

## Desarrollo de un arrecife coralino en el Pleistoceno tardío en Isla Coronados, Golfo de California

### Late Pleistocene coral-reef development on Isla Coronados, Gulf of California

ME Johnson<sup>1\*</sup>, RA López-Pérez<sup>2</sup>, CR Ransom<sup>1</sup>, J Ledesma-Vázquez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Geosciences, Williams College, Williamstown, MA 01267, USA. \* E-mail: markes.e.Johnson@williams.edu

<sup>2</sup> Instituto de Recursos, Universidad del Mar, Apartado postal 47, Puerto Angel, CP 70902, Oaxaca, México.

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Apartado postal 453, Ensenada, CP 22800, Baja California, México.

#### Resumen

Un extenso afloramiento de un arrecife identificado como *Porites panamensis* se presenta en sección transversal sobre las laderas de la Cañada Coronados en la parte sur de Isla Coronados en el Golfo de California, cercana a Loreto, Baja California Sur (México). De acuerdo con la razón de isótopos de uranio y torio determinada a una muestra de coral, el arrecife se desarrolló hace entre 121,000 y 127,000 años durante un levantamiento del nivel del mar correlacionable con el estadio isotópico marino 5e. Las colonias densas, en forma de bouquet, con abundantes ramificaciones, presentan una altura máxima de 1.1 m y un diámetro máximo de 1.1 m. El tamaño de la colonia disminuye claramente en dirección a tierra. Aproximadamente 60% de los corales crecieron desde un punto de fijación sobre una grava o canto de andesita. Estos clastos formaron un abanico de detritus en el piso de una gran laguna que estabilizó la arena de carbonato derivada de rodolitos fragmentados. Asociada con la superficie de grava se presenta una biota intermareal que incluye costras de alga calcárea coralina, bivalvos sésiles tales como *Pseudochama janus*, *Modiolus capax*, *Barbatia reevseana* y *Arca pacifica*, además de gasterópodos como *Turbo fluctuosus*, *Acanthina tuberculata* y *Nerita bernhardi*. El cuerpo arrecifal subsiguiente cubrió un área mínima de 1.3 ha. Mediante una estimación moderada de una colonia de coral por metro cuadrado, el depósito arrecifal en la Cañada Coronados representa la amalgama de 13,000 colonias. Sin ser ecológicamente cogenéticas, estructuras arrecifales adicionales pueden haber cubierto hasta 50 ha en la Cañada Coronados de Isla Coronados. La orientación sureña del arrecife fósil en Isla Coronados es un patrón comúnmente encontrado en otras islas y bahías protegidas de la costa peninsular en la parte baja del Golfo de California.

*Palabras clave:* caliza de coral, estadio 5e del Pleistoceno, fauna del intermareal rocoso.

#### Abstract

Part of an extensive fossil reef composed of corals attributed to *Porites panamensis* is exposed in cross section along the walls of Cañada Coronados on the south side of Isla Coronados in the Gulf of California, near Loreto, Baja California Sur (Mexico). Based on laboratory analysis of uranium/thorium isotope ratios derived from a coral sample, the reef developed sometime between 121,000 and 127,000 years ago during a highstand in sea level correlative with marine isotope substage 5e. Densely packed bouquet-shaped colonies with multiple branches reach a maximum height of 1.1 m and maximum diameter of 1.1 m. Colony size diminishes markedly in the landward direction. About 60% of the corals show growth from an attachment point on andesite cobbles or small boulders. These clasts formed a debris apron on the floor of a large lagoon that effectively stabilized carbonate sand derived from crushed rhodoliths. Associated with the cobbled surface is a transitional intertidal biota that includes clast-encrusting coralline red algae, fixed bivalves such as *Pseudochama janus*, *Modiolus capax*, *Barbatia reevseana*, and *Arca pacifica*, in addition to gastropods such as *Turbo fluctuosus*, *Acanthina tuberculata*, and *Nerita bernhardi*. The succeeding reef body covered a minimum area of 1.3 ha. Using a conservative estimate of one coral colony per square meter, the reef deposit at Cañada Coronados represents the coalescence of 13,000 colonies. Not strictly coeval in ecological age, additional reef structures may have occupied up to 50 ha around the Cañada Coronados site on Isla Coronados. The southern exposure of fossil reefs on Isla Coronados is a pattern commonly found on other islands and sheltered bays on the peninsular coast in the lower Gulf of California.

*Key words:* coral limestone, Pleistocene substage 5e, rocky-intertidal fauna.

#### Introducción

Los corales pétreos de edad Pleistoceno tardío alcanzaron una distribución amplia en el Golfo de California a lo largo de los 5° de latitud, desde Cabo Pulmo en el sur (trópico de Cáncer) hasta Isla Tibúron en el norte (Durham 1947, López-

#### Introduction

Stony corals of Late Pleistocene age achieved wide distribution in the Gulf of California across 5° of latitude from Cabo Pulmo in the south (Tropic of Cancer) to Isla Tibúron in the north (Durham 1947, López-Pérez 2005). The fossil record for

Pérez 2005). El registro fósil de arrecifes coralinos del Pleistoceno parece indicar una distribución menor extendiéndose de la parte sur de Isla Cerralvo (Emerson 1960) hacia el norte a través de los 3° de latitud hasta Punta Chivato (Ransom 2000, Johnson 2002). En contraste, los arrecifes vivos en el Golfo de California se encuentran restringidos a la región entre Cabo Pulmo y Bahía Los Frailes, al sur del trópico de Cáncer (Steinbeck y Ricketts 1941, Brusca 1980, Reyes-Bonilla 2003). Con la atención del mundo enfocada en los problemas asociados con el calentamiento global y la tasa de retroceso del hielo polar (Overpeck *et al.* 2006), se ha incrementado el interés por examinar las condiciones climáticas del último episodio glacial hace 120,000 a 130,000 años, cuando las temperaturas globales medias eran mayores y el nivel del mar era 6 m más alto que hoy en día (Ashby *et al.* 1987). El ambiente del Pleistoceno tardío en el Golfo de California resulta ser un campo atractivo para tales investigaciones.

*Porites panamensis* colonizó el margen de Isla Coronados y formó una de las estructuras fósiles más grandes que se conservan en el Golfo de California. Aproximadamente 70% del resto de la isla está cubierto de rocas volcánicas, con flujos de una antigüedad estimada de  $690 \pm 50$  ka y  $160 \pm 20$  ka (Bigioggero *et al.* 1988). El levantamiento y posterior erosión en la isla produjeron una cañada de laderas bajas que permite la interpretación del establecimiento y la expansión de las estructuras coralinas relacionadas. El propósito de este trabajo es describir las condiciones físicas bajo las cuales se desarrollaron las estructuras coralinas y establecer su edad. Las sutiles variaciones regionales que se presentan en el desarrollo de un arrecife ayudan a establecer la compleja interacción entre la geografía y los patrones de circulación local en el Golfo de California durante el Pleistoceno tardío. Por tanto, un segundo objetivo de esta contribución es comparar el patrón de crecimiento y la biodiversidad del arrecife de Isla Coronados con otros arrecifes del Pleistoceno en la parte baja del Golfo de California (Squires 1959, Emerson 1960, Johnson y Ledesma-Vázquez 1999, Ransom 2000, Halfar *et al.* 2001, DeDiego-Forbis *et al.* 2004) y otras estructuras fósiles del mundo.

## Métodos de campo y laboratorio

En los mapas que se presentan en la figura 1(a, b) se muestra la localización de los arrecifes modernos y del Pleistoceno tardío en el Golfo de California estudiados por otros autores. El sitio principal de este estudio es una antigua laguna parcialmente descubierta por los arroyos de la Cañada Coronados hacia el interior de la costa sur de Isla Coronados (fig. 1c). Una cordillera de andesita forma una barrera física cerca de la costa, pero se ha formado un depósito delgado de arena carbonatada fina que surge de una brecha en la cordillera (fig. 2a). La laguna descubierta detrás de la barrera (fig. 2b) se encuentra siguiendo la pista del sedimento carbonatado hasta su fuente a través de la brecha andesítica. La calcarenita de grano mediano a grueso retenida detrás de la barrera andesítica se compone de

Pleistocene coral reefs appears to represent a lesser distribution extending from the south end of Isla Cerralvo (Emerson 1960) northward across 3° of latitude to Punta Chivato (Ransom 2000, Johnson 2002). In contrast, living reefs in the Gulf of California are restricted to the region between Cabo Pulmo and Bahía Los Frailes, south of the Tropic of Cancer (Steinbeck and Ricketts 1941, Brusca 1980, Reyes-Bonilla 2003). With world attention drawn to issues of global warming and rising melt rates of polar ice (Overpeck *et al.* 2006), there is growing interest in looking back on climatic conditions from the last interglacial episode 120,000 to 130,000 years ago, when average global temperatures were warmer and sea level stood about 6 m higher than today (Ashby *et al.* 1987). The Late Pleistocene environment in the Gulf of California is an attractive arena for investigations in this regard.

*Porites panamensis* colonized the margin of Isla Coronados and formed one of the largest fossil structures preserved in the Gulf of California. Elsewhere, volcanic rocks cover approximately 70% of the island landscape with flows reported to be  $690 \pm 50$  ka and  $160 \pm 20$  ka in age (Bigioggero *et al.* 1988). Uplift and later erosion on the island resulted in low canyon walls that make it possible to interpret the establishment and expansion of coherent coral structures. The purpose of this paper is to describe the physical conditions under which coral structures developed and to establish their age. Subtle regional variations in reef development help to establish the complex interplay between geography and local circulation patterns in the Late Pleistocene Gulf of California. Thus, a secondary goal of this contribution is to compare the growth pattern and biodiversity of the Isla Coronados reef with other Pleistocene reefs from the lower Gulf of California (Squires 1959, Emerson 1960, Johnson and Ledesma-Vázquez 1999, Ransom 2000, Halfar *et al.* 2001, DeDiego-Forbis *et al.* 2004) and some fossil structures known elsewhere in the world.

