



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México



GEOMORFOLOGÍA Y FACIES DEL SISTEMA ARRECIFAL DE PUNTA MAROMA, MÉXICO

T E S I S

Que para obtener el Grado Académico de
Maestro en Ciencias del Mar y Limnología
(Especialidad Geología Marina)

P r e s e n t a :

MIGUEL SÓCRATES IBARRA FERNÁNDEZ

Director de Tesis: Dr. Paul Andrew Blanchon

Comité Tutorial: Dr. Eric Jordán Daghlgren
Dra. Elva Escobar Briones
Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi
Dr. Carlos Canet Miquel

Puerto Morelos, Q. Roo, mayo del 2008.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

Por todo el amor, apoyo y comprensión:

A mi esposa Paty y a mis hijos Miguel Ángel y Oliver Erwin

A mis padres Miguel Ángel Ibarra Y Díaz† y Saraswati Fernández de Ibarra.

A mis tíos José Antonio†, María del Carmen y María Luisa Ibarra Y Díaz.

A mis hermanos Ulises y Artemisa.

Y a toda la demás familia.

Agradecimientos

Mi más alto y sincero agradecimiento al Doctor Paul Andrew Blanchon por la dirección de este trabajo y de su siempre profesional y amable disposición y gran apoyo en todos los sentidos.

A la Secretaría de Marina.

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

A los miembros del Comité Tutorial.

A los compañeros Investigadores, Técnicos, Estudiantes de Posgrado y Trabajadores de la Unidad Puerto Morelos de la UNAM.

Al personal de la coordinación de posgrado del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

De manera muy especial a todos mis amigos y compañeros Geólogos de la carrera y a mis amigos de la Secretaría de Marina, en especial a mi gran amigo Alberto Acuña†.

No podemos basar nuestras convicciones ni nuestra lucha en lo que queremos que sea verdadero, pues la verdad sólo puede hallarse al considerar las evidencias.

Keith Augustine (1997)

Contenido

| | <i>Página</i> |
|---|---------------|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Hipótesis y objetivos | 4 |
| 3. Antecedentes | 5 |
| 3.1 Arrecifes Holocénicos | 5 |
| 3.2 Geología de Yucatán | 14 |
| 3.3 Área de estudio | 17 |
| 3.4 Actividad de huracanes en el Caribe | 19 |
| 4. Materiales y Métodos | 21 |
| 4.1 Geomorfología | 21 |
| 4.2 Geología | 21 |
| 5. Resultados | 25 |
| 5.1 Geomorfología y zonación bentónica de la plataforma | 25 |
| 5.1.1 Línea de costa | 25 |
| 5.1.2 Laguna | 26 |
| 5.1.3 Arrecife | 27 |
| 5.1.4 Terraza de roca | 28 |
| 5.1.5 Terraza arenosa | 28 |
| 5.2 Depósito de arrecife de coral | 30 |
| 5.2.1 Ubicación y tamaño | 30 |
| 5.3 Caracterización de los núcleos | 33 |
| 5.4 Variación en la distribución de organismos incrustantes | 41 |
| 5.5 Resumen de la facies arrecifal e interpretación | 43 |
| 5.6 Hallazgo principal | 45 |
| 5.7 Depósito de la terraza de roca | 45 |
| 6. Discusión | 48 |
| 7. Conclusiones | 51 |
| 8. Glosario | 52 |
| 9. Referencias | 53 |
| 10. Anexo de fichas técnicas de los núcleos | 56 |

Índice de figuras

| | | <i>Página</i> |
|-----------------|--|---------------|
| Figura 1 | Idealización de los efectos de la lluvia ácida sobre bloques de caliza. Tomado de Purdy (1974). | 4 |
| Figura 2 | Sección esquemática mostrando la estructura de la plataforma oriental del arrecife Houtman Abrolhos, donde se aprecia el crecimiento postglacial sobre estructuras preexistentes. Tomado de Collins et al. (1996). | 11 |
| Figura 3 | Representación esquemática de la historia Pleistoceno Tardío/Holoceno del arrecife John Brewer al noreste de Australia. Tomado de Walbran (1994). | 12 |
| Figura 4 | Características tafonómicas de las facies identificadas por Blanchon y Perry (2004) para las zonas de arrecife frontal, cresta arrecifal y cayos de guijarros. | 13 |
| Figura 5 | Mapa geológico de la Península de Yucatán mostrando las principales unidades sedimentarias, fallas, caminos y ciudades. | 16 |
| Figura 6 | Ubicación del área de estudio. | 19 |
| Figura 7 | Esquema de la energía ciclónica para el Caribe, desde 1950 hasta 2004, donde se observa el incremento en la energía ciclónica a partir del 2001. | 20 |
| Figura 8 | Transecto a lo largo del arrecife frontal en donde se aprecia la ubicación de las perforaciones para la obtención de núcleos | 22 |
| Figura 9 | Perfil de la zona de Punta Maroma donde se observa la zona de la laguna arrecifal y el depósito de arrecife en la zona de la terraza superior. Este perfil se obtuvo mediante ecosondeo | 26 |
| Figura 10 | Fotografías de los detalles de la zonación del sistema arrecifal en Punta Maroma. | 29 |
| Figura 11 | Zonación bentónica y geomorfológica de la plataforma de Punta Maroma. | 31 |
| Figura 12 | Gráfica de distancias observadas a lo largo de 10 transectos medidos sobre el arrecife de Punta Maroma. | 32 |
| Figura 13 | Promedios y cantidad de <i>Homotrema rubrum</i> por niveles de profundidad de los núcleos del arrecife frontal de Punta Maroma. | 42 |
| Figura 14 | Características de la facies de arrecife frontal de Punta Maroma. | 44 |
| Figura 15 | Características asociadas al basamento pleistocénico. | 47 |
| Figuras 16 a 29 | Fichas tafonómicas de los núcleos perforados en la zona de Punta Maroma. | 57 |

Resumen

Las investigaciones geológicas de arrecifes modernos, utilizando núcleos, han asumido que las comunidades de coral observadas sobre la superficie deben ser encontradas en facies del interior de arrecife. El objetivo de este trabajo es comprobar esta idea y documentar las características de la facies del arrecife a través del arrecife frontal de Punta Maroma, Quintana Roo. Durante el verano de los años 2005 y 2006, se perforaron y se recuperaron 12 núcleos de la zona del arrecife frontal, se efectuaron batimetrías, y se analizaron imágenes aéreas y de satélite. Estos datos mostraron que tanto la cresta como la zona de macizos y canales del arrecife frontal en Punta Maroma están caracterizados por la misma facies, la cual consiste de gravas de tamaño medio, de gravas y guijarros de esqueletos de coral, y de escasas colonias *in situ* de *Acropora palmata* (Lamarck 1816). La única variable entre los núcleos fue el grado de incrustación de *Homotrema rubrum* (Lamarck 1816), el cual se incrementa ligeramente hacia la cresta. Las imágenes de satélite mostraron que la cresta arrecifal está localizada de manera uniforme a 300 m de distancia desde zona media de la rompiente de la terraza, a 10 m bajo el nivel medio del mar. Estos hallazgos sustentan la importancia que tienen los huracanes en controlar el desarrollo arrecifal. El oleaje de tormenta cruza la plataforma, rompe en la cresta que se encuentra en medio de la plataforma arenosa y se derrama sobre las comunidades del arrecife frontal, destruyendo las ramas de las colonias *in situ* produciendo una capa de gravas de guijarros de pedacería que culmina en una franja sumergida y depositada a nivel medio del mar. La distancia entre esta franja y el escalón que se forma entre la plataforma arenosa y la terraza de roca representa el ancho de la zona de rompiente del oleaje generado por huracanes. Entre cada tormenta, la franja y la capa de pedacería son recolonizadas por comunidades coralinas características para esa zona y profundidad, lo que completa el ciclo. Se concluye que la zonación en la superficie de arrecifes de coral es superficial y que la facies interna refleja el continuo impacto de huracanes a través del tiempo geológico.

Abstract

Geological research on modern reef tracts using drill-cores have assumed that coral communities seen on the surface should also be encountered in facies from the reef interior. The objective of this work was to test this idea and document the characteristics of reef facies across the reef front at Punta Maroma, Quintana Roo, Mexico. In the summers of 2005 and 2006, 12 cores were drilled and recovered from the reef-front zone. In addition, bathymetric surveys and aerial and satellite imagery analysis were performed. These data show that both the crest and spur-and-groove zone of the reef front at Punta Maroma are characterized by the same facies, which consists of medium-cobble coral gravel with sparse, in-place, colonies of *Acropora palmata* (Lamarck 1816). The only difference observable between cores is the degree of encrustation by *Homotrema rubrum* (Lamarck 1816), which increases slightly at the crest. Satellite images show that the reef-crest is located at a uniform 300 m distance from a mid-shelf slope break at 10 m below mean sea level. These findings support a hurricane control on reef development. Decimetre-sized storm waves crossing the shelf are tripped by the mid-shelf slope break and spill over shallow reef-front communities, destroying in-place coral thickets and producing a layer of cobble gravel that culminates in a submerged ridge deposited at mean sea-level. The distance between the ridge and the mid-shelf slope break represents the width of the hurricane breaker zone. Between storms, the ridge and rubble sheet are re-colonized by the same coral community with the same depth zoning thereby completing the cycle. I therefore conclude that the surface zoning of reef corals is superficial and the internal reef facies reflect the continuing impact of hurricanes over geologic time scales.

1. Introducción

El conocimiento del interior de la estructura y de la historia del crecimiento de los arrecifes holocénicos y postglaciares, está basado casi en su totalidad en datos obtenidos de núcleos. Una premisa muy común en los análisis geológicos de estos núcleos es que la zonación de corales observada en la superficie de arrecifes activos se encuentra también en el interior de éstos (holocénicos y postglaciares). Por ejemplo, Cabioch (1999) estableció que, en virtud de que los ensambles o asociaciones de arrecifes modernos tienen una zonación predecible debido a la variación en la intensidad de luz y de energía por la profundidad, las etapas del desarrollo de arrecifes del Holoceno, tales como el crecimiento vertical y la acreción lateral, son "relativamente fáciles de reconstruir" a partir de datos obtenidos de núcleos. En sus análisis de secuencias en núcleos, sin embargo, solo la forma y orientación de los corales se utilizaron para identificar corales en la posición de crecimiento y los impactos por tormentas se ignoraron en gran medida, a pesar de que los núcleos que estudiaron eran de arrecifes que se encuentran dentro de la trayectoria de ciclones tropicales.

La importancia de las tormentas en el desarrollo de facies arrecifales se identificó primeramente por Blanchon *et al.* (1997). Ellos estudiaron el arrecife de franja de Gran Caimán, en donde las zonas de sedimentos y de corales son comparables a muchos otros arrecifes en el Caribe caracterizados por presentar altas coberturas de coral. La estructura arrecifal no consiste de corales *in situ*, sino de capas de pedacería de coral cuyos clastos de gran tamaño y condiciones desgastadas, que claramente implican a los huracanes como el mayor agente controlador de su desarrollo. Además, la cresta arrecifal está localizada a una distancia uniforme (~300 m) del borde de la plataforma media, varía ligeramente a medida que cambia la orientación del margen, y se alinea conforme al oleaje producido por los huracanes cuando éstos rompen sobre la terraza

superior. El arrecife de franja no se desarrolla cuando el ancho de la terraza superior es menor a la distancia que el oleaje de tormenta puede arrastrar clastos, por ejemplo, menos de 250 m, porque los clastos son arrojados tierra adentro en lugar de ser acumulados para formar un basamento para el crecimiento de arrecife (Blanchon *et al.*, 1997).

Posteriormente, Braithwaite *et al.* (2000) reconocieron que se debe considerar un nuevo modelo relacionado con el crecimiento de los arrecifes de coral, distinto al modelo Darwiniano el cual no considera los factores oceanográficos tales como la frecuencia y severidad de fenómenos meteorológicos, incluyendo tormentas. En este sentido, su trabajo en las islas Seychelles establece que los nuevos modelos deben de relacionar la geometría de la acreción y la interacción entre eventos extremos de tormentas, ya que las tormentas severas destruyen la continuidad de las estructuras del arrecife y generan incrementos en el volumen de detritus con tamaños de grano más grandes. También mencionan que, en condiciones normales, las tormentas de baja severidad y baja energía hidrodinámica pueden provocar la acumulación de sedimentos de grano más fino, derivados del arrecife, que a través de la erosión inhiben el crecimiento de estructuras *in situ*. Los autores concluyen que si bien la ecología refleja temporalmente las condiciones oceánicas actuales, la litología y las estructuras *in situ* están controladas por tormentas excepcionales, en conjunto con los cambios del nivel del mar, y denotan los procesos históricos.

Blanchon y Perry (2004), al realizar un análisis tafonómico de núcleos en las zonas frontal, rompiente y plataforma de pedacaría de los arrecifes de Cayo Arcas y Cayo Triángulos en el Banco de Campeche, México, identificaron tres facies relacionadas con la profundidad: 1) Facies de arrecife frontal.- Comprendida entre los -2 y los -10 m b.n.m.m., 2) Facies de cresta arrecifal.- Comprendida entre los -1 y los 0 m b.n.m.m.; y 3) Facies de cayos de guijarros.- Comprendida entre los 0 y los +5 m s.n.m.m.

Con base en lo anterior, parece que el desarrollo de facies de arrecifes holocénicos es el objeto de un debate científico significativo entre los geólogos que investigan arrecifes usando núcleos. Algunos insisten en que las facies arrecifales son un simple reflejo de las comunidades de coral de la superficie, solamente modificados por cambios relativos en nivel del mar (p.e. Cabioch, 1999), mientras que otros sugieren que las tormentas tropicales han dejado un sello indeleble que ha resultado en facies dominadas por pedacería de coral, mas bien que estructuras *in situ* (p.e. Braithwaite *et al.*, 2000),

Las investigaciones de Blanchon y Perry (2004) establecen rasgos tafonómicos que servirán de herramienta en los análisis que se realicen para la presente tesis. Cabe mencionar que en el caribe mexicano no se ha efectuado ningún trabajo sobre estructuras internas de arrecifes cuaternarios por medio de núcleos, por lo que se seleccionó la zona de Punta Maroma debido a sus características morfológicas, que serán descritas en el capítulo de Antecedentes, por lo que este trabajo representa el primer estudio en esa zona, el cual contribuirá al conocimiento que soporte la conclusión al debate sobre si las comunidades de coral observadas en la superficie deben ser encontradas en el interior del arrecife.

2. Hipótesis y objetivos

En el presente trabajo se describe la facies y la estructura geológica del sistema arrecifal de Punta Maroma, ubicado en la zona costera del Estado de Quintana Roo, por medio del análisis de núcleos y de la descripción geomorfológica.

Punta Maroma forma parte de la barrera arrecifal conocida como cinturón de arrecifes del Atlántico Occidental (INE, 2000), y a diferencia de otros arrecifes ubicados al Norte del Caribe Mexicano presenta un importante desarrollo arrecifal en la frontal (Jordán, 1979). Por sus características geológicas, esta localidad proporciona un buen sitio para la realización de estudios por medio de perforación y obtención de núcleos a lo largo de transectos perpendiculares a la línea de costa.

2.1 Hipótesis

H1.- Los procesos ecológicos que controlan la zonación de arrecifes son registrados en la facies y en los patrones de acreción en el interior de los sistemas arrecifales.

H2.- Los procesos físicos tales como huracanes y tsunamis, que impactan grandemente en la ecología del arrecife, tienen grandes impactos sobre las facies arrecifales y los patrones de acreción.

2.2 Objetivos

1. Caracterizar la geomorfología del sistema arrecifal de Punta Maroma.
2. Caracterizar los tipos de facies sedimentarias holocénicas del sistema arrecifal.
3. Identificar los procesos que controlan el desarrollo de facies y la geomorfología.

3. Antecedentes

3.1 Arrecifes holocénicos

Los arrecifes de coral se han mantenido al nivel del mar, a pesar de que durante los últimos dos millones de años el nivel del mar osciló en más de ~150 m. En el pico de la última glaciación, hace 20 ka, los arrecifes se encontraban a 125 m por debajo del nivel del mar actual. A medida que las capas de hielo comenzaron a derretirse, el nivel del mar comenzó a elevarse, y como respuesta los arrecifes comenzaron a crecer. Al principio el índice de elevación del nivel del mar fue lento, pero a medida que continuaba la deglaciación éste comenzó a ser más rápido, y los arrecifes continuaron creciendo a su paso (Blanchon y Shaw, 1995). Posteriormente, hace alrededor de 14 ka, la elevación del nivel del mar comenzó a desestabilizar las capas de hielo, y éstas comenzaron a colapsarse hacia el océano. El mecanismo de colapso incluyó un movimiento rápido de hielo hacia el mar, enviando témpanos de hielo hacia el Atlántico norte; algunos llegaron tan lejos como hasta el sur de Portugal (Alley y Clark, 1999). El colapso de las capas de hielo incrementó en el nivel del mar de 10 a 15 m, con índices que de más de 10 cm/año (Keigwin *et al.*, 2006). Este incremento inundó las líneas de costa y los arrecifes quedaron aislados en aguas más profundas. Conforme las capas de hielo comenzaron a estabilizarse, el incremento del nivel del mar se volvió lento, y nuevos arrecifes comenzaron a desarrollarse a lo largo de las nuevas líneas de costa (Blanchon y Shaw, 1995). La respuesta de los arrecifes a este rápido aumento en el nivel del mar fue un retroceso a una nueva posición hacia zonas menos profundas. Antes de que la deglaciación estuviera completa, ocurrieron dos aumentos más del nivel del mar y en respuesta los arrecifes crecieron hacia zonas menos profundas en las dos ocasiones. Entre estos eventos los arrecifes continuaron creciendo conforme fue incrementándose el nivel mar, lo cual fue documentado por Blanchon y Shaw (1995) mediante medidas del grosor

del arrecife y fechamientos, estimando que los arrecifes tuvieron una acreción vertical de 13 mm/año.

Una de las incógnitas que surgen de este proceso de respuesta de los arrecifes ante el incremento en el nivel del mar es el mecanismo mediante el cual los arrecifes pueden mantener su crecimiento a la par del nivel del mar. Esta incógnita aún requiere contestación y la comunidad científica continúa estudiando estos procesos. A la fecha, lo que se ha planteado y documentado es el proceso de acreción arrecifal, que describe el balance entre el crecimiento de los corales y su destrucción física dada por los procesos de construcción, destrucción, sedimentación y estabilización (Scoffin y Garret 1974; Scoffin 1981).

