

Evolución costera de un depósito de barrera transgresivo a terraza marina en Isla Coronados, Baja California Sur, México

Coastal evolution from transgressive barrier deposit to marine terrace on Isla Coronados, Baja California Sur, Mexico

J Ledesma-Vázquez^{1*}, ME Johnson², DH Backus², C Mirabal-Davila¹

¹ Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Apartado postal 453, Ensenada CP 22800, Baja California, México. * E-mail: ledesma@uabc.mx

² Department of Geosciences, Williams College, Williamstown, MA 01267, USA.

Resumen

Esta colaboración describe y discute la evolución de los depósitos costeros del Pleistoceno en Islas Coronados. La parte sur del cono volcánico de 700,000 a 160,000 años en Isla Coronados (Baja California Sur, México) conforma una plataforma que conecta con andesitas del Mioceno del Grupo Comondú. Carbonatos del Pleistoceno tardío se acumularon sobre y alrededor de la topografía preexistente, tal y como lo muestran las secciones estratigráficas ubicadas estratégicamente con respecto a los pequeños islotes andesíticos que formaron una barrera fija a lo largo de la margen exterior de una gran laguna al pie del volcán. Facies características muestran la evolución desde el basamento de la isla hasta el relleno de la laguna hace ~121,000 años asociados con el estadio isotópico marino 5e. Hacia el mar, afuera de la barrera, un conglomerado basal con guijas y cantos rodados de andesita cambia gradualmente a calizas con una diversa fauna de conchas y rodolitos completos en una matriz de arena de rodolitos. Una caliza similar se presenta al lado lagunar de la barrera, pero presenta *Pina corteziana*, un bivalvo de ambientes protegidos. Otras facies están representada por conjuntos del coral *Porites panamensis* en diferentes etapas de crecimiento e integración. Biocalcarenita resultante de la destrucción de rodolitos se presenta como la facies más extensa por cuanto a área y espesor. Los estratos con echados de 20° de la cima de los islotes hacia el volcán se interpretan como depósitos de inundación típicos de sistemas de barrera. Un conglomerado de guijas es interpretado como un pavimento, marca una amplia discordancia en la cima de la biocalcarenita. Esta superficie fue el zócalo para una biota de línea de costa rocosa de corta duración en transición a la densa colonización ramificada de *P. panamensis*. La secuencia culmina con un delgado depósito de terraza marina que cubrió las capas de coral a los 12 m de altura.

Palabras clave: sistemas de isla en barrera, Pleistoceno, transgresivo, abanico de inundación.

Abstract

This contribution describes and discusses the development of the Isla Coronados Pleistocene coastal deposits. The south side of the 700,000–160,000 year-old volcanic cone on Isla Coronados (Baja California Sur, Mexico) forms a shelf that converges on older Miocene andesite from the Comondú Group. Later Pleistocene carbonates accumulated on and around the antecedent topography as related by stratigraphic sections strategically located with respect to small andesite islets that formed a fixed barrier along the outer margin of a large lagoon at the foot of the volcano. Distinct facies show the progressive foundering on the island and the infilling of the lagoon about 121,000 years ago during events correlated with marine isotope substage 5e. On the seaward side of the barrier, a basal conglomerate of andesite boulders and cobbles grades into limestone with a diverse shelly fauna and whole rhodoliths in a matrix of rhodolith sand. Similar limestone is found on the lagoon side of the barrier, but features the bivalve *Pina corteziana* from a sheltered environment. Other facies are represented by populations of the coral *Porites panamensis* at different levels of growth and integration. Biocalcarenite derived from the debris of crushed rhodoliths occurs as the most extensive facies in terms of area and thickness. Sheeted layers that dip 20° off the top of the islets toward the volcano are regarded as washover deposits typical of barrier systems. A cobble pavement, interpreted as a ravinement surface, marks a widespread unconformity at the top of the biocalcarenite. This surface was the foundation for a short-lived rocky-shore biota in transition to dense growth of branching *P. panamensis*. The sequence ends with a thin marine terrace deposit that buried the coral thickets at the present 12-m level.

Key words: barrier-island system, Pleistocene, transgressive, overwash fan.

Introducción

El origen y la estratigrafía de las islas de barrera ha sido tema de investigación por muchos años. No se ha establecido ni una sola teoría para interpretar su origen. De acuerdo con

Introduction

The origin and stratigraphy of barrier islands has been a subject of investigation for many years. Not a single theory regarding their origin has been agreed upon. According to

Fisher (1982), la deriva a lo largo de la costa produce grandes lengüetas de tierra que se separan de ésta para formar una isla de barrera. Hoyt (1967) propuso que el origen de las islas de barrera se debe a un incremento del nivel del mar que causó la inundación de dunas y ondulaciones paralelas a la costa, usando ejemplos del Golfo de México.

Muchas playas no alcanzan perfiles de equilibrio debido a fluctuaciones eustáticas del nivel del mar, falta de un adecuado abastecimiento de sedimento o a la influencia variable del marco geológico sobre el cual se sobrepone la playa (Riggs *et al.* 1995). De acuerdo con Riggs *et al.* (1995), los promontorios dominados por la cara de la playa son aquellos que tienen características morfológicas que resaltan sobre la superficie de erosión activa y están predominantemente compuestos por unidades semi-consolidadas a consolidadas más antiguas. Se reconocen dos subclases, la primera es de promontorios de cara de playa subaéreos que se caracterizan por un acantilado y una plataforma que están activamente siendo seccionados en unidades más antiguas con una playa sobrepuesta; la segunda es de promontorios de cara de playa submarinos que son rasgos morfológicos inundados que han sido incorporados a la nueva cara de playa y en los cuales el sistema estuarino de barrera está superpuesto. Los sedimentos más viejos se reducen en la cara de playa erosionada y comúnmente ocurren dentro de la plataforma como altos batimétricos que protegen la nueva cara de playa y modifican las olas entrantes.

A lo largo de la línea de costa emergente de la península de Baja California y de las islas mar adentro, los rasgos geográficos comunes son terrazas Cuaternarias. Las terrazas marinas y depósitos de terraza, particularmente las atribuidas al nivel del mar más alto del interglacial en el estadio isotópico marino (MIS) 5e, son muy extensas a lo largo de la península y han sido importantes para descifrar la neotectónica de la península (Sirkin *et al.* 1990, Libbey y Johnson 1997, Johnson y Ledesma-Vázquez 1999, Mayer y Vincent 1999, Ledesma-Vázquez y Johnson 2001, DeDiego-Forbis *et al.* 2004).

Este escrito sintetiza el carácter sedimentológico y estratigráfico de las unidades sedimentarias del Pleistoceno en el sur de Isla Coronados (Baja California Sur, México), en donde los depósitos costeros pueden ser estudiados mejor que en muchas otras cuencas gracias a la visión tridimensional debida a la buena exposición de las paredes de la cuenca que muestran diferentes orientaciones, considerando también su excelente preservación. La finalidad de este trabajo fue describir y discutir el desarrollo de los depósitos costeros del Pleistoceno en Isla Coronados en función de los cambios en el nivel del mar.

Antecedentes

Tal como lo describieron e interpretaron detalladamente Backus *et al.* (2005), en Isla Coronados existen varias terrazas marinas. La parte alta de la sección en el extremo sur de la cuenca central, llamada Cañada Coronados en Johnson *et al.* (2007), está situada a 12 m. La altura a la que se encuentra la terraza marina 121-Ka, asociada con el MIS 5e, es típicamente

Fisher (1982), longshore drift produced long spits that were breached to form a barrier island. Hoyt (1967) proposed that barrier islands originated through rising sea level drowning shore parallel features such as beach ridges and dunes, using examples from the Gulf of Mexico.

Many beaches do not achieve profiles of equilibrium due to eustatic sea-level fluctuation, lack of adequate sediment supplies, or the variable influence of the geologic framework upon which the beach is superimposed (Riggs *et al.* 1995). According to Riggs *et al.* (1995), headland dominated shorefaces are those with morphological features that rise above the active ravinement surface and are dominantly composed of semi-indurated to indurated, older units. Two subclasses are recognized. Firstly, subaerial headland shorefaces are characterized by a wave-cut cliff and platform that are actively being incised into older units with a perched beach. Secondly, submarine headland shorefaces are submerged morphological features that have been incorporated into the modern shoreface and upon which the barrier-estuarine system is perched. Older sediments crop out on the eroding shoreface and commonly occur on the inner shelf as bathymetric highs seaward of the modern shoreface and thus modify incoming waves.

Along the emergent coastline of the Baja California peninsula and immediate offshore islands, Quaternary terraces are common geomorphic features. Marine terraces and terrace deposits, particularly those attributed to the last interglacial highstand sea level at marine isotope stage (MIS) 5e, are widespread along the peninsula and have been important in deciphering the neotectonics of the peninsula (Sirkin *et al.* 1990, Libbey and Johnson 1997, Johnson and Ledesma-Vázquez 1999, Mayer and Vincent 1999, Ledesma-Vázquez and Johnson 2001, DeDiego-Forbis *et al.* 2004).

This paper summarizes the sedimentological and stratigraphic character of Pleistocene sedimentary units on the southern side of Isla Coronados (Baja California Sur, Mexico). Coastal deposits can be better studied here than in many other basins because of the three-dimensional insight due to good exposure along variously oriented basin walls, considering also their excellent preservation. The purpose of this paper was to describe and discuss the development of the Isla Coronados Pleistocene coastal deposits as a function of sea-level changes.

Previous work

Several marine terraces are present on Isla Coronados, as was recently described and interpreted in detail by Backus *et al.* (2005). The top of the section at the southern end of the central basin, named Cañada Coronados in Johnson *et al.* (2007), sits at about the 12-m mark. The height at which the 121-ka marine terrace associated with MIS 5e is typically found in many parts of the Gulf of California (Ashby and Minch 1987, Ortlieb 1991, Ledesma-Vázquez and Johnson 2001). A second marine terrace associated with a rocky-shore deposit is exposed at the top of the basement rocks on the southeast corner of the island, and sits about 17 m above sea

encontrada en muchas partes del Golfo de California (Ashby y Minch 1987, Ortlieb 1991, Ledesma-Vázquez y Johnson 2001). Una segunda terraza marina asociada a depósitos de costa rocosa está expuesta en la parte alta del basamento rocoso en extremo sureste de la isla y aproximadamente a 17 m sobre el nivel del mar, en la base de la superficie horizontal que se prolonga al noroeste, hacia el punto alto local en la región sureste de la isla. Una tercera terraza marina se localiza 24 m sobre el nivel del mar y una cuarta 40 m sobre el nivel del mar.

Los procesos finales registrados están representados por la sucesión de terrazas halladas en Isla Coronados e indican dos periodos de levantamiento durante el Pleistoceno tardío en Isla Coronados (Backus *et al.* 2005). Aproximadamente hace 320,000 años (MIS 9), pero quizá hace tanto como 400,000 (MIS 11) años que comenzó el levantamiento de Isla Coronados. La tasa media de levantamiento era probablemente de 0.07 a 0.1 m ka⁻¹. Hace menos de 160,000 años la tasa media de levantamiento incrementó a ~0.3 m ka⁻¹, hasta hace ~120,000 años (MIS 5e). Durante los últimos 120,000 años la tasa de levantamiento de la isla disminuyó a ~0.05 m ka⁻¹.