## Field and laboratory methods

Modern reefs and late Pleistocene reefs in the Gulf of California studied by other authors are located on maps shown in figure 1(a, b). The principal study site treated in this paper is a former lagoon partially exhumed by the arroyos of Cañada Coronados inland from the south coast of Isla Coronados (fig. 1c). A ridge of andesite forms a physical barrier near the shore, but fine carbonate sand has left a thin deposit that emanates from a gap in the ridge (fig. 2a). The lagoon exhumed behind the barrier (fig. 2b) is found by following the trail of carbonate sediment to its source through the andesite gap. Medium- to coarse-grained calcarenite dammed behind the andesite barrier is composed of poorly cemented rhodolith debris that once filled the lagoon almost to the top of the barrier. A separate study on the stratigraphy of Pleistocene sediments, both inside and outside the paleolagoon, is underway. A layer of coral limestone, generally less than 1 m in thickness, caps the rhodolith limestone on a distinct erosional surface inside the paleolagoon. The fossil corals from the

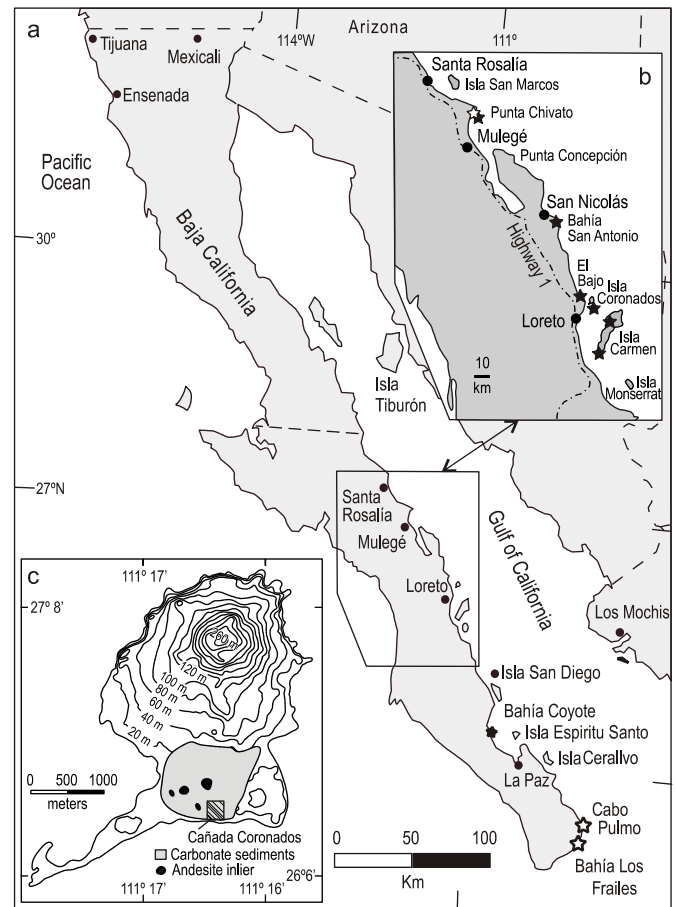
restos de rodolitos pobremente consolidados que alguna vez llenaron la laguna hasta la cima de la barrera. Actualmente se realiza un estudio independiente de la estratigrafía de sedimentos del Pleistoceno. Una capa de caliza de coral, en general de menos de 1 m de espesor, cubre la caliza de rodolito en una superficie erosional dentro de la paleolaguna. En este trabajo se estudian principalmente los corales fósiles de esta capa y otros invertebrados fósiles asociados con los corales dentro de la paleolaguna.

Se realizó un mapa topográfico de la Cañada Coronados con base en las elevaciones con respecto al nivel medio del mar registradas con un altímetro y un nivel de mano. La circunferencia de la Cañada Coronados se graficó utilizando una cinta métrica y una brújula Brunton. Se tuvo cuidado de alinear los transectos medidos a lo largo del borde expuesto de la roca de la cubierta de caliza de coral alrededor de los márgenes de la cañada.

Cada transecto fue considerado como un censo estadístico lineal a fin de aprovechar todos los fósiles dentro de la roca de cubierta expuestos en sección transversal sobre las laderas de la cañada. Esto significa que la cinta métrica pasó directamente por encima o adyacente a los lugares donde los fósiles se observaban en perfil vertical para mostrar la posición de crecimiento potencial. Las observaciones se realizaron con respecto a las dimensiones de las colonias coralinas presentes, la densidad total de las colonias vecinas, la naturaleza del sustrato al cual se encontraban fijos los corales y la diversidad de otros invertebrados marinos asociados tanto con el sustrato colonizado por los corales como con la estructura de coral maduro. Estos datos se registraron por separado para cada transecto. La densidad de la cobertura coralina fue evaluada mediante la observación del número y tamaño de las colonias en proporción a la longitud de cada transecto. Una cobertura de 100% dentro de un cierto transecto significa que cada cabeza de coral tocó a su vecina adyacente en la cinta métrica; una cobertura de 50% significa que la mitad de la distancia en la cinta métrica estaba desprovista de corales.

La prueba ecológica más importante aplicada a los corales muestreados de la cinta métrica consistió en determinar si la colonia se conservó en su posición de crecimiento original. Para cada transecto se registró la altura máxima de las colonias conservadas en posición vertical. Se aplicaron criterios ecológicos similares a los invertebrados asociados al inspeccionar la evidencia de la posición de crecimiento original. Se registró el estado de los bivalvos fósiles en cuanto a la articulación y orientación de sus valvas, por ejemplo. En particular se buscaron invertebrados de hábitos incrustantes ya que éstos indican un crecimiento *in situ*. Se hizo una colección fotográfica extensa para ayudar a registrar estos datos y poder así dejar en el lugar los materiales fósiles a fin de proteger la integridad del Parque Nacional Bahía de Loreto.

La identificación de todos los corales fósiles estudiados en este trabajo como *P. panamensis* se basó en la revisión taxonómica de López-Pérez (2005). Para la identificación de los demás invertebrados fósiles asociados con los corales se



**Figura 1.** Península de Baja California y Golfo de California (México) mostrando los sitios de interés: (a) toda la península, (b) ampliación del cuadro que muestra las localidades sobre la costa del golfo de Baja California Sur y algunas de las islas con arrecifes coralinos del Pleistoceno (estrellas negras), y (c) mapa topográfico de Isla Coronados indicando la localización de un gran arrecife fósil. Los arrecifes fósiles de Bahía Coyote (cerca de La Paz) se muestran en el mapa grande. La estrella blanca en Cabo Pulmo indica la localización del principal arrecife vivo del golfo.

**Figure 1.** Baja California Peninsula and Gulf of California (Mexico) showing sites of interest: (a) entire peninsula, (b) inset enlarged to show localities on the gulf coast of Baja California Sur and some of its islands with Pleistocene coral reefs (black stars), and (c) topographic map of Isla Coronados marking the location of a large fossil coral reef. Note that the fossil reefs from Bahía Coyote (near La Paz) are shown on the larger map. The open star at Cabo Pulmo marks the locality of the gulf's major living reef.

capstone and other fossil invertebrates associated with the corals within the paleolagoon are the main subjects of this study.

A topographic map of Cañada Coronados was made based on elevations against mean sea level recorded using an altimeter and a hand level. The circumference of Cañada Coronados was mapped using a meter tape and a Brunton compass. Care was taken to align measured transects along the exposed edge of the coral-limestone cap rock around the margins of the canyon.

Each transect was treated as a statistical line census to take advantage of all fossils within the cap rock exposed in cross

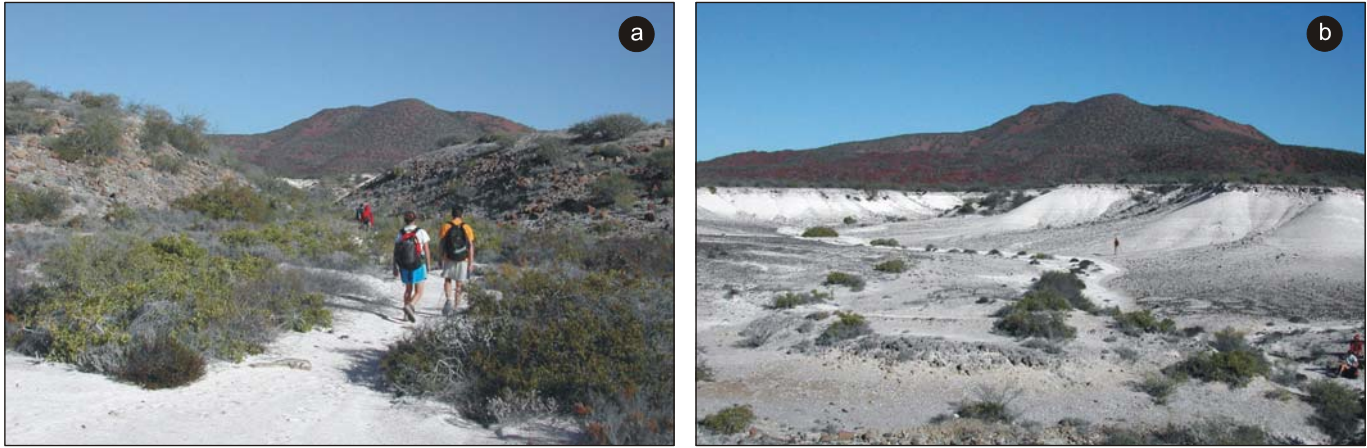


Figura 2. Vistas hacia el norte de la costa sur de Isla Coronados: (a) entrada a la Cañada Coronados y (b) lado oeste de la Cañada Coronados (las personas indican la escala), con el pico volcánico de la isla al fondo.

Figure 2. Views to the north from the south shore of Isla Coronados: (a) entrance to Cañada Coronados and (b) west side of Cañada Coronados (note figures for scale), with the island's volcanic peak in the background.

consultaron los trabajos taxonómicos de Durham (1950) y Brusca (1980).

Se recolectó una cabeza de coral que se sometió a pruebas de laboratorio para la determinación de edad. Se siguieron los procedimientos estándar usando un espectrómetro de masas de ionización térmica (TIMS) para determinar la pureza del contenido de aragonita y las cantidades de uranio y torio presentes (en partes por millón) a fin de derivar las razones  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  y  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ . El contenido de aragonita fue determinado por difracción de rayos X. Todas las razones son razones de actividad. Todos los errores calculados corresponden a  $2\sigma$ . Los métodos de series de uranio aplicados corresponden a los descritos por Ludwig *et al.* (1992) y las vidas medias consultadas son las presentadas por Cheng *et al.* (2000).

## Resultados

### *Dimensiones erosionales de la Cañada Coronados*

La intersección de dos amplios arroyos forma la cuenca abierta que ocupa la aquí llamada Cañada Coronados (fig. 3). Esta cuenca tiene una extensión de norte a sur de 210 m y de este a oeste de 185 m. Su desagüe fluye hacia el mar por una brecha en una cordillera de andesita en el lado sur de la cuenca. Según mediciones tomadas desde la parte superior de la cordillera de 7 m de altura, la apertura presenta una anchura de 25 m, la cual se reduce considerablemente al nivel del suelo al inclinarse las laderas de ambos lados una hacia otra. Se tendieron 30 segmentos de líneas con una longitud compuesta de 651 m utilizando una cinta métrica, a fin de circundar el margen de la cuenca mediante estaciones comenzando y terminando en la brecha. En el mapa topográfico los segmentos de línea numerados se dibujan a escala en sentido de las manecillas del reloj (fig. 3). El área comprendida dentro de los márgenes de la cuenca es de 1.6 ha.

section on the surface of canyon walls. This means that the tapeline passed directly over or adjacent to places where fossils could be viewed in vertical profile to show potential growth position. Observations were made with respect to the dimensions of coral colonies present, the overall density of neighboring colonies, the nature of the substrate to which colonies were affixed, and the diversity of other marine invertebrates associated both with the substrate colonized by the corals and the mature coral structure. These data were recorded separately for each transect. The density of coral coverage was evaluated by looking at the number and size of coral colonies in proportion to the length of each transect. Coverage at 100% within a given transect means that each coral head touched its adjacent neighbor on the tapeline; coverage at 50% means that half of the distance on the tapeline was devoid of corals.