Para determinar el desarrollo de arrecifes de manera cualitativa Scoffin (1972) y Scoffin y Garret (1974) establecieron que el desarrollo de estructuras en Bermuda es en forma de parches de arrecifes someros y de parches de arrecifes con formas de cabezos fusionados. También en Bermuda, Gingsburg y Schoeder (1973) determinaron que el desarrollo de la estructura de los arrecifes era enteramente “secundaria”. Respecto al desarrollo de estructuras en arrecifes profundos, Hubbard *et al.* (1986) y Blanchon y Jones (1997) determinaron que los arrecifes en Sant Croix y de Gran Caimán tenían entre el 30 y el 50% de los espacios rellenos con sedimento, debido a las estrategias de sobrecrecimiento de los corales profundos, y a que la progradación lateral de la estructura del arrecife es mayor que la vertical debido a la “poda” por huracanes.

Para reconstruir patrones de zonación de arrecifes inducidos por tormentas, Graus *et al.*, (1984) simularon, a partir de datos de Discovery Bay en Jamaica, el crecimiento de arrecifes de coral del Caribe. Sus resultados indican que, a pesar de la severidad de los huracanes, su efecto es mínimo en el largo plazo sobre la zonación ya establecida. Asimismo se reconoció que el periodo de retorno de huracanes es generalmente menor que el periodo de recuperación del arrecife. Además, efectuaron simulaciones adicionales que indicaron que las complejas condiciones de

oleaje en Discovery Bay son las que mantienen la actual zonación del arrecife, y que es durante el invierno cuando se producen las máximas velocidades de fondo, y que las estructuras de coral *in situ* han resistido sin llegarse a romper.

Jordán (1989) estudió los efectos de la morfología del sustrato en el desarrollo de la comunidad coralina en la zona del Caribe Mexicano y encontró que los arrecifes coralinos de la región norte centro del litoral de Quintana Roo se caracterizan por un pobre desarrollo coralino en la zona frontal, mientras que en la zona protegida el desarrollo es elevado. El autor presentó un modelo para explicar el porqué de esa atípica conformación arrecifal, el cual se basa en 1) la presencia del sustrato arrecifal de bajo relieve y escasa pendiente de la plataforma continental; 2) que esa condición favorece la existencia de condiciones de alta severidad ambiental para corales escleractínios por depositación y resuspensión de sedimentos no establecidos; y 3) que durante la formación de la comunidad coralina ha habido una frecuencia relativamente alta de huracanes que modifican periódicamente su estructura. Concluye que el bajo desarrollo de dicho arrecife coralino en la zona frontal se debe a determinantes históricas que han propiciado condiciones de alta severidad ambiental para los corales escleractínios que, aunado a procesos destructivos naturales, determinan que el desarrollo de arrecifes sea lento y que sea interrumpido por el paso de huracanes de alta intensidad (de categorías 4 y 5 en la escala Saffir-Simpson), y que por la lentitud del proceso de crecimiento adquieran una frecuencia relativa alta.

Los índices de acreción arrecifal se han cuantificado mediante diferentes tipos de estudios; algunos miden los índices biológicos de crecimiento de los corales (Hopley, 1982), otros utilizan los registros biogeoquímicos de la alcalinidad de las aguas suprayacentes, que indican el enriquecimiento de CO₂ durante el metabolismo del coral, y un tercer tipo incluye a los que usan la medición directa del crecimiento, distribución y cobertura del coral sobre el arrecife. Recientemente, se han estimado a través de la perforación de las secuencias del arrecife y del

fechamiento de sus constituyentes (Chávez *et al.*, 1972; Smith y Kinsey, 1976; Scoffin *et al.*, 1980; Hubard, 1990).

El impacto del incremento en el nivel del mar sobre la acreción arrecifal se ha documentado ampliamente. Neumann y Macintyre (1985) propusieron tres procesos principales de respuesta de los arrecifes al incremento del nivel del mar, denominados comúnmente como respuestas *Mantenerse*, *Alcanzar* y *Ceder*. La respuesta de tipo “mantenerse” se presenta cuando el nivel del mar se eleva pero sin exceder la tasa de acreción más alta de un arrecife. Así, si el índice de elevación es gradual, el arrecife acrecionará verticalmente, progradará sobre sus depósitos frontales o retrogradará sobre sus depósitos de arrecife posterior. Si la tasa de elevación del nivel del mar involucra cambios rápidos, que exceden el índice de acreción del arrecife, el arrecife tendrá que “alcanzar” el nivel de la elevación en función de su magnitud; si la magnitud no desplaza al arrecife de sus zonas de hábitat de las mayores estructuras de coral, el arrecife lo “alcanzará” cuando el índice de elevación se frene, pero si el aumento en el nivel del mar provoca un desplazamiento de los corales de su hábitat, el arrecife “retrocederá” a la nueva posición (Blanchon y Shaw, 1995; Blanchon *et al.*, 2002). En los casos donde no exista el sustrato disponible para que el arrecife responda retrocediendo, el crecimiento de arrecife se finaliza por inundación. Los arrecifes pueden “rendirse” (o “ceder”) durante un incremento rápido del nivel del mar y cambios en la circulación, por el clima u otra condición oceánica.

Los resultados de investigaciones encaminadas a explicar el desarrollo de estructuras geológicas de arrecifes coralinos del Cuaternario mediante la utilización de núcleos han propuesto de manera general dos hipótesis: la primer teoría menciona que la geomorfología de arrecifes modernos es controlada fundamentalmente por el crecimiento de éstos sobre estructuras cársticas anteriores (Purdy, 1974; Purdy y Winterer, 2001), y la segunda indica que esta morfología está controlada por procesos de acreción arrecifal y por las interacciones con el

incremento post-glacial del nivel del mar (Walbran, 1994; Collins *et al.*, 1996). En Australia y Belice, Purdy (1974) y Purdy y Winterer (2001) realizaron experimentos con bloques de caliza tratados con ácidos y los correlacionaron con datos reales de perfiles geomorfológicos de diversos arrecifes, en los que encontraron superficies de disolución, tales como el de Tuvuthá en Fiji, Maratoes en el mar de las Célebes, el Arrecife Alacranes en México, entre otros. Purdy y Winterer (2001) elaboraron una base de datos de 301 atolones de los océanos Pacífico, Índico y Atlántico, efectuando análisis estadísticos de correlación, considerando el efecto combinado de la disolución por precipitación y del área de captura en función de la profundidad máxima del atolón. Encontraron que los índices de subsidencia de 5 cm cada mil años no eran suficientes para explicar la profundidad de las discontinuidades encontradas, y sugieren que la influencia dominante para dar forma a las estructuras arrecifales es la expresión del relieve en donde se establecen las colonias, y que la morfología de los atolones está determinada por la disolución y no por el crecimiento (Fig. 2).

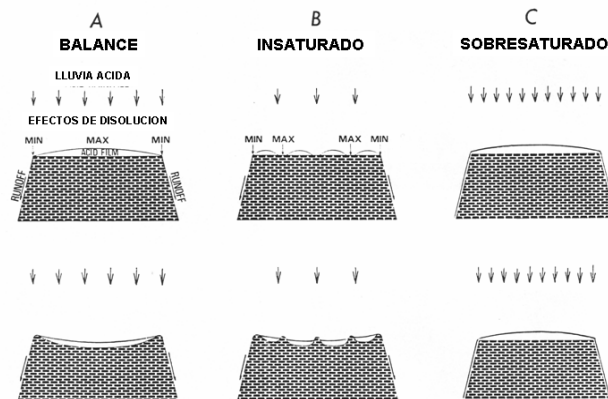


Figura 1. Idealización de los efectos de la lluvia ácida sobre bloques de caliza. Tomado de Purdy (1974).

La segunda teoría, sustentada con los trabajos de Walbran (1994) y de Collins *et al.* (1996), propone que la geomorfología de las estructuras arrecifales está controlada por procesos de acreción e interacciones con el cambio del nivel del mar post-glacial, explicando que el

complejo arrecifal se ajusta a la profundidad óptima de desarrollo a medida que sube el nivel del mar. En este sentido, Collins *et al.* (1996), basándose en el estudio de la estructura de la plataforma continental de los Arrecifes Houtman Abrolhos en la margen oeste de Australia, y utilizando perfiles de reflexión sísmica, establecen que el crecimiento holocénico del arrecife es asimétrico con respecto a la plataforma. La sección esquemática de la plataforma oriental del arrecife muestra la estructura de la plataforma, donde se aprecia el contraste del patrón de crecimiento del arrecife holocénico a ambos lados de la plataforma del arrecife formada durante la última glaciación (Fig. 3).

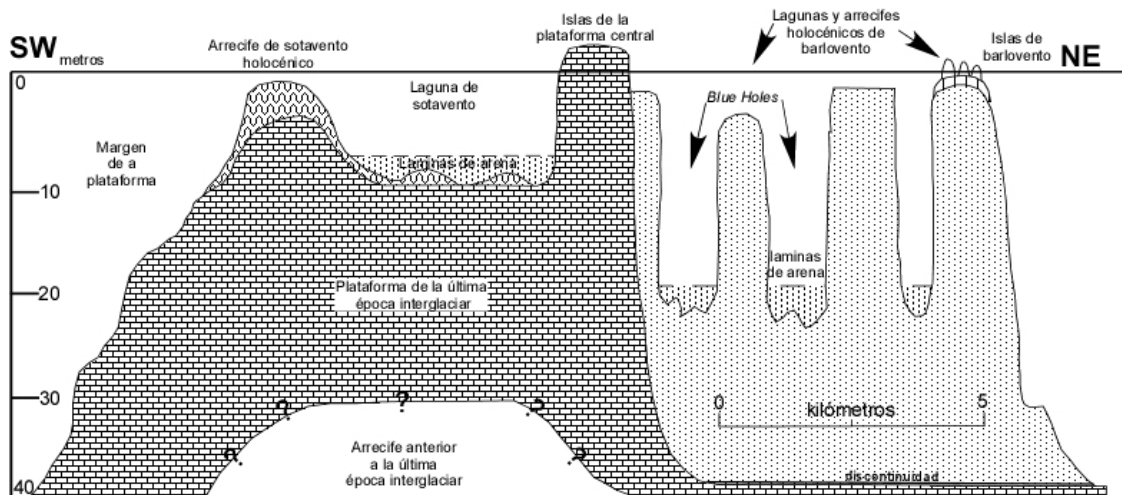


Figura. 2. Sección esquemática mostrando la estructura de la plataforma oriental del arrecife Houtman Abrolhos, donde se aprecia el crecimiento postglacial sobre estructuras preexistentes. Tomado de Collins *et al.* (1996).

Walbran (1994) estudió la naturaleza de la superficie pre-holocénica del arrecife John Brewer, al noreste de Australia, con el fin de reconocer e interpretar el desarrollo de ese arrecife, utilizó perfiles de reflexión sísmica y encontró que el arrecife coralino post-glacial se desarrolló sobre una plataforma anterior que se encuentra a 20 m de profundidad con respecto al actual nivel del mar (Fig. 4).

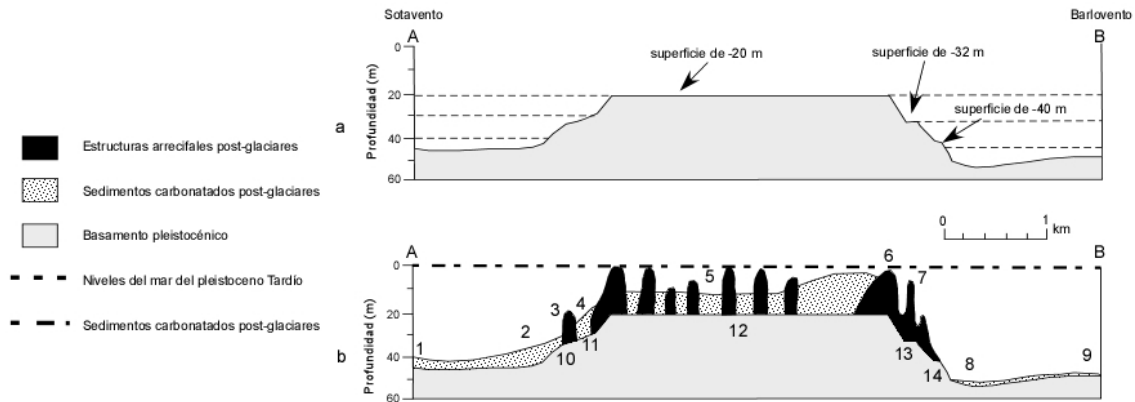


Figura 3. Representación esquemática de la historia del Pleistoceno Tardío/Holoceno. Fase 1: Formación de la superficie de -20m como un arrecife antiguo o una vía de erosión de una estructura arrecifal casi plana durante los 50 mil años; Fase 2: crecimiento de una barrera de arrecife a los -32m durante un periodo de estabilidad del nivel del mar donde llegó a los -20m; Fase 3: Desarrollo de la superficie de los -40m por erosión y posible desarrollo de barrera de arrecife durante 40 a 30 mil años; Fig. 2b. Fase 4: desarrollo de una estructura arrecifal post-glacial y de acumulación de sedimentos carbonatados, y establecimiento de la morfología actual, subsecuente a la llegada de la transgresión marina mas reciente. Las estructuras post-glaciares están ubicadas por los números del 1 al 9. Las estructuras del Pleistoceno Tardío están ubicadas por los números del 10 al 14. Tomado de Walbran (1994).

En este sentido Collins *et al.* (1996) y Walbram (1994) coinciden en que las estructuras o superficies antiguas influyeron en la determinación de los arrecifes actuales, además de que la morfología actual del arrecife es consistente con el ascenso del nivel del mar durante la trasgresión del Holoceno.

En el arrecife de franja de Gran Caimán (Blanchon *et al.*, 1997), las zonas de sedimentos y de corales son comparables a muchos otros arrecifes en el mar. Este arrecife se encuentra a menos de 1 km de la costa y se distribuye sobre la plataforma interior paralelo a la isla. El arrecife consta de cinco zonas hacia mar adentro: (1) zona arenosa, de 1 a 8 m b.n.m.m.; (2) zona de pedacería y cabezos de coral, de 1 a 2 m b.n.m.m.; (3) zona de cresta arrecifal, de cero a 1.5 m b.n.m.m.; (4) zona de muñones y guijarros de coral, de 0 a 5 m b.n.m.m.; y (5) zona de macizos y canales, de 5 a 10 m b.n.m.m.. El núcleo del arrecife consiste en capas de pedacería de coral compactada “Rudstone”, cuyos clastos de gran tamaño y condiciones desgastadas claramente hacen pensar que los huracanes han fungido como el agente determinante en su desarrollo.

Kennedy y Woodroffe (2002) mencionan que los arrecifes de franja parecen ser simples estructuras alineadas a la costa, cuya variación principal es la presencia y tamaño de la laguna arrecifal, pero que su evolución está lejos de ser simple, ya que presentan numerosas morfologías de crecimiento, con una gran variedad de unidades sedimentarias debajo de la superficie, mismas que son afectadas por los movimientos relativos del nivel del mar, el propio crecimiento del coral, la morfología de la superficie anterior y el régimen del clima (tormentas). Estos autores también mencionan que tales factores no parecen ser determinantes en el modo de crecimiento de los arrecifes, ya que existen algunos que parecen tener crecimientos en formas muy similares pero con historias geológicas diferentes respecto a los cambios del nivel del mar. Por lo tanto, no parece existir una relación simple entre la etapa de crecimiento y los índices de acreción. En su mayoría, los arrecifes de franja tienen índices de crecimiento entre 2 y 7 mm/año, siendo posible describir la variación entre arrecifes de franja de acuerdo con la naturaleza de la superficie anterior, así como la proporción de las estructuras y los sedimentos detríticos dentro de la estructura del arrecife.