Los depósitos marinos típicos del Pleistoceno en Baja California e islas cercanas son terrazas marinas, bajos o pequeñas plataformas labradas en la roca cubiertas por una capa delgada de arena y grava con conchas de moluscos quebradas, fragmentos de coral y rodolitos y otros restos de invertebrados. En muy pocos lugares de la península de Baja California las secuencias marinas, incluyendo terrazas marinas, fueron depositadas en ensenadas someras y protegidas donde los ambientes depositacionales cercanos a la costa y sus biotas fósiles asociadas estuvieran bien preservados. Esos depósitos poco usuales son, en parte, producto del nivel eustático más alto del mar durante el último interglacial (McCulloch y Esat 2000). Bahía San Antonio, cerca de Bahía Concepción, es un lugar semejante en donde se puede identificar una línea de costa rocosa del Pleistoceno tardío que incluye una costa exterior expuesta, una costa interior protegida y una ensenada con parches de corales *Porites*, así como un depósito de terraza marina en su cima con evidencia de una zonación vertical de la biota costera (Johnson y Ledesma-Vázquez, 1999). Otro afloramiento de un depósito marino del Pleistoceno tardío está ubicado en una ensenada en el margen occidental de la Bahía de La Paz, en Bahía Coyote (DeDiego-Forbis *et al.* 2004). Allí, una sucesión marina transgresiva-regresiva empieza con un conglomerado de guijas con conchas de ostión, subyace a arenas bioclásticas pobremente estratificadas, ricas en conchas de moluscos y fragmentos de coral, capas masivas de *Porites* en posición de crecimiento y arenas de coral-rodolito y marga. Las conchas de ostiones y fragmentos de conchas, que representan buena diversidad de especies, están omnipresentes a lo largo de la secuencia del Pleistoceno. Las especies halladas en la localidad sugieren un ambiente lagunar con una profundidad de 10–20 m, separado del mar abierto por una isla de barrera. Una localidad muy interesante se localiza en la Isla Espíritu Santo al este de La Paz, donde Halfar *et al.* (2001) han descrito una bioherma de rodolitos, de 16 m de espesor.

level at the base of a planar surface that ramps up northwest towards the local high point in the southeast region of the island. A third terrace is located at 24 m above sea level, and a fourth at about 40 m above sea level.

The final processes recorded are represented by the sequence of terraces found on Isla Coronados, indicating that two periods of Late Pleistocene uplift occurred on Isla Coronados (Backus *et al.* 2005). Approximately 320,000 years ago (MIS 9), but perhaps as early as 400,000 years ago (MIS 11), Isla Coronados began to uplift. The average rate of uplift was likely in the range of 0.07 to 0.1 m ka⁻¹. Less than 160,000 years ago the average rate of uplift increased to about 0.3 m ka⁻¹ until ~120,000 years ago (MIS 5e). Over the last 120,000 years the uplift rate for the island slowed to about 0.05 m ka⁻¹.

Typical Pleistocene marine deposits in Baja California and immediate offshore islands are marine terraces, wave-cut benches or small platforms cut into the bedrock, covered by a thin layer of sand and gravel with broken mollusk shells, coral and rhodolith fragments and other invertebrate remains. At very few sites on the Baja California peninsula, the marine sequences, including marine terraces, were deposited in shallow, protected embayments, where the original near-shore depositional environments and associated fossil biotas were well preserved. In part, these unusual deposits are due to the higher stand in eustatic sea level during the last interglacial (McCulloch and Esat 2000). One such site is at Bahía San Antonio, near Bahía Concepción, where a Late Pleistocene rocky shoreline can be identified, including an exposed outer shore, sheltered inner shore and protected cove with patches of *Porites* corals, as well as a thin marine terrace deposit on the top, complete with evidence of vertical zonation in the shoreline biotas (Johnson and Ledesma-Vázquez 1999). Another occurrence of emergent Late Pleistocene marine deposits is located in an embayment on the western margin of Bahía de La Paz, at Bahía Coyote (DeDiego-Forbis *et al.* 2004). Here, a marine transgressive-regressive sequence begins with a cobble conglomerate with oyster shells, overlain by poorly bedded molluscan-rich bioclastic sands and coral rubble, beds of massive *Porites* in growth position and coral-rhodolith sands and marls. Oyster shells and shell fragments representing a number of different species are ubiquitous throughout the Pleistocene sequence. The species found at the locality suggest a lagoon/bay environment 10–20 m deep, separated from the open sea by a barrier island. One very interesting locality is at Isla Espíritu Santo to the east of La Paz, where a 16-m-thick rhodolith bioherm has been described by Halfar *et al.* (2001).

Geographic/geologic setting

The location for this study is the southern portion of Isla Coronados off Baja California Sur (fig. 1), in the Gulf of California, covering an area of more than 7 km². Located 10 km north of the city of Loreto, the island features Miocene volcanic rocks from the Comondú Group forming the basement on

Escenario geológico/geográfico

La zona de estudio consta de un área de más de 7 km² y se encuentra en la parte sur de la Isla Coronados frente a las costas de Baja California Sur, en el Golfo de California (fig. 1). Localizada 10 km al norte de Loreto, la isla se caracteriza por presentar rocas volcánicas del Mioceno del Grupo Comondú en el basamento, sobre el cual se desarrolló el volcán Coronados hace aproximadamente 1.8 Ma y recientemente (Bigioggero *et al.* 1987).

La historia geológica de Isla Coronados muestra varias fases de desarrollo. Las rocas Comondú del Mioceno de la base de la isla son parte de un bloque estructural formado durante la extensión tectónica en el Dominio Central de Baja California del Golfo de California de hace 13 a 3.5 Ma (Karig y Jensky 1972, Stock y Hodges 1989). El régimen transtensional desde hace 3.5 Ma es responsable de la configuración tectónica presente en el Golfo de California (Zanchi 1994, Mayer y Vincent 1999). Algunas de las islas ubicadas en el Golfo de California se separaron de la Península de Baja California o del continente mexicano como consecuencia de la extensión y el deslizamiento lateral derecho durante la evolución del golfo. Bigioggero *et al.* (1987) reportaron datos de fechado geocronológico para una lava de dacita (0.69 ± 0.05 Ma) y un flujo de andesita suprayacente (0.16 ± 0.02 Ma) en Isla Coronados. La secuencia sedimentaria marina del Pleistoceno fue depositada sobre esta unidad.

Antes de iniciar nuestro trabajo de campo se utilizó una imagen ASTER de satélite de la región de Loreto como una herramienta de reconocimiento en la identificación de unidades calcáreas del Plio-Pleistoceno en la isla y la región circundante.

Unidades sedimentarias de carbonato ocupan una prominente cuenca que se ubica al sur del cono volcánico, llamada Cuenca Coronados (fig. 2). También alrededor del perímetro exterior de la cuenca están expuestos carbonatos, particularmente a lo largo del borde suroeste. También existen rocas sedimentarias de origen marino bien expuestas en los canales que penetraron los lados sur, suroeste y occidental de la cuenca. En el borde sur de la región peninsular de la isla que se extiende al suroeste se presentan equivalentes laterales a las unidades de carbonato expuestas a lo largo del borde suroeste de la cuenca central. Una pequeña cuenca localizada en el borde oeste del volcán y aproximadamente 1.5 km al noroeste de la cuenca principal contiene una serie similar de depósitos carbonatados (Backus *et al.* 2005).

La posición y orientación de los depósitos sedimentarios están controladas en parte por el antecedente topográfico producido por el volcán. Fechados radiométricos reportados previamente del flujo de lava más reciente en la isla restringe el la antigüedad del depósito sedimentario a <160,000 años (Bigioggero *et al.* 1987). La parte alta del depósito sedimentario está cubierta por un extenso arrecife de coral *Porites panamensis*. El análisis de U/Th de una muestra de la capa de coral indica una edad de 121 ± 0.6 ka para la parte alta de esta sección (MIS 5e).

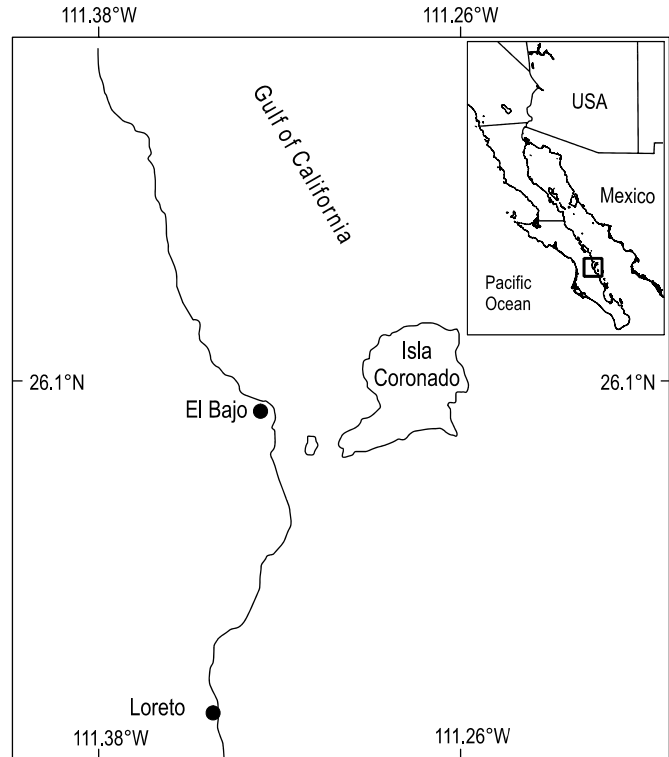


Figura 1. Isla Coronados en el Golfo de California, frente a las costas de Baja California Sur, México.

Figure 1. Isla Coronados off Baja California Sur (Mexico), in the Gulf of California.

which the Coronados volcano developed between 1.8 Ma and very recent times (Bigioggero *et al.* 1987).

The geologic history of Isla Coronados shows several phases of development. The Miocene age Comondú rocks form the base of the island as part of a structural block formed during tectonic extension within the Baja California Central Domain of the Gulf of California from 13 to 3.5 Ma (Karig and Jensky 1972, Stock and Hodges 1989). The transtensional regime since 3.5 Ma is responsible for the present tectonic configuration in the Gulf of California (Zanchi 1994, Mayer and Vincent 1999). Some of the islands within the Gulf of California were separated from the Baja California Peninsula or the Mexican mainland as a consequence of the extension and right lateral slip faulting during evolution of the gulf. Bigioggero *et al.* (1987) reported geochronologic age data for a dacite lava (0.69 ± 0.05 Ma) and an overlying andesite flow (0.16 ± 0.02 Ma) on Isla Coronados. On top of these units, the Pleistocene marine sedimentary sequence was deposited.

An ASTER satellite image of the Loreto region was used as a reconnaissance tool for the identification of Plio-Pleistocene calcareous units on the island and in the surrounding region, prior to our field work.

Carbonate sedimentary units fill a prominent basin, named Coronados Basin, that sits to the south of the volcanic cone (fig. 2). Carbonates are also exposed around the exterior perimeter of the basin particularly along the southwestern

Metodología

Se midieron 12 secciones estratigráficas y sus unidades sucesivas se caracterizaron como facies sedimentarias. Las secciones fueron medidas con un espacio de 40 m a varios cientos de metros entre cada una dependiendo de la complejidad de la distribución de las facies, y con base en el análisis previo de la imagen de satélite (fig. 2). En el lado sur de Isla Coronado, estratos del Pleistoceno claramente sobreyacen al basamento de rocas volcánicas, bien expuestos en los acantilado marino alrededor de la línea de costa, así como tierra adentro hasta el nivel topográfico de 30 m.

Resultados

Las secuencias de carbonato depositadas fuera de la cuenca central se encuentran bien caracterizadas por afloramientos expuestos a lo largo del borde sur de la isla. Al este de la entrada SE a la cuenca principal está expuesta una secuencia marina de carbonatos aproximadamente de 6.5 m de espesor en el acantilado (sección A, fig. 2). La secuencia de carbonatos descansa discordantemente sobre una capa púrpura-roja de rocas volcanoclásticas del Grupo Comondú altamente intemperizada de aproximadamente 1.5 m de espesor, en la cual está registrada la paleolínea de costa y la línea de costa actual. La capa basal de carbonato es una unidad masiva de 4.6 m de espesor, biocalcarenita blanquecina compuesta principalmente de detritos de rodolitos tamaño arena, en una matriz de arena fina carbonatada. Ocasionalmente se encuentran rodolitos enteros, almejas enteras en posición de vida y abundantes fragmentos de tubos de gusanos. La capa superior de la secuencia es conglomerado compuesto de fragmentos volcánicos de medianamente a bien sorteados (8 cm de diámetro, en promedio) soportado por una matriz de 0.35 m de espesor. La matriz está compuesta por fragmentos de rodolitos y algunos rodolitos enteros. Dentro de esta unidad se encontraron colonias de *P. panamensis* (25 cm de alto) en posición de vida, así como ejemplares enteros de moluscos (*Chione*, *Codakia*, *Strombus* y *Turritella*). Esta secuencia se extiende al este donde las unidades bajas están divididas y desplazadas por flujos de lava.