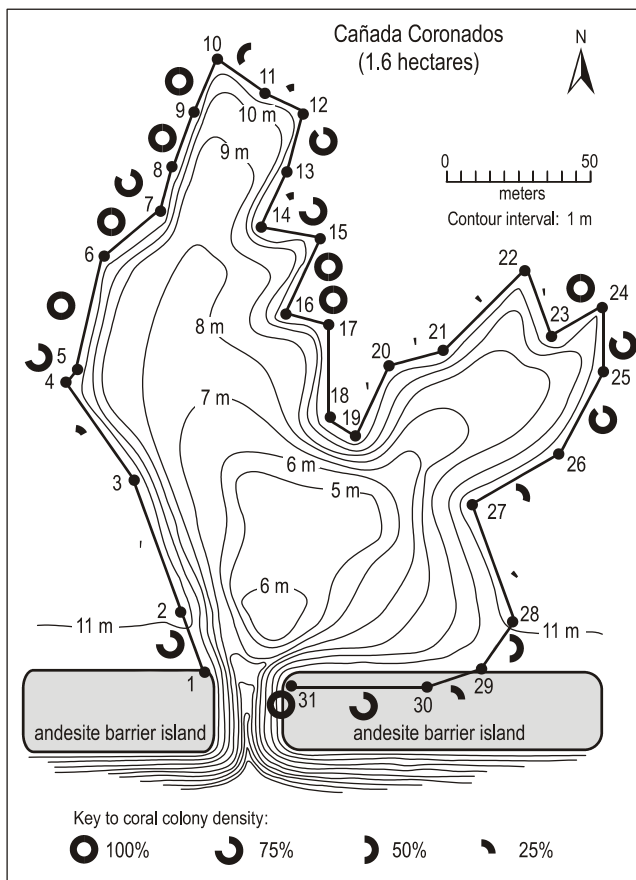
The most important ecological test applied to corals sampled from the tapeline was whether or not a colony was preserved in its original growth position. The maximum coral height for colonies preserved in an upright position was recorded for each transect. Similar ecological criteria were applied to associated invertebrates in checking evidence for original growth position. Status of fossil bivalves with respect to articulation and orientation of valves was noted, for example. In particular, invertebrates with an encrusting habit were searched for, because they indicate *in situ* growth. An extensive photographic collection was made to help record these data, which meant that fossil materials were left in place to protect the integrity of the Loreto Bay National Park.

Attribution of all fossil corals studied in this project to *P. panamensis* follows the taxonomic review by López-Pérez (2005). Identification of all other fossil invertebrates associated with the corals was made by consulting taxonomic references by Durham (1950) and Brusca (1980).

A single coral head was collected and sent out for laboratory analysis in order to make an age determination.

### Variaciones en el tamaño y densidad de las colonias

Las colonias coralinas de *P. panamensis* en los arrecifes fósiles de Isla Coronados presentan una forma de bouquet, con abundantes ramificaciones que se extienden hacia arriba y hacia afuera en un cuerpo cónico. En la isla también se encuentran otras especies de corales hermatípicos como *Pocillopora capitata*, *P. elegans*, *Psammocora stellata*, *Pavona clavus* y *P. gigantea*, pero *Porites panamensis* forma un conjunto monoespecífico dentro del área de la Cañada Coronados. En la tabla 1 se resumen los datos relativos a la altura y densidad de las colonias, recolectados de afloramientos laterales en la capa de caliza en el perímetro de la Cañada Coronados. Como se muestra en el mapa (fig. 3), la parte norte del perímetro de la cuenca presenta la mayor concentración de colonias coralinas. Alrededor de 22% de la circunferencia de la cuenca muestra la densidad máxima de cobertura coralina de 100%. Casi la mitad



**Figura 3.** Mapa topográfico de la Cañada Coronados. Los símbolos indican la localización y la densidad de las colonias de coral (*Porites panamensis*) preservadas en posición de crecimiento y muestreadas a lo largo de transectos numerados alrededor del perímetro de la cuenca de la cañada. La elevación en la parte superior de la superficie coralina es alrededor de 12 m por arriba del nivel medio del mar.

**Figure 3.** Topographic map of Cañada Coronados with symbols marking the location and density of coral colonies (*Porites panamensis*) preserved in growth position sampled along numbered transects around the perimeter of the canyon basin. Elevation at the top of the coral surface is about 12 m above mean sea level.

Standard laboratory practice was followed using a precision thermal-ionization mass spectrometer (TIMS) to determine the purity of aragonite content and the amount of uranium and thorium present (in parts per million) in order to derive ratios of  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ , and  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ . Aragonite content was determined by X-ray diffraction. All ratios are activity ratios. All errors calculated are  $2\sigma$ . The uranium-series methods applied conform to those outlined by Ludwig *et al.* (1992) and the half-lives consulted are those given by Cheng *et al.* (2000).

## Results

### Erosional dimensions of Cañada Coronados

The intersection of two broad arroyos forms the open basin occupied by Cañada Coronados, so named herein (fig. 3). This basin has a north-south extent of 210 m and an east-west extent of 185 m. The drainage exits seaward through a gap in an andesite ridge on the south side of the basin. As measured from the top of the 7-m high ridge, the opening is 25 m wide. The width of the gap is considerably reduced at ground level, because the walls on opposite sides of the gap slope towards each other. Thirty line segments with a composite length of 651 m were laid out by meter tape in order to encircle the basin margin through stations starting and ending at the gap. The numbered line segments are drawn to scale clockwise on the accompanying topographic map (fig. 3). The enclosed area within the basin margin is 1.6 ha.

### Variations in coral-colony size and density

Coral colonies of *P. panamensis* in the fossil reefs of Isla Coronados conform to a bouquet shape with multiple branches spreading upward and outward in a conical body. Other species of hermatypic corals such as *Pocillopora capitata*, *P. elegans*, *Psammocora stellata*, *Pavona clavus*, and *P. gigantea* occur elsewhere on the island, but *Porites panamensis* forms a monospecific aggregation within the area of Cañada Coronados. Data on colony height and colony density collected from side exposures in the limestone cap on the perimeter of Cañada Coronados are summarized for each of the 30 line segments listed in table 1. As shown by the map (fig. 3), the northern half of the basin perimeter shows the highest concentration of coral colonies. About 22% of the basin's circumference shows the maximum density of coral packing at 100%. Almost half of the basin's circumference (49%) demonstrates coral packing with density levels that reach a coverage of 75% or higher (table 1). The largest colonies occur between stations 5 and 8 on the west side of the basin. Corals there have a maximum height of 1.1 m and attained a maximum spread of branches through a diameter of 1.1 m. Based on a conservative estimate of one coral colony per square meter, the reef structure correlated within the Cañada Coronados basin would represent the coalescence of 13,000 colonies.

The inside margin of the andesite barrier is yet another zone where concentrations of corals occur packed closely

de la circunferencia (49%) presenta niveles de densidad que alcanzan una cobertura coralina de 75% o mayor (tabla 1). Las colonias más grandes se encuentran entre las estaciones 5 y 8 en el lado oeste de la cuenca, donde presentan una altura máxima de 1.1 m y un diámetro máximo de 1.1 m. Con base en una estimación moderada de una colonia de coral por metro cuadrado, la estructura arrecifal en la cuenca de la Cañada Coronados representa la amalgama de 13,000 colonias.

El margen interior de la barrera andesítica es otra zona donde las colonias de corales se encuentran agrupadas densamente en posición de crecimiento; sin embargo, las colonias son mucho más chicas con una altura media de 20 cm y típicamente crecen en hileras sobre una superficie rocosa muy empinada. Además, se encontraron corales fijos a la superficie de andesita inclinada dentro de la brecha. Esta relación indica que la brecha, que claramente sirve como un punto de desagüe para la cuenca hoy en día, también existió como un paso abierto entre una laguna anterior y las aguas del Golfo de California.

*Ecología de la colonización del arrecife*

Un pavimento de cantos rodados de andesita separa físicamente la capa de coral y la caliza subyacente compuesta por rodolitos fragmentados. Cerca del centro aproximado de la paleolaguna (entre las estaciones 18 y 19, fig. 3), la superficie pavimentada se encuentra a una elevación de 12 m por arriba del nivel medio del mar. Con base en mediciones directas a lo largo de la cinta métrica, los cantos rodados medianos y grandes tienden a ser planos, mientras que los guijarros presentan una forma más esférica. El tamaño de los clastos se incrementa hacia la parte posterior de la paleolaguna, donde los clastos de andesita más grandes que se midieron tuvieron dimensiones tales como 16 x 25 cm y 20 x 30 cm (entre las estaciones 9 y 10, fig. 3).

La biota asociada con la superficie pavimentada es claramente de agua somera a intermareal, según lo constatan las especies que actualmente habitan en el Golfo de California (Brusca 1980). Los elementos que se encuentran enterrados entre los cantos rodados medianos o fijos directamente a ellos incluyen una gama de algas calcáreas e invertebrados marinos, como lo indican los fósiles observados entre las estaciones 5 y 6 (fig. 3). Los fósiles que ahí se registraron incluyeron los gasterópodos herbívoros *Turbo fluctuosus* y *Nerita bernhardi*, el gasterópodo carnívoro *Acanthina tuberculata*, el bivalvo bisado *Modiolus capax* y abundancia de algas rojas coralinas incrustadas sobre guijarros de andesita (fig. 4a). Alguno de los rodolitos, con núcleos de grava, son grandes, de 6 a 9 cm en diámetro. Se registraron otros bivalvos bisados, incluyendo ejemplares articulados de *Arca pacifica* y *Barbatia reevseana*, en el horizonte de cantos rodados entre las estaciones 6 y 7 (fig. 3). El bivalvo grande *Periglypta multicostata* también se encuentra en esta zona entre los cantos de andesita. Al otro lado de la Cañada Coronados, entre las estaciones 22 y 23, se observaron ejemplares articulados de las conchas incrustantes

**Tabla 1.** Densidad, tamaño y fijación de las colonias coralinas expuestas sobre los márgenes de la cuenca de Cañada Coronados. Las líneas de los transectos numerados corresponden directamente al mapa de la cuenca (fig. 3).

**Table 1.** Density, size, and attachment of coral colonies exposed on the margins of the Cañada Coronados basin. Numbered transect lines correspond directly to the map of the basin (fig. 3).

Transect station	Coral coverage (%)	Maximum coral height (cm)	Hard substrate
1-2	75	36	+
2-3	2	15	-
3-4	15	15	-
4-5	70	35	+
5-6	100	110	+
6-7	100	95	+
7-8	80	75	+
8-9	100	60	+
9-10	100	30	+
10-11	35	25	-
11-12	10	20	-
12-13	90	28	-
13-14	10	18	-
14-15	75	25	+
15-16	100	28	+
16-17	100	45	+
17-18	0	-	-
18-19	0	-	-
18-19	0	-	-
19-20	3	22	-
20-21	3	22	-
21-22	5	25	-
22-23	3	30	+
23-24	100	35	+
24-25	85	30	+
25-26	90	30	+
26-27	30	24	+
27-28	5	30	-
28-29	50	rubble	-
29-30	25	30	+
30-31	75	25	+

together in growth position. In contrast, however, the colonies are much smaller with an average height of 20 cm and they grew more typically in tiers on a steeply inclined rock surface. In addition, corals were found attached to the inclined andesite surface within the gap. This relationship indicates that the gap, which clearly serves as a drainage point for the basin today, also existed as an open passage between a former lagoon and the open waters of the Gulf of California.

*Pseudochama janus* (fig. 4b) y *Chama mexicana* fijas a los cantos de andesita. En la misma zona también se encontraron pequeñas colonias de *Porites panamensis* fijas a los cantos de andesita (fig. 4c), así como un gran número de algas rojas coralininas nucleadas alrededor de los guijarros de andesita. Cerca de la parte central de la Cañada Coronados (de la estación 16 a la 19, fig. 3), el bivalvo *Codakia distinguenda* es el molusco dominante, observándose totalmente articulado y en posición de vida entre los cantos rodados medianos.