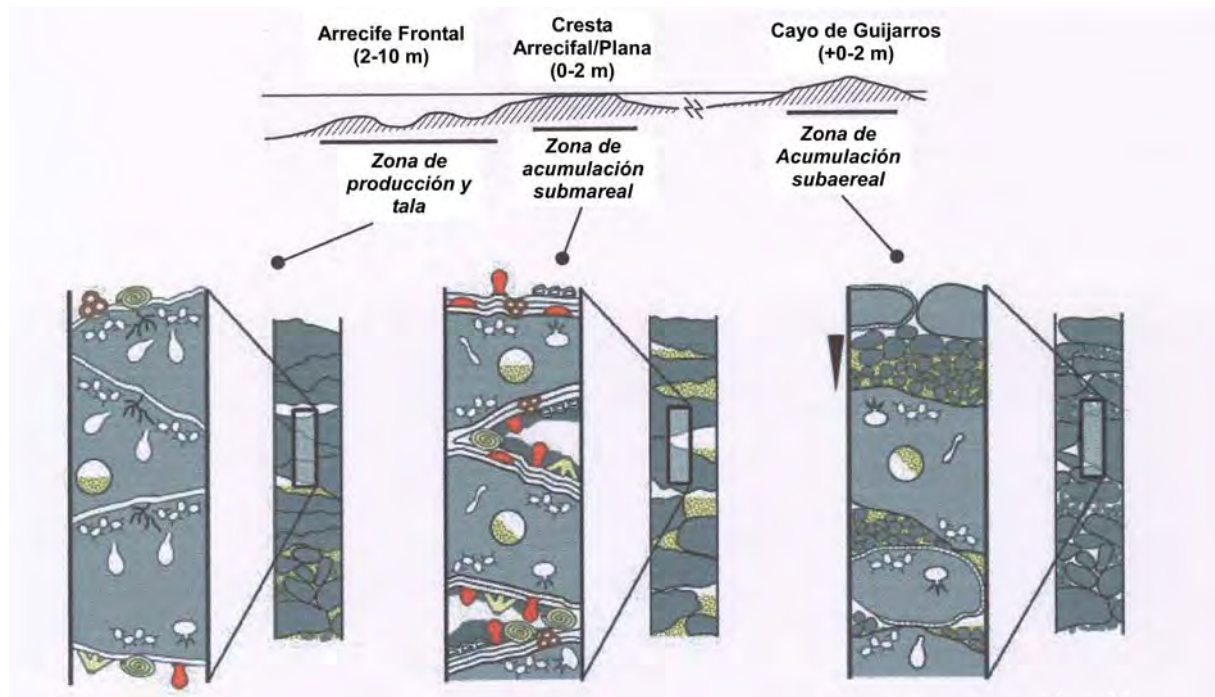
Blanchon y Perry (2004), por investigaciones en Cayo Arcas y Cayo Triángulos en el Banco de Campeche, México, identificaron tafonómicamente que el 93% de las zonas frontal, rompiente y plataforma de pedacera de los arrecifes consistían en *Acropora palmata*, con el 25% de las colonias presentando crecimiento *in situ* y el 75% restante estando compuesto por clastos. Sus resultados indican que la parte superior del arrecife, cerca de 15 m de rango de elevación, está compuesta principalmente por restos de *A. palmata*, y que ninguna de las zonas de ensamblaje de coral es reconocible. Encontraron también que la proporción de corales *in situ* era muy similar en las zonas frontal (40%) y cresta arrecifal (30%), por lo que concluyen que este indicador no puede ser utilizado para distinguir entre esos ambientes. Sin embargo, establecen que caracterizando la condición tafonómica de las colonias *in situ* y de los clastos, junto con

datos sedimentológicos y geocronológicos habituales, pueden diferenciarse las tres facies relacionadas con la profundidad (Fig. 5):

1) Facies de arrecife frontal.- Comprendida entre los -2 y los -10 m b.n.m.m., está compuesta por restos de muñones de *Acropora palmata* que fueron nivelados por huracanes pero que fueron capaces de recuperarse. Este proceso cíclico de destrucción y recuperación resulta en el desarrollo de áreas caracterizadas por secuencias condensadas de muñones, con depresiones entre ellas rellenas con detritus provenientes de los remanentes fragmentados derivados de las colonias;

2) Facies de cresta arrecifal.- Comprendida entre los -1 y los 0 m b.n.m.m., consistente en secciones de estructuras de colonias *in situ* de *A. palmata* y de gravas de coral generadas por la destrucción de colonias del arrecife frontal y transportadas hacia la cresta del arrecife por efectos de oleaje y de tormenta; y

3) Facies de cayos de guijarros.- Comprendida entre los 0 y los +5 m s.n.m.m., consiste en gravas de fragmentos de *Acropora palmata* y carece de estructuras *in situ*, las gravas fueron generadas por la destrucción de colonias de corales del arrecife frontal y cresta arrecifal durante huracanes, transportados por el oleaje del huracán y re TRABAJADOS por un fuerte acción del oleaje, y depositados en una berma de tormenta sobre el nivel medio del mar.



Composición: múltiples muñones *in situ* de *Acropora palmata* con superficies basales de adherencia de coral con gravas de *A. palmata*.

Bioerosión: alta, dominada por esponjas, bivalvos y huellas microendolíticas.

Incrustación: delgadas costras de corales photofílicos y epibiontes crípticos.

Cementación: micrita peloidal que llena los poros y escasas franjas de aragonita intraesquelética.

Geopetales: orientación original.

Composición: clastos de tamaño de guijarros grandes de *A. palmata* con matriz de arena muy gruesa

Bioerosión: localmente alta, dominada por esponjas y trazas de gusanos

Incrustación: gruesas costras de intercrecimiento coralino con *H. rubrum* de bajo relieve y verméticos

Cementación: abundante micrita peloidal que llena los poros y aragonita botroidal

Geopetales: mezcla de orientación original e invertida

Composición: clastos de tamaño de guijarros grandes de *A.*

palmata con matriz de gradación inversa de arena muy gruesa

Bioerosión: poca y variable, incluyendo esponjas, bivalvos y huellas de gusanos, toda predeposicional

Incrustación: poca y variable, toda predeposicional

Cementación: delgados bordes de micrita cincungranular y aragonita isopaca

Geopetales: orientación original e invertida

Figura 4.- Características tafonómicas de las facies identificadas por Blanchon y Perry (2004) para las zonas de arrecife frontal, cresta arrecifal y cayos de guijarros.

3.2 Geología de Yucatán

La Península de Yucatán, con una superficie de casi 40,000 km² y su extensión sumergida, conocida como el banco de Campeche, forman una vasta plataforma de calizas. Ésta, está

bordeada al Suroeste por la Sierra Madre del Sur, al Sur por la Tierras Altas de Chiapas, y al Sureste por las sierras de norte de Guatemala y las Montañas Mayas de Belice (Fig. 5). La plataforma está compuesta en su mayoría por calizas y dolomías terciarias y tiene un borde estrecho de calizas cuaternarias en su periferia (Weidie, 1985 en Ward *et al.*, 1985).

Los depósitos terciarios en el Suroeste están compuestos de un basamento ligeramente bandeado de carbonatos y evaporitas del Eoceno que bordean al norte y al este con calizas, dolomitas y margas del Oligoceno, Mioceno y Plioceno no diferenciadas. Estos carbonatos terciarios han estado sujetos a una extensiva erosión mecánica y química. La infiltración de agua de lluvia ha formado agujeros y cavernas, creando un acuífero altamente permeable (Batllori, 1999). No existen ríos superficiales y el alto grado de karstificación permite una rápida infiltración (Steinich y Marín, 1996). El colapso de las cavidades en el sustrato produce dolinas y ojos de agua conocidos localmente como cenotes. Existen extensos lentes de agua dulce por encima de la zona intrusión de agua salada que en algunas zonas penetra hasta 40 km (Steinich y Marín, 1996; Graniel *et al.*, 2004). Estos lentes están confinados a lo largo de la zona costera por una delgada capa calcárea casi impermeable (Perry *et al.*, 1989).

Los depósitos del Eoceno forman una terraza cárstica madura, ondulada y con colinas, que alcanza en elevación de 150 a 300 m, mientras que los depósitos más jóvenes forman una planicie cárstica “agujereada”, extremadamente plana, donde el rango de elevaciones desde el nivel del mar es de hasta 30 m con promedios de 10 m. El Estado de Quintana Roo se extiende por un sistema cárstico que pertenece a dos regiones fisiográficas, la planicie cárstica del Norte, franjeada por barras de playa y dunas, desde Cancún hasta Tulúm, y el complejo de fallas de bloque del Este, que se extiende desde Tulúm hasta Belice. En ambas áreas el agua de lluvia se infiltra en los poros de la roca carbonatada y no existen ríos, en cambio existen numerosos cenotes y ríos subterráneos.

El agua dulce es descargada en la zona costera por medio de ojos de agua. Las fracturas presentes en la plataforma cárstica de Yucatán actúan como un conducto para la mezcla de agua de mar y agua dulce, resultando en una solución de calcita no saturada que causa la disolución máxima de la caliza. De esta manera, la densidad máxima de las fracturas del Distrito de Bloque de Fallas del Este está íntimamente relacionada con la abundancia de ensenadas.

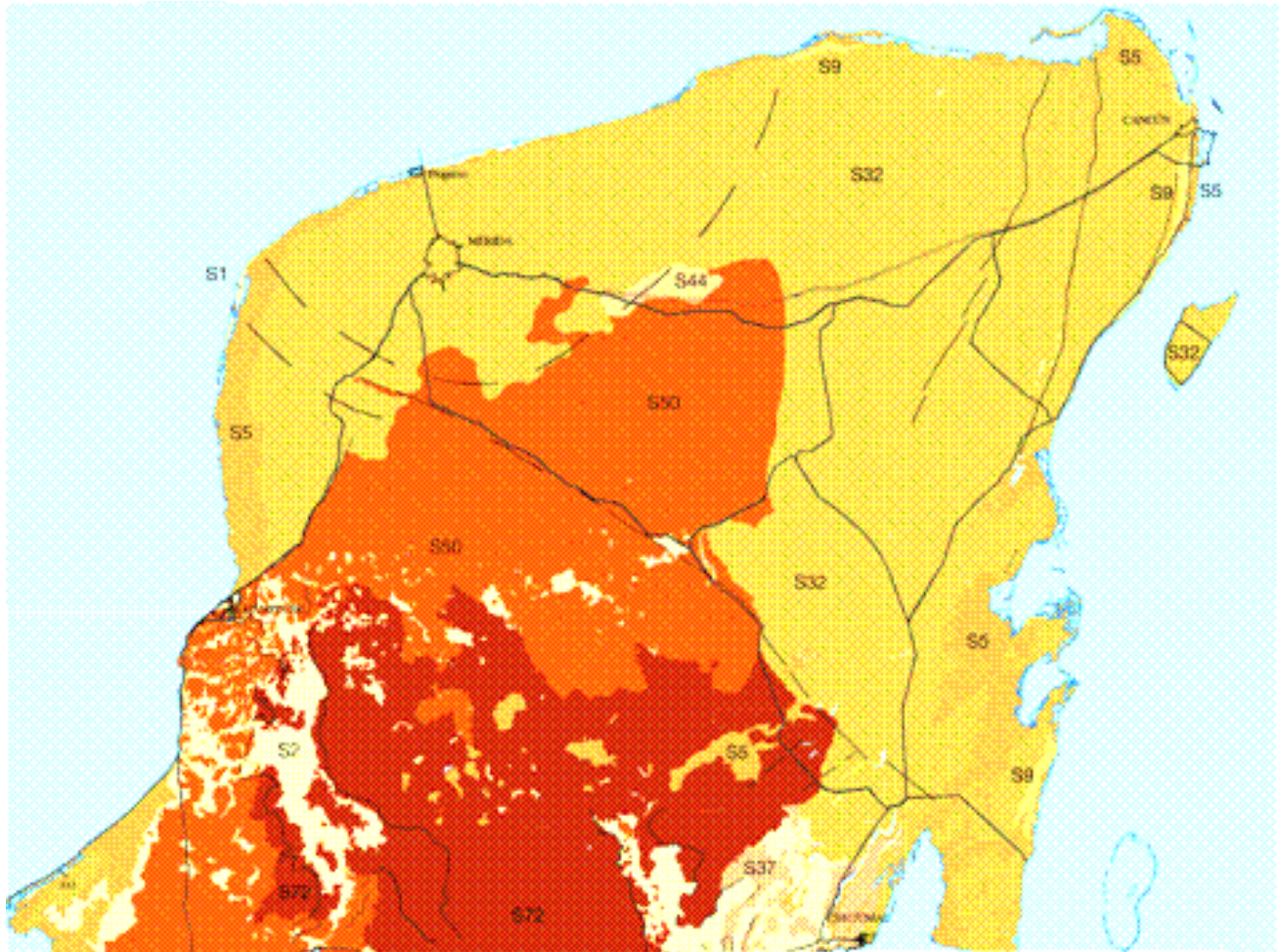


Figura 5. Mapa geológico de la Península de Yucatán mostrando las principales unidades sedimentarias, fallas, y caminos (Escala 1:2,000,000). Las unidades del Holoceno están divididas en eólicas (S1), lacustres (S5), y lodos, arenas y gravas no diferenciadas (S2). Debido a la escala no se muestran las unidades estrechas costeras. Las unidades del Pleistoceno (S9) no están diferenciadas y se describen como gravas de conchas y cantos rodados calizos arenosos. Las unidades con mayor cobertura en la península son la Formación Carrillo-Puerto (S32), una unidad no diferenciada del Mioceno a Pleistoceno descrita como calizas de conchuelas arrecifales, la Formación Chichen Itza (S50), un miembro arrecifal del Eoceno compuesto de calizas laguno-arrecifales (S44), y la formación Icaiché (S72), compuesta por calizas arrecifales del Paleoceno-Oligoceno. Nótese que la clave de las unidades se muestra dentro de la figura. Imagen cortesía de Blanchon, P. (en prensa).

Los depósitos cuaternarios de Quintana Roo están representados en una planicie estrecha (0.5 – 4 km) de cordilleras y hondonadas de 5 – 10 m.s.n.m., alargada por más de 150 km a lo largo de la costa.

En Quintana Roo, las eolinitas del Holoceno de la última era interglaciar (Ward, 1975) están presentes en varias partes de la costa cerca de Tulum, así como en las islas Contoy, Mujeres y Cancún. Éstas son semejantes a las franjas de duna del Pleistoceno que se desarrollaron al final de la última era interglaciar.

Las dunas holocénicas que han sido fechadas, han dado entre 4000 y 2300 años (Maclaren y Gardner, 2000) presentan la mineralogía y estructuras sedimentarias menos alteradas, mientras que las dunas del Pleistoceno están infestadas con huellas de raíces y tienen la más baja mineralogía original de aragonita.

3.3 Área del estudio

El arrecife coralino frente a Punta Maroma presenta diversas zonas: el fondo está cubierto por una capa de arena (con rizaduras en ángulo de que van de 1 a 180° con respecto a la costa) que tiene más de 50 cm de espesor, el fondo está colonizado por *Thalassia testudinum* (hasta 9 a 11 m de profundidad) y por varias especies del alga *Halimeda*, existen parches arenosos en que no hay colonización superficial. La pendiente general del fondo es de 8 a 12°. El perfil de la barrera está estructurado con base en los rasgos fisiográficos y bióticos (Jordán, 1979).

Nolasco-Montero (1988) desarrolló una descripción general de las características de las playas para la región del Caribe Mexicano, estableciendo que la zona de playa está caracterizada predominantemente por arenas del tipo de calcarenitas medias y finas, moderadamente bien clasificadas y mesocúrticas principalmente simétricas, que son de composición carbonatada con abundantes componentes biógenos, seguidos por los intraclastos y oolitas y que las estructuras

sedimentarias con mayor abundancia son las marcas de oleaje, las horadaciones por organismos, las marcas romboidales y la estratificación, tanto cruzada como paralela.

De acuerdo con la clasificación de Shepard (1973), Carranza-Edwards (1975), establece que la costa de Quintana Roo consta tanto de (a) costas primarias, es decir, producto de erosión terrestre, con topografía cárstica sumergida, como de (b) costas secundarias, producto de la depositación marina, con playas e islas de barrera y estructuras construidas por arrecifes coralinos.

En Punta Maroma es particularmente notoria la formación de extensos bancos del coral *Porites furcata* con *Thalassia testudinum*, en la zona de separación entre la plataforma y la laguna arrecifal, mientras que en las zonas de la parte media de la plataforma arrecifal está prácticamente desierta, existiendo pedacera de roca de origen.

En los bordes de la plataforma se encuentran las correspondientes asociaciones dominantes de *Acropora palmata* y *Montastraea annularis*, aunque existen algunos bancos aislados de *A. palmata* con especies típicas de la plataforma, pero de tamaño pequeño, como *Mycetophyllia lamarckiana*, *Isophyllia sinuosa*, *Isophyllastrea rigida*, *Mussa angulosa*, *Eusmilia fastigiata* y *Dichocoenia stokesii*.

De acuerdo con Jordan (1978) los alcionarios también presentan una zonación aunque aparentemente menos marcada, encontrando en la zona de rompiente a *Gorgonia flabellum*, *Plexaura flexuosa* y *Eunicea tourneforti*. A medida que se aleja (hacia la laguna) de la rompiente, la dominancia de *G. flabellum* disminuye, para ser parcialmente substituida por otros plexauridos y gorgóneos como: *Pseudoplexaura porosa*, *Plexaura homomalla*, *Eunicea mammosa*, *Muricea atlantica*, *Muriceopsis flavida*, *Plexaurella dichotoma* y además *Briareum asbestium*. Además de que entre más alto es el nivel de energía del oleaje y de las corrientes, más acentuada es la forma de candelabro de las colonias que se encuentran en esa zona.

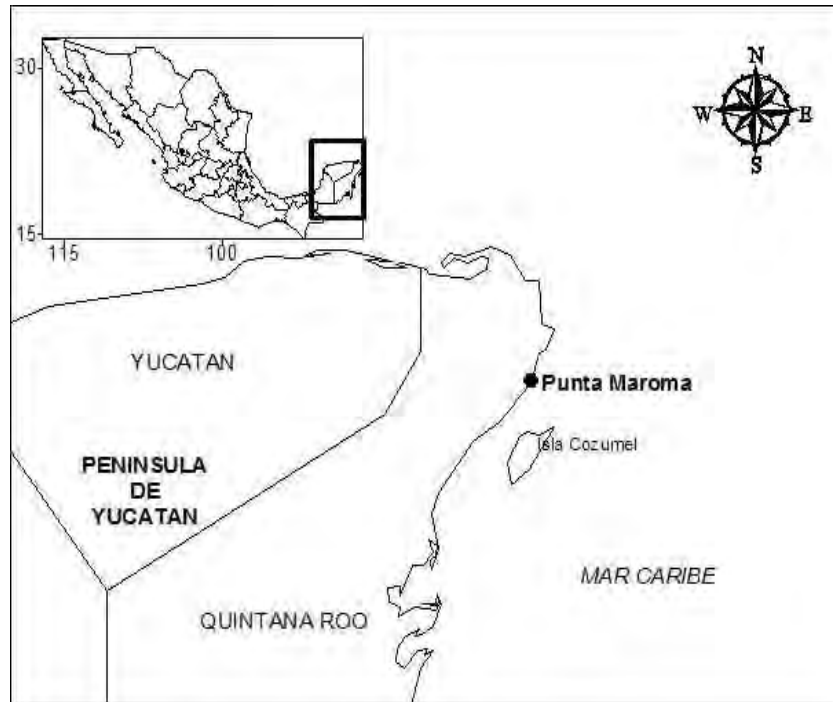


Figura 6. Ubicación del área de estudio.

3.4 Actividad de huracanes en el Caribe

Punta Maroma se encuentra dentro de la zona de trayectorias de huracanes que se generan en el Océano Atlántico y en el mar Caribe entre los meses de junio a noviembre (Arroyo, 1982; NOAA, 2006) (Fig. 6). Las estadísticas citan que, en promedio, una vez por año un huracán pasa por la Península de Yucatán (Merino, 1992). Para la parte Norte de Quintana Roo el periodo de retorno de huracanes es de 7 a 9 años (Jordán y Rodríguez, 1998).

La temporada de huracanes 2005 en el Atlántico, superó numerosos registros históricos al producirse 31 tormentas tropicales, más que en que cualquier otro año del que se tiene registro. Quince de las tormentas alcanzaron la categoría de huracanes según la escala Saffir-Simpson, y 4 alcanzaron la categoría 5; en ningún otro año se habían registrado más de dos huracanes de esa magnitud, lo que convierte al estado de Quintana Roo en una zona con gran afluencia de huracanes. Éstos representan un gran riesgo para la población y para los ecosistemas. En los

últimos 50 años Quintana Roo se ha visto afectado por más de cinco grandes meteoros de este tipo, los cuales causaron serios daños a la población y a los ecosistemas.