Al suroeste del extremo sudoccidental de la Cuenca coronados se extiende una línea casi continua de depósitos ricos en carbonato expuestos a lo largo del borde sur de la isla. La sección medida cerca de la esquina suroeste de la cuenca central (sección B, fig. 2) da un marco general para esta región de la isla. El basamento rocoso es el mismo grupo de rocas Comondú hallado al este. La pendiente sobre el basamento rocoso volcanoclástico está cubierta a lo largo de 2.8 m y, sobreyaciéndola, la cubre una biocalcarenita granular fina. En los 4.2 m de la sección, la parte baja de la unidad no presenta fósiles, pero presenta abundantes icnofósiles (*Thalassanoides*); en la parte alta son comunes las piezas rotas de conchas de ostión y, encima de éstas, piezas de coral *P. panamensis*. En el equivalente lateral de esta unidad, dentro del canal suroeste de la cuenca principal, se encontraron fósiles de los equinodermos

edge. Sedimentary rocks of marine origin are well exposed in channels that penetrate the central basin from the southern, southwestern and western sides. Lateral equivalents to the carbonate units exposed along the southwestern edge of the central basin also occur along the southern edge of the peninsular region of the island that extends to the southwest. A separate small basin located on the western edge of the volcano and approximately 1.5 km to the northwest of the main basin preserves a similar series of carbonate deposits (Backus *et al.* 2005).

The position and orientation of the sedimentary deposits is controlled, in part, by the antecedent topography produced by the volcano. The previously reported radiometric age for the most recent lava flow erupted on the island constrains the age of the sedimentary deposit to <160,000 years (Bigioggero *et al.* 1987). The top of the sedimentary deposit is capped by an extensive coral thicket of *Porites panamensis*. The U/Th analysis of a sample from the coral bed indicates an age of 121 ± 0.6 ka for the top of this section (MIS 5e).

Methods

Twelve stratigraphic sections were measured and their successive units were arranged as sedimentary facies. The sections were measured with the spacing between them ranging from 40 m to several hundred meters depending on the complexity of the facies distribution, based on the previous analysis of the satellite image (fig. 2). Pleistocene strata on the southern side of Isla Coronados clearly overlap volcanic basement rocks; they are exposed in sea cliffs around the coastline, as well as inland up to the 30-m topographic level.

Results

Carbonate sequences deposited outside the central basin are well characterized by outcrops exposed along the southern edge of the island. East of the southeastern entrance to the central basin, an approximately 6.5-m-thick marine carbonate sequence is exposed in the cliff (section A, fig. 2). The carbonate sequence rests disconformably on an approximately 1.5-m-thick bed of heavily-weathered purplish-red volcanoclastic rocks in the Comondú Group against which both the paleoshoreline and the modern shoreline are carved. The basal carbonate layer is a 4.6-m-thick unit of massive, whitish biocalcarenite composed primarily of sand-sized rhodolith debris in a matrix of fine carbonate sand. There are occasional whole rhodoliths, whole clams in living position and abundant fragments of worm tubes. The uppermost bed in this sequence is a 0.35-m-thick matrix-supported conglomerate made up of medium to well-sorted volcanic fragments (8 cm in diameter, on average). The matrix is composed of rhodolith fragments with some whole rhodoliths. Colonies of *P. panamensis* (25 cm tall) in life position are found scattered within this unit, as well as whole specimens of several mollusks (*Chione*, *Codakia*, *Strombus* and *Turritella*). This sequence extends to the east

Encope grandis inezana y *Encope* n. sp. *B* de Durham (1950), que sugieren que la edad de esta unidad corresponde al Pleistoceno temprano. El contacto más alto de la unidad está en una superficie erosional en la cual se asienta una capa de conglomerado de 0.70 m de espesor, compuesta por una matriz de clastos volcánicos bien redondeados. En la capa de conglomerado son comunes los fragmentos de coral *P. panamensis* y de rodolitos. De 10 a 15 cm de la parte alta de esta capa contienen únicamente fragmentos de rodolitos. Hacia el oeste de la playa, el contacto entre el basamento de rocas Comondu y los carbonatos suprayacentes es inconsistente en altura. A pesar del desplazamiento por fallas en varios lugares y del enterramiento por escombros de la línea de costa actual, este contacto representa una paleocosta. El espesor y la composición de las capas sedimentarias que se asientan sobre la paleocosta son también variables. Esta variación probablemente se relaciona con la proximidad de una determinada localidad a partes elevadas del basamento dentro del área, como afloramientos de rocas ígneas expuestas en el lado norte de la península, los cuales podrían ser fuentes activas de sedimentos durante la depositación.

La interestratificación parcial de capas de carbonato y capas conglomeráticas contra los bloques levantados muestra que ésta fue activa durante la depositación de las unidades sedimentarias adyacentes. El levantamiento por fallas de las unidades sedimentarias a lo largo del borde sur de la isla es del orden de <1 a 10 m en las capas del Pleistoceno temprano y del orden de 1.25 m o menos en la terraza del Pleistoceno tardío y en los depósitos de la costa rocosa.

Como se describió anteriormente, los cambios composicionales registrados dentro de las capas sedimentarias depositadas en la paleocosta son producto de la erosión de las rocas más antiguas del Grupo Comondu, y se observan al suroeste. Esos cambios incluyen la aparición de múltiples capas de clastos volcánicos grandes a muy grandes bien redondeados, capas de calcarenita compuestas casi únicamente de detritos de rodolitos y lentes o bancos de calcirudita compuestos solamente de pedazos de coral *P. panamensis*. Más al suroeste cerca de la punta de la península de la isla, la unidad llega a ser una calcarenita conglomerática con estratificación fina, con granos volcánicos pequeños y bien redondeados con un tamaño de 0.25–6.0 cm. Esta parte de la isla, la cual está parcialmente cubierta por un pequeño campo de dunas, actualmente no está protegida de los fuertes vientos septentrionales de invierno por el cono volcánico o el alto topográfico local en el extremo este de la península (Russell y Johnson 2000). Es probable que estas mismas condiciones ocurrieran en el Pleistoceno temprano considerando, en parte, cambios laterales en composición y estratificación observados al suroeste a lo largo de la península y lejos de la protección de sotavento del cono volcánico.

Un afloramiento de 5.2 m de grosor está expuesto en la entrada de la cuenca (sección C, fig. 2) a una elevación de 5.6 m sobre el nivel del mar. La sección consiste de conglomerado con clastos derivados de las rocas volcánicas. Los clastos están muy bien redondeados pero pobremente clasificados y

where the lower units are disrupted and displaced by coeval lava flows.

Extending southwest from the southwest corner of the Coronados Basin is an almost continuous line of carbonate-rich deposits exposed along the southern edge of the island. A section measured near the southwest corner of the central basin (section B, fig. 2) gives a general framework for this region of the island. Basement rocks here are the same Comondu Group rocks found to the east. The slope above the basement volcanoclastic rocks is covered for 2.8 m and then overlain by fine-grained biocalcarenite. Within the 4.2 m of section, the lower part of the unit lacks fossils, but has abundant ichnofossils (*Thalassanoides*). Up section, pieces of broken oysters are common, while pieces of the coral *P. panamensis* are found in the upper part of this unit. Specimens of the fossil echinoderms *Encope grandis inezana* and *Encope* n. sp. *B* of Durham (1950), found in lateral equivalents to this layer within the southwest channel of the main basin, indicate an Early Pleistocene age for this unit. The upper contact of this unit is an erosional surface on which sits a 0.70-m-thick bed of conglomerate composed of well-rounded, matrix-supported, volcanic clasts. Fragments of the coral *P. panamensis* and rhodoliths are common within the conglomerate layer. The top 10–15 cm of this bed, however, is composed exclusively of rhodolith fragments. Moving west along the beach, the contact between the basement Comondu rocks and the overlying carbonates is variable in height. Although offset in several places by faults and often buried by the rubble of the modern shoreline, this contact represents a paleoshore. The thickness and composition of the sedimentary beds that sit above the paleoshore are also variable. This variation is likely related to the proximity of a particular location to basement highs within the area, such as the outcrops of igneous rocks exposed on the northern side of the peninsula, which would have been active sources of eroding sediments during deposition.

Partial onlap of carbonate and conglomeratic beds against the up-thrown block shows that it was active during deposition of the adjacent sedimentary units. Uplifting by faults of the sedimentary units deposited along the southern edge of the island is of <1 to 10 m for the Lower Pleistocene beds and only of 1.25 m or less for the overlying Upper Pleistocene terrace and rocky-shore deposits.

As described above, compositional changes recorded within the sedimentary beds deposited on the paleoshore are due to erosion of the older Comondu Group rocks, and are shown to the southwest. These changes include the appearance of multiple layers of large to very large, well-rounded, volcanic clasts, calcarenite beds almost exclusively composed of rhodolith debris, and lenses or banks of calcirudite made up solely of pieces of the coral *P. panamensis*. Further to the southwest near the tip of the island's peninsula, this unit becomes a fine-bedded, fine-grained, conglomeratic calcarenite with small, well-rounded, volcanic clasts in the 0.25–6.0-cm size range. This part of the island, which is partially covered by a small dune field, is currently not protected by the volcanic cone or

con un diámetro de 0.2–0.3 m. La base de la unidad no está expuesta. En lo alto de la unidad se repiten capas irregulares de colonias ramificadas de *P. panamensis*. Cada colonia es de 10 a 20 cm de alto y los corales se encuentran asociados a fragmentos rotos de los mismos corales. El espesor total de la capa es de 0.40 m. Las colonias de coral son bajas y escuetas en forma, y se encuentran adheridas a fragmentos de roca volcánica en su base, y las segundas o terceras generaciones están adheridas entre sí. Discordantemente, un fragmento de roca volcánica de 0.5 m de grosor se presenta como un ortoconglomerado bien redondeado, y algunas capas de calcarenita están compuestas casi exclusivamente de detritos de rodolito y de pequeños fragmentos tamaño arena del coral *P. panamensis*.

Dentro de la cuenca del Pleistoceno (sección D, fig. 2) el contacto inferior no es visible en ninguna localidad, pero es sin duda parte de la secuencia volcánica relacionada con el volcán Coronado de la isla. La secuencia comienza cerca de la entrada de la cuenca a 5.6 m sobre el nivel del mar, con arena gruesa compuesta de conchas rotas y, en su menor parte, de fragmentos de coral, así como de fragmentos de roca volcánica con escasos cantos rodados intemperizados y fragmentos de granitoides redondeados. La unidad varía en espesor y extensión; es de 0.9 m de espesor, presenta gradación normal, y los fragmentos de roca volcánica están en su mayoría restringidos a esta capa. Una segunda capa con un grosor de 0.60 m se sobrepone a la unidad basal que contiene muy pocas conchas, con fragmentos de rodolitos de tamaño de arena media como la matriz, pobremente estratificada. En un contacto gradacional, una capa de biocalcarenita de 1 m de espesor, compuesta por fragmentos de rodolitos tamaño arena media, pobremente clasificada y bien estratificada, con abundantes rodolitos tipo fruticosa como ejemplares enteros de 2–3 cm de diámetro. En la parte alta de la sección la biocalcarenita ahora no varía con ejemplares enteros y fragmentos de almejas. Las capas están bien estratificadas con capas individuales de 40 a 60 cm de espesor, y un espesor total de esta unidad de hasta 5.4 m. Entre la biocalcarenita que llena la paleolaguna están presentes capas donde sólo se presentan colonias ramificadas de *P. panamensis*, principalmente alejadas al canal de la entrada. La altura media del coral es de 20 cm en cada colonia y hasta 1 m de espesor en la capa. La amplitud de este tipo de colonias en parche es de 2 a 5 m.