La biodiversidad dentro del arrecife es baja, así como también lo es la frecuencia de las especies no coralininas más comunes. El desarrollo de invertebrados marinos dentro de las ramas de *Porites panamensis* probablemente es limitado por el crecimiento cerrado de las frondas de coral dentro del arrecife. Rara vez se observan entre las ramas coralininas ejemplares articulados de los bivalvos *Modiolus capax* y *Barbatia reevseana*, así como del gasterópodo *Turbo fluctuosus*. También son escasos los tubos calcificados de gusano, pero se observan algunos ejemplares de hasta 7 cm de longitud pegados a las frondas de coral con una orientación vertical.

En los márgenes de la Cañada Coronados es común la fijación de colonias coralininas grandes al sustrato duro que ofrece el pavimento de cantos rodados. La superficie pavimentada está bien expuesta en sección transversal en alrededor de 60% del perímetro de la cuenca (tabla 1), y se estima moderadamente que no menos de 60% de los corales arrecifales se colonizaron directamente sobre las rocas andesíticas. Asimismo, se observaron dos ejemplos de crecimiento de coral sobre las conchas del gran gasterópodo *Strombus galeatus*, las cuales probablemente se encontraban vacías cuando se asentaron las larvas de coral. Casi todos los corales en el arrecife de la Cañada Coronados muestran evidencia clara de crecimiento

### Ecology of reef colonization

A pavement of andesite cobbles and small boulders physically separates the coral capstone from the underlying limestone with its pervasive fabric of crushed rhodolith debris. Near the approximate center of the paleolagoon (between stations 18 and 19, fig. 3), the paved surface is at an elevation of about 12 m above mean sea level. Based on direct measurements along the tapeline, small boulders and cobbles tend to be flat in shape, while pebbles tend to be more spherical. Clast size on the erosion surface increases toward the back of the paleolagoon, where the largest andesite clasts measured have dimensions such as 16 × 25 cm and 20 × 30 cm (between stations 9 and 10, fig. 3).

The biota associated with the paved surface is distinctly shallow-water to intertidal in composition, as verified by species found today living in the Gulf of California (Brusca 1980). Elements buried among cobbles or attached directly to cobbles include a range of calcareous algae and marine invertebrates, as illustrated by fossils found between stations 5 and 6 (fig. 3). The fossils recorded there include the herbivorous gastropods *Turbo fluctuosus* and *Nerita bernhardi*, the carnivorous gastropod *Acanthina tuberculata*, the byssate bivalve *Modiolus capax*, and abundant coralline red algae encrusted on andesite pebbles (fig. 4a). Some of the pebble-nucleated rhodoliths are large, from 6 to 9 cm in diameter. Additional byssate bivalves, including articulated examples of *Arca pacifica* and *Barbatia reevseana*, were recorded from the cobble horizon between stations 6 and 7 (fig. 3). The large bivalve *Periglypta multicostata* also occurs in this zone nestled among andesite cobbles. On the opposite side of Cañada Coronados, between stations 22 and 23, articulated examples of the encrusting jewel-box shells



**Figura 4.** Invertebrados fósiles asociados con el pavimento de cantos rodados alrededor de los márgenes de la Cañada Coronados: (a) en dirección de las manecillas del reloj desde la punta del lápiz, *Acanthina tuberculata* (gasterópodo), *Modiolus capax* (bivalvo), *Nerita bernhardi* y *Turbo fluctuosus* (gasterópodos), y guijarro de andesita incrustado con algas rojas coralininas (lápiz de 15 cm de largo); (b) bivalvo *Pseudochama janus* incrustado en un canto de andesita; y (c) coral *Porites panamensis* incrustado en un canto de andesita.

**Figure 4.** Fossil invertebrates associated with the cobble pavement around the margins of Cañada Coronados: (a) clockwise from the tip of the pencil, *Acanthina tuberculata* (gastropod), *Modiolus capax* (bivalve), *Nerita bernhardi* and *Turbo fluctuosus* (gastropods), and andesite pebble encrusted with coralline red algae (pencil is 15 cm in length); (b) bivalve *Pseudochama janus* encrusted on an andesite cobble; and (c) coral *Porites panamensis* encrusted on an andesite cobble.

vertical desde un punto discreto, como lo demuestra la vista inferior de una colonia típica (fig. 5a) de una localidad entre las estaciones 5 y 6. El crecimiento coralino adquirió una forma cónica, con las frondas exteriores extendidas hacia arriba en un ángulo de 35° o más. La fijación a las rocas por las colonias de corales que subsecuentemente crecieron para obtener esta forma (fig. 5b) es más característica en el lado oeste de la Cañada Coronados, entre las estaciones 4 y 7 y las estaciones 14 y 17 (fig. 3). En contraste, las colonias son de poca altura y más robustas en la parte posterior de la Cañada Coronados, entre las estaciones 9 y 11, donde se encuentran fijadas exclusivamente a cantos rodados grandes (fig. 5c).

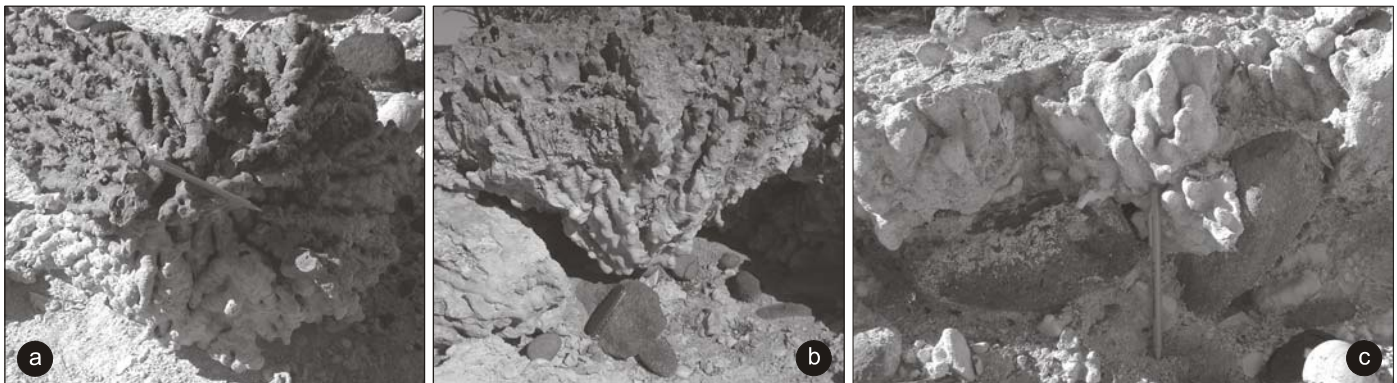
#### Edad del principal cuerpo arrecifal

Para la determinación de la edad se recolectó una cabeza de coral del arrecife principal. Con base en el análisis de las razones uranio/torio, una muestra de coral arrojó una edad calibrada de  $127 \pm 0.6$  ka. Un contenido de aragonita de 97% indica que el coral sólo experimentó una recristalización menor. Esta determinación es sustentada por el contenido de uranio de 3.19 ppm, el cual es típico para el intervalo de uranio que se encuentra en colonias vivas de coral. La razón  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  inicial retrocalculada de 1.1735 es mayor que la del agua de mar moderna, que es de 1.14 a 1.15 (Chen *et al.* 1986). Este resultado indica algún comportamiento en un sistema abierto durante la historia de postemergencia del coral y típicamente sesga la muestra de tal forma que la edad aparente es algo mayor que la edad real. Si se aplica el modelo de Gallup *et al.* (1994) para corregir este error, la edad real podría ser de alrededor de 121 ka, en vez de 127 ka. Esta edad concuerda con las edades de otros corales fósiles de California y Baja California (Muhs *et al.* 2002) y se correlaciona con el subestadio isotópico marino 5e. En este ejercicio no se consideraron las

*Pseudochama janus* (fig. 4b) and *Chama mexicana* are attached to andesite cobbles. Examples of small colonies of *Porites panamensis* also occur attached to andesite cobbles (fig. 4c) in the same area, as do large numbers of coralline red algae nucleated around andesite pebbles. Near the center of Cañada Coronados (from stations 16 to 19, fig. 3), the bivalve *Codakia distinguenda* is the dominant mollusk. It occurs fully articulated and in life position nestled among the cobbles.

Biodiversity within the reef is low, as is the frequency of even the most common non-coral species. The extent to which marine invertebrates lived within the branches of *Porites panamensis* probably was limited by tight growth of coral fronds within the reef. Articulated examples of the bivalves *Modiolus capax* and *Barbatia reevseana* occur only rarely among the coral branches, as does the gastropod *Turbo fluctuosus*. Calcified worm tubes also are rare, but some examples up to 7 cm in length occur cemented against coral fronds in a vertical orientation.

Attachment of large coral colonies to the hard substrate afforded by the cobble pavement is common around the margins of Cañada Coronados. The paved surface is well exposed in cross section around 60% of the basin perimeter (table 1), and it is a conservative estimate that no less than 60% of the reef corals colonized directly on andesite rocks. Two examples were also observed of coral growth on shells of the large gastropod *Strombus galeatus*. Presumably, these shells were empty when the settlement of coral larvae occurred. Almost all of the corals in the Cañada Coronados reef show clear evidence of upright growth from a discrete point, as demonstrated by the bottom view of a typical colony (fig. 5a) from a location between stations 5 and 6. Coral growth took on a conical shape with outer fronds sweeping upward at an angle of 35° or more. Attachment to rocks by coral colonies that subsequently grew to take on this shape (fig. 5b) is most characteristic on the west



**Figura 5.** Colonias fósiles de corales (*Porites panamensis*) fijadas al pavimento de cantos rodados en la Cañada Coronados: (a) vista de abajo mostrando la punta de fijación de una colonia coralina en las estaciones 5 y 6 (lápiz de 15 cm de largo), (b) colonia coralina en las estaciones 5 y 6 en posición de crecimiento fija a un canto rodado (navaja de 9 cm de largo), y (c) colonias coralinas de las estaciones 9 y 10 con ramas más cortas y robustas creciendo de cantos rodados grandes (lápiz para escala).

**Figure 5.** Fossil coral colonies (*Porites panamensis*) affixed to the cobble/boulder pavement in Cañada Coronados from stations: (a) bottom view showing attachment tip of a coral colony from stations 5 and 6 (pencil is 15 cm long), (b) coral colony from stations 5 and 6 in growth position attached to a large cobble (pocket knife is 9 cm long), and (c) coral colonies from stations 9 and 10 with shorter and more robust branches growing from boulders (pencil for scale).



innovaciones recientes de Thompson y Goldstein (2005) en el fechado de uranio y torio en corales, lo que resulta en la detección de los ciclos del nivel del mar relacionados con los parámetros suborbitales, aunque sus técnicas podrían llevar a una mayor precisión de futuras correlaciones en el Golfo de California.