El huracán Gilberto, ocurrido en septiembre de 1988, es considerado como la tormenta más intensa registrada en el siglo XX en el hemisferio tropical Occidental (Lawrence y Gross, 1989), el “ojo” de éste, pasó a escasos kilómetros del Puerto Morelos. Su efecto fue amplificado dos meses más tarde por la tormenta tropical Keith. “Gilberto”, presentó ráfagas de hasta 350km/h y produjo una marea de tormenta de aproximadamente 3 m sobre el nivel medio del mar. El huracán “Roxana” afectó la zona en octubre de 1995. Su trayectoria pasó a una distancia aproximada de 70 km al sur del poblado de Puerto Morelos. Después de 1995, no fue sino hasta el año 2005 que el huracán “Wilma” afectó Punta Maroma.

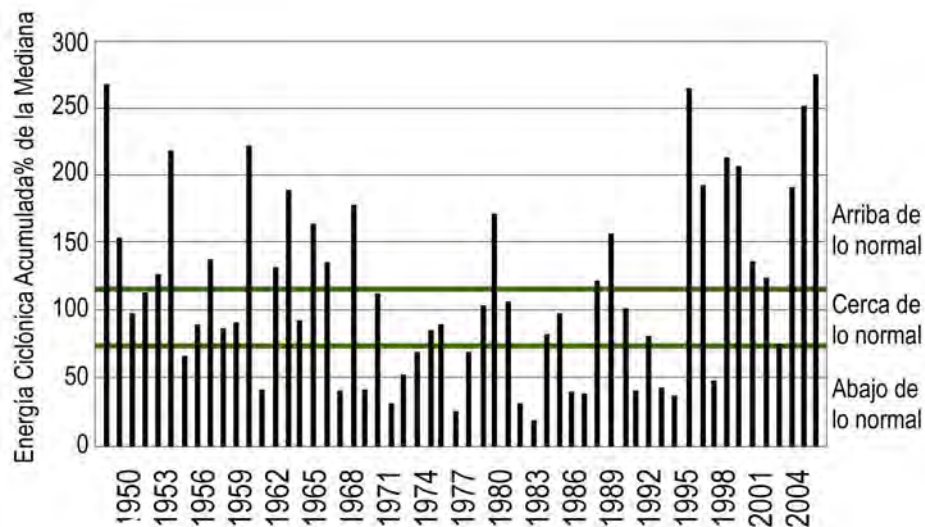


Figura 7. Esquema de la energía ciclónica para el Caribe, desde 1950 hasta 2004, donde se observa el incremento de energía ciclónica a partir del 2001. (Tomado de NOAA, 2006).

4. Materiales y métodos

4.1 Geomorfología

La zonación del arrecife se realizó por una combinación de las características de la biota béntica, del sedimento del sustrato, de la forma del sustrato y de la profundidad, y se caracterizó utilizando imágenes de satélite ortorectificadas de abril del 2005, obtenidas con el programa *Google-Earth-Pro*, y corroboradas en el sitio mediante observaciones subacuáticas y utilizando imágenes obtenidas con cámaras subacuáticas Nikonos 5.

La geomorfología de cada zona del arrecife se caracterizó utilizando perfiles realizados con datos de ecosondeo y mediciones in situ mediante buceo autónomo de distancias horizontales entre las zonas, con cintas de medición topográficas y estacas para establecer puntos de control, y con imágenes obtenidas del programa *Google-Earth-Pro*. La precisión de las mediciones tomadas del *Google-Earth-Pro* fue validada por comparación con mediciones tomadas *in situ* a través de buceo autónomo.

4.2 Geología

Los trabajos de perforación para la obtención de núcleos y batimetría prospectiva se llevaron a cabo a bordo de una embarcación menor, entre los meses de septiembre a octubre del 2005, en la zona del arrecife de Punta Maroma (Fig. 7). Debido al paso del huracán Wilma, la campaña de perforación tuvo que suspenderse y retomarse hasta junio del 2006.

Los sitios de perforación se ubicaron en el arrecife frontal (Fig. 8). Se utilizó un taladro hidráulico portátil de tres velocidades, impulsado por una bomba hidráulica montada en una embarcación menor. Las brocas utilizadas fueron de un diámetro exterior de 8.2 cm y 1.3 m de longitud con barras de extensión de 30 cm cuando fue requerido. Este dispositivo permitió

recuperar núcleos del arrecife de 7 cm de diámetro y más de 1.2 m de longitud en las diferentes zonas bénticas hasta ~6 m de profundidad.

En total se efectuaron 12 perforaciones y se recuperaron 12 núcleos de un transecto perpendicular a la costa en la zona del arrecife frontal: dos se recuperaron de la plataforma de roca (PMA-F1 y PMA-F2), dos en la superficie al final del macizo (PMA-F3 y PMA-F4), dos más en la zona plana entre los macizos A y B (PMA-F5 y PMA-F6), tres más la zona plana del macizo B (PMA-F7, PMA-F8 y PMA-F9), y los otros tres núcleos de la zona anterior a los macizos cerca de la cresta (PMA-F10, PMA-F11 y PMA-F12) (Fig. 8).

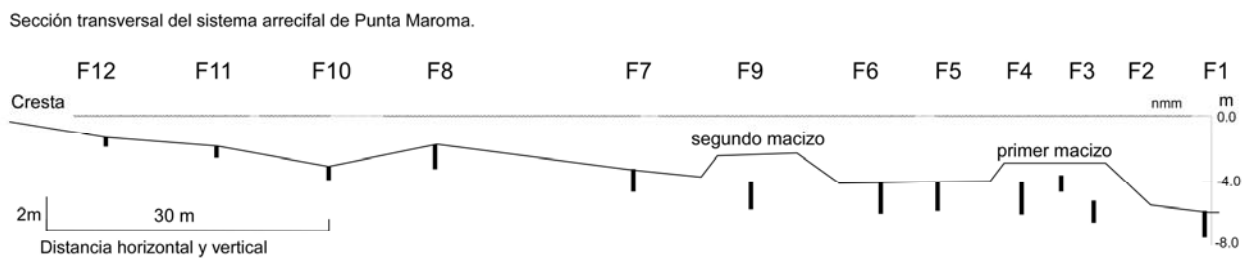


Figura 8. Transecto a lo largo del arrecife frontal en donde se aprecia la ubicación de las perforaciones para la obtención de núcleos.

A cada núcleo se le registró información para su identificación, tal como: clave de identificación, fecha de obtención, profundidad del fondo donde se perforó, profundidad de la perforación, longitud del núcleo recuperado, ubicación y anotaciones pertinentes (Tabla 1). Una vez en el laboratorio, los núcleos fueron cortados longitudinalmente y escaneados en un scanner de pantalla plana, para posteriormente ser integrados en un archivo digital con sus características de recuperación y composición.

Tabla 1. Características de los núcleos obtenidos de las perforaciones en el sistema arrecifal de Punta Maroma, México. WD se refiere a la distancia entre la superficie del nmm y el fondo. TD se refiere a la distancia desde la superficie del n.m.m. y la profundidad máxima alcanzada en el núcleo perforado. RQD es el Índice de Calidad de Roca.

| Núcleo N° | IDENTIFICADOR | FECHA OBTENCIÓN | PROFUNDIDAD DEL FONDO (m) | PROFUNDIDAD DE LA PERFORACIÓN | PROFUNDIDAD TOTAL DE LA PERFORACIÓN | LARGO DEL NÚCLEO | % DE RECUPERACIÓN | ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA RQD | OBSERV'S |
|--------------|---------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------|
| | | | WD | | TD | | | | |
| | | | metros | | | | | | |
| 2005 y 2006* | | | | | | | | | |
| 1 | PMAF1 | Ago-12 | 5.7 | 1.3 | 7 | 1.30 | 100 | 100 | BASAMENTO |
| 2 | PMAF2 | Ago-16 | 5.0 | 1.3 | 6.3 | 1.30 | 100 | 100 | BASAMENTO |
| 3 | PMAF3 | Ago-22 | 3.5 | 0.75 | 4.25 | 0.75 | 100 | 76 | ATORADO |
| 4 | PMAF4 | Ago-26 | 4.3 | 1.60 | 5.9 | 1.00 | 63 | 34 | |
| 5 | PMAF5 | Sep-05 | 4.2 | 1.60 | 5.8 | 0.70 | 44 | 64 | FONDO DE ARENA |
| 6 | PMAF6 | 06-Sep | 4.1 | 1.60 | 5.7 | 1.60 | 100 | 86 | POSIBLE. CTO. PLEIST. |
| 7 | PMAF7 | 09-Sep | 3.5 | 1.10 | 4.6 | 0.80 | 73 | 73 | CERCA DE LA GRAN ROCA |
| 8 | PMAF8 | 10-Oct | 2 | 1.1 | 3.1 | 0.55 | 50 | 55 | FONDO DE ARENA |
| 9 | PMAF9 | 13-Oct | 4 | 1.2 | 5.2 | 0.75 | 63 | 35 | FONDO DE ARENA |
| 10 | PMAF10 | 15-Ago* | 3 | 1 | 4 | 0.51 | 51 | 63 | FONDO DE ARENA |
| 11 | PMAF11 | 16-Ago* | 2 | 1 | 3 | 0.60 | 60 | 97 | FONDO DE ARENA |
| 12 | PMAF12 | 17-Ago* | 1.5 | 0.8 | 2.3 | 0.50 | 63 | 78 | FONDO DE ARENA |

Con base en la longitud del núcleo y en la longitud de la perforación se obtuvo el índice de Calidad de Roca (RQD: por su denominación en inglés: Rock-Quality-Designation) y el porcentaje de recuperación del núcleo. El RQD es un índice ingenieril que proporciona una estimación cuantitativa de la calidad de la masa de la roca obtenida por perforaciones de núcleos (Deere *et al.*, 1963). El RQD está definido como el porcentaje de piezas intactas mayores a 100 mm de todo el núcleo recuperado y se obtiene calculando la sumatoria de todas las piezas del núcleo mayores a 100 mm dividido entre la longitud total del núcleo multiplicando por 100 el resultado, los valores obtenidos se clasifican de acuerdo con la siguiente relación: de 0 a 25 %

muy pobre; de 25 a 50 % pobre; de 50 a 75 % regular; de 75 a 90 % buena; y de 95 a 100 % excelente. El porcentaje de recuperación del núcleo se calcula mediante la división de la longitud del núcleo recuperado entre la profundidad de la perforación.

Los núcleos se analizaron tafonómicamente de acuerdo con los antecedentes de Blanchon y Perry (2004). La descripción de la estructura tafonómica de los núcleos se desarrolló a través del programa *CANVAS versión "X"*, siguiendo los procedimientos de Blanchon y Perry (2004), elaborando hojas descriptivas para cada núcleo donde se muestran mediante ilustraciones específicas las condiciones tafonómicas, el grado de bioerosión, la fábrica de la estructura, y variables tales como la condición de la estructura del coral y de los clastos enfocados al grado relativo de bioerosión y fragmentación.

La incrustación de corales y clastos se describió en términos de grosor de corteza, además de la distribución de especies y de la morfología, mediante el conteo directo de organismos incrustantes cada 5 cm a lo largo del núcleo. Los resultados se registraron en una hoja de cálculo del programa *Microsoft Excel*, mismo que se utilizó para la elaboración de las gráficas de distribución de número de organismos, en función de la profundidad en que se encontraban. La bioerosión se cuantificó analizando las imágenes escaneadas de las secciones de los núcleos. Se calculó el porcentaje de área horadada para cada 5 cm del núcleo, utilizando el programa *Adobe Photoshop* para cuantificar las áreas y completando con mediciones directas de los núcleos y los cálculos de áreas obtenidos en el programa *Microsoft Excel*.

Con el fin de diferenciar los núcleos, se utilizaron los criterios de orientación de la superficie basal, la orientación de los corales y la forma en que se presentan las estructuras geopetales. La presencia de superficies basal o lateral, que se forman cuando un coral se fija a un sustrato, proporciona el nivel más alto de confianza en la identificación de corales *in situ*. Además, comúnmente las especies de coral tienen patrones de crecimiento característicos, que

pueden ser reconocidos en núcleos a partir de la orientación de la columela y/o paredes coralinas. Las acumulaciones de clastos de ramas también muestran geopetales invertidos o inclinados que también pueden distinguirlas de los corales *in situ*. Utilizando las combinaciones de estos criterios pueden distinguirse con certeza las estructuras *in situ* y depósitos de clastos el 95% de las veces (Blanchon y Perry, 2004).

Caracterizando las condiciones tafonómicas de los clastos y de las colonias *in situ*, junto con datos sedimentológicos como el tamaño de grano y su textura, se identificaron las facies de las colonias de corales de Punta Maroma solamente en la zona frontal del arrecife, ya que no fue posible perforar en la zona posterior debido a la predominancia de arena y a la carencia de estructuras de corales.

5. Resultados

5.1 Geomorfología y zonación béntica de la plataforma

La plataforma en Punta Maroma y la zona costera consisten en la zona de playa, la laguna arrecifal, el arrecife de franja, la terraza de roca, y la terraza de arena. En general el sistema llega a medir hasta 1,060 m desde la línea de costa hasta el fin de la plataforma arenosa (Fig. 9).

5.1.1 Línea de Costa

La playa en la zona de Punta Maroma está constituida por una franja arenosa de ~20 m de ancho en la porción sur y al Norte alcanza hasta 70 m de ancho. La porción sur tiene un rumbo NE-SW y la playa al Norte cuenta con una dirección NW-SE. La playa tiene una pendiente suave, típica de costas de baja energía con presencia de micromareas, y está protegida del oleaje por el arrecife de franja. La descripción sedimentológica de la playa y del sustrato no formó parte de los objetivos de este estudio.

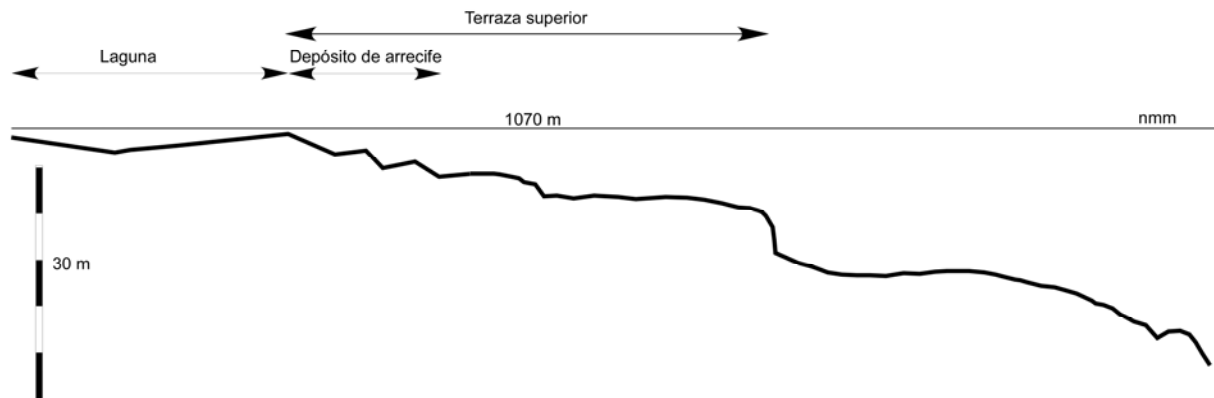


Figura 9. Perfil de la zona de Punta Maroma donde se observa la zona de la laguna arrecifal y el depósito de arrecife en la zona de la terraza superior. Este perfil se obtuvo mediante ecosondeo.

5.1.2 Laguna

La laguna arrecifal es de una amplitud promedio de 615 m, con un canal al centro de profundidad máxima de 4 m, con fondo arenoso y parches esparcidos de pastos marinos. La laguna es somera, teniendo solo 5 m en su zona más profunda y tiene una extensión variable que va desde 100 m en la zona norte, hasta 400 m en la zona sur (Fig. 10a).

El fondo está representado básicamente por parches de *Thalassia testudinum* en toda su extensión, y existen zonas con presencia de especies de escleractínios y alcionarios. Además de fanerógamas como *Thalassia* y *Halodule*, el fondo tiene diferentes especies de algas, tales como con *Halimeda*, *Udotea*, *Rhipocephalus*, *Penicillus*. La zona de separación entre el fondo de la laguna y el piso del arrecife posterior es normalmente abrupta, dependiendo de la cantidad de sedimento depositado. En general, el cambio entre un fondo y otro parece ser independiente de la región del arrecife y de la anchura de la laguna.

5.1.3 Arrecife

La presencia de una laguna somera con una extensión limitada significa que el arrecife de Punta Maroma se clasifica como un arrecife de franja (Kuenen, 1950). Este arrecife de franja presenta 3 habitats bénticos: el arrecife posterior, la cresta arrecifal y el arrecife frontal. El arrecife posterior se extiende en promedio 100 m desde la cresta hasta la laguna, alcanza profundidades de 1 a 3 m, y el fondo está cubierto de arena y grava. En su extremo oeste, es decir la parte que da hacia la laguna, está rodeado por un escalón suave y arenoso; este borde es irregular en su posición y forma distintas lenguas que se pueden extender hacia la laguna hasta más de 200 m.

La cresta arrecifal mide aproximadamente 50 m de ancho, es la parte más somera del arrecife, con una profundidad que varía entre 0.6 m y 0.2 m, y está compuesta por pedacería de grava de corales, particularmente de *A. palmata* (Fig. 10b). Está rodeada del lado de la laguna por un escalón de gravas de 1 m con una pendiente hasta 40 grados. Los clastos están severamente plagados de organismos incrustantes y biohoradores. En el lado del arrecife frontal, la cresta forma una transición gradual hacia la zona de pedacería.

El arrecife frontal se divide en 3 subzonas: una de pedacería y dos de macizos y canales, de cerca de 130 m de longitud, que finaliza en la isobata de los 6 m al término de la segunda zona de macizos y canales. La subzona de pedacería está compuesta por un substrato de pedacería de coral que está colonizado por colonias esparcidas de *Acropora palmata* y abundantes gorgonáceos. Las dos zonas de macizos y canales (Fig. 10c y 10d) tienen su orientación hacia mar adentro. Están desarrolladas pobremente en cuanto a corales duros aunque contienen una gran densidad de corales blandos del tipo gorgonáceo, principalmente en los lados; sus flancos tienen pendientes de $\sim 45^\circ$ y tienen alturas hasta de ~ 3 m desde la base del canal hasta la cima del

macizo; los canales están rellenos con una capa delgada de arena gruesa que está sobre una capa de roca arrecifal y escasamente tienen cantos rodados y carecen de corales.