Al noreste de la entrada de la laguna (sección E, fig. 2) la unidad inferior es una biocalcarenita de 1.5 m de espesor compuesta casi exclusivamente de detritos de rodolitos y de algunos rodolitos enteros, así como de pocos ejemplares desarticulados y rotos de *Pina corteziana*. Sobre un contacto pobremente definido, se encuentra una biocalcarenita de 5.6 m de espesor compuesta de restos de rodolitos organizados como una capa individual de 40 a 60 cm de espesor. El metro superior de esta unidad incluye al bivalvo *Codakia distinguenda* en posición de vida. La biocalcarenita exhibe estratificación cruzada con un echado de 20°N.

Hacia al este (sección F, fig. 2) dentro de la cuenca, otra sección presenta en la parte inferior de la unidad una capa de

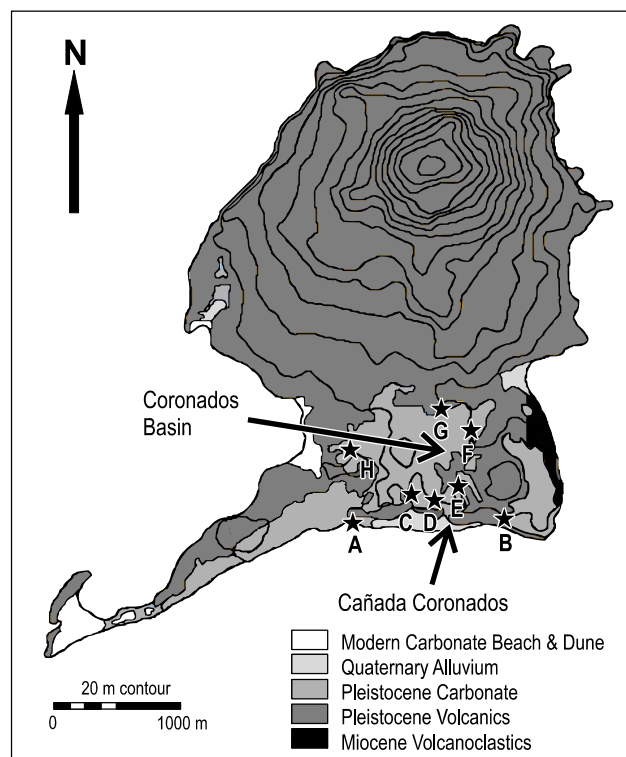


Figura 2. Mapa de Isla Coronados mostrando la posición de las localidades de las secciones medidas dentro de la Cuenca Coronados cerca de la costa sur.

Figure 2. Map of Isla Coronados showing the location of the localities of the sections measured within Coronados Basin near the south coast.

the local topographic highs on the eastern end of the peninsula from the strong northerly winter wind (Russell and Johnson 2000). It is probable that these same conditions occurred in Early Pleistocene times and account, in part, for the lateral changes in composition and bedding observed to the southwest along the peninsula and away from the leeward protection of the volcanic cone.

A 5.2-m-thick outcrop is exposed at the entrance of the basin (section C, fig. 2) at an elevation of 5.6 m above sea level. The section consists of conglomerate with clasts derived from volcanic rocks. The clasts are very well rounded but poorly sorted, and the clast size ranges from 0.2 to 0.3 m in diameter. The base of this unit is not exposed. On top of this unit, however, are recurring irregular beds of branching *P. panamensis* colonies. Each colony is from 10 to 20 cm in height and the corals are associated with broken fragments of the same corals. The total thickness of these beds is 0.40 m. Coral colonies are low and squat in shape. They occur attached to volcanic rock fragments at the base, and then the second or third generations are attached among themselves. Disconformably, a 0.5-m-thick volcanic rock fragment occurs as an orthoconglomerate, well rounded, and some calcarenite beds composed almost exclusively of rhodolith debris and small coarse sand-size pieces of the coral *P. panamensis*.

biocalcarenita de 1.5 m de espesor que está compuesta casi exclusivamente de restos de rodolitos y fragmentos de bivalvos así como de ejemplares completos, capa igual a la de secciones anteriores. Sobre un contacto pobremente definido, una biocalcarenita de 6.5 m de espesor está compuesta de restos de rodolitos organizados en capas individuales de 40 a 60 cm de espesor. Esta unidad presenta estratificación cruzada con un echado de 20°N.

En el lado norte de la cuenca (sección G, fig. 2), la unidad inferior presenta una capa pobremente estratificada de 0.60 m de espesor suprayacente a la unidad basal, con muy pocas conchas, y fragmentos de rodolitos de tamaño arena media como matriz. Sobre un contacto gradacional se encuentra una biocalcarenita compuesta por restos de rodolitos organizados en una capa individual de 40 a 60 cm de espesor. Tal como antes, esta unidad presenta estratificación cruzada con un echado de 20°N; su parte superior también presenta al bivalvo *C. distinguenda* preservado en posición de vida. Todo el espesor de la unidad en esta localidad es de 7.7 m. A 1.5 m sobre la base de esta unidad se encuentran colonias dispersas de *Porites panamensis*. Discordando en la biocalcarenita se encuentra un conglomerado de 0.3 m de espesor compuesto de fragmentos de roca volcánica. Los fragmentos están muy bien redondeados, descansan sobre clastos y tienen en promedio 5 cm de diámetro. La unidad presenta abundantes fósiles, especialmente bivalvos en posición de vida. La unidad superior de esta sección es una capa masiva de coral de 0.6 m de espesor, la cual ha sido descrita detalladamente por Johnson *et al.* (2007).

Cerca de la esquina suroeste de la isla (sección H, fig. 2), también se pueden observar rocas carbonatadas de origen marino, en canales que penetran la cuenca central del lado oeste. La base de la sección comienza a 3.7 m sobre el nivel del mar, y el contacto inferior está cubierto por dunas recientes. Una pequeña unidad de *P. panamensis* de 3.3 m de espesor con capas individuales de 0.2–0.3 m de espesor presenta *C. distinguenda* y *Ostrea* sp. En un contacto gradacional, biocalcarenita de 2 m de espesor compuesta de restos de rodolitos tamaño arena incluye fragmentos de *P. panamensis*, *Ostrea* sp., *Chione californiensis* y *Tagelus californienus*. Algunos ejemplares de *Codakia distinguenda* se encuentran en posición de vida. Sobre un contacto marcado se encuentra una biocalcarenita blanquecina de 2.15 m de espesor compuesta principalmente de restos de rodolitos tamaño arena gruesa en una matriz de arena fina carbonatada. Se encontraron unos pocos ejemplares enteros de rodolitos cerca de la base y algunas más hacia la parte alta de esta unidad. Se hallaron algunos bivalvos en posición de vida en una sola capa arenosa cerca de la base (fig. 3).

Facies sedimentarias

De la descripción de las columnas estratigráficas se identificaron cinco facies principalmente por sus características sedimentarias, las cuales presentan una clara relación lateral y vertical.

Inside the Pleistocene basin (section D, fig. 2), the lower contact is not visible at any location, but it is without doubt part of the volcanic sequence associated with the Coronado volcano on the island. The sequence begins near the entrance to the basin, at 5.6 m above sea level, with coarse-grained sand made of broken shell and minor coral fragments, as well as volcanic rock fragments with rare boulders of weathered, rounded granitoid fragments. The unit varies in thickness and extent. It is 0.90 m thick, normal graded, and the volcanic rock fragments are mostly constrained to this bed. A second 0.60-m-thick bed overlies the basal units containing very few shells, with medium sand-size rhodolith fragments as the matrix, poorly bedded. On a gradational contact a 1-m-thick biocalcarenite bed occurs made of medium sand-size rhodolith fragments, poorly graded, and well bedded, with abundant fructifose rhodoliths as whole specimens from 2 to 3 cm in diameter. Up section, the biocalcarenite is unvaried now with whole specimens and fragments of clams. The beds are well bedded with individual beds from 40 to 60 cm thick, up to 5.4 m in total thickness for this unit. Restricted beds of branching *P. panamensis* colonies are present within the biocalcarenite filling the paleolagoon, mostly away from the entrance channel. On average, coral size is 20 cm high for each colony and up to 1 m thick for the bed. The amplitude of this type of patchy colony is from 2 to 5 m.

To the northeast of the entrance to the lagoon (section E, fig. 2), the lowermost unit is a 1.5-m-thick biocalcarenite bed almost exclusively composed of rhodolith debris and few whole rhodoliths, as well as few specimens of disarticulated and broken *Pina corteziana*. Above a poorly defined contact, a 5.6-m-thick biocalcarenite is composed of rhodolith debris organized as individual beds from 40 to 60 cm in thickness. The upper meter of this unit includes the bivalve *Codakia distinguenda* occurring in life position. This biocalcarenite displays large cross-bedding dipping 20°N.

Continuing to the east (section F, fig. 2) inside the basin, on the lowermost unit another section has a 1.5-m-thick biocalcarenite bed composed almost exclusively of rhodolith debris and bivalve fragments, as well as whole specimens, the same bed as in previous sections. Above a poorly defined contact, a 6.5-m-thick biocalcarenite is composed of rhodolith debris organized as individual beds 40–60 cm in thickness. This unit includes large cross-beds that dip 20°N.

On the northern side of the basin (section G, fig. 2), the lower unit presents a poorly-bedded, 0.60-m-thick bed overlying the basal units, with very few shells, and of medium sand-size rhodolith fragments as the matrix. Above a gradational contact is a biocalcarenite composed of rhodolith debris organized as individual beds from 40 to 60 cm in thickness. As before, this unit includes large cross-beds that dip 20°N. The top of this unit also includes the bivalve *C. distinguenda* preserved in life position. The full thickness of the unit at this locality is 7.7 m. Patches of *Porites panamensis* colonies are located 1.5 m above the base of this unit. Disconformably, on the biocalcarenite a 0.3-m-thick conglomerate is found composed of volcanic rock fragments. The fragments are very

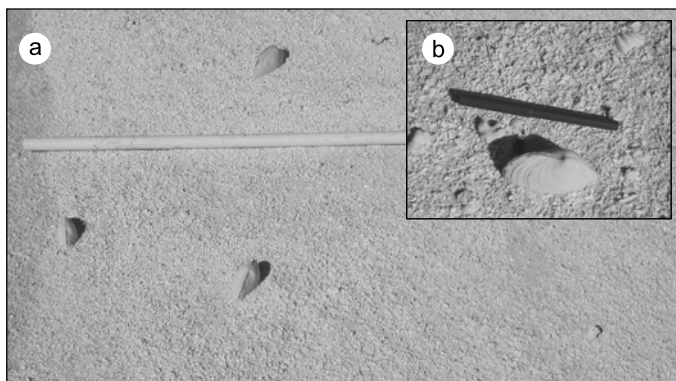


Figura 3. Fósiles de la almeja *Codakia distinguenda*: (a) en posición de vida dentro de una capa de biocalcarenita; (b) almeja, 13 cm de longitud (pluma negra para escala)

Figure 3. Fossils of the clam *Codakia distinguenda*: (a) in living position within a biocalcarenite layer; (b) single clam, 13 cm long (black pen for scale).