#### *Extensión del arrecife y orientación geográfica*

La estructura coralina en la Cañada Coronados no puede seguirse de forma continua desde el lado este hasta el lado oeste de la cuenca. Esto se demuestra por la ausencia o muy baja densidad de corales (<5%) entre las estaciones 17 y 23 (tabla 1). El terreno elevado que actualmente separa las vertientes este y oeste de la cuenca debió haber existido desde hace 121,000 a 127,000 años, cuando la colonización del coral alcanzó su apogeo. La caliza de coral rellena las suaves depresiones que se desarrollaron en el suelo de la laguna original. No es un cuerpo tabular coextensivo, sino más bien sobresale de lugar a lugar. Se presume que el evento que trajo un influjo de cantos rodados de andesita de las laderas bajas del volcán para cubrir los sedimentos carbonatados sueltos en la laguna sucedió como resultado de una gran tempestad de lluvia. Una tormenta de menor intensidad fue responsable del depósito subaéreo de restos de andesita sobre el fondo de la cuenca en tiempos recientes. Este tipo de evento es erosivo por naturaleza, pero también sigue los contornos de la tierra o del fondo de una laguna somera. Una explicación alternativa sería que la distribución de cantos rodados de basalto se formó como un depósito de rezago relacionado con la erosión de terrazas anteriores.

#### **Discusión**

La discordancia sobre la cual se asentaron las colonias de *P. panamensis* alrededor de la Cañada Coronados probablemente se inclinaba hacia el mar en un ligero ángulo de 1–2°. Como se observa mejor entre las estaciones 6 y 10 (tabla 1), existe un cambio gradual en la altura de la colonia entre el margen hacia tierra y el centro de la paleolaguna, así como una disminución gradual de cantos rodados grandes a medianos sobre la superficie de discordancia en la misma dirección. Estos cambios sugieren pequeñas diferencias en las condiciones de crecimiento a lo largo de una superficie inclinada. Los datos de la cobertura coralina también muestran que el arrecife principal dentro de la paleolaguna nunca se unió con las colonias que se asentaron en la parte superior y en los lados interiores de la cordillera de andesita (fig. 3). Es posible que el agua haya alcanzado demasiada profundidad entre la cordillera y el margen exterior del crecimiento coralino denso dentro de la paleolaguna o que la arena carbonatada en esa zona nunca haya sido estabilizada por los cantos rodados de andesita.

Los arrecifes de *P. panamensis* en la isla no son exclusivos de la Cañada Coronados. También se encuentran distribuidos de forma irregular dentro del área sombreada en el mapa de

side of Cañada Coronados, between stations 4 and 7 and stations 14 and 17 (fig. 3). In contrast, coral colonies are low and squat in shape with thicker branches at the rear of Cañada Coronados (between stations 9 and 11). There, they occur exclusively attached to small boulders (fig. 5c).

#### *Age of the main reef body*

A single coral head was collected from the main reef for age determination. Based on analysis of uranium/thorium ratios, a sample from the coral yielded a calibrated age of  $127 \pm 0.6$  ka. An aragonite content of 97% indicates that the coral experienced only minor recrystallization. This determination is supported by the uranium content of 3.19 ppm, which is typical for the range of uranium found in living colonial corals. The back-calculated initial  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  of 1.1735 is higher than that in modern seawater, which is 1.14 to 1.15 (Chen *et al.* 1986). This result indicates some behavior in an open system during the coral's post-emergence history, and typically biases the sample such that the apparent age is somewhat older than the actual age. If the model by Gallup *et al.* (1994) is applied to correct for this error, the true age could be about 121 ka, rather than about 127 ka. This age is in good agreement for the ages of fossil corals from elsewhere in California and Baja California (Muhs *et al.* 2002), and correlates with marine isotope substage 5e. Recent innovations in uranium/thorium dating of corals by Thompson and Goldstein (2005) resulting in the detection of sea-level cycles related to suborbital parameters were not taken into consideration in this exercise, although their techniques could improve the accuracy of future correlations in the Gulf of California.

#### *Reef extent and geographic orientation*

The coral structure at Cañada Coronados cannot be followed continuously from the east to the west sides of the basin. This is demonstrated by the absence or very low density of corals (<5%) between stations 17 and 23 (table 1). The high ground that presently separates the east and west sides of the basin must have existed from 121,000 to 127,000 years ago, when coral colonization reached its zenith. The capping coral limestone fills in gentle depressions that developed on the floor of the original lagoon. It is not a co-extensive tabular body, but pinches out from place to place. The event that brought an influx of andesite boulders and cobbles from the lower slopes of the volcano to clad loose carbonate sediments in the lagoon is interpreted to have occurred as the result of a major rainstorm. A storm of lesser intensity was responsible for the subaerial deposition of andesite debris across the floor of the basin in recent times. Such an event is erosive by nature, but also follows the contours of the land or a shallow lagoon bottom. An alternative explanation is that the distribution of dense basalt cobbles formed as lag deposit related to the erosion of former terraces.

Isla Coronados (fig. 1c). Por ejemplo, otra zona que presenta un desarrollo arrecifal extensivo se sitúa aproximadamente 250 m tierra adentro de la ensenada grande en el lado oeste de la isla. Al igual que los arrecifes alrededor de la Cañada Coronados, el crecimiento coralino subsiguió los sedimentos carbonatados dominados por restos de rodolitos; sin embargo, la discordancia entre estas dos unidades no es del todo aparente. Todas las colonias grandes de *P. panamensis* en la isla, conservadas en posición de crecimiento, probablemente vivieron durante la última época interglacial correlacionable con el estadio isotópico 5e, sin ser ecológicamente cogenéticas. Habría de realizarse un programa de perforaciones someras en la isla para determinar el grado de distribución de los arrecifes coralinos y hasta qué grado están éstos físicamente integrados; no obstante, tal programa sería totalmente inapropiado en un parque nacional.

Una serie de terrazas marinas que bordean el terreno elevado en el extremo sudoriental de la isla muestra material coralino externo elevado por encima de la Cañada Coronados. Se registraron varias terrazas entre 16 y 25 m sobre el nivel medio del mar, probablemente datando de momentos más tempranos del Pleistoceno. Su presencia sugiere que la isla experimentó un levantamiento episódico. Es posible afirmar con certeza que todos los depósitos fósiles de coral en Isla Coronados están limitados a su parte sur, del lado de sotavento del volcán que los protege de los vientos predominantes del norte y su oleaje costero asociado.

#### *Comparación con otros arrecifes fósiles del Golfo de California*

En la tabla 2 se resume la información sobre el tamaño, la edad, la orientación geográfica y la diversidad de la fauna asociada de varias colonias que presentan corales del Pleistoceno tardío en posición de crecimiento en diversas localidades de la parte baja del Golfo de California. La mitad de estas colonias comparten una orientación sureña. El único que mira al norte hacia el mar es un arrecife del Pleistoceno tardío en Punta El Bajo (Ransom 2000). Todas las demás colonias con orientación hacia el este u oeste se encuentran en ambientes protegidos de los fuertes vientos del norte que actualmente predominan durante los meses de invierno. Debido a los pocos o nulos datos disponibles en la literatura publicada para algunos sitios, aquí se describen en mayor detalle con base en conocimientos personales.

El arrecife fósil de Punta Chivato (fig. 1b) se encuentra resguardado del lado sur de un promontorio y ha sido estudiado extensamente en relación a la paleoecología (Ransom 2000, Johnson 2002). Aunque las colonias son pequeñas (de 15 cm de altura en promedio), una sucesión de por lo menos tres generaciones de *P. panamensis* (= *P. californica*) es dividida por un arroyo que atraviesa el centro del arrecife por una distancia de 70 m. La base del arrecife yace sobre un plano inclinado a 6° que asciende de 7.5 a 10 m por arriba del nivel del mar. El extremo del plano inclinado está compuesto de

## Discussion

The unconformity on which colonies of *P. panamensis* settled around Cañada Coronados was probably tilted seaward to the south at a slight angle of 1–2°. Best observed between stations 6 and 10 (table 1), there is a gradual change in colony height between the landward shore and the center of the paleolagoon and a gradual decrease from small boulders to small cobbles on the unconformity surface in the same direction. Small differences in growing conditions along an inclined surface are implied by these changes. Data on coral coverage also show that the main reef within the paleolagoon never merged with the coral colonies that settled on the top and inward flanks of the andesite ridge (fig. 3). Perhaps the water was too deep between the ridge and the outer margin of dense coral growth within the paleolagoon or carbonate sand in that area was never stabilized by andesite cobbles.

*Porites panamensis* reefs are not exclusive to Cañada Coronados on the island. They have a spotty exposure elsewhere within the larger region shaded on the map of Isla Coronados (fig. 1c). For example, another area with extensive reef development is situated approximately 250 m inland from the large embayment on the west side of the island. Like the reefs around Cañada Coronados, coral growth succeeded carbonate sediments dominated by rhodolith debris. The unconformity between these two units, however, is not readily apparent. All large *P. panamensis* colonies on the island preserved in growth position probably lived during the last interglacial epoch correlated with isotope stage 5e, but not strictly as coeval coral beds. A program of shallow drilling on the island would be required to appraise the extent to which reef corals are distributed and to what degree various reefs are physically integrated. However, such drilling would be inappropriate in a national park.

A series of marine terraces that fringe the uplands in the southeast corner of the island feature extraneous coral material at elevations above Cañada Coronados. Several terraces were recorded at elevations between 16 and 25 m above mean sea level, probably dating from earlier Pleistocene times. Their presence implies that the island experienced episodic uplift. It can be claimed with certainty that all fossil coral deposits on Isla Coronados are restricted to the south side of the island, under the volcano's leeward protection from prevailing northerly winds and associated coastal wave shock.

#### *Comparison with other Gulf of California fossil reefs*

Information on coral-colony size, age, geographic orientation, and associated faunal diversity is summarized in table 2 for several localities in the lower Gulf of California that feature Late Pleistocene corals preserved in growth position. Half of these aggregations share in common a southern exposure. A Late Pleistocene reef at Punta El Bajo (Ransom 2000) is the only one that faces seaward to the north. Whether facing east or west, all others occur in settings that are sheltered from the strong northerly winds that currently prevail during the winter

**Tabla 2.** Datos comparativos del tamaño, edad, orientación geográfica y diversidad de la fauna asociada de las colonias coralinas en varios sitios de la parte baja del Golfo de California (ver fig. 1 para su localización).**Table 2.** Comparative data on coral-colony size, age, geographic orientation, and associated faunal diversity at localities in the lower Gulf of California (see fig. 1 for map locations).

Location	Coral height (cm)	Age (ka)	Geographic orientation	Assoc. species diversity	Reference
Punta Chivato	15	117.9	South	50	Ransom (2000), Johnson (2002)
Punta San Antonio	18	Late Pleistocene	East	18	Johnson and Ledesma-Vázquez (1999)
Punta El Bajo	46	80/105	North	8	Ransom (2000), Mayer and Vincent (1999)
Isla Coronados	110	121	South	4	This study
Balandra, Isla Carmen	15	?	East	Low	Durham (1947)
Isla Carmen, south end	45	Late Pleistocene	South	2	This study
Isla San Diego	?	Late Pleistocene	South		Squires (1959)
Bahía Coyote	50	109/209	East	8+	DeDiego-Forbis <i>et al.</i> (2004)
Isla Espíritu Santo	?	102/46	East-west	Moderate	Halfar <i>et al.</i> (2001)
Isla Cerralvo	?	Late Pleistocene	South	32	Emerson (1960)

grava de río del Pleistoceno imbricada con cantos rodados medianos y guijarros. En el terreno elevado se presenta una transición hacia una superficie erosional sobre caliza del Plioceno, por lo que las colonias coralinas se fijaron directamente a los clastos de andesita o a un substrato duro de caliza. No se asocia ningún otro invertebrado marino con el conglomerado basal. Entre las ramas de los corales se encuentra una fauna diversa de 50 especies de conchas. Los bivalvos se observan totalmente articulados *in situ*, siendo *Chione californiensis* y *Divalinga eburnean* los más abundantes. Los bivalvos *Barbatia reevseana* y *Trigoniocardia biangulata* ocurren en menor abundancia (la mitad), y los gasterópodos *Olivella gracilis* y *Turbo fluctuosus* son aún menos comunes. El gasterópodo *Architectonica nobilis* se encuentra pero es poco común. Utilizando un cuadrante de 25 cm por lado para cada muestra, un censo basado en 22 muestras arrojó una diversidad media de 12 especies por cuadrante. Barrenos de prueba muestran que el arrecife ocupaba un área de alrededor de 7 ha. El análisis de laboratorio de isótopos radiométricos le asigna al arrecife una edad de  $117.9 \pm 0.6$  ka.