5.1.4 Terraza de roca

La terraza de roca se extiende desde la línea de la cresta hasta los 200 m mar adentro y presenta de 6 a 16 m de profundidad. Su sustrato es rocoso, con una pendiente de ~ 2 a 2.5 colonizada escasamente por algas calcáreas, corales pétreos y alcionarios tales como *Agaricia spp*, *Montastraea annularis*, *Gorgonian flabellum*, *Eunicea mammosa* y *Plexaura flexuosa*, y cubierta en algunas partes por capas delgadas de arena y de grava de coral. Después de la terraza de roca se presenta un escalón de ~3m de altura que da inicio a la terraza arenosa (Fig.10e).

5.1.5 Terraza arenosa

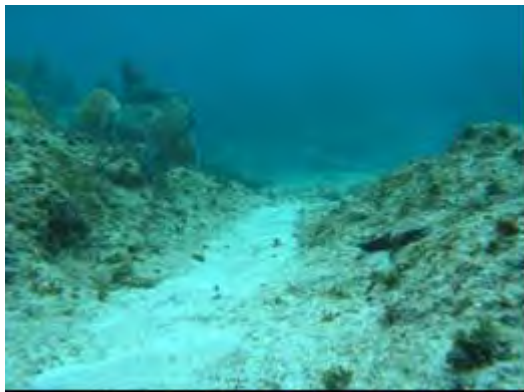
La terraza arenosa se presenta a partir de la isobata de los 19 m (Fig. 10f), extendiéndose hasta el borde del talud continental para prolongarse hasta la isobata de los 30 m y con longitudes desde la línea de costa que alcanzan los 600 m. El gradiente de la pendiente es de ~2 a 2.5° y está casi desprovista de crecimiento de organismos.



a



b



c



d



e



f

Figura 10. Fotografías de los detalles de la zonación del sistema arrecifal en Punta Maroma. a) Laguna arrecifal; b) cresta arrecifal; c y d) zona de macizos y canales; e) detalle del escalón del borde de la terraza de roca de aproximadamente 3 m de altura; f) terraza arenosa. El sistema llega a medir hasta 1,060 m desde la línea de costa hasta el fin de la plataforma arenosa.

5.2 Depósito de Arrecife de Coral

5.2.1 Ubicación y tamaño

A lo largo de 10 transectos medidos sobre el arrecife de Punta Maroma de manera perpendicular a su eje mayor, se calcularon las distancias entre los diferentes rasgos (Fig. 11 y 12). Estas medidas muestran lo siguiente:

- (a) La cresta del sistema arrecifal de Punta Maroma se encuentra a una distancia uniforme del borde de la terraza de roca, con un promedio de alrededor 300 m.
- (b) La distancia desde la cresta hasta el borde de la plataforma es también uniforme, con un promedio de 730 m.
- (c) La distancia desde la cresta hacia la costa varía desde 300 hasta 1000 m.
- (d) La amplitud del depósito consolidado del arrecife disminuye de norte a sur, con valores de 180 m a 120 m, respectivamente, en una distancia de ~3.5 km.

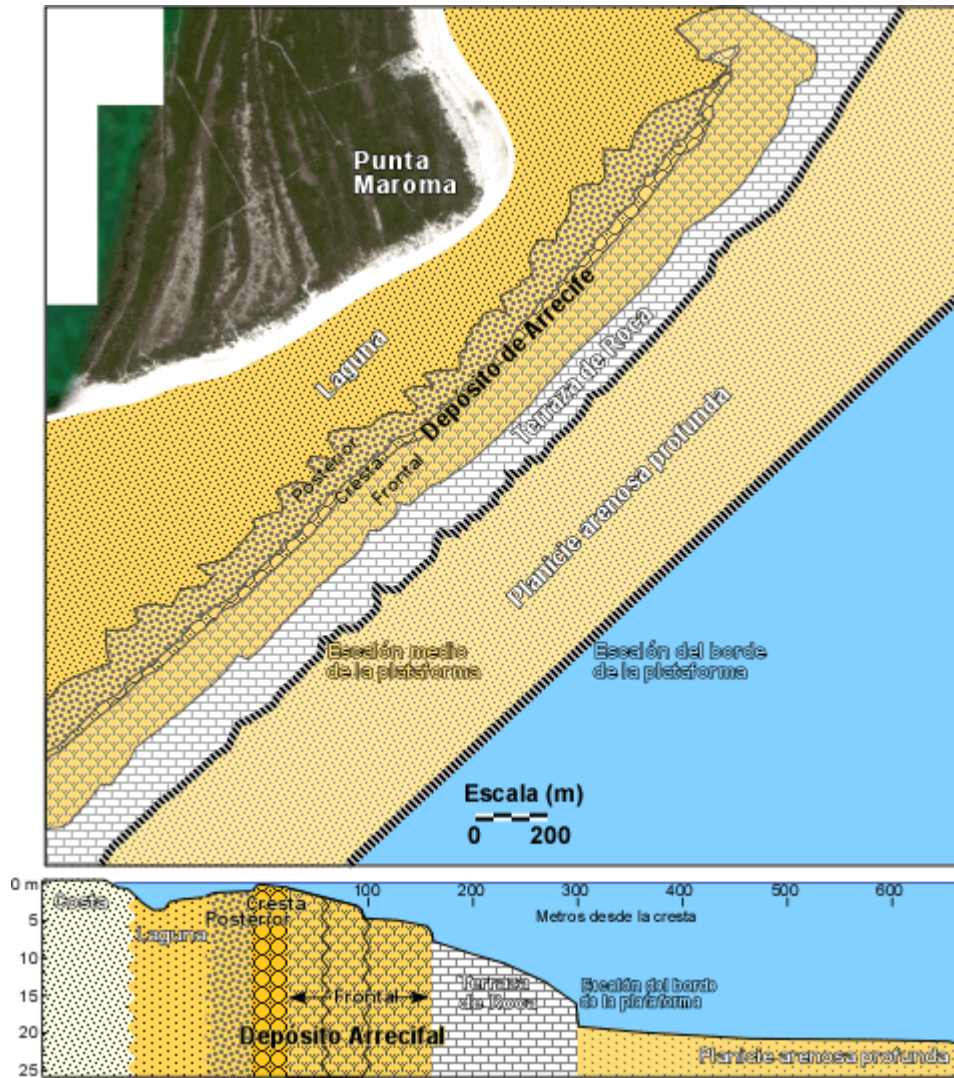


Figura 11. Zonación béntica y geomorfológica de la plataforma de Punta Maroma. La figura superior muestra la zonación general del depósito de arrecife en sus 300 m lineales, y la figura inferior muestra la geomorfología y la zonación a detalle donde se muestran las subzonas del arrecife frontal (la exageración vertical es aproximadamente x10).

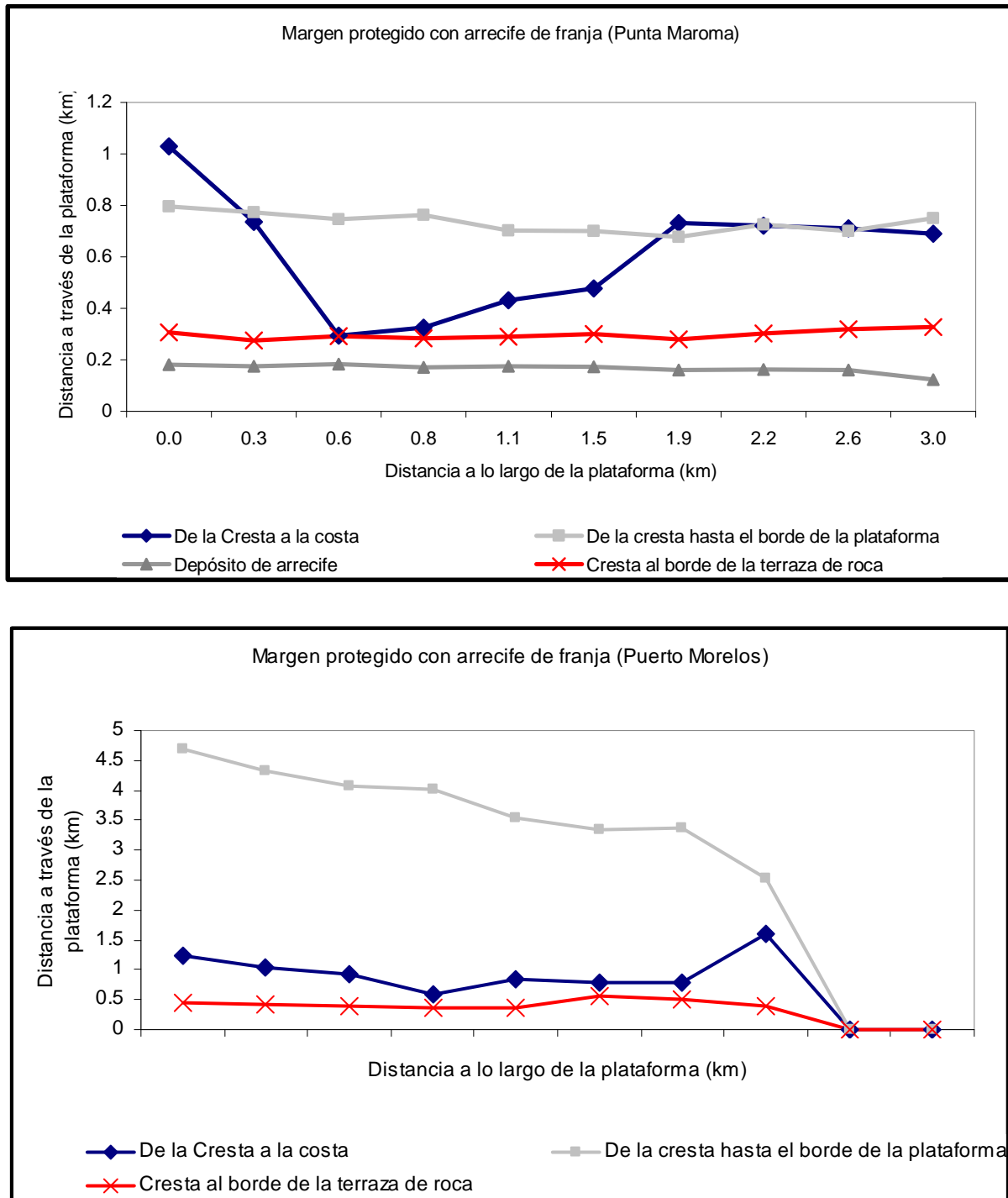


Figura. 12. Gráfica de distancias observadas a lo largo de 10 transectos medidos sobre el arrecife de Punta Maroma de manera perpendicular a su eje mayor. Se calcularon las distancias relativas a las amplitudes de la laguna arrecifal, el depósito de arrecife y la amplitud de la plataforma. En la parte superior se observa la zona de Punta Maroma y en la parte inferior la zona de Puerto Morelos; obsérvese la uniformidad de la distancia entre la cresta hacia el borde de la plataforma en Punta Maroma, no así en Puerto Morelos donde, de hecho, la distancia se incrementa hacia el norte. Por otra parte, nótese que la cresta en Puerto Morelos está localizada a una distancia similar de 300 m desde el borde de la terraza rocosa.

5.3 Caracterización de los núcleos

Núcleo PMA F3: El núcleo se obtuvo en la cima de un macizo de coral a una profundidad de 3.5 m y tiene una longitud de 0.75 m con un índice RQD del 57%, es decir, una calidad regular de núcleo y un porcentaje de recuperación del 73 %. Con base en el RQD se observa primordialmente una unidad parcialmente consolidada. La perforación de este núcleo se dio por concluida ya que la broca del taladro de perforación se atascó en dos ocasiones, por lo que se estableció un prototipo hidráulico para extraerla.

Este núcleo consiste en una unidad sencilla de roca pobremente consolidada (-0.75 a 0.00 m), que está compuesta por una intercalación de facies de estructuras *in situ* y de facies unimodal de clastos de coral. La facies de estructura *in situ* representa el 72% de la unidad y consiste en el coral *A. palmata* que presenta, tanto en la zona superior como inferior, una banda de bioerosión caracterizada por huellas de bivalvos, particularmente *Gastrochaenolites sp.*, y de la esponja horadadora *Entobia ovula*, además de restos de *Homotrema rubrum*. La cantidad de bioerosión en la banda de la estructura es del 22%. En la superficie de la estructura se encontraron costras delgadas (0.5–2.0 mm de grueso) de algas coralinas calcáreas que presentan íntercrecimientos de gasterópodos, posiblemente verméticos. Las superficies de la estructura muestran congregaciones de formas globosas de *Homotrema rubrum* y de formas planas por debajo de las costras de algas coralinas. Se observan geopetales con orientación normal.

La facies unimodal de gravas de coral representa el 28% de la unidad y consiste en clastos de *A. palmata* del tamaño de guijarros (-4 phi). Los clastos presentan bandas de bioerosión caracterizada por huellas de bivalvos tales como *Gastrochaenolites sp.* y de la esponja horadadora *Entobia ovula*. Las superficies de algunos de los clastos muestran congregaciones de formas globosas y planas de *Homotrema rubrum* y rastros de gusanos (*Trypanites isp.*). Entre los clastos se observa una matriz de arena muy fina (4 a 3 phi) que rellena los poros entre los huecos

de los incrustantes, en los geopetales y en las cámaras vacías de grandes horadaciones de bivalvos. Se observan geopetales con orientaciones mezcladas, es decir, tanto normal como invertida.

Núcleo PMA F4: El núcleo se obtuvo en la cima de un macizo de coral a una profundidad de 4.3 m y tiene una longitud de 1.0 m, con un índice RQD del 34 %, es decir, una calidad pobre de núcleo y un porcentaje de recuperación del 63 %. El RQD indica que se trata de una unidad pobremente consolidada. La perforación de este núcleo se terminó cuando se encontró una unidad de arena en el fondo del agujero.

La facies unimodal de gravas de coral representa el 100 % de la unidad y consiste en clastos de *A. palmata* y de *A. cervicornis* del tamaño de guijarros (-4 phi). Los clastos presentan huellas de bioerosión caracterizada por marcas de bivalvos tales como *Gastrochaenolites sp.* y por las esponjas horadoras *Entobia ovula*, *Cliona laticavicola* y *Aca sp.* Las superficies de algunos de los clastos muestran congregaciones de formas globosas y de bajo relieve de *Homotrema rubrum* y rastros de gusanos (*Trypanites isp.*). Entre los clastos se observa una matriz de arena muy fina (4 a 3 phi) que rellena los poros entre los huecos de los incrustantes, los geopetales y las cámaras vacías de grandes horadaciones de bivalvos. Se observan geopetales con orientación normal.

Núcleo PMA F5: El núcleo se obtuvo entre dos macizos de coral a una profundidad de 4.2 m y tiene una longitud de 0.70 m, con un índice RQD del 64 %, es decir, una calidad regular de núcleo y un porcentaje de recuperación del 44 %. El RQD señala una unidad pobremente consolidada. La perforación de este núcleo se dio por concluida cuando se encontró una unidad de arena desde los -0.70 m hasta los -1.60 m.

La facies unimodal de gravas de coral representa el 100 % de la unidad y consiste de clastos de *A. palmata* del tamaño de guijarros (-6 phi). Los clastos presentan huellas de

bioerosión caracterizada por marcas de bivalvos tales como *Gastrochaenolites sp.* y *Lihophaga*, así como por las esponjas horadoras *Entobia ovula*, *Cliona laticavicola* y *Aca sp.* Las superficies de algunos de los clastos muestran congregaciones de formas globosas, de bajo relieve y de forma ramificada de *Homotrema rubrum*. Se presentan pequeñas bandas de *Millepora sp.* y rastros de abundantes gusanos (*Trypanites isp*). Entre los clastos se observa una matriz de arena muy fina (4 a 3 phi) que rellena los poros entre los huecos de los incrustantes, los geopetales y las cámaras vacías de grandes horadaciones de bivalvos. Se observan geopetales con orientación normal.

Núcleo PMA F6: El núcleo se obtuvo en una zona plana entre dos macizos de coral a una profundidad de 4.1 m y una longitud de 1.60 m con un índice RQD del 98%, es decir, una calidad excelente de núcleo y un porcentaje de recuperación del 100 %. Con base en el RQD se distinguen: (a) una unidad de basamento bien consolidado de aproximadamente 40 cm de longitud en la base, y (b) una unidad por encima, parcialmente consolidada, de 70 cm de longitud. La perforación de este núcleo se terminó cuando se encontraron las rocas del basamento.

La unidad de basamento consolidada (-1.20 a -0.80 m) se compone de clastos de gravas de corales (-10 phi) de *Montastraea sp.*, con una matriz de sedimentos carbonatados de grano muy fino, bien consolidado, y partículas de conchas de moluscos de tamaños que van desde -1 a -2 phi. Los clastos no presentan gradación. Estos depósitos presentan rizocreciones. La parte superior de esta unidad presenta rastros de bioerosión marina moderna, de macrohoradores como la esponja *Entobia ovula* y de huellas de bivalvos específicamente de *Gastrochaenolites sp.* El estado de preservación de los esqueletos en esta unidad es del tipo Modificado.

La unidad superior pobremente consolidada (-0.80 a 0.00 m) estuvo compuesta por una intercalación de facies de estructuras *in situ* y de facies bimodal de clastos de coral. La facies de estructura *in situ* representa el 18% de la unidad y consiste en el coral *A. palmata* que presenta,

tanto en la zona superior como inferior, una banda de bioerosión caracterizada por huellas de bivalvos, particularmente *Gastrochaenolites sp.* y por la esponja horadora *Entobia ovula*. La cantidad de bioerosión en la banda de la estructura es del 25%. Por encima de la superficie de fractura bioerosionada de cada estructura hay costras delgadas (0.5 – 2.0 mm de grueso) de algas coralinas calcáreas que presentan íter-crecimientos de gasterópodos, posiblemente verméticos, y también costras más gruesas de *Millepora sp.*, de hasta 1.5 cm. Las superficies de la estructura muestran congregaciones de formas globosas de *Homotrema rubrum*.