Facies I: Conglomerado basal

El conglomerado basal es visible principalmente en la costa como parte de un depósito de costa rocosa en la cara de playa. La base de la unidad está marcada por una superficie erosiva desarrollada sobre el material volcánico (fig. 4). La superficie inferior es irregular. La unidad está compuesta de un conglomerado tamaño de grano a canto rodado que varía de 1 a 3.5 m de espesor. El conglomerado está compuesto en su mayoría por clastos retrabajados de la capa volcánica inferior con un diámetro de 3 a 60 cm. Éstos varían en forma de subangulares a bien redondeados. La base de la sección descansa sobre clastos con una matriz arenosa de granos gruesos compuesta de fragmentos de roca volcánica y cristales. En la parte alta de la sección, el conglomerado cambia a un soporte de matriz, en el cual restos de rodolitos tamaño arena media constituyen la mayor parte de la matriz. Esta facies se repite, separada por un contacto erosional marcado por fragmentos volcánicos tamaño canto rodado bien redondeados, a 12 m sobre el nivel del mar. En el lado suroeste de la isla, las unidades conglomeráticas basales tienen un echado de 5 a 11°E, pero son planas en las secciones orientales.

Facies II: Pequeños *Porites*

Las facies están dominadas por pequeñas colonias ramificadas de *P. panamensis* con ramificaciones de 0.5 a 2 cm de diámetro y cabezas de 10 a 20 cm de alto, en capas lenticulares de 2 m de espesor y 10 m de diámetro. Escasos fragmentos de rodolitos tamaño arena fina constituyen una matriz de biocalcarenita. Esta facies es ubicua en el área de estudio. En vida, los corales forman parches en el piso dentro de la laguna costera y en lo alto de la barra costera (fig. 5), así como en el interior del canal oeste.

well rounded, clast-supported and 5 cm in diameter on average. The unit includes abundant fossils, especially some bivalves in life position. The uppermost unit of this section is the massive coral bed, at this section 0.6 m thick. This uppermost unit has been described in detail by Johnson *et al.* (2007).

Near the southwest corner of the island (section H, fig. 2), carbonate rocks of marine origin are well exposed in channels that penetrate the central basin from the western side. The base of the section starts at 3.7 m above sea level; the lower contact is covered by modern dunes. A small *P. panamensis* unit 3.3 m thick, with individual beds 0.2–0.3 m in thickness, includes *C. distinguenda* and *Ostrea* sp. On a gradational contact, a 2-m-thick biocalcarenite composed of sand-sized rhodolith debris includes fragments of *P. panamensis*, *Ostrea* sp., *Chione californiensis* and *Tagelus californienus*. Few specimens of *Codakia distinguenda* occur in life position. On a sharp contact there is a 2.15-m-thick whitish biocalcarenite composed primarily of coarse sand-sized rhodolith debris in a matrix of fine carbonate sand. Few whole specimens of rhodoliths are found near the base and more individuals occur toward the top of this unit. Few bivalves occur in life position on a single sandy bed near the base (fig. 3).

Sedimentary facies

From the description of the stratigraphic columns, five facies are recognized primarily by their sedimentary characteristics, showing clear lateral and vertical relationships.

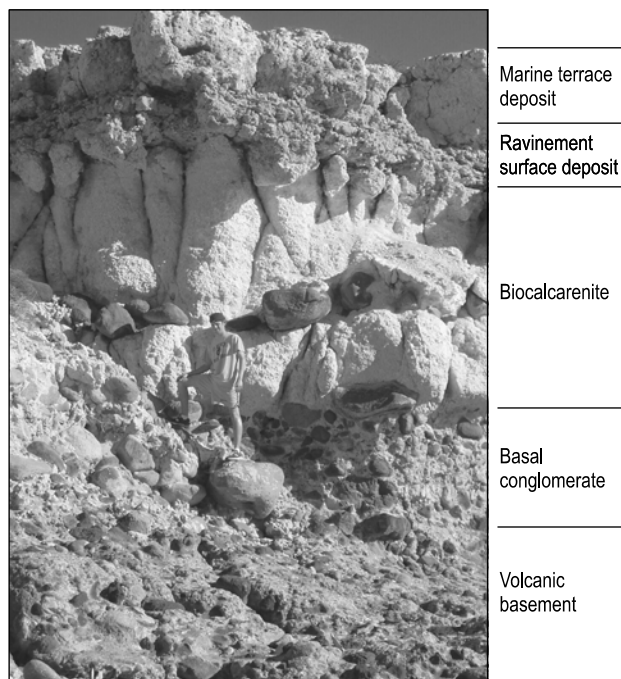


Figura 4. Unidades volcánicas y sedimentarias en la base de la sección en la localidad A de la figura 2 (descripción en el texto).

Figure 4. Volcanic and sedimentary units at the base of the section at locality A from figure 2 (description in the text.)



Figura 5. Pequeñas colonias ramificadas de *Porites panamensis*, comúnmente encontradas dentro de las biocalcarenitas (mochila como escala).

Figure 5. Small branching colonies of *Porites panamensis*, commonly distributed within biocalcarenites (backpack for scale).

Facies III: Biocalcarenita

Esta facies se caracteriza por presentar arena bioclástica, clasificación pobre, con abundantes ejemplares de rodolitos tipo fructicosa enteros, preservados, con un diámetro de 2 a 3 cm, dentro de una matriz mediana de fragmentos de rodolitos, de poco a moderadamente cementada, y moderadamente clasificada en capas de 40 a 60 cm de grosor (fig. 6). Estas capas están ampliamente distribuidas como depósitos sedimentarios principalmente sobre la facies de conglomerado basal. La misma biocalcarenita se encuentra presente como un depósito de abanico dentro de la laguna cerrada, asentado durante eventos de tormenta e interpretado de las capas inclinadas al norte de la laguna.

Facies IV: *Porites* masivo

Las colonias de coral *P. panamensis* en el arrecife fósil de Isla Coronados comúnmente conforman un bouquet con múltiples ramificaciones que se extienden hacia arriba y afuera en un cuerpo cónico. Aunque en otras partes de la isla se pueden encontrar otras especies de corales hermatípicos, *P. panamensis* es monolítico dentro del área de la cuenca Coronados: las colonias se encuentran preservadas en posición de vida rodeadas por una matriz de arena bioclástica no cementada y restos de rodolitos. La cabeza de los corales, típicamente de 50 a 110 cm de diámetro y 110 cm de alto (Johnson *et al.* 2007; fig. 6), ocuparon grandes áreas dispersas en la superficie marina, principalmente en las situadas y ahora preservadas en la parte norte de la laguna ya llena. Algunos especímenes de bivalvos articulados como *Modiolus capax* y *Barbatia reevseana* se encuentran entre las ramas del coral, así como el gasterópodo *Turbo fluctuosus*.

Facies I: Basal conglomerate

The basal conglomerate is mostly exposed on the coast as part of a rocky-shore deposit localized on the shoreface. The base of the unit is marked by a distinct erosion surface, developed on top of volcanic material (fig. 4). The underlying surface is irregular. The unit is made of a granule- to boulder-sized conglomerate that varies in thickness from 1 to 3.5 m. The conglomerate is largely composed of clasts from 3 to 60 cm in length reworked from the underlying volcanic beds. They vary from subangular to well rounded in shape. The base of the section is clast-supported with a coarse-grained sandy matrix made of volcanic rock fragments and individual crystals. Up section, the conglomerate changes to matrix-supported, in which medium sand-size rhodolith debris constitute most of the matrix. These facies repeat themselves, separated by erosional contacts marked by well-rounded, boulder-size volcanic fragments, up to the 12 m mark above sea level. On the southwestern side of the island, the basal conglomeratic units show dips 5–11° to the east, but they are flat for the eastern sections.

Facies II: Small *Porites*

Small branching colonies of *P. panamensis* form distinct mounds of coral-dominated facies, with branches 0.5–2 cm in diameter and heads 10–20 cm high, in lenticular beds up to 2 m thick and 10 m in diameter. Scarce fine sand-size rhodolith fragments constitute a biocalcarenite matrix. This facies is ubiquitous for the study area. In life, the corals formed patches on the sea floor inside the coastal lagoon and on top of the coastal barrier (fig. 5), as well as within the west channel.

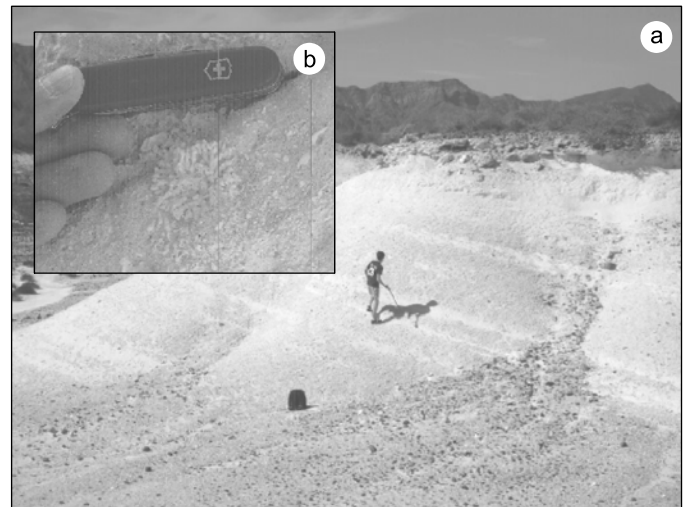


Figura 6. Capas de biocalcarenita compuestas principalmente de fragmentos de rodolitos: (a) vista hacia el norte en la margen sur de Isla Coronados; (b) rodolito completo dentro de la matriz.

Figure 6. Biocalcarenite layers made up mostly of rhodolith fragments: (a) view to the north at the southern edge of Isla Coronados; (b) whole rhodolith within the matrix.

Facies V: Pavimento marino y depósitos asociados

En el depósito se distinguió una superficie erosional de pavimento marino que se desarrolló en respuesta a los efectos del incremento del nivel del mar por encima del anterior sistema de isla de barrera. Sobre depósitos lagunares subyacentes, una biocalcarenita de grano medio a grueso y 1 m de espesor, con un contacto erosional local marcado, sirve de matriz a fragmentos de roca volcánica bien redondeados y con 3 a 7 cm de diámetro (fig. 7). La presencia de clastos volcánicos es más evidente cerca del lado continental de la paleolaguna, como escurrimientos de tierra. Asociada a la superficie de guijarros se encuentra biota intermareal (Johnson *et al.* 2007) que incluye elementos enterrados entre los guijarros o adheridos a éstos, tales como algas calcáreas e invertebrados marinos, incluyendo los gasterópodos *Turbo fluctuosus*, *Nerita bernhardi* y *Acanthina tuberculata*, el bivalvo *Modiolus capax* y abundantes algas rojas coralinas incrustadas en guijas de andesita, así como rodolitos enteros y rotos en la matriz de biocalcarenita. Guijarros de andesita y pequeños cantos rodados separan físicamente la capa masiva de coral de la biocalcarenita subyacente con su persistente tejido de restos de rodolitos quebrados. Cerca del centro aproximado de la paleolaguna esta unidad está situada a 12.5 m sobre el nivel del mar. Los pequeños cantos rodados y guijarros tienden a ser planos, mientras que las guijas tienden a ser más esféricas. En la superficie erosional el tamaño de los clastos tiende a incrementar hacia el lado norte de la paleolaguna, donde los clastos de andesita más grandes miden 16 × 25 cm y 20 × 30 cm. La composición de la biota en este depósito es notoriamente de aguas someras a

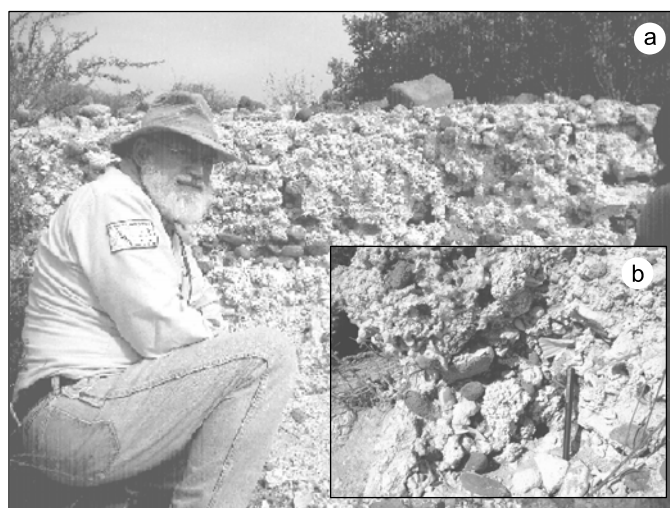


Figura 7. Vista al norte, dentro de la Cuenca Coronados: (a) pavimento y depósito asociado; (b) vista en detalle del depósito asociado, incluyendo especímenes completos y rotos de fósiles, fragmentos de roca volcánica y matriz de biocalcarenita.