Johnson y Ledesma-Vázquez (1999) han descrito una paleolaguna inusualmente orientada hacia el este que conserva un litoral rocoso de más de 400 m de largo en la Bahía San Antonio, cerca de San Nicolás (fig. 1b). En el límite occidental de la paleolaguna se encuentra una ensenada de aproximadamente 750 m<sup>2</sup> de área, donde sólo una generación de *P. panamensis* alcanzó una densidad alta (Ransom 2000). La altura máxima de la colonia es de 18 cm. La ensenada prácticamente no es perturbada por el oleaje, y en la colonia predomina una morfología masiva “rotunda”. Asociada con los corales de la ensenada existe una fauna de 18 invertebrados marinos. Entre los moluscos más abundantes se encuentran los gasterópodos *Turbo fluctuosus* y *Neorapana muricata*, así como el bivalvo *Chione tumens*. Utilizando un cuadrante de 25 cm por lado para cada muestra, un censo basado en ocho muestras

months. Because few or no details are available in the published literature for some localities, they are described here in greater detail on the basis of personal familiarity.

Sheltered on the south side of a protective promontory, the fossil reef at Punta Chivato (fig. 1b) has been studied extensively with respect to paleoecology (Ransom 2000, Johnson 2002). Although colonies are small (15 cm in height, on average) a succession of at least three generations of *P. panamensis* (= *P. californica*) is dissected by an arroyo that cuts through the reef's center for a distance of 70 m. The base of the reef rests on a 6° incline that rises from 7.5 to 10 m above sea level. The toe of the incline consists of Pleistocene river gravel with imbricated cobbles and pebbles. Upslope, there is a transition to an erosion surface on Pliocene limestone. Therefore, settlement of coral colonies attached directly to andesite clasts or a limestone hardground. No other marine invertebrates are directly associated with the basal conglomerate. A diverse fauna of 50 shelly species occurs among the coral branches. Bivalves are fully articulated *in situ*, the most abundant of which are *Chione californiensis* and *Divalinga eburnean*. Less abundant (by half) are the bivalves *Barbatia reevseana* and *Trigoniocardia biangulata*. Somewhat less common are the gastropods *Olivella gracilis* and *Turbo fluctuosus*. The gastropod *Architectonica nobilis* is present, but rare. Using a quadrant 25 cm on a side for each sample, a census based on 22 samples yielded an average diversity of 12 species per quadrant. Test pits show that the reef occupied an area of about 7 ha. Laboratory analysis for radiometric isotopes dates the reef at  $117.9 \pm 0.6$  ka.

Unusual for its east-facing orientation, a paleolagoon described by Johnson and Ledesma-Vázquez (1999) preserves a rocky shoreline more than 400 m long at Bahía San Antonio near San Nicolás (fig. 1b). A cove approximately 750 m<sup>2</sup> in area occurs at the west termination of the paleolagoon, where a single generation of *P. panamensis* achieved high density

arrojó una diversidad media de 12 especies por muestra. Aunque no se han fechado los corales de esta localidad por medio de isótopos radiométricos, con base en una correlación física con las terrazas marinas adyacentes a la paleolaguna se le asigna una edad del Pleistoceno tardío de la última época interglacial (Johnson y Ledesma-Vázquez 1999).

A menos de 3 km al oeste de Isla Coronados, Punta El Bajo (fig. 1b) presenta un litoral rocoso de 50 m de largo orientado hacia el norte, con un arrecife del Pleistoceno tardío (Ransom 2000). *Porites panamensis* (= *P. californica*) es el principal arrecife coralino, pero la morfología robusta de sus colonias es distinta. Las ramas individuales de hasta 10 cm de largo tienen forma de maza, con una base delgada que se ensancha y forma una fronda amplia en la punta. Una sola generación de corales alcanzó una altura media de 46 cm y una circunferencia de 46 cm. Pocos corales se fijan a los clastos de andesita, y la mayoría se asientan directamente sobre un substrato duro de caliza. Aproximadamente la mitad de las colonias presenta un crecimiento vertical, mientras que la otra mitad se inclina 30° o más con respecto a la vertical. La biodiversidad total de los invertebrados marinos asociados con este arrecife es baja. Utilizando un cuadrante de 25 cm de lado para cada muestra, un censo basado en 11 muestras arrojó una diversidad media de menos de cuatro especies por cuadrante. Sólo ocho especies exclusivas de los corales se encuentran asociadas con el arrecife, siendo la más abundante el gasterópodo *Turbo fluctuosus*. Los bivalvos más comunes son *Chione californiensis*, *Barbatia reevseana* y *Codakia distinguenda*. Aunque todavía no se han fechado los corales de esta localidad mediante isótopos radiométricos, Mayer y Vincent (1999) intentaron encontrar la correspondencia entre la secuencia de terrazas marinas en la cuenca de Loreto y los estadios isotópicos marinos normales. Dependiendo de la tasa de levantamiento local que se acepte, se puede correlacionar el arrecife de Punta El Bajo con el subestadio isotópico 5a (80,000 años) o con el 5c (105,000 años).

Durham (1947, 1950) describió varios arrecifes coralinos compuestos de *P. panamensis* (= *P. californica*) de distintos sitios en Isla Carmen. Un sitio importante es la localidad A3534 en Puerto Balandra, una bahía orientada hacia el oeste en el lado noroccidental de la isla (fig. 1b). La bahía es pequeña (menor que 0.5 km<sup>2</sup>) y tiene una apertura angosta al estrecho de Isla Carmen que la convierte en un lugar muy resguardado. La roca arrecifal tiene un espesor de 6 m y consiste de múltiples generaciones de colonias (15 cm de altura, en promedio) preservadas en posición de crecimiento. Aunque aparentemente las generaciones sucesivas de corales colonizaron una encima de la otra, un talud extenso en la base del afloramiento (cerca del nivel del mar) oculta las condiciones bajo las cuales se fijaron las primeras colonias. Durham (1947, p. 12) describe las capas de corales como "interestratificadas con lentes ocasionales de fósiles de moluscos". Dos de los autores de esta contribución (MEJ y RALP) visitaron este sitio en 2003 y encontraron gran densidad de colonias coralinas con poco o ningún indicio de fauna de conchas asociadas dentro o entre las capas discretas. Durham (1947, 1950) le asignó a este

(Ransom 2000). Maximum colony height is 18 cm. Little or no wave agitation disturbed the cove, where the predominant colony shape developed as a massive "rotund" morphology. A fauna of 18 marine invertebrates is associated with the cove corals. Among the most abundant molluscs are the gastropods *Turbo fluctuosus* and *Neorapana muricata*, as well as the bivalve *Chione tumens*. Using a quadrant 25 cm on a side for each sample, a census based on eight samples yielded an average diversity of 12 species per sample. The corals from this locality have not been dated using radiometric isotopes, but the age of the paleolagoon is regarded as Late Pleistocene from the last interglacial epoch based on physical correlation with adjoining marine terraces (Johnson and Ledesma-Vázquez 1999).

Less than 3 km west of Isla Coronados, Punta El Bajo (fig. 1b) features a north-facing rocky shoreline with a 50-m-long exposure that features a Late Pleistocene reef (Ransom 2000). *Porites panamensis* (= *P. californica*) is the primary reef coral, but the robust morphology of its colonies is distinct. Up to 10 cm in length, individual branches are club-shaped with a slender base that broadens into a wide frond at the tip. A single generation of corals achieved an average colony height of 46 cm and colony girth of 46 cm. Few corals are attached to andesite clasts and most sit directly on a limestone hardground. Approximately half of the colonies are upright in growth position, but the other half are tilted 30° or more from an upright position. The overall biodiversity of marine invertebrates associated with this reef is low. Using a quadrant of 25 cm on a side for each sample, a census based on 11 samples yielded an average diversity of less than four species per quadrant. Only eight species exclusive of the corals are affiliated with the reef, the most abundant of which is the gastropod *Turbo fluctuosus*. The most common bivalves are *Chione californiensis*, *Barbatia reevseana*, and *Codakia distinguenda*. The corals at this locality have not been dated using radiometric isotopes, but Mayer and Vincent (1999) attempted to fit the sequence of marine terraces in the Loreto Basin to the standard marine isotope stages. Depending on what rate of local uplift is accepted, the Punta El Bajo reef may be equated with isotope substage 5a (80,000 years) or 5c (105,000 years).

Durham (1947, 1950) described coral reefs composed of *P. panamensis* (= *P. californica*) from several localities on Isla Carmen. A significant site is locality A3534 at Puerto Balandra, a west-facing bay on the northwest side of the island (fig. 1b). The bay is small (less than 0.5 km<sup>2</sup>) and has a narrow opening to the Carmen Passage that makes it a highly sheltered place. The reef rock is 6 m in thickness and consists of multiple generations of colonies (15 cm in height, on average) preserved in growth position. While it is clear that successive generations of corals colonized on top of one another, an extensive talus at the base of the outcrop exposure (near sea level) conceals the conditions under which the earliest colonies were attached. Durham (1947, p. 12) describes coral layers as "interbedded with occasional lenses of molluscan fossils". Two of the present authors (MEJ and RALP) visited this site in 2003 and a

depósito una edad de Pleistoceno tardío; sin embargo, los corales de esta localidad no han sido fechados por isótopos radiométricos. Se encontraron dos montículos adicionales de *Porites* en Puerto Balandra en posición lateral, lo que indica un desarrollo discontinuo sin estratos intermedios. Una edad correspondiente al Pleistoceno tardío parece ser lo más probable, pero esto necesita comprobarse.

También en 2003, dos de nosotros (MEJ y RALP) visitaron las acumulaciones de fósiles de *P. panamensis* en la costa sur protegida de Isla Carmen (fig. 1b). Se observaron corales ramificados preservados en posición de crecimiento sobre la costa al nivel del mar, así como tierra adentro a 11 m por encima del nivel del mar. Las colonias expuestas sobre un plano de estratificación en la costa tienen un diámetro de hasta 60 cm y se presentan como una sola generación fija a un sustrato duro de caliza. Por lo menos dos generaciones están expuestas transversalmente a una elevación de 11 m. El crecimiento ocurrió sobre un sustrato de fragmentos sueltos de coral, aunque algunas colonias de hasta 45 cm de altura se encuentran fijadas a conchas desarticuladas del ostión espinoso *Spondylus princeps*. No hay muchos invertebrados fósiles asociados con esta capa de coral masiva, y sus restos más comunes son tubos de gusano de 10 a 15 cm de longitud fijados a lo largo de las ramas coralinas.

