed. Petrol.*, 57, 558-570.
- MONDON, J. M. (1976): *Contribution a la géomorphologie et sédimentologie des récifs coralliens de l'île Maurice (Archipel des Mascareignes, Océan Indien)*, Univ. de Provence UER des Scienc. Nat. Univ. d' Aix-Marseille IT. UER des Scienc. de la Mer et de l' environnement.
- MONTAGGIONI, L. F. (1978): *Recherches géologiques sur les complexes récifaux de l' Archipel des Mascareignes (Océan Indien Occ)*, Marseille, Univ. d'Aix-Marseille, Tesis Doctoral.
- MOORE, C. H. (1971): «Beachrock cements, Grand Cayman Island B. W. J.», en O. P. Bricker (ed.), *Carbonate Cements*, The Johns Hopkins Press, Baltimore y Londres, 9-12.
- (1973): «Intertidal carbonate cementation: Grand Cayman, West Indies», *Jour. Sed. Petrol.*, 43, 591-602.
- (1989): *Carbonate Diagenesis and Porosity*, Developments in Sedimentology 46, Elsevier, Amsterdam, 338 pp.
- NAIR, K. M. (1975): «First generation cement in beach rocks along the East coast of South India», *IX International Congres of Sedimentology, Nice*, thème 7, 149-158.
- SCHROEDER, J. H. (1979): «Carbonate diagenesis in Quaternary beachrock of Uyombo, Kenya: sequences of processes and coexistence of heterogenic products», *Geol. Rundsch.*, 68, 894-919.
- SIESSER, W. G. (1974): «Relict and Recent beachrock from Southern Africa», *Geol. Soc. Am. Bull.*, 85, 1849-1854.
- STRASSER, A., DAVAUD, E. y JEDOUI, Y. (1989): «Carbonate cements in Holocene beachrock: example from Bahiret el Biban, southeastern Tunisia», *Sedimentary Geology*, 62, 89-100.
- TAYLOR, J. C. M. e ILLING, L. V. (1969): «Holocene intertidal calcium carbonate cementation, Qatar, Persian Gulf», *Sedimentology*, 12, 69-107.
- (1971): «Variation in recent beachrock cements, Qatar, Persian Gulf», en O. P. Bricker (ed.), *Carbonate Cements*, The Johns Hopkins University, Baltimore y Londres, 32-35.
- TIETZ, G. y MÜLLER, G. (1971): «High-magnesian calcite and aegonite cementation in recent beachrocks, Fuerteventura, Canary Islands, Spain», en O. P. Bricker (ed.), *Carbonate Cements*, The Johns Hopkins University, Baltimore y Londres, 4-8.

Manuscrito recibido: 29 de junio 1995

Manuscrito aceptado: 10 marzo 1996