Figure 7. View to the north, inside Coronados Basin: (a) ravinement surface and associated deposit; (b) detail view of the associated deposit, including whole and broken specimens of fossils, volcanic rock fragments and biocalcarenitic matrix.

Facies III: Biocalcarenite

This facies is characterized by bioclastic sand, poorly graded, with abundant fructifere rhodoliths preserved as whole specimens 2–3 cm in diameter, within a medium sand-size matrix of rhodolith fragments, weakly to moderately cemented, moderately sorted in beds 40–60 cm thick (fig. 6). These beds are widely distributed as sedimentary deposits most commonly above the basal conglomerate facies. The same biocalcarenite is present as an overwash fan deposit inside the enclosed lagoon, deposited during storm activity, and interpreted from the dipping beds to the north of the lagoon.

Facies IV: Massive *Porites*

Coral colonies of *P. panamensis* in the fossil reefs of Isla Coronados commonly conform to a bouquet shape with multiple branches spreading upward and outward in a conical body. Although other species of hermatypic corals occur elsewhere on the island, *P. panamensis* is monolithic within the area of the Coronados Basin: colonies are preserved in growth position enclosed in an uncemented matrix of bioclastic sand and rhodolith debris. Coral heads, typically 50–110 cm in diameter and up to 110 cm in height (Johnson *et al.* 2007; fig. 6), occupied large patches on a marine surface, mainly situated and now preserved in the northern part of the already filled lagoon. Associated with the coral reef, articulated specimens of the bivalves *Modiolus capax* and *Barbatia reevseana* occur only rarely among the coral branches, as does the gastropod *Turbo fluctuosus*.

Facies V: Ravinement surface and associated deposit

One very distinct erosional surface has been recognized in the deposit as a ravinement surface that developed in response to the effect of sea level rising above the barrier-island system. Above underlying lagoonal deposits, with a sharp and locally erosional contact, a medium- to coarse-grained 1-m-thick biocalcarenite occurs as a matrix for very well-rounded volcanic rock fragments from 3 to 7 cm in diameter (fig. 7). The presence of volcanic clasts is more evident closer to the landward side of the paleolagoon, as run-off from land. Associated with the cobbled surface is a transitional intertidal biota (Johnson *et al.* 2007) that includes elements found buried among cobbles or attached directly to cobbles, including a range of calcareous algae and marine invertebrates, such as the gastropods *Turbo fluctuosus*, *Nerita bernhardi* and *Acanthina tuberculata*, and the bivalve *Modiolus capax*, as well as abundant coralline red algae encrusted on andesite pebbles. Whole and broken rhodoliths are found in the biocalcarenite matrix. Andesite cobbles and small boulders physically separate the massive coral capstone from the underlying biocalcarenite with its pervasive fabric of crushed rhodolith debris. Near the approximate center of the paleolagoon this unit is situated at 12.5 m above sea level. The small boulders and cobbles tend to be flat in shape, while pebbles tend to be more spherical. Clast size on the erosion surface tends to increase toward the north side of the

intemareales (Johnson *et al.* 2007). Algunas de las guijas cubiertas de rodolitos son grandes, de 6 a 9 cm de diámetro. En este horizonte se registraron también otros bivalvos, incluyendo especímenes articulados de *Arca pacifica* y *Barbatia reevseana*. En el lado sur de la Cañada Coronados se encontraron algunas conchas articuladas de *Pseudochama janus* y *Chama mexicana*, adheridas a guijarros de andesita. También adheridos a éstos se encontraron colonias inmaduras de *Porites panamensis*, así como abundantes algas rojas coralinas alrededor de guijas de andesita. Cerca del centro de la Cuenca Coronados se encuentra en abundancia el bivalvo *Codakia distinguenda* en posición de vida entre los guijarros. A excepción de *C. distinguenda*, la fauna de bivalvos citada anteriormente se encuentra actualmente en la línea de costa rocosa e indica un periodo transicional de colonización antes de la fase principal de crecimiento del coral.

La superficie basal erosional y el depósito marino se interpretan como un pavimento marino, por lo que se supone que ha sido formada por procesos de oleaje activos antes del desarrollo de la capa masiva de *Porites*. La facies y su fauna característica son interpretadas como de un ambiente de cara de playa en una superficie somera semiprottegida.

Modelo estratigráfico

A lo largo de los sistemas lagunares de barrera de carbonatos se encuentran depositados paquetes sedimentarios y, a gran escala, el principal factor que controla las secuencias de facies es el cambio en el nivel relativo del mar.

En Isla Coronados la gran producción de carbonato fue un elemento claramente asociado a la sedimentación marina, tal como lo indican las casi 50 ha de la cuenca rellenas con calcarenita rodoalgal, con estratificación cruzada del Pleistoceno. Estos rodolitos fueron producidos y después quebrados en el lado marino de la barra. El transporte de sedimentos a la anteplaya y a la laguna por eventos de tormenta es un mecanismo importante y bien documentado en la migración de barras costeras (Davis *et al.* 2003).

Se encontraron sedimentos intemperizados que componen un porcentaje significativo del depósito de isla de barrera (Christiansen *et al.* 2004). En la figura 8 se muestra un modelo básico para la laguna Coronados del Pleistoceno. La cima del arrecife de coral se formó ante el incremento relativo del nivel del mar, cuando el aumento del nivel eustático del mar era más rápido que el levantamiento tectónico local, pero no más rápido que la tasa máxima de crecimiento del coral.

En el modelo propuesto por Davis *et al.* (2003), la laguna Coronados fue siempre un sistema estable debido a la presencia de un afloramiento volcánico que eventualmente aportó grandes clastos que funcionaron como dorsal; en la figura 9 se muestra un corte transversal N-S de la paleolaguna Coronados. La barra fue estable y nunca varió su posición, hasta que el resto de la laguna se relleno e inundó. Durante su formación la laguna estuvo sujeta a erosión, cambiando después a una etapa

paleolaguna, where the largest andesite clasts have dimensions such as 16 × 25 cm and 20 × 30 cm. The biota in this deposit is distinctly shallow-water to intertidal in composition (Johnson *et al.* 2007). Some of the pebble-nucleated rhodoliths are large, from 6 to 9 cm in diameter. Additional bivalves including articulated specimens of *Arca pacifica* and *Barbatia reevseana* were recorded from this horizon. On the southern side of Cañada Coronados, articulated specimens of the encrusting jewel-box shells *Pseudochama janus* and *Chama mexicana* are attached to andesite cobbles. Immature colonies of *Porites panamensis* also occur attached to andesite cobbles in the same area, as do abundant coralline red algae nucleated around andesite pebbles. Near the center of the Coronados Basin the bivalve *Codakia distinguenda* occurs abundantly in life position nestled among the cobbles. Except for *C. distinguenda*, the shelly fauna cited above is typically found today on rocky shores and indicates a transitional period of colonization prior to the main phase of coral growth.

This basal erosional surface and marine deposit is interpreted as a wave-ravinement surface. It is assumed to have been formed by active wave processes before the development of the massive *Porites* bed. These facies and faunal features are interpreted to indicate a shoreface environment in a semi-protected shallow surface.

Stratigraphic model

Sedimentary packages are deposited along barrier-lagoonal carbonate systems, and on a broad scale the main factors controlling the facies sequences are changes in relative sea level.

High carbonate production was one element clearly associated with the marine sedimentation for Isla Coronados, as indicated by the almost 50-ha basin filled with Pleistocene cross-stratified rhodalgal calcarenite. These rhodoliths were produced and then crushed on the seaward side of the barrier. Transfers of beach sediments to the backshore and lagoon by

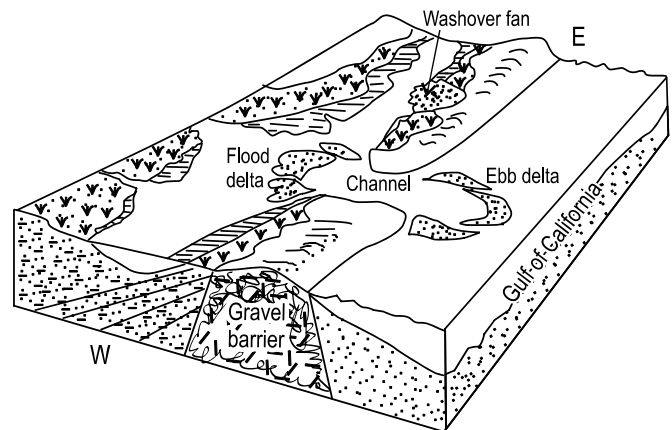


Figura 8. Modelo simplificado para la laguna Coronados del Pleistoceno.
Figure 8. Simplified model for the Pleistocene Coronados lagoon.

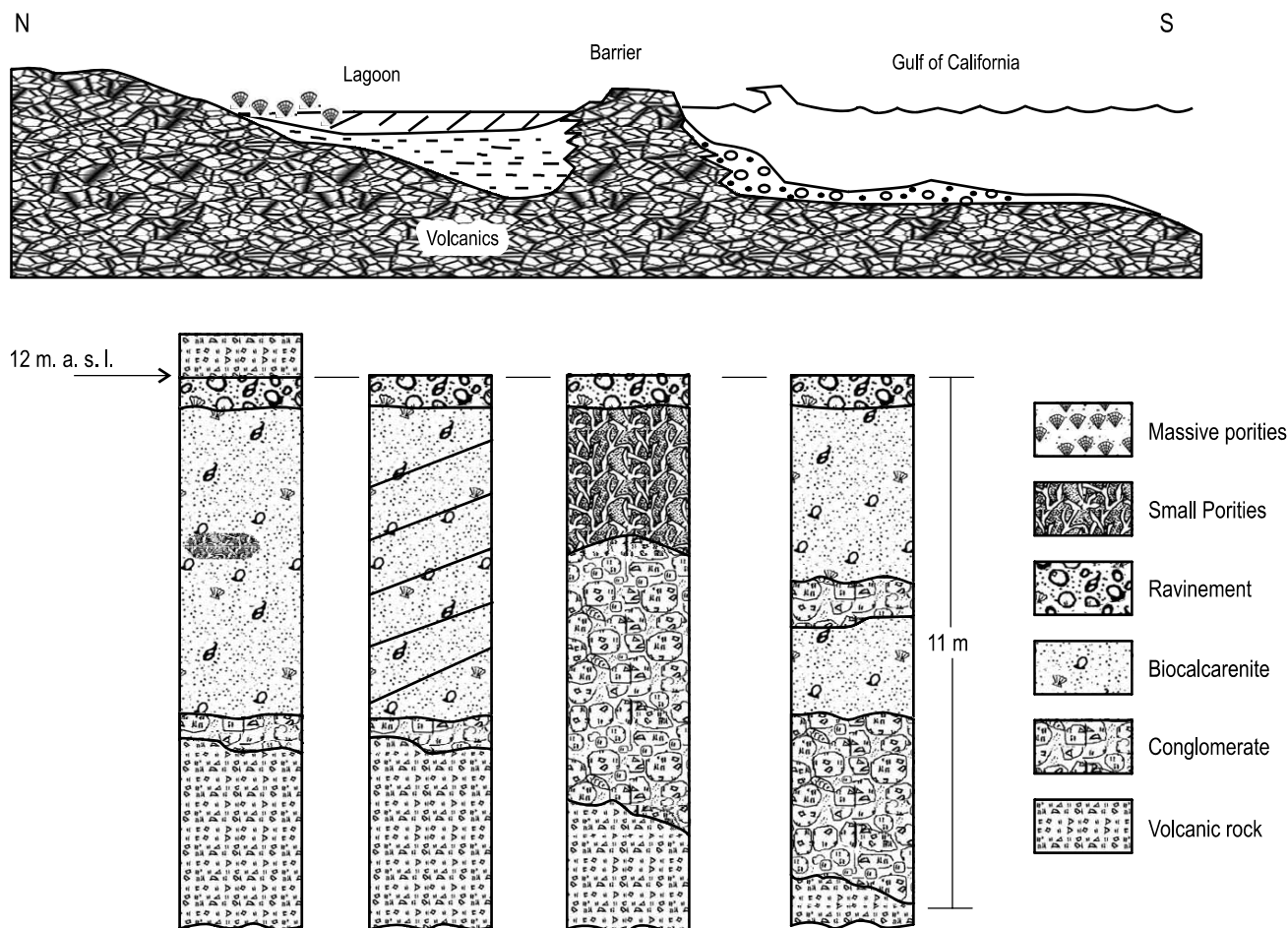


Figura 9. Sección cruzada compuesta para la paleolaguna Coronados de sur a norte, sin escala. Posición aproximada de las secciones estratigráficas de acuerdo con la figura 2 (descripción en texto).