Bahía Coyote se localiza a unos 70 km al norte de La Paz (fig. 1a), donde una ensenada del Pleistoceno protege estratos extensivos de colonias ramificadas de *P. panamensis*. A una distancia de 15 km se encuentran más de media docena de lugares con densas estructuras de coral que han sido descritas por DeDiego-Forbis *et al.* (2004). Todas se sitúan al sur de la gran delta conglomerática en forma de abanico en Punta Coyote que se proyecta hacia el este en el Golfo de California. Las capas de coral son densas donde la colonización se aprovechó de los canales erosionados en el Miembro Cerro Colorado, la Formación El Cien del Mioceno inferior. Los corales preservados en posición de crecimiento “yacen directamente sobre arena gruesa bioclástica, restos de ostión y cantos esparcidos” (DeDiego-Forbis 2004, p. 34). Las colonias de *Porites* de 25 a 50 cm de alto se presentan en acumulaciones masivas con múltiples generaciones que pueden alcanzar un grosor de 8 m. Las fotografías de los afloramientos muestran una mínima infiltración de invertebrados de conchas en las capas masivas de *Porites* (figs. 4, 6 en DeDiego-Forbis 2004).

Según DeDiego-Forbis *et al.* (2004), el morfotipo típico de *Porites* de una estructura abierta no reforzada por algas coralinas sugiere que los sistemas fueron incapaces de tolerar la fuerza de las olas rompientes. Esta observación es válida para todas las localidades coralinas del Pleistoceno comparadas en la tabla 2, con excepción de Punta El Bajo.

#### Comparación con arrecifes fuera del Golfo de California

La colonización y el crecimiento de un arrecife coralino sobre un sustrato duro de arenisca se representan en la discordancia entre los miembros Cape Burney y Bootenall de

strong impression was made by the high density of coral colonies with little or no trace of an associated shelly fauna within or between discrete layers. Durham (1947, 1950) assigned a Late Pliocene age to this deposit, but the corals at this locality have not been dated using radiometric isotopes. We found two additional *Porites* mounds at Balandra in lateral positions that implied discontinuous development with no intervening strata. A Late Pleistocene age appears most likely, but remains to be tested.

Also in 2003, two of us (MEJ and RALP) visited fossil accumulations of *P. panamensis* on the sheltered south shore of Isla Carmen (fig. 1b). Branching corals preserved in growth position occur on the coast at sea level and inland 11 m above sea level. Colonies exposed on a bedding plane at the coast are up to 60 cm in diameter. They occur as a single generation directly attached to a limestone hardground. At least two generations of colony growth are exposed in cross section at the 11-m elevation. Growth occurred on a substrate of loose coral fragments, although some colonies up to 45 cm in height are attached to disarticulated shells of the spiny oyster *Spondylus princeps*. Fossil invertebrates associated with this massive coral bed are sparse, the most prolific remains being worm tubes 10–15 cm in length cemented along coral branches.

Bahía Coyote is an area located about 70 km north of La Paz (fig. 1a), where a Pleistocene embayment sheltered extensive beds of branching *P. panamensis* colonies. Dense coral build-ups described by DeDiego-Forbis *et al.* (2004) occur in more than a half-dozen spots over a distance of 15 km. All are situated south of the large, conglomeritic fan delta at Punta Coyote that projects eastward into the Gulf of California. The coral beds are thick where colonization took advantage of channels eroded in the Cerro Colorado Member, El Cien Formation from the Lower Miocene. Corals preserved in growth position “rest directly on coarse bioclastic sand, oyster debris, and sparse cobbles” (DeDiego-Forbis 2004, p. 34). *Porites* colonies 25–50 cm in height occur in massive accumulations with multiple generations that may attain a thickness of 8 m. Outcrop photographs show that infiltration by shelly invertebrates was minimal in the massive *Porites* beds (figs. 4, 6 in DeDiego-Forbis 2004).

As argued by DeDiego-Forbis *et al.* (2004), the typical morphotype of *Porites* as an open framework not reinforced by coralline algae suggests that the structures were unable to tolerate breaking waves. This observation is valid for all the Pleistocene coral localities compared in table 2, except for Punta El Bajo.

#### Comparison with reefs outside the Gulf of California

Colonization and growth of a coral reef on a sandstone hardground is represented at the disconformity between the Cape Burney and Bootenall members of the Upper Pleistocene Tamala Formation in western Australia (Johnson *et al.* 1995). Ridges between tidal troughs eroded in the sandstone (Cape Burney Member) initially were encrusted by coralline red

la Formación Tamala del Pleistoceno superior en Australia occidental (Johnson *et al.* 1995). Las cordilleras entre las pozas de marea erosionadas en la arenisca (Miembro Cape Burney) inicialmente estaban incrustadas por algas calcáreas coralinas, el coral *Rhizotrochus tuberculatus*, ostiones pequeños, gusanos serpulidos y gasterópodos verméticos. Asociada con el sustrato duro, en forma de alfombras de conchas, se encuentra una fauna dominada por una docena de especies de moluscos típicos de las costas rocosas de Australia. Los gasterópodos *Turbo intercostalis* y *T. torquatus* son los elementos más prolíficos dentro de las cortinas de conchas que representan la base de la caliza (Miembro Bootenall). La roca arrecifal sobreyacente presenta un grosor máximo de más de 2 m y es dominada por colonias grandes y frondosas de *Acropora* sp. preservadas en posición de crecimiento. Sólo en los corales se encuentra una fauna fósil de 28 especies marinas de invertebrados dentro del arrecife. Particularmente abundantes dentro del arrecife se observan bivalvos como *Glycymeris radians* y *Brachiodontes ustulatus*, así como gasterópodos como *Thais orbita* y *Oliva ovilva*, aunque éstos están escasamente representados en las cortinas de conchas. Por medio de un análisis de resonancia paramagnética electrónica de una muestra de coral se ha relacionado el desarrollo arrecifal con el estadio isotópico 5e (Johnson *et al.* 1995).

La colonización de una superficie erosional de ondulada a plana por colonias de corales y el subsiguiente establecimiento de un arrecife de coral dio origen al Miembro Cockburn Town de la Formación Grotto Beach del Pleistoceno en San Salvador, en las Bahamas (Wilson *et al.* 1998). La discordancia separa dos unidades de caliza. La unidad inferior presenta una superficie que trunca escombros de *Porites* y corales con forma de domo *in situ*. La superficie se encuentra muy perforada por el bivalvo *Gastrochaenolites torpedo* y esponjas cliónidas, así como incrustada por algas rojas coralinas, gusanos serpulidos y gasterópodos verméticos. Se han documentado corales con forma de domo tales como *Diploria strigosa* y *Montastrea annularis*, así como *Mancinia* sp. incrustando directamente sobre la superficie erosional (fig. 8 en Wilson *et al.* 1998). El fechado de los corales por debajo y encima de la discordancia mediante isótopos de uranio y torio indica que sucedieron fluctuaciones en el nivel del mar hace alrededor de 125–124 ka, correlacionables con el subestadio isotópico 5e.

Independientemente de si las estructuras representadas por el fósil *Porites* que se encuentran esparcidas en la parte baja del Golfo de California (tabla 2) se consideran o no arrecifes verdaderos, éstas albergaron la misma gama de invertebrados que otros arrecifes resistentes al oleaje. Esto es demostrado por las similitudes entre la fauna fósil del arrecife de *Acropora* en Australia occidental y las estructuras de *Porites* en el Golfo de California. El bivalvo *Barbatia reevseana* de los agregados de *Porites* en el golfo tiene su contraparte en *Brachiodontes ustulatus* de Australia occidental. Ambas conchas tienen un perfil de mejillón y ambas utilizan filamentos del biso para sujetarse a superficies duras. Asimismo, las conchas de *Turbo* están bien representadas en los agregados coralinos de Baja

algae, small cup corals (*Rhizotrochus tuberculatus*), small oysters, serpulid worms, and vermetid gastropods. A fauna dominated by a dozen mollusk species typical of Australian rocky shores is associated with the hardground as shell drapes. The gastropods *Turbo intercostalis* and *T. torquatus* are the most prolific elements in the shell drapes that represent the base of the limestone (Bootenall Member). The overlying reef rock has a maximum thickness of more than 2 m and is dominated by large, frondose colonies of *Acropora* sp. preserved in growth position. Exclusive of the corals, a fossil fauna of 28 marine invertebrate species occurs within the reef. Bivalves such as the dog cockle *Glycymeris radians* and the mussel *Brachiodontes ustulatus*, as well as gastropods such as *Thais orbita* and *Oliva ovilva* are especially plentiful within the fossil reef, but poorly represented in the shell drapes. Reef development is correlated with isotope substage 5e through analysis of electron-spin resonance from a coral sample (Johnson *et al.* 1995).

Colonization of an undulating to flat erosion surface by coral colonies and the eventual establishment of a barrier-type coral reef entails the Cockburn Town Member of the Pleistocene Grotto Beach Formation on San Salvador in the Bahamas (Wilson *et al.* 1998). The disconformity separates two limestone units. The lower unit features a surface that truncates *Porites* rubble and *in situ* dome corals. Heavily bored by the bivalve *Gastrochaenolites torpedo* and clionid sponges, the surface was also encrusted by coralline red algae, serpulid worms, and vermetid gastropods. Dome-type corals such as *Diploria strigosa* and *Montastrea annularis*, in addition to *Mancinia* sp., are documented as encrusting directly on the erosion surface (fig. 8 in Wilson *et al.* 1998). Dating of corals from below and above the disconformity by uranium/thorium isotopes shows that sea-level fluctuations occurred about 125–124 ka, correlative with isotope substage 5e.

Whether or not the structures represented by fossil *Porites* found widespread in the lower Gulf of California (table 2) were true reefs, they hosted the same range of marine invertebrates as found elsewhere in wave-resistant reefs. This is shown by similarities in the fossil fauna between the *Acropora* reef in western Australia and the *Porites* structures in the Gulf of California. The bivalve *Barbatia reevseana* from *Porites* aggregates in the gulf has its counterpart in *Brachiodontes ustulatus* from western Australia. Both shells have a mussel profile and both use byssal threads to anchor to hard surfaces. Likewise, *Turbo* shells are well represented in the coral aggregates of Baja California and western Australia. The common occurrence of these mollusk species is a reflection on fringing reefs as a kind of modified rocky shore in a tropical setting.

From the foregoing review of localities where fossil colonies of *Porites panamensis* established successful aggregates during the last interglacial interval, predictions can be made on the future development of this species in the Gulf of California under conditions of ongoing global warming and a subsequent global rise in sea level. Comparison of Pleistocene *Porites* from Isla Coronados with the same coral from other localities

California y Australia occidental. La presencia común de estas especies de moluscos es un ejemplo de arrecifes costeros que constituyen un tipo de costa rocosa modificada en un ambiente tropical.