La facies bimodal de gravas de coral representa el 82% de la unidad y consiste en clastos de *A. palmata* de tamaños que van desde arena muy gruesa (0 a -1 phi) hasta guijarros grandes (-8 a -10 phi). En los contactos superiores entre la facies de clastos y la facies de estructura se observan superficies basales de adherencia de coral. Los clastos presentan bandas de bioerosión caracterizada por huellas de bivalvos tales como *Gastrochaenolites sp.* y por la esponja horadora *Entobia ovula*. Las superficies de algunos de los clastos muestran congregaciones de formas globosas de *Homotrema rubrum* y rastros de gusanos (*Trypanites isp.*). Entre los clastos se observa una matriz de arena muy fina (4 a 3 phi) que rellena los poros entre los huecos de los incrustantes, en los geopetales y en las cámaras vacías de grandes horadaciones de bivalvos.

Núcleo PMA F7: El núcleo se obtuvo de la perforación de la zona cercana a la cresta del arrecife frontal del área de Punta Maroma y tiene una longitud de 0.65 m, la profundidad del fondo fue de 3.5 m y la profundidad total de la perforación fue de 4.15 m. Este núcleo consiste en una unidad sencilla de roca pobremente consolidada.

La unidad está constituida por una secuencia intercalada de arena gruesa (2 phi) en el fondo (de los -1.10 hasta los -0.83 m), seguida de muñones de colonias *in situ* de *A. palmata* (de los -0.83 a los -0.60 m). En la parte superior (de los -0.60 a los 0.0 m) se encuentran clastos de *Acropora palmata* con una matriz de arena fina (-5 a -10 phi) y en la zona superior de guijarros

grandes de *Acropora cervicornis* (-9 a -10 phi) cementada con una matriz de arena muy fina con restos de conchas de foraminíferos de hasta 0.4 cm y de bivalvos de hasta 0.5 cm.

Los clastos presentan áreas de bioerosión en sus periferias de 1.5 a 2.0 cm de ancho. La macro-horadación de esas zonas se presenta como huellas de bivalvos, particularmente *Gastrochaenolites sp.*, y de la esponja horadadora *Entobia ovula*. La cantidad de bioerosión es del 34% en los clastos, y del 40% en el muñón de *A. palmata* que está en la base del núcleo. Las superficies de los clastos y del muñón encontrado en la base del núcleo muestran congregaciones de formas globosas de *Homotrema rubrum*. Entre los clastos se observan geopetales de orientación normal rellenos de arena muy fina; también se observan huecos de incrustantes y cámaras vacías de grandes horadaciones de bivalvos rellenas de arena muy fina. Los clastos presentes en el núcleo son clasificados por su tamaño como guijarros grandes (-5 a -10 phi). A pesar de que se observa un clasto de phi menor en la zona inferior y clastos de phi mayor en la parte superior, esto no representa una gradación de los clastos.

Núcleo PMA F8: El núcleo se obtuvo al inicio de la zona de macizos y canales a una profundidad de 2 m y tiene una longitud de 0.55 m, con un índice RQD del 55 %, es decir, una calidad regular de núcleo y un porcentaje de recuperación del 50 %. Con base en el RQD se observa primordialmente una unidad pobremente consolidada. La perforación de este núcleo se dio por concluida cuando se encontró una unidad de arena a partir del fondo desde los -0.55 m hasta -1.1 m.

Este núcleo muestra una unidad de roca sencilla pobremente consolidada (-0.70 a 0.00 m), que está compuesta por una facies unimodal de clastos de coral. La facies unimodal de gravas de coral consiste en clastos de *Acropora palmata* y *Diploria strigosa* del tamaño de guijarros (-6 phi). Los clastos presentan huellas de bioerosión caracterizadas por marcas de bivalvos tales como *Gastrochaenolites sp.* así como por las esponjas horadoras *Entobia ovula*, *Cliona*

laticavicola, *Thossa sp.* y *Aca sp.* Las superficies de algunos de los clastos muestran congregaciones de formas globosas, de bajo relieve y de forma ramificada de *Homotrema rubrum*, y presentan pequeñas bandas de *Millepora sp.* y rastros de gusanos (*Trypanites isp*). Entre los clastos se observa una matriz de arena muy fina (4 a 3 phi) que rellena los poros entre los huecos de los incrustantes, los geopetales y las cámaras vacías de grandes horadaciones de bivalvos.

Núcleo PMA F9: El núcleo se obtuvo en un canal entre dos macizos a una profundidad de 4 m y tiene una longitud de 0.75 m, con un índice RQD del 35 %, es decir, una calidad pobre de núcleo y un porcentaje de recuperación del 63 %. El RQD indica una unidad pobremente consolidada. La perforación de este núcleo se dio por concluida por encontrar una unidad de arena a partir del fondo desde los -0.75 m hasta -1.2 m.

Este núcleo consiste en una unidad de roca sencilla pobremente consolidada (-0.75 a 0.00 m) que está compuesta por una facies unimodal de clastos de coral. La facies unimodal de gravas de coral representa el 100 % de la unidad y consiste en clastos de *Acropora palmata* del tamaño de guijarros grandes (-6 phi). Los clastos presentan huellas de bioerosión caracterizada por marcas de bivalvos tales como *Gastrochaenolites sp.*, así como por las esponjas horadoras *Entobia ovula*, *Cliona laticavicola*, *Thossa sp.* y *Aca sp.* Las superficies de algunos de los clastos muestra congregaciones de formas globosas, de bajo relieve y de forma ramificada de *Homotrema rubrum*. Se presentan en abundancia bandas de *Millepora sp.* y rastros de gusanos (*Trypanites isp*), además de *Carpentaria utricularis*. Entre los clastos se observa una matriz de arena muy fina (4 a 3 phi) que rellena los poros entre los huecos de los incrustantes, en los geopetales y en las cámaras vacías de grandes horadaciones de bivalvos. Se observa la presencia de geopetales normales.

Núcleo PMA F10: El núcleo se obtuvo a 40 m de la cresta arrecifal y tiene una longitud de 0.51 m, con un índice RQD del 63 %, es decir, una calidad regular de núcleo y un porcentaje de

recuperación del 51 %. Según el RQD se trata de una unidad pobremente consolidada. La perforación de este núcleo se dio por concluida por encontrar huecos rellenos de arena hasta la profundidad de 1.0 m.

Este núcleo consiste en una unidad de roca sencilla pobremente consolidada (-0.51 a 0.00 m) que está compuesta por una facies unimodal de clastos de coral. La facies unimodal de gravas de coral consiste en clastos de *Acropora palmata* y de *Montastraea annularis* del tamaño de guijarros grandes (-6 phi). Entre los clastos se observa una matriz de arena muy fina (4 a 3 phi) que rellena los poros entre los huecos de los incrustantes, los geopetales y las cámaras vacías de grandes horadaciones de bivalvos. Se observa la presencia de geopetales normales. Los clastos presentan huellas de bioerosión caracterizada por marcas de bivalvos tales como *Gastrochaenolites sp* y por las esponjas horadoras *Entobia ovula* y *Cliona laticavicola*. Las superficies de algunos de los clastos muestran congregaciones de formas globosas, de bajo relieve y de forma ramificada de *Homotrema rubrum*, y en menor abundancia se presentan bandas de *Millepora sp.* y rastros de gusanos (*Trypanites isp*).

Núcleo PMA F11: El núcleo se obtuvo a 30 m de la cresta arrecifal y tiene una longitud de 0.60 m, con un índice RQD del 97 %, es decir, una excelente calidad de núcleo y un porcentaje de recuperación del 60 %. Con base en el RQD es una unidad poco consolidada. La perforación de este núcleo se dio por concluida cuando se encontraron huecos rellenos de arena hasta la profundidad de 1.0 m.

Este núcleo muestra una unidad de roca sencilla pobremente consolidada (-0.60 a 0.00 m) que está compuesta por una facies unimodal de clastos de coral. Entre los clastos se observa una matriz de arena muy fina (4 a 3 phi), que rellena los poros entre los huecos de los incrustantes, los geopetales y las cámaras vacías de grandes horadaciones de bivalvos. La facies unimodal de gravas de coral representa el 100 % de la unidad y consiste en clastos de *Acropora palmata* del

tamaño de guijarros grandes (-6 phi). Los clastos presentan huellas de bioerosión caracterizada por marcas de bivalvos tales como *Gastrochaenolites sp* y por las esponjas horadoras *Entobia ovula*, *Thoosa sp.* y *Cliona laticavicola*. Las superficies de algunos de los clastos muestran congregaciones de formas globosas, de bajo relieve y de forma ramificada de *Homotrema rubrum*, y en menor abundancia se presentan bandas de *Millepora sp.* y rastros de gusanos (*Trypanites isp*).

Núcleo PMA F12: El núcleo se obtuvo a 20 m de la cresta arrecifal y tiene una longitud de 0.50 m, con un índice RQD del 78 %, es decir, una calidad buena de núcleo y un porcentaje de recuperación del 63 %. Con base en el RQD es ésta una unidad poco consolidada. La perforación de este núcleo se dio por concluida por encontrar huecos rellenos de arena hasta la profundidad de 0.8 m.

Este núcleo presenta una unidad de roca sencilla pobremente consolidada (-0.50 a 0.00 m) que está compuesta por una facies unimodal de clastos de coral. La facies unimodal de gravas de coral consiste en clastos de *Acropora palmata* del tamaño de guijarros grandes (-6 phi). Las superficies de algunos de los clastos muestran congregaciones de formas globosas y de bajo relieve de *Homotrema rubrum*. Se presentan además bandas de *Millepora sp.* y se observan rastros de gusanos (*Trypanites isp*). Los clastos presentan huellas de bioerosión caracterizada por marcas de bivalvos tales como *Gastrochaenolites sp* y por la esponja horadora *Entobia ovula*. Entre los clastos se observa una matriz de arena muy fina (4 a 3 phi) que rellena los poros entre los huecos de los incrustantes, los geopetales y las cámaras vacías de grandes horaciones de bivalvos. Se observan geopetales normales.

5.4 Variación en la distribución de organismos incrustantes *H. rubrum* y biohoradores

Del análisis de los núcleos obtenidos en la zona del arrecife frontal se encontró que los foraminíferos incrustantes, especialmente de *Homotrema rubrum* (Lamarck) forman parte importante de la comunidad de organismos incrustantes, particularmente en las partes críticas de los fragmentos de núcleos, así como las oquedades remanentes de organismos horadores. Se encontraron tres morfologías comunes en el crecimiento de estos foraminíferos, de los tipos globosa, ramificada y de bajo relieve, en distintos niveles desde 1.5 hasta 5 m, en los cuales se observó que no varían significativamente en lo que se refiere a abundancia de número de individuos con respecto a las diferentes profundidades de los núcleos, mostrando una ligera tendencia a incrementar el número de individuos hacia la zona más somera (Fig. 13). Además se identificó que la forma globosa es ligeramente más abundante que las formas ramificada y de bajo relieve (Fig. 13).

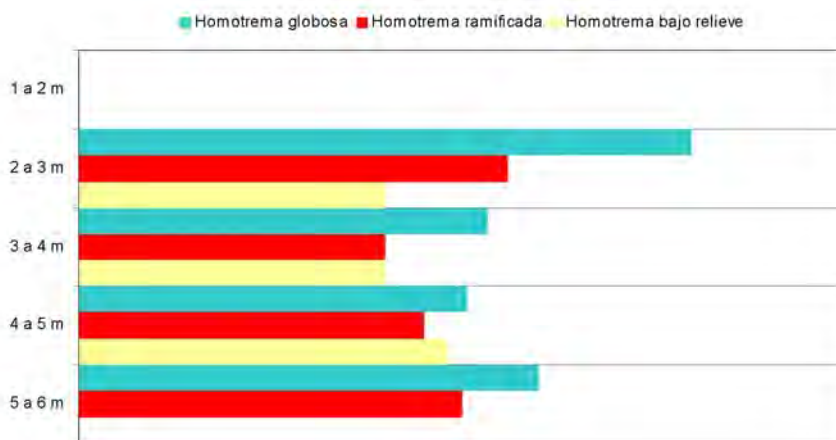
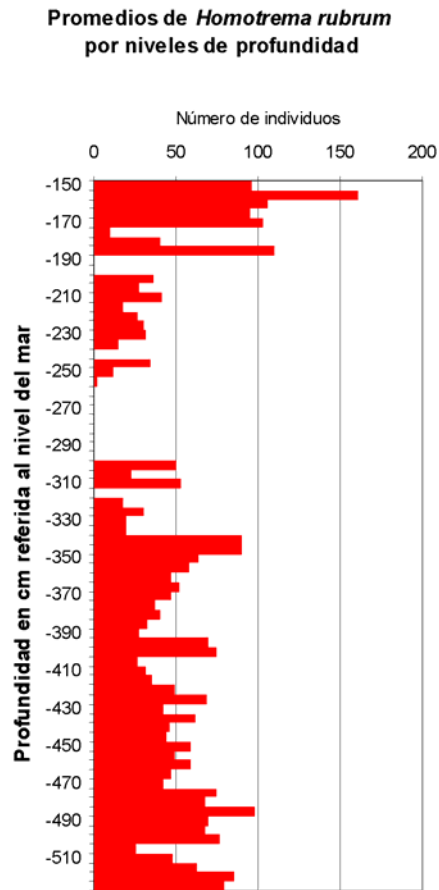


Figura 13. La imagen superior muestra los promedios de *Homotrema rubrum* por niveles de profundidad de los núcleos del arrecife frontal de Punta Maroma. La imagen inferior representa la cantidad de *Homotrema rubrum* en los diferentes tipos encontrados: globosa, ramificada y de bajo relieve.

5.5 Resumen de la facies arrecifal e interpretación

El depósito de arrecife consiste aparentemente en una sola unidad de gravas de cantos rodados (-8 a -10 phi) de *Acropora palmata*, de aproximadamente 5.2 m de espesor en la zona de cresta y de 2.5 m en la parte mas frontal, con presencia de escasas colonias *in situ* de *A. palmata*. En la zona de macizos se encuentra la alternancia de estructuras *in situ* con zonas de gravas unimodales. La facies unimodal de gravas se localiza a lo largo del depósito de arrecife. La alternancia de facies, de estructura *in situ* y de facies unimodal de grava, se presentó más claramente en los núcleos PMAF3 y PMAF6, localizados en la cima de un macizo y entre la zona del primer y segundo macizo, respectivamente. La facies unimodal de grava se presenta a lo largo del depósito de arrecife. Del total de núcleos perforados (10.5 m) el 90% son clastos de coral y el 10 % de estructura *in situ*. La especie de coral dominante en los clastos es *Acropora palmata*, con un 95%, aunque hay también clastos de *Montastraea annularis* y de *Siderastrea siderea* en porcentajes de ~5%. La bioerosión en los clastos es del ~29% y en las estructuras *in situ* del ~25%. Los clastos están bien preservados en un 70% y las estructuras *in situ* en 75%. La matriz dominante es arena de grano fino de 4 a 3 phi y las menos comunes fueron de matriz de guijarros grandes y de restos de conchas de foraminíferos (Fig.14).

El depósito de arrecife de la zona de Punta Maroma se formó presumiblemente a partir de los siguientes procesos: a) la acumulación progresiva de pedacería de corales rotos durante el paso de tormentas (huracanes), b) el propio mecanismo de bioerosión a que están sujetos, y c) de estructuras *in situ* que se habían estado estableciendo en la terraza.

Estos depósitos formaron capas de clastos de coral entre restos de muñones de colonias *in situ*, y sobre esas capas se establecieron nuevas colonias que a su vez fueron rotas por eventos de tormenta. El retrabajado de los clastos de coral rotos y acumulados se identifica por la serie de organismos incrustantes que se observan en diferentes profundidades de los núcleos y en ambos

lados de los fragmentos. Entre dichos organismos, *H. rubrum* prefiere las condiciones crípticas, lo que supone que los lados de los clastos estuvieron siendo removidos o volteados durante los eventos de tormenta.

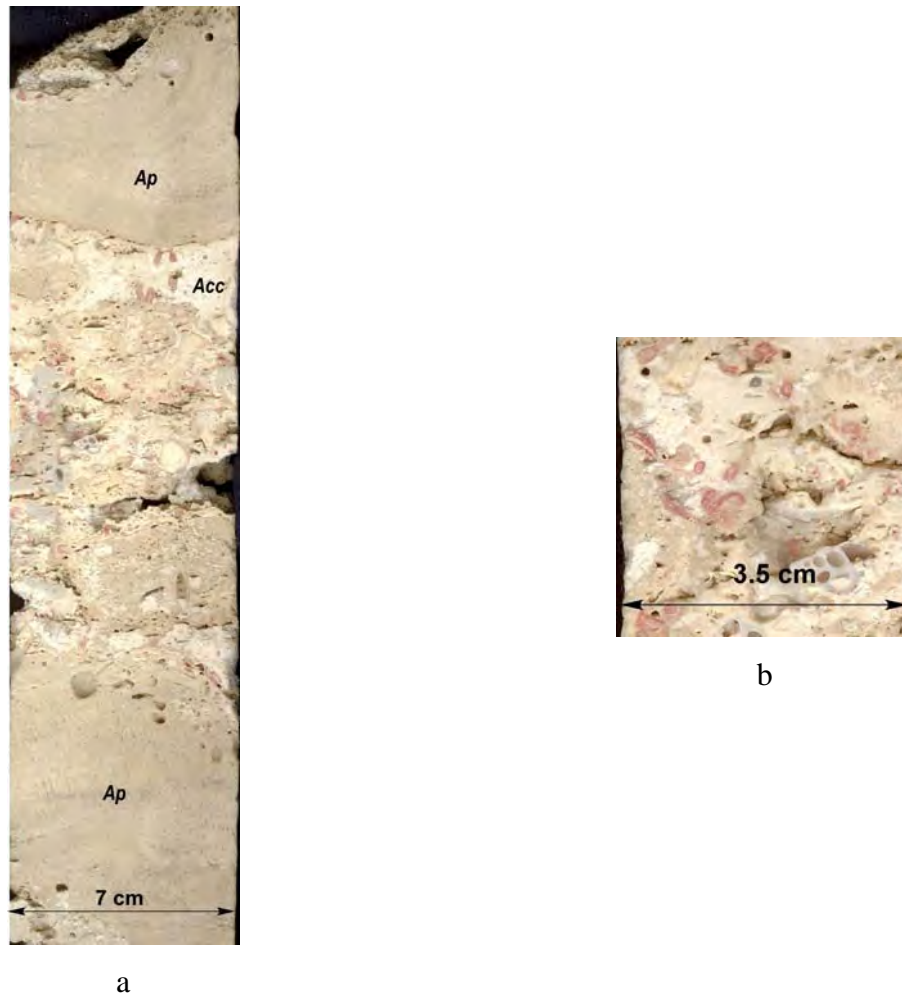


Figura 14. Imágenes mostrando las características de la facies de arrecife frontal de Punta Maroma. (a) Detalle de la facies representativa mostrando la alternancia de estructura *in situ* con guijarros de pedacería; (b) detalle de la presencia de *Homotrema rubrum* con restos de foraminíferos en la matriz calcárea de la facies de guijarros pobremente consolidado. Ap: *Acropora palmata*, Acc: Algas Coralinas Calcáreas.