Figure 9. Composed cross-section for the Coronados paleolagoon from south to north (not to scale). Stratigraphic sections located under approximate position according to figure 2 (description in the text).

de estabilidad. La migración tierra adentro de la barra bajo condiciones de incremento del nivel del mar es un fenómeno comúnmente observado a lo largo de costas abiertas (Roy *et al.* 1994, Christiansen *et al.* 2004).

Las características del sedimento, como por ejemplo el tamaño de grano a lo largo de la costa sur durante el establecimiento de la laguna costera, indican un transporte litoral del borde sur de la isla hacia el oeste, sustentado por la existencia de la laguna costera. No se puede inferir nada más sobre el transporte litoral una vez que la colonia masiva de coral se estableció.

Discusión

La biocalcarenita con estratificación planar y echado hacia el norte dentro de la cuenca sur de Isla Coronados nos permite interpretar estas unidades como depósitos erosionales asociados a eventos episódicos de tormenta. Backus *et al.* (2005) interpretaron que esta unidad se depositó dentro de la laguna costera durante un aumento del nivel del mar en el

storm-induced overwash processes are important and well-documented mechanisms involved in onshore barrier migration (Davis *et al.* 2003).

Washover sediments have been found to comprise a significant percentage of barrier island deposits (Christiansen *et al.* 2004). A basic model for the Pleistocene Coronados lagoon is shown in figure 8. The crest of the coral reef formed under rising relative sea level, when eustatic sea-level rise was faster than local tectonic uplift, but not faster than the maximum rate of upward coral growth.

From the model proposed by Davis *et al.* (2003), the Coronados lagoon was always a stable system, due to the presence of a close and fixed volcanic outcrop, which eventually provided large clasts that acted as a beach ridge. A simple N-S cross-section for the Coronados paleolagoon is shown in figure 9. The barrier was stable and never shifted its location, and finally drowned until the rest of the lagoon was filled. The lagoon was in a washover stage during its early history, changing to a spillover stage later on. Landward migration of barriers under rising sea-level conditions is a commonly observed phe-

Pleistoceno tardío. Los depósitos de rebase son un componente común de las islas de barrera que son depositadas como resultado de la erosión de una isla. La lentificación del flujo de rebase en el lado continental de la barra o la unión a la costa resulta en la depositación de cuerpos de sedimento llamados de rebase o abanicos de rebase (*washover fans*) (Sedgwick y Davis 2003). Los depósitos de rebase pueden variar en composición debido a las diferentes fuentes de material, pero en general presentan una estratificación horizontal y alternada de capas de arena y fragmentos de conchas que reflejan cambios en la competencia hidráulica y variaciones de la marea durante los eventos de tormenta (Sedgwick y Davis 2003). El potencial de preservación de unidades de tormenta individuales y de las facies de rebase depende de muchos factores tales como la tasa de bioturbación, la frecuencia del evento, el espesor de la unidad y la magnitud y la tasa de cambio del nivel del mar. De acuerdo con Sedgwick y Davis (2003), distinguir unidades individuales y subfacies después de ser retrabajadas es difícil en comparación con la identificación de facies en conjunto.

La identificación de la variabilidad espacial en el desarrollo de los posibles diferentes tipos de superficies erosionales transgresivas es crucial para esclarecer los procesos de formación de un sistema de isla de barrera. Probablemente las características de escala pequeña de los depósitos de rebase no se preservan con frecuencia, pero si esto ocurre como sucedió en Isla Coronados, resultan de gran ayuda para la identificación. Tales características incluyen, entre otras, arenas con estratificación planar y echado hacia el continente con capas de conchas y evidencias de que ha habido muy poco o ningún retrabajo por las mareas o las corrientes. De acuerdo con Sedgwick y Davis (2003) las unidades de rebase presentes dentro de la cuenca son identificadas como un afloramiento de capas depositadas bajo condiciones subacuáticas que se caracterizan por biocalcarenitas (sin fósiles) con estratificación planar y echado hacia el continente (hacia el norte de Isla Coronados) y sin evidencias de haber sido retrabajadas. La barrera se muestra muy inclinada al estar compuesta de roca volcánica. Una vez que el nivel del mar se elevó, pequeñas colonias de *P. panamensis* poblaron las rocas de la superficie de la barra hasta que la cuenca se rellenó con sedimentos y la depositación de rebase cesó, pero en todo momento el perfil construido se muestra muy inclinado por ambos lados de la barra; por tanto, no se depositó arena con estratificación planar en el abanico de rebase supramareal. No se identifican claramente depósitos deltáicos de flujo o reflujos debido a que la remoción de sedimentos de la cuenca por la erosión también ocurrió a lo largo de la entrada principal de la palolaguna. En realidad la barrera nunca se movió de su posición original durante los incrementos del nivel del mar, lo que permitió la excelente preservación de los depósitos de rebase. Cuando la cuenca alcanzó el equilibrio con el incremento del nivel del mar, se desarrolló una superficie sedimentaria plana que enterró los sedimentos progradacionales más antiguos con todo y sus capas inclinadas.

Por consiguiente, la barra comenzó como un rasgo morfológico sumergido que se fue incorporando a la cara de playa

along open coasts (Roy *et al.* 1994, Christiansen *et al.* 2004).

Sediment attributes, such as grain size along the southern coast during the establishment of the coastal lagoon, indicate a littoral transport from the southern edge of the island to the west, sustained for the whole existence of the coastal lagoon. No further littoral transport interpretation can be made once the massive coral colony became established.

Discussion

The northward-dipping planar-stratified biocalcarenites found inside the southern basin of Isla Coronados allows us to interpret these units as washover deposits associated with episodic storm activity. This unit was deposited inside a coastal lagoon during later Pleistocene times, while sea level was rising as interpreted by Backus *et al.* (2005). Washovers are a common component of barrier islands that are deposited as a result of overwash of the island. Decrease in overwash flow velocity on the landward side of the barrier or spit results in deposition of bodies of sediment termed washovers or washover fans (Sedgwick and Davis 2003). Washover deposits may vary in composition due to differences in source material, but, in general, they consist of horizontally-bedded, alternating layers of sand and shell fragments that reflect changing hydraulic competence and tidal variations during storm surge (Sedgwick and Davis 2003). The preservation potential of individual storm units and the washover facies as a whole depends on many factors, including rate of bioturbation, frequency of overwash, thickness of the units, and magnitude and rate of sea-level change. According to Sedgwick and Davis (2003), distinguishing individual units and subfacies after reworking is difficult compared to recognition of the facies as a whole.

Identification of spatial variability in the development of possible different types of transgressive erosional surfaces is crucial for elucidating formative processes of a barrier-island system. Small-scale features of washovers are less likely to be preserved, but they provide an excellent means of identification if preservation does occur, such as in the Coronados lagoon. When present, small-scale features include, among others, landward-dipping planar-stratified sands with shell beds and little to no evidence of reworking by tidal or current activity. According to Sedgwick and Davis (2003), the washover units within the basin are identified as foreset beds deposited under subaqueous conditions that are characterized by landward-dipping (northward for Isla Coronados) planar-stratified biocalcarenites (no fossils), with no evidence of reworking on these beds. The actual barrier was very steep, because it is made of volcanic rock. Once the sea level rose, the rock surface of the barrier was encrusted with small branching colonies of *P. panamensis* until the basin was filled with sediments and the washover deposition ceased, but at all times constituting a very steep profile for both sides of the barrier; hence, no planar-bedded sand in supratidal washover fans was deposited. No flood or ebb delta deposits are clearly identified.

más reciente (Riggs *et al.* 1995). Los sedimentos más antiguos afloran en cara erosionada de la playa y están comúnmente presentes en la plataforma interna como un alto batimétrico hacia el mar, de la cara de playa más reciente, y por tanto modifican las olas entrantes. Con base a lo anterior, de acuerdo con Riggs *et al.* (1995), el sistema de barrera de Isla Coronados se identifica como un promontorio de cara de playa.

Las variaciones espaciales y temporales en las características de los conjuntos de facies y la superficie erosional dentro de la secuencia en Isla Coronados del Pleistoceno, permiten realizar una evaluación de los procesos de formación de un sistema de isla de barrera remanente. La unidad de conglomerado en la parte alta de la cuenca es interpretada como una superficie erosional de pavimento tal y como fue descrita por Nummedal y Swift (1987).

Se considera que las terrazas marinas indeformadas a 12 m sobre el nivel del mar en Isla Coronados tienen una edad de 121 ka, debido a que éstas son el equivalente estratigráfico al arrecife en la cuenca Coronados del cual se analizó una muestra. Por lo tanto, la edad del sistema de isla de barrera es ligeramente mayor que 121 ka, pero no mayor al Pleistoceno Inferior como lo expresó Backus *et al.* (2005).

Bajo condiciones de un lento incremento en el nivel del mar es de esperarse una gran producción de carbonato, y ésta ha sido claramente establecida gracias a las casi 50 ha de cuenca que han sido rellenadas con calcarenita rodoalgal con estratificación cruzada del Pleistoceno. Considerando que para producir 1 m³ de arena carbonatada se requieren 16,265 rodolitos enteros (Sewell *et al.* 2007), los rodolitos fueron producidos y luego quebrados hacia el lado marino de la barra. Por lo tanto, considerando un espesor mínimo de 6 m para la cuenca, fueron necesarios un total de 48,795,000,000 de rodolitos enteros para rellenarla con el producto depositacional de material quebrado.

Las pequeñas colonias de *P. panamensis* que forman montículos de facies dominadas por coral son también distintivas del ambiente costero lagunar y están ampliamente distribuidas dentro de la cuenca (Johnson *et al.* 2007).

Where preserved, all biocalcarenite beds include whole thalli, 2–3 cm in diameter, with densely branched, fruticose morphology as the most usual type. Less abundant are whole specimens with a densely branched, foliose morphology. No sequence showing stratigraphic changes in rhodolith type could be established for the deposits on Isla Coronados. At Punta Bajo, on the nearby peninsular coast, however, two beds with distinctly different rhodolith morphologies can be demonstrated as part of a natural succession. The lowermost bed is a 3-m-thick biocalcarenite that is 60% dominated by whole thalli with densely branched, fruticose morphology. The overlying unit, 2-m-thick biocalcarenite, includes whole specimens 80% of which are sparsely branched with a fruticose morphology, 15% are densely branched with a foliose morphology, and another 5% are densely branched, with fruticose morphology.

able since removal of sediments from the basin by erosion also occurred along the main entrance of the paleolagoon. The barrier actually never moved from its original position during sea-level rising, allowing for the excellent preservation of the washover deposits. When the basin achieved equilibrium with rising sea level, it developed a flat-lying sediment surface that buried the older progradational sediments with their dipping beds.