A partir de esta revisión de algunas localidades donde las colonias fósiles de *Porites panamensis* establecieron con éxito agregaciones durante el último periodo interglacial, se pueden hacer predicciones sobre el futuro desarrollo de esta especie en el Golfo de California bajo las presentes condiciones de calentamiento global y el subsecuente aumento del nivel del mar. Una comparación de *Porites* del Pleistoceno de Isla Coronados con el mismo coral de otros sitios del Golfo de California y otras partes del mundo, confirma que la fijación a un sustrato duro por la colonia inmadura promueve su supervivencia. Las capas sumergidas son las más susceptibles a la colonización por *Porites*; sin embargo, de no estar aquellas disponibles, un pavimento de guijarros puede cumplir la misma función. En Isla Coronados una capa delgada de cantos rodados de andesita formó una extensa superficie sobre un plano inclinado ligeramente hacia el mar. Estos clastos volcánicos pavimentaron sobre material inestable compuesto de arena carbonatada derivada de rodolitos fragmentados. La calcarenita sirve como un sustrato para la colonización coralina sólo si ésta es cimentada como un estrato, como sucedió en Punta El Bajo. Bajo algunas condiciones, bastará un sustrato de fragmentos rotos de coral, como se observa en Isla Carmen y Bahía Coyote. Un sustrato de escombros no consolidados de corales *Porites* proporciona una superficie más estable que la arena carbonatada.

La comparación de la orientación geográfica de los sitios con agregaciones grandes de fósiles de *Porites* también proporciona información sobre los hábitats preferidos. Los arrecifes fósiles del lado sur de Isla Coronados se localizan en un ambiente protegido, al igual que las otras estructuras de *Porites* en Punta Chivato, Bahía San Antonio, Isla Carmen (tanto en Balandra como del lado sur de la isla), Isla San Diego, Bahía Coyote, Isla Espíritu Santo e Isla Cerralvo. La exposición a los vientos Norte, típicos del Golfo de California durante los meses de invierno, se minimiza en estas localidades. La única excepción es Punta El Bajo, cerca de Isla Coronados. Resulta interesante que la morfología de los fósiles de *P. panamensis* en Punta El Bajo es mucho más robusta que en cualquier otro lado del golfo. Es similar a la forma frondosa de las colonias de *Acropora* del Pleistoceno en Australia occidental (Johnson *et al.* 1995), una especie de arrecife capaz de soportar condiciones de oleaje. Estudios de campo futuros deberían investigar si el morfotipo de El Bajo está mejor representado en otras localidades del Pleistoceno en el Golfo de California.

## Agradecimientos

Este trabajo se basa en estudios de campo realizados en enero de 2005, con la asistencia de J Bates (Williams College) y C Mirabal-Dávila (UABC). Se agradece el apoyo del Freeman Foote Fund (Departamento de Geociencias, Williams College), así como el apoyo logístico generosamente

around the Gulf of California and elsewhere, confirms that attachment to a hard surface by the immature colony promotes survival. Submerged hardgrounds are the most prone to colonization by *Porites*. If not available, however, a cobbled pavement will perform the same function. On Isla Coronados, a thin cover of andesite cobbles and small boulders formed an extensive ravinement surface on a slight seaward inclination. These well-rounded volcanic clasts paved over unstable material consisting of calcarenite sand derived from crushed rhodoliths. Calcarenite is adequate as a substrate for coral colonization, only if it is cemented as a hardground, as was the case at nearby Punta El Bajo. Under some conditions, a substrate of broken coral fragments will suffice, as found on Isla Carmen and Bahía Coyote. Clearly, an unconsolidated rubble substrate of broken *Porites* corals provides a more stable surface than carbonate sand.

Comparison of the geographic orientation of localities with large aggregates of fossil *Porites* also provides insight regarding preferred habitat. The fossil reefs on the south side of Isla Coronados share in common a highly sheltered setting with other *Porites* structures at Punta Chivato, Bahía San Antonio, Isla Carmen (at Balandra as well as the south end of the island), Isla San Diego, Bahía Coyote, Isla Espíritu Santo, and Isla Cerralvo. Exposure to the Norte winds typical of the Gulf of California during the winter months is minimized at all those localities. The only exception is Punta El Bajo, near Isla Coronados. Interestingly, the morphology of fossil *P. panamensis* at Punta El Bajo is much more robust than anywhere else in the gulf. It is similar to the frondose shape of *Acropora* colonies from the Pleistocene of western Australia (Johnson *et al.* 1995), which represent a proper reef species capable of withstanding surf conditions. Future field studies should investigate if the El Bajo morphotype might be better represented at other Pleistocene localities around the Gulf of California.

## Acknowledgements

This contribution is based on field studies conducted in January 2005. The authors were assisted in the field by J Bates (Williams College) and C Mirabal-Dávila (UABC). Support from the Freeman Foote Fund in the Geosciences Department at Williams College is gratefully acknowledged. Leon Fichman of Baja Outpost in Loreto, Baja California Sur, generously contributed to logistical support. The safety of participants relied on expert boat handling by E Baeza, who captained the *Jangada*. Participation by RALP was supported by a doctoral fellowship from the Mexican Council of Science and Technology (CONACYT), the Geological Society of America, and the Max and Lorraine Littlefield Fund from the University of Iowa. Data cited herein on the invertebrate fauna from Punta Chivato, Bahía San Antonio, and Punta El Bajo, led to an undergraduate honors thesis by CRR at Williams College in 2000. Laboratory dating of coral samples from Isla Coronados and Punta Chivato was performed at the Denver facilities of

proporcionado por L Fichman de Baja Outpost en Loreto, Baja California Sur. La seguridad de los participantes recayó en la experiencia de E Baeza, capitán del *Jangada*. El segundo autor reconoce el apoyo recibido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (México), la Geological Society of America y el Max and Lorraine Littlefield Fund de la Universidad de Iowa. Los datos citados aquí sobre la fauna de invertebrados de Punta Chivato, Bahía San Antonio y Punta El Bajo se utilizaron para una tesis de licenciatura por CRR en Williams College en el 2000. El fechado en el laboratorio de las muestras de corales de Isla Coronados y Punta Chivato se realizó en las instalaciones del US Geological Survey en Denver, por el Earth Surface Processes Team bajo la dirección de DR Muhs y en particular se reconoce la ayuda de la analista K Simons. Los autores agradecen a M Wilson (College of Wooster) y dos revisores anónimos sus comentarios útiles a este manuscrito.

Traducido al español por Christine Harris.

## Referencias

- Ashby JR, Ku TL, Minch JA. 1987. Uranium series ages of corals from the Upper Pleistocene Mulege terrace, Baja California Sur, Mexico. *Geology* 15: 139–141.
- Bigioggero B, Capaldi G, Chiesa S, Montrasio A, Vezzoli L, Zanchi A. 1988. Post-subduction magmatism in the Gulf of California: The Isla Coronados (Baja California Sur, Mexico). *Ist. Lombardo Acad. Sci. Lett. (Rend. Sci. B)*, 121: 117–132.
- Brusca RC. 1980. Common Intertidal Invertebrates of the Gulf of California. 2nd ed. Univ. Arizona Press, Tucson, 512 pp.
- Chen JH, Edwards RL, Wasserburg GJ. 1986.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ , and  $^{232}\text{Th}$  in seawater. *Earth Planet. Sci. Lett.* 80: 2412–251.
- Cheng H, Edwards RL, Hoff J, Gallup CD, Richards DA, Asmerom Y. 2000. The half-lives of uranium-234 and thorium-230. *Chem. Geol.* 169: 17–33.
- DeDiego-Forbis T, Douglas R, Gorsline D, Nava-Sanchez EN, Mack L, Banner J. 2004. Late Pleistocene (Last Interglacial) terrace deposits, Bahía Coyote, Baja California Sur, Mexico. *Quatern. Int.* 120: 29–40.
- Durham JW. 1947. Corals from the Gulf of California and the north Pacific coast of America. *Geol. Soc. Am. Mem.* 20: 1–68.
- Durham JW. 1950. 1940 EW Scripps Cruise to the Gulf of California. Part II. Megascopic paleontology and marine stratigraphy. *Geol. Soc. Am. Mem.* 43: 1–216.
- Emerson WK. 1960. Results of the Puritan-American Museum of Natural History expedition to western Mexico. II. Pleistocene invertebrates from Ceralvo Island. *Am. Mus. Novit.* 1995: 1–6.
- Gallup CD, Edwards RL, Johnson RG. 1994. The timing of high sea levels over the past 200,000 years. *Science* 263: 796–800.
- Halfar J, Godinez-Orta L, Goodfriend GA, Mucciarone DA, Ingle JC, Holdern P. 2001. Holocene-Late Pleistocene non-tropical carbonate sediments and tectonic history of the western rift basin margin of the southern Gulf of California. *Sediment. Geol.* 144: 149–178.
- Johnson ME. 2002. Discovering the Geology of Baja California: Six Hikes on the Southern Gulf Coast. Univ. Arizona Press, Tucson, 220 pp.
- Johnson ME, Ledesma-Vázquez JL. 1999. Biological zonation on a rocky-shore boulder deposit: Upper Pleistocene Bahía San Antonio (Baja California Sur, Mexico). *Palaios* 14: 569–584.
- Johnson ME, Baarli BG, Scott Jr JH. 1995. Colonization and reef growth on a Late Pleistocene rocky shore and abrasion platform in western Australia. *Lethaia* 28: 85–98.
- López-Pérez RA. 2005. The Cenozoic hermatyic corals in the eastern Pacific: History of research. *Earth-Sci. Rev.* 72: 67–87.
- Ludwig KR, Simmons KR, Szabo BJ, Winograd IJ, Landwehr JM, Riggs AC, Hoffman RJ. 1992. Mass-spectrometric  $^{230}\text{Th}$ - $^{234}\text{U}$ - $^{238}\text{U}$  dating of the Devils Hole calcite vein. *Science* 258: 284–287.
- Mayer L, Vincent KR. 1999. Active tectonics of the Loreto area, Baja California Sur, Mexico. *Geomorphology* 27: 243–255.
- Muhs DR, Simmons KR, Kennedy GL, Rockwell TK. 2002. The last interglacial period on the Pacific coast of North America: Timing and paleoclimate. *Geol. Soc. Am. Bull.* 114: 569–592.
- Overpeck JT, Otto-Bliesner BL, Miller GH, Muhs DR, Alley RB, Kiehl JT. 2006. Paleoclimatic evidence for future ice-sheet instability and rapid sea-level rise. *Science* 311: 1747–1750.
- Ransom CR. 2000. Paleocology of Upper Pleistocene coral reefs based on morphology and fossil assemblages, Baja California Sur, Mexico. Fifth International Meeting on Geology of the Baja California Peninsula, Abstracts, pp. 36–37.
- Reyes-Bonilla H. 2003. Coral reefs on the Pacific coast of Mexico. In: Cortez J (ed.), *Latin American Coral Reefs*. Elsevier, Amsterdam, pp. 331–350.
- Squires DF. 1959. Results of the Puritan-American Museum of Natural History expedition to western Mexico. Part 7: Corals and coral reefs in the Gulf of California. *Bull. Am. Mus. Nat. Hist.* 118: 367–432.
- Steinbeck J, Ricketts EF. 1941. *Sea of Cortez: A Leisurely Journal of Travel and Research*. Viking Press, New York, 598 pp.
- Thompson WG, Goldstein SL. 2005. Open-system coral ages reveal persistent suborbital sea-level cycles. *Science* 308(5720): 401–404.
- Wilson MA, Curran HA, White B. 1998. Paleontological evidence of a brief global sea-level event during the last interglacial. *Lethaia* 31: 241–250.

Recibido en abril de 2006;  
aceptado en febrero de 2007