En la distribución de los clastos, a lo largo del depósito de arrecife, no se observan diferencias significativas en la de gradación que hagan suponer que hubo diferentes condiciones de energía durante su acumulación. Los clastos y las estructuras *in situ* son principalmente de *Acropora palmata*, lo que sugiere que el depósito de arrecife proviene de las mismas estructuras.

5.6 Hallazgo Principal

Tanto la cresta, como las zonas de pedacera de coral y de macizos y canales, del arrecife frontal de Punta Maroma se encuentran caracterizadas por la misma facies, establecida por la intercalación de escasas estructuras de coral *in situ* con pedacera de gravas de estructura de coral, producto de la acreción arrecifal. Los huracanes juegan un papel determinante en la acreción de este sistema arrecifal.

5.7 Depósito de la Terraza de roca

5.7.1 Caracterización de los Núcleos

Núcleo PMA F1: El núcleo se obtuvo en la zona de la plataforma arenosa, aproximadamente a 11 m mar adentro desde el final de la zona de macizos y canales, a una profundidad de 5.7 m. Tiene una longitud (CL) de 1.30 m con un índice RQD de 100%, por lo que se clasifica como Excelente calidad de núcleo, así como un 100% de recuperación del núcleo. Muestra una sola unidad consistente en basamento bien consolidado. La perforación de este núcleo se terminó por estar perforando solo rocas de basamento.

La unidad está compuesta por clastos de gravas de corales (-10 phi) de *Montastraea sp.*, *Agaricia sp.* y *Porites sp.* con una matriz compuesta de arena carbonatada de grano muy fino bien consolidada y de clastos de conchas de moluscos de tamaños que van desde -1 a -2 phi. Estos depósitos presentan rizocreciones. En la zona superior de la unidad se localizan rastros de bioerosión marina moderna, de macrohoradores como la esponja *Entobia ovula* y de huellas de bivalvos como *Gastrochaenolites sp.*; además, se observan restos de foraminíferos incrustantes como *Homotrema rubrum*. El estado de preservación de los esqueletos en esta unidad es del tipo Modificado.

Núcleo PMA F2: El núcleo se obtuvo en la zona de la plataforma arenosa al final de la zona de macizos y canales, a una profundidad de 5 m. Tiene una longitud (CL) de 1.30 m con un índice RQD de 100% y se reconoce la excelente calidad de núcleo, así como un 100% de recuperación del núcleo. Muestra una sola unidad consistente en basamento bien consolidado. La perforación de este núcleo se terminó por estar perforando solo rocas de basamento.

La unidad está compuesta por clastos de gravas de corales (-10 phi) de *Montastraea* sp., *Agaricia* sp. y *Porites* sp. con una matriz compuesta de arena carbonatada de grano muy fino bien consolidada y partículas de conchas de moluscos de tamaños que van desde -1 a -2 phi. Estos depósitos presentan rizocreciones. También se observan restos de foraminíferos incrustantes como *Homotrema rubrum*.

5.7.2 Resumen de los núcleos de la terraza roca e interpretación

Unidad de basamento consolidado

La unidad de basamento consolidado es una roca tipo *Floatstone* cuyos clastos corresponden a gravas de corales, principalmente de *Mussa* sp., *Siderastrea* sp., *Agaricia* sp. *Porites* sp. y partículas de conchas de moluscos. La matriz de *Halimeda* presenta tamaños de grano más finos hacia la cima que en la base, y no existe gradación en los clastos. En la parte superior de la unidad existen rastros de bioerosión marina moderna, por lo que esta unidad es interpretada como una facies de laguna, o plataforma del Pleistoceno Tardío, que experimentó exposición subaérea, probablemente durante la última era glacial, y posteriormente fue sumergida durante la subsiguiente transgresión marina, evidenciado por la presencia de matriz de *Halimeda* como principal componente, junto con gravas de corales del Pleistoceno y las rizocreciones que posiblemente son producto del acarreo en la zona costera (Fig. 15).

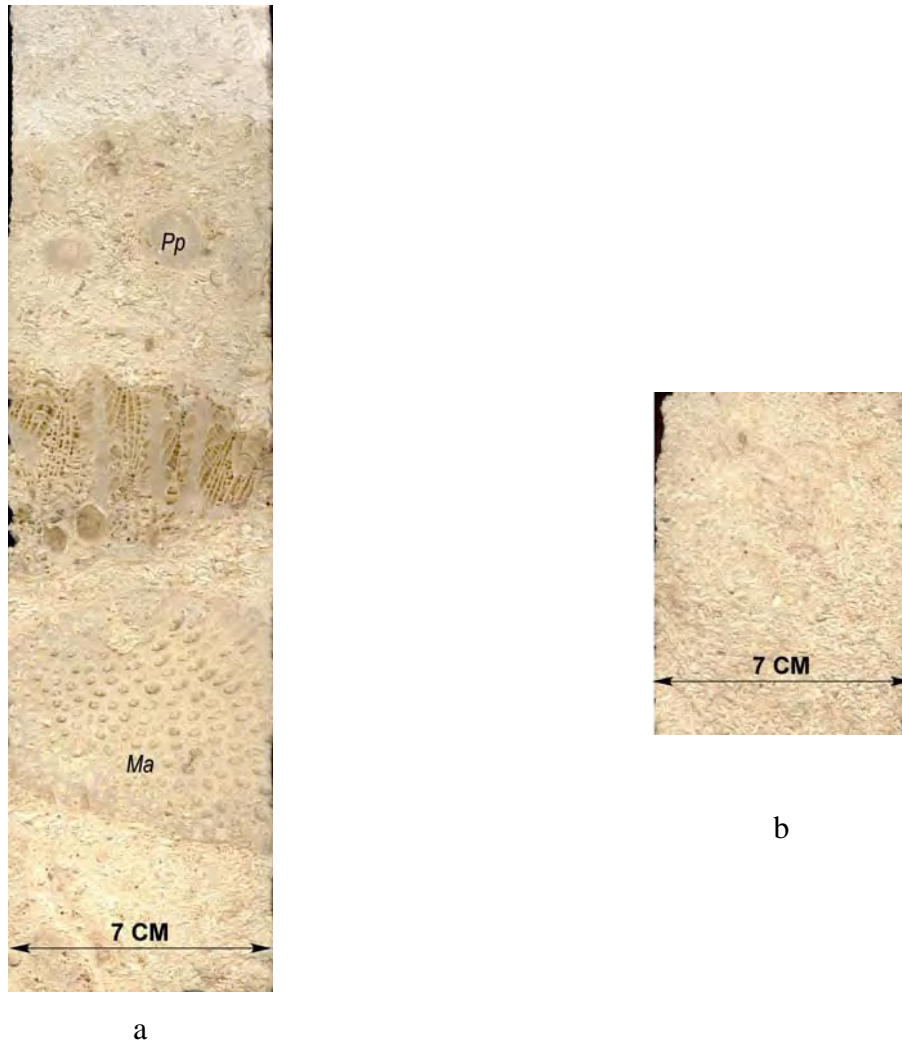


Figura 15. Imágenes mostrando las características asociadas al basamento pleistocénico. (a) Sección del núcleo (PMAF1) entre -1.0 y -1.30 mostrando los guijarros de *Montastraea sp.* (Ma) y *Porites sp.* (Pp), con la matriz de *Halimeda*; (b) detalle de la matriz de *Halimeda*.

6. *Discusión*

Los datos obtenidos en los núcleos, tanto en la zona arrecifal como en la plataforma rocosa de Punta Maroma, muestran un depósito de pedacería de arrecifes holocénicos con escasas estructuras *in situ*, sobre rocas pleistocénicas, acrecionado principalmente por la acción de los huracanes.

Hallazgo 1. Todos los núcleos del arrecife frontal muestran características de depósito similares y forman una capa compuesta por gravas de tamaños medios a finos (según la escala de Blair y Mcpherson), sobre una plataforma preexistente. Estas gravas están compuestas casi enteramente por fragmentos de *A. palmata*. El grado de incrustación en los clastos es la única variable de las características del depósito que se presenta, caracterizado por la abundancia de *H. rubrum* que se incrementa hacia la cresta.

La génesis del arrecife de franja en Punta Maroma puede ser comparada con los planteamientos propuestos por Kennedy y Woodroffe (2002), quienes describen las variaciones de la génesis de los arrecifes de franja de acuerdo con aspectos tales como la naturaleza de las superficies anteriores, la proporción y crecimiento de estructuras *in situ*, los sedimentos detríticos dentro de la propia estructura del arrecife, los cambios del nivel del mar y los regímenes de tormentas. Dichos investigadores consideran que el crecimiento de las colonias *in situ* está determinado por el espacio de acomodamiento como parte fundamental. En este sentido, Blanchon y Perry (2004) cuestionan las interpretaciones sobre la naturaleza de los corales *in situ* realizadas en núcleos de arrecifes y establecen que, caracterizando la condición tafonómica de las colonias *in situ* y de los clastos, y vinculado con datos sedimentológicos y geocronológicos, diferencian tres facies relacionadas con la profundidad: (a) de -10 a -2 la facies de arrecife frontal,

(b) de -1 a 0 la facies de cresta arrecifal, y (c) de 0 a +5 la facies de cayos de pedacería. Asimismo, plantean la gran importancia que tienen las tormentas en el desarrollo de facies arrecifales, mencionando que las colonias *in situ* no se desarrollan de acuerdo al espacio de acomodamiento disponible. Blanchon *et al.* (1997) no consideraron la posibilidad de que el depósito arrecifal compuesto de gravas en Gran Caimán fuera el resultado de un depósito tsunamigénico. Los estudios realizados por el USGS (United States Geological Survey) señalan que los depósitos de tsunamis se caracterizan por dos grandes rasgos: (a) depósito de grandes bloques de roca o megaclastos de hasta 5 m de diámetro y de 22 toneladas de peso, transportados tierra adentro hasta más de 100 m y en ocasiones sin dejar rastros de fricción con el fondo, y (b) formación de depósitos bimodales con una gradación o estratificación, tanto horizontal hacia la costa como vertical. Como resultado de la velocidad de flujo asumida a la relación de la altura de la ola, se requiere de un oleaje de tormenta de aproximadamente cuatro veces la altura de un tsunami para transportar megaclastos. En este sentido, los depósitos de arrecife en Punta Maroma no pueden ser el producto de un tsunami, ya que los núcleos no muestran ni clasificación ni estratificación, ni hay una gradación de clastos rumbo tierra firme.

Hallazgo 2. El depósito de arrecife está localizado a una distancia uniforme desde el borde de la terraza rocosa con respecto al borde de la plataforma. Este rasgo es importante, ya que demuestra la conexión entre el impacto de los huracanes y los depósitos de arrecife. Considerando básicamente la idea de que el oleaje generado por un huracán rompe en la terraza rocosa y deposita fragmentos de coral a una distancia uniforme desde ese borde para formar la cresta arrecifal, es evidente que existe una relación directa entre la posición del arrecife y la ubicación del borde de la terraza rocosa, y que el sistema arrecifal no está relacionado con una terraza cárstica de disolución preexistente. Los núcleos perforados en la terraza rocosa muestran

claramente que los arrecifes holocénicos de Punta Maroma descansan sobre rocas arrecifales pleistocénicas de facies de cresta y arrecife frontal que formaron parte de una plataforma carbonatada y que el borde de la terraza rocosa es posiblemente un relicto rocoso de una antigua línea de costa similar a la observada en Gran Caimán (Blanchon y Jones 1995; Collina-Girard 2002). De este modo, es evidente la relación entre la antigua línea de costa y el depósito arrecifal, convergiendo con la hipótesis de Blanchon y Jones (1997) en Gran Caimán, donde la conexión entre la orientación consistente del arrecife con el borde de la plataforma es el rompimiento del oleaje de producido por huracanes en borde de la plataforma.

7. Conclusiones

El análisis sedimentológico y tafonómico de las estructuras internas del sistema arrecifal de Punta Maroma, mediante la obtención y descripción de núcleos, permitió obtener datos sobre su composición y facies, así como establecer los principales procesos de control y desarrollo del arrecife en esa localidad.

1. Los núcleos recuperados de diferentes zonas ecológicas como son: la cresta arrecifal, la zona de pedacería, y la zona de macizos y canales, indican la presencia de una sola facies, la de arrecife frontal. Esta facies está compuesta de guijarros de pedacería de arrecifes holocénicos, con escasas estructuras *in situ*, y fue formada claramente por procesos generados por huracanes.

2. La posición de la cresta arrecifal se mantiene regular con relación a la distancia del borde de la terraza de roca. La relación entre estos dos rasgos morfológicos puede explicarse debido al rompimiento del oleaje de tormenta y la consiguiente depositación de pedacería de colonias de coral que crecieron en la zona de lavado de los huracanes.

3. Los datos obtenidos del sistema arrecifal de Punta Maroma claramente muestran que los huracanes no solo controlan la facies interna de la cresta y del arrecife frontal, sino que además determina la zona donde inicia y donde crece el arrecife sobre la plataforma.

4. Los procesos físicos como huracanes que impactan la zona de Punta Maroma son los agentes de control y desarrollo de arrecifes y no los rasgos topográficos anteriores.

8. *Glosario de términos de español a inglés utilizados en esta Tesis.*

- *Capas de tormenta*
- *Cayos de pedacería*
- *Cenotes*
- *Cordilleras y hondonadas*
- *Estructura de coral*
- *Follaje*
- *Franja*
- *Gravas y guijarros de coral*
- *Índice de calidad de roca*
- *Macizos y canales*
- *Muñones*
- *Pedacería y cabezos*
- *Respuesta alcanzar*
- *Respuesta ceder*
- *Respuesta mantenerse*
- *Rocas de playa*
- *Superficies basales de adherencia de coral*
- *Zona de lavado*
- *Zona de rompiente*
- *Zona de rompiente de huracanes*
- *Storm layers*
- *Rubble cay*
- *Sinkholes*
- *Ridges and swales*
- *Framework*
- *Thickets*
- *Ridge*
- *Cobble coral gravel*
- *Rock quality designation*
- *Spur and groove*
- *Stump*
- *Rubble and knob*
- *Catch-up response*
- *Give-up response*
- *Keep-up response*
- *Beach rocks*
- *Coral basal attachment surface*
- *Swash zone*
- *Surf zone*
- *Hurricane breaker zone*

9. Referencias

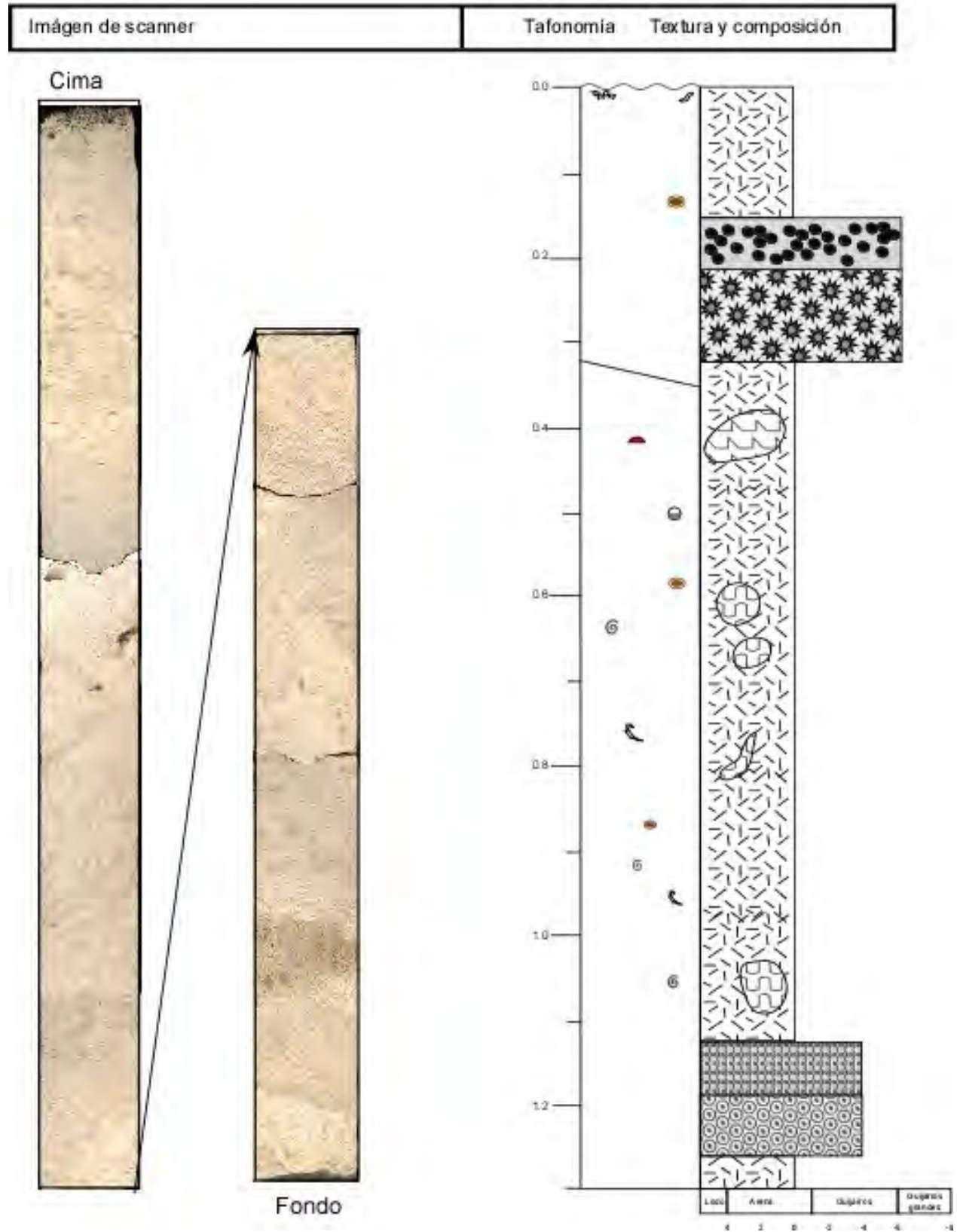
- Alley, B. y Clark, M. (1999). The Deglaciation of the Northern Hemisphere: A Global Perspective. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1999, 27: 149–82.
- Arroyo, J. (1982). Trayectoria de ciclones tropicales 1871–1975. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Univ. Nal. Auton. de México. México. pp. 50.
- Blanchon, P. y Jones, B. (1995). Marine-planation terraces on the shelf around Grand Cayman: a result of stepped Holocene sea-level rise. *J. Coastal Res.*, 11, 1–33.
- Blanchon, P. y Jones, B. (1997). Hurricane control on shelf edge-reef architecture around Grand Cayman. *Sedimentology*, 44, 479–506.
- Blanchon, P. y Shaw, J. (1995). Reef drowning during the last deglaciation: evidence for catastrophic sea-level rise and ice-sheet collapse. *Geology*, 23, 4–8.
- Blanchon, P. y Perry, C.T. (2004). Taphonomic differentiation of *Acropora palmata* facies in cores from Campeche Bank Reefs, Gulf of Mexico. *Sedimentology* 51:53–76.
- Blanchon, P., Jones, B. y Kalbfleisch, W. (1997). Anatomy of a fringing reef around Grand Cayman: Storm rubble, not coral framework. *J. Sed. Res.*, 67, 1–16.
- Blanchon, P., Jones, B. y Ford, D.C. (2002). Discovery of a submerged relic reef and shoreline off Grand Cayman: further support for an early Holocene jump in sea level. *Sed. Geol.*, 147, 253–270.
- Braithwaite, C.J.R., Montaggioni, L.F., Camoin, G.F., Dalmaso, H., Dullo, W.C. y Mangini, A. (2000). Origins and development of holocene coral reefs: a revisited model based on reef boreholes in the Seychelles, Indian Ocean. *Int. J. Earth Sci.*, 89, 431–445.
- Cabioch, G. (1999). Postglacial growth history of a French Polynesian barrier reef tract, Tahiti, central Pacific. *Sedimentology*, 46, 985–100.
- Carranza-Edwards, A., Gutiérrez-Estrada, M. y Rodríguez Torres, R. (1975). Unidades morfotectónicas continentales de las costas mexicanas. *An. Centro Cienc. del Mar y Limnol.*, Univ. Nal. Autón. México, 2(1), 81–88.
- Collina-Girard, J. (2002). Underwater mapping of Late Quaternary submerged shorelines in the Western Mediterranean Sea and the Caribbean Sea. *Quaternary International* 92, 63–72.
- Collins, L.B., Zhu, Z.R. y Wyrwoll, K.H. (1996). The structure of the Easter Platform, Houtman Abrolhos Reefs: Pleistocene foundations and Holocene reef growth. *Marine Geology* 135, 1–13.

- Deere, D.U. (1963). Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mech. Eng. Geol.*, 1, 16–22.
- Grael, E.C., Vera, M.I. y González, H.L. (2004). Dinámica de la Fase Salina y calidad de agua en la costa nororiental de Yucatán. *Ingeniería*, 8-3, pp. 15–25.
- Graus, R., Macintyre, I. y Herchenroder, B. (1984). Computer simulation of the reef zonation at Discovery Bay, Jamaica: Hurricane disruption and long term physical oceanographic controls. *Coral Reefs* 3, 59–68.
- Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2000). Programa de Manejo del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. México. Primera Edición.
- Hernández-Unzón, A. y Bravo, M.G. (2006). Resumen de la temporada de ciclones tropicales 2005., Comisión Nacional del Agua. Servicio Meteorológico Nacional. México. pp. 3.
- Hopley, D. (1982). The geomorphology of the Great Barrier Reef: Quaternary development of coral reefs. John Wiley-Interscience, New York, pp 453.
- Hubbard, D.K., Burke, R.B. y Gill, I.P. (1986). Styles of reef accretion along a steep, shelf-edge reef, St Croix, US Virgin Islands. *J. Sed. Petrol.*, 56, 848–861.
- Jordán, E. (1979). Estructura y composición de arrecifes coralinos, en la región noreste de la península de Yucatán. México. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM*, 6, 69–86.
- Jordán, E., y Rodríguez, R. (1998). Post-hurricane inicial recovery of *Acropora palmata* in two reefs of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Bull. Marine Science*, 63(19), 213–228.
- Keigwin, L.I. D., Donnelly, J.P., Cook, M.S., Driscoll, N.W. y Grette, J.B. (2006). Rapid sea-level rise and Holocene climate in the Chukchi Sea. *Geology*, 34, 861–864.
- Kennedy, D. y Woodroffe, C. (2002). Fringing reef and morphology: a review. *Earth Sciences Reviews*, 57, 255–277.
- Kuenen, H. *Marine Geology* (568 pp., 1950, John Wiley & Sons Inc., New York; Chapman & Hall, Limited London.).
- Lawrence, M. B. y J. M. Gross. 1989. Atlantic Hurricane Season of 1988. Annual Summaries. *Monthly Weather Review* 117: 2248-2256.
- Merino, I. M. (1992). Afloramiento en la Plataforma de Yucatán: estructura y fertilización. UACPyP-CCH, UNAM. Tesis Doctoral.

- Nolasco-Montero, E. y Carranza-Edwards, A. (1988). Estudio sedimentológico regional de playas de Yucatán y Quintana Roo, México. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol., Univ. Nal. Autón. México*, 15(2), 49–66.
- Perry, E., Smith, E., Gamboa, J., Reeve, A., Sanborn, R., Marin, L. y Villasuso, M. (1989). Geologic and environmental aspects of surface cementation, North Coast, Yucatán, Mexico. *Geology*, 17, 818–821.
- Purdy, E.G. y Winterer (2001). Origin of atoll lagoons. *Geol. Soc. America Bull.*, 113, 837–854.
- Purdy, E.G. (1974). Reef configurations: Cause and effect, en Laporte, L.F., ed., *Reefs in Time and Space: Tulsa, OK, EUA. SEPM Special Publication No. 18*, 9–76.
- Scoffin, T.P. (1972) Fossilization of Bermuda patch reefs. *Science*, 178, 1280–1282.
- Scoffin, T.P. y Garrett, P. (1974). Processes in the formation and preservation of internal structure in Bermuda patch reefs. *Proc. 2nd Int. Coral Reef Symp.*, 2, 429–448.
- Secretaría de Marina. Dirección de Meteorología Marítima. *Almanaque de ciclones tropicales 2005*. México, 2006.
- Shepard, F.P. (1973). *Submarine geology*. Harper and Row. New Cork, EUA. 517 pp.
- Smith, S.V. y Kinsey, D.W. (1976). Calcium carbonate production, coral reef growth and sea level change. *Science*, 194, 937–939.
- Steinich, B. y Marín, L.E. (1996). Determination of the ground water divide in the karst aquifer of Yucatán, Mexico, combining geochemical and hydrogeological data. *Geof. Internac.*, 35, 153–159.
- Walbran (1994). The nature of the pre-Holocene surface, John Brewer Reef, with implications for the interpretation of Holocene reef development. *Marine Geology*, 122, 63–79.
- Ward, W.C. (1975). Petrology and diagenesis of carbonate eolianite of northeastern Yucatan Peninsula, Mexico. *American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology*, 2, 500–571.
- Ward, W.C., Weidie, A.E., y Back, W. (1985). *Geology and Hydrogeology of the Yucatan and Quaternary Geology of North-eastern Yucatan Peninsula*. The New Orleans Geological Society, New Orleans, LA, 159 pp.

9. Anexo de fichas técnicas de los núcleos obtenidos

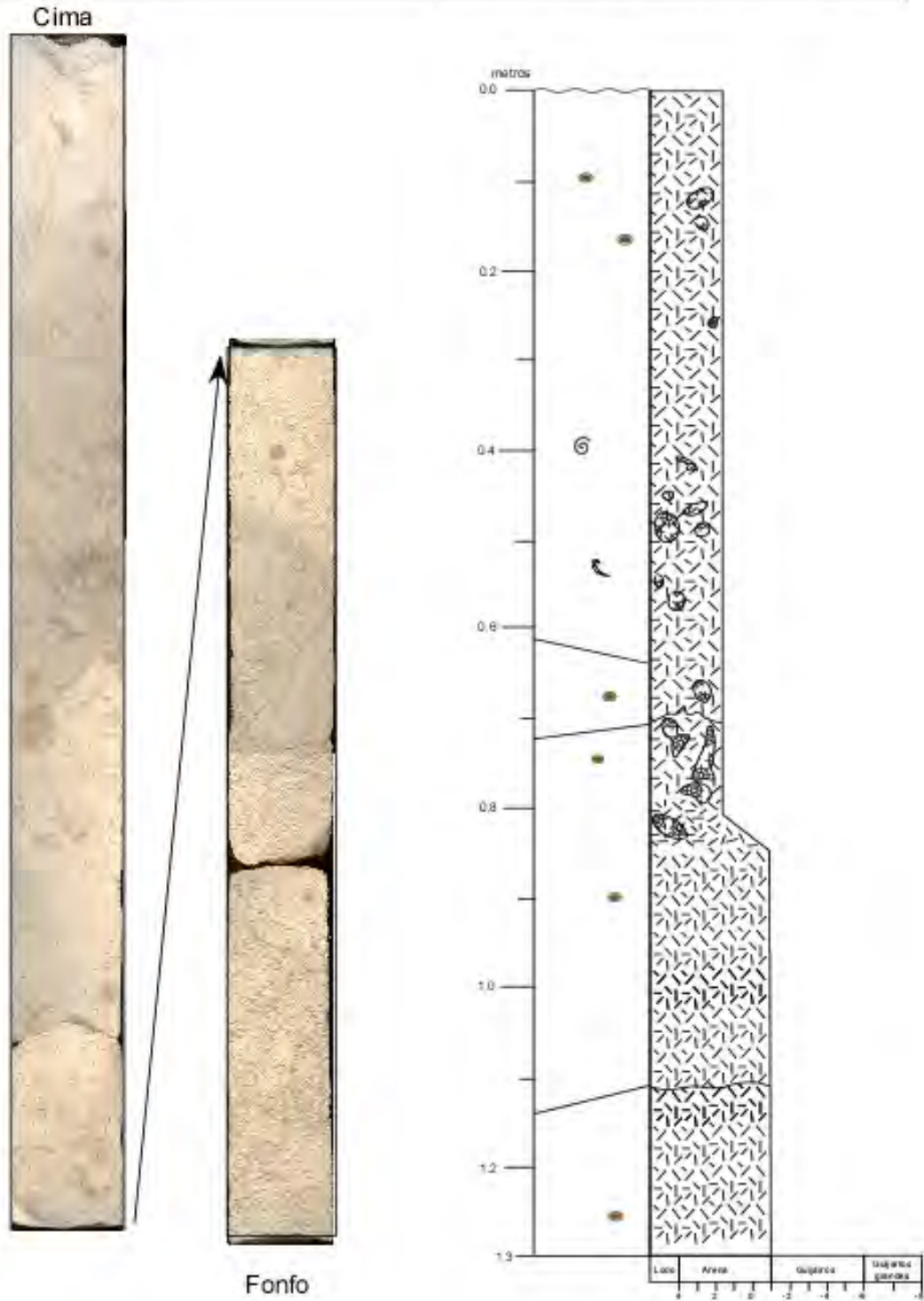
Núcleo PMA-F1 WD: 5.7 m TD: 7.0 m Sitio: Plataforma arenosa



Núcleo PMA-F2

WD: 5.0 m TD: 6.30 m Sifio: Canal en la plataforma arenosa al final de los macizos.

| | | |
|-------------------|-----------|-----------------------|
| Imágen de scanner | Tafonomía | Textura y composición |
|-------------------|-----------|-----------------------|



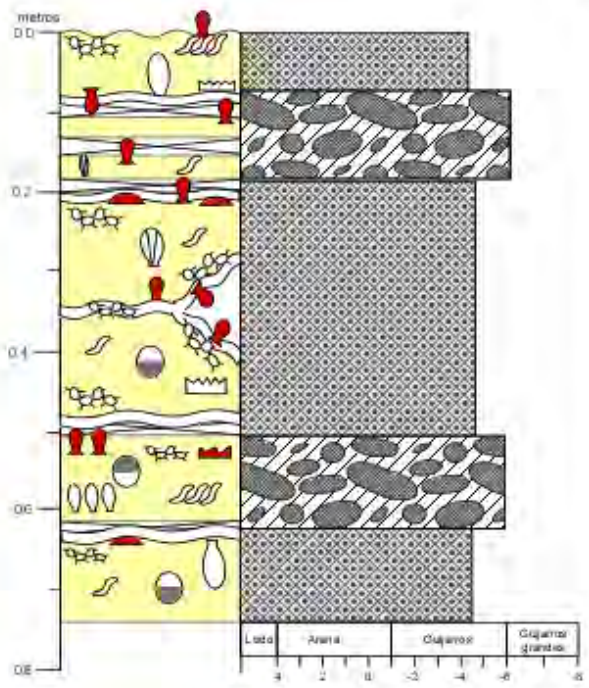
Núcleo PMA-F3

WD: 3.5 m TD: 4.25 m

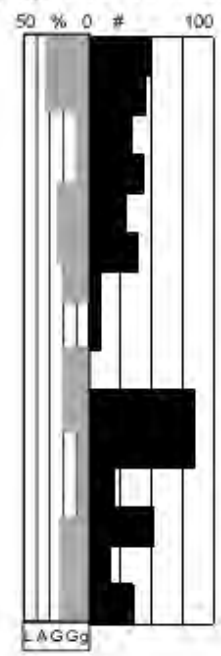
Sitio: Arrecife Frontal

Cresta de un Madero (Top of Spur)

| | | |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Imágen de scanner | Tafonomía, Textura y composición | Bioerosión e Incrustantes |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|



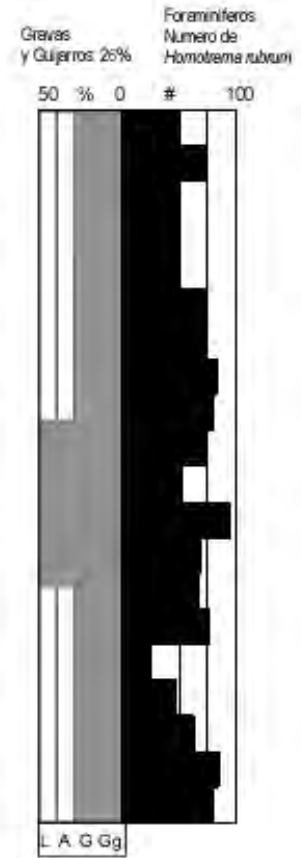
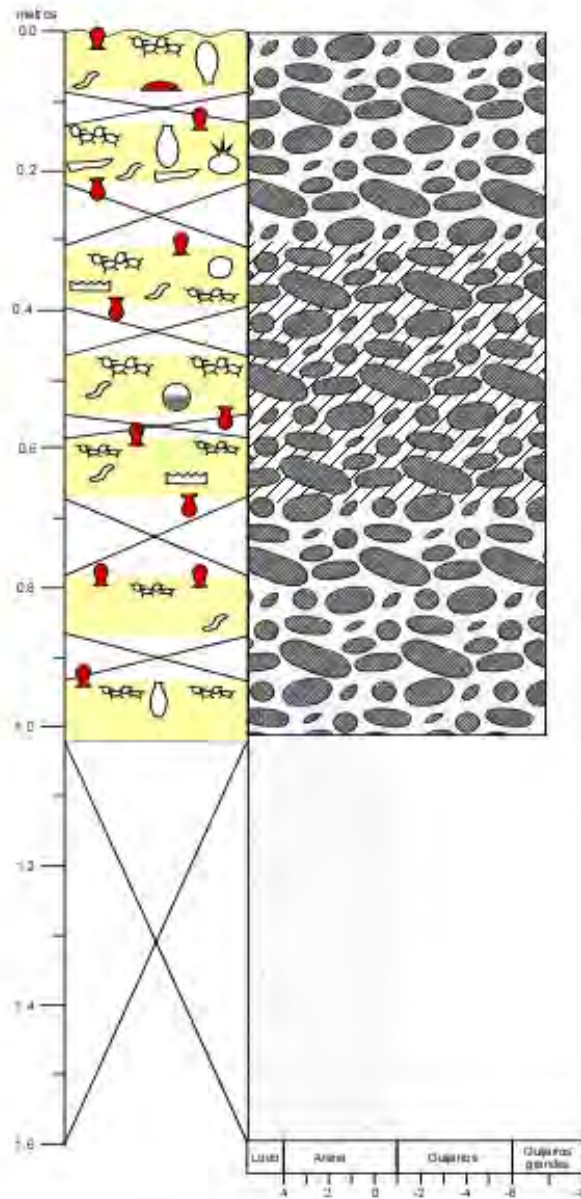
Estructura: 22%
 Gravas y Guajeros: 17%
 Foraminíferos
 Número de *Homotrema rubrum*



Núcleo PMA-F4

WD: 4.3m TD: 5.90 m Sitio: Punta de un macizo (Top Spur)

| | | |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Imágen de scanner | Tafonomía, Textura y composición | Bioerosión e Incrustantes |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|

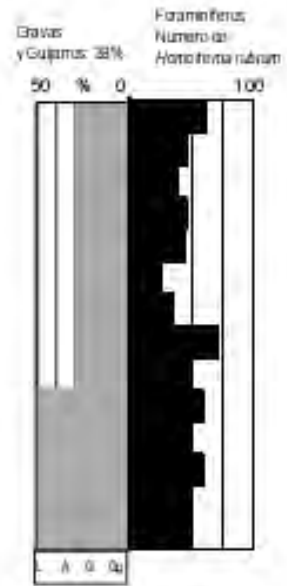