Therefore, the barrier started as a submerged morphological feature that was incorporated into the younger shoreface (Riggs *et al.* 1995). Older sediments crop out on the eroding shoreface and commonly occur on the inner shelf as bathymetric highs seaward of the younger shoreface and thus modify incoming waves. Based on all of the above, the barrier system for Isla Coronados is identified as a submarine headland shoreface according to Riggs *et al.* (1995).

Spatial and temporal variations in facies assemblages and erosional surface characteristics within the Isla Coronados Pleistocene sequence allow an evaluation of the formative processes of a remnant barrier-island system. The conglomerated unit on top of the basin-filled sequences is interpreted here as a wave-ravinement erosional surface as described by Nummedal and Swift (1987).

The lowest undisturbed terraces at 12 m above sea level on Isla Coronados are considered to be 121 ka in age, because they are the stratigraphic equivalents to the capping reef in the Coronados Basin from which the analyzed coral sample was taken. Therefore, the age for the barrier-island system is slightly older than 121 ka, but not older than Lower Pleistocene as stated by Backus *et al.* (2005).

High carbonate production is expected under slow rising sea level, and this is clearly established by the almost 50-ha basin filled with Pleistocene cross-stratified rhodalgal calcarenite. Considering that in order to produce 1 m³ of carbonate sand, 16,265 whole rhodoliths are required (Sewell *et al.* 2007), these rhodoliths were produced and then crushed on the seaward side of the barrier. Therefore, considering a minimum thickness of 6 m for the basin, a total of 48,795,000,000 whole rhodoliths would be necessary to fill the basin with the depositional product of crushed material.

The small branching colonies of *P. panamensis* that form distinct mounds of coral-dominated facies are also distinctive for coastal lagoon settings and are widely distributed within the basin (Johnson *et al.* 2007).

Donde subsisten, todas las capas de biocalcarenite incluyen especímenes completos de rodolitos de 2 a 3 cm de diámetro con morfología fruticosa, densamente ramificados, del tipo más común. Menos abundantes son los especímenes completos densamente ramificados de morfología foliosa. No fue posible establecer una secuencia estratigráfica para el tipo de rodolitos depositados en Isla Coronados. En Punta Bajo, en la costa cercana de la península, se presentan dos capas con rodolitos de características morfológicas diferentes que representan una sucesión natural. La capa inferior, compuesta de biocalcarenite de 3 m de espesor, está conformada por hasta un 60% de

Conclusiones

Se identificaron cinco facies sedimentarias en Isla Coronados, todas someras y marinas: (1) matriz de fragmentos de rodolitos con tamaño de arena media, (2) fragmentos de roca volcánica bien redondeados, (3) arrecifes en parche de *Porites panamensis*, (4) fósiles marinos enteros y quebrados y arena de rodolitos y (5) pavimento marino.

La descripción generalizada para las facies presentes en el área de estudio es de una sola laguna costera separada del océano abierto por una isla de barrera fija y con un abanico de rebase asociado dentro de la paleolaguna.

El modelo de la isla de barrera para Isla Coronados incluye una barra rocosa que nunca se movió lateralmente, sólo verticalmente hasta que el nivel del mar alcanza la cima.

El sistema de barrera de Isla Coronados se identifica como un promontorio submarino de la cara de playa.

La secuencia estratigráfica, la cual se creó por movimientos tectónicos, es una secuencia poco profunda producto del incremento del nivel del mar hace aproximadamente 121,000 años (MIS 5e).

La gran producción de carbonato influenciada por pausados incrementos del nivel del mar está demostrada por las casi 50 ha de cuenca rellenas de restos de rodolitos.

El número total estimado de rodolitos enteros formados fuera de la paleolaguna necesarios para rellenar la cuenca es alrededor de 48,795,000,000.

Este depósito es categóricamente uno de los ejemplos mejor preservados de una laguna costera separada del océano por una isla de barrera del Pleistoceno en el Golfo de California.

Agradecimientos

Esta contribución se basó en estudios de campo de enero de 2005 dirigidos por investigadores y estudiantes de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California y del Williams College. Se agradece el apoyo de la UABC. Leon Fichman de Baja Outpost en Loreto, Baja California Sur, México, contribuyó generosamente al apoyo logístico. También agradecemos al director del Parque Nacional de Bahía Loreto y al director del Centro INAH en Baja California Sur por conceder los permisos necesarios para este estudio.

Referencias

- Ashby J, Minch JA. 1987. Stratigraphy and paleoecology of the Mulegé embayment, Baja California Sur, Mexico. *Cienc. Mar.* 13(2): 89–112.
- Backus DH, Ledesma-Vázquez J, Johnson ME, López-Pérez RA. 2005. Geologic history of Isla Coronados, Baja California Sur, Mexico. VII International Meeting on the Geology of the Baja California Peninsula. Sociedad Geológica Peninsular, pp. 11–12.
- Bigioggero B, Capaldi G, Chiesa S, Montrasio A, Vezzoli L, Zanchi A. 1987. Postsubduction magmatism in the Gulf of California: The Isla Coronados, Baja California Sur, Mexico. *Ist. Lombardo Acad. Sci. Lett. (Rend. Sci. B)* 121: 117–132.

rodolitos con morfología fructicosa, densamente ramificados. La unidad superior de biocalcarenita, con 2 m de espesor, contiene 80% de especímenes que se presentan levemente ramificados con morfología fructicosa, 15% son densamente ramificados, con morfología foliosa y el otro 5% presentan morfología fructicosa, densamente ramificados.

Conclusions

Five sedimentary facies were identified on Isla Coronados, all of them shallow marine: (1) medium sand-size matrix of rhodolith fragments, (2) well-rounded volcanic rock fragments, (3) patches of *Porites panamensis* colonies, (4) whole and broken marine fossils and rhodolith sand, and (5) ravinement erosional surface.

A generalized portrayal for the facies identified in the study area is of a single coastal lagoon separated from the open ocean by a fixed barrier island, and with an associated washover fan inside the paleolagoon.

The barrier-island model for Isla Coronados is one in which the fixed rock barrier never moves laterally, only builds up until sea level reaches the top.

The barrier system for Isla Coronados is identified as a submarine headland shoreface.

The stratigraphic sequence, which was created by discrete tectonic movements, is a simple shallowing-up sequence due to sea level rising about 121,000 years ago (MIS 5e).

High carbonate production under slow rising sea level is demonstrated by the almost 50-ha basin filled with rhodolith debris.

The total number of whole rhodoliths formed outside the paleolagoon necessary to fill the basin as rhodolith debris is estimated at about 48,795,000,000.

This deposit is categorically one of the best preserved examples of a coastal lagoon separated from the ocean by a barrier island for the Pleistocene in the Gulf of California.

Acknowledgements

This contribution is based on field studies conducted in January 2005 by faculty and students from the Autonomous University of Baja California and Williams College; support from the former is gratefully acknowledged. Leon Fichman of Baja Outpost in Loreto (Baja California Sur, Mexico) generously contributed to logistical support. We also thank the directors of the Parque Nacional Bahía de Loreto and Centro INAH (Baja California Sur) for granting the permits.

- Christiansen C, Aagaard T, Bartholdy J, Christiansen M, Nielsen J, Nielsen N, Pedersen JBT, Vinther N. 2004. Total sediment budget of a transgressive barrier-spit, Skallingen, SW Denmark: A review. *Geogr. Tidsskr./Danish J. Geogr.* 104: 107–126.
- Davis RA Jr, Yale KE, Pekala JM, Hamilton MV. 2003. Barrier island stratigraphy and Holocene history of west-central Florida. *Mar. Geol.* 200: 103–123.
- DeDiego-Forbis T, Douglas R, Gorsline D, Nava-Sanchez E, Mack L, Banner J. 2004. Late Pleistocene (Last Interglacial) terrace

- deposits, Bahía Coyote, Baja California Sur, Mexico. *Quatern. Int.* 120: 29–40.
- Durham JW. 1950. Megascopic paleontology and marine stratigraphy. Pt. 2 of the 1940 *E.W. Scripps* cruise to the Gulf of California. *Geol. Soc. Am. Mem.* 43: 1–216.
- Fisher JJ. 1982. Barrier islands. In: Schwartz ML (ed.), *The Encyclopedia of Beaches and Coastal Environments*. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, PA, pp. 124–134.
- Halfar J, Godinez-Orta L, Goodfriend GA, Mucciarone DA, Ingle JC, Holden P. 2001. Holocene-Pleistocene carbonate sedimentation and tectonic history of the La Paz area, Baja California Sur, Mexico. *Sediment. Geol.* 144: 149–177.
- Hoyt JO. 1967. Barrier island formation. Reply. *Geol. Soc. Am. Bull.* 79: 1427–1432.
- Johnson ME, Ledesma-Vázquez J. 1999. Biological zonation on a rocky-shore boulder deposit: Upper Pleistocene Bahía San Antonio (Baja California Sur, Mexico). *Palaios* 14: 569–584.
- Johnson ME, López-Pérez RA, Ransom CR, Ledesma-Vázquez J. 2007. Late Pleistocene coral-reef development on Isla Coronados, Gulf of California. *Cienc. Mar.* 33: 105–120.
- Karig DE, Jansky W. 1972. The Proto-Gulf of California. *Earth Planet. Sci. Lett.* 17: 169–174.
- Ledesma-Vázquez J, Johnson ME. 2001. Miocene-Pleistocene tectono-sedimentary evolution of Bahía Concepción region, Baja California Sur (Mexico). *Sediment. Geol.* 144: 83–96.
- Libbey LK, Johnson ME. 1997. Upper Pleistocene rocky shores and intertidal biotas at Playa La Palmita (Baja California Sur, Mexico). *J. Coast. Res.* 13: 216–225.
- Mayer L, Vincent KR. 1999. Active tectonics of the Loreto area, Baja California Sur, Mexico. *Geomorphology* 27: 243–255.
- McCulloch MT, Esat TM. 2000. The coral record of last interglacial sea-levels and sea surface temperatures. *Chem. Geol.* 169: 107–129.
- Nummedal D, Swift DJP. 1987. Transgressive stratigraphy at sequence-bounding unconformities: Some principles derived from Holocene and Cretaceous examples. In: Nummedal D, Pilkey OH, Howard JD (eds.), *Sea-level Fluctuation and Coastal Evolution*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Publ. 41: 241–260.
- Ortlieb L. 1991. Quaternary vertical movements along the coasts of Baja California and Sonora. In: Dauphin JP, Simoneit BRT (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem. 47: 447–480.
- Riggs SR, Cleary WJ, Snyder SW. 1995. Influence of inherited geologic framework on barrier shoreface morphology and dynamics. *Mar. Geol.* 126: 213–234.
- Roy PS, Cowell PJ, Ferland MA, Thom BG. 1994. Wave-dominated coasts. In: Carter RWG, Woodroffe CD (eds.), *Coastal Evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 121–186.
- Russell P, Johnson ME. 2000. Influence of the seasonal winds on coastal carbonate dunes from the Recent and Plio-Pleistocene at Punta Chivato (Baja California Sur, Mexico). *J. Coast. Res.* 16: 709–723.
- Sedgwick PE, Davis RA Jr. 2003. Stratigraphy of washover deposits in Florida: Implications for recognition in the stratigraphic record. *Mar. Geol.* 200: 31–48.
- Sewell AA, Johnson ME, Backus DH, Ledesma-Vázquez J. 2007. Rhodolith detritus impounded by a coastal dune on Isla Coronados, Gulf of California. *Cienc. Mar.* 33: 485–496.
- Sirkin L, Szabo BJ, Padilla AG, Pedrin AS, Diaz RE. 1990. Uranium-series ages of marine terraces, La Paz peninsula, Baja California, Sur, Mexico. *Coral Reefs* 9: 25–30.
- Stock JM, Hodges KV. 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific plate. *Tectonics* 8: 99–115.
- Zanchi A. 1994. The opening of the Gulf of California near Loreto, Baja California, Mexico: From basin and range extension to transtensional tectonics. *J. Struct. Geol.* 16: 1619–1639.

*Recibido en agosto de 2006;
aceptado en mayo de 2007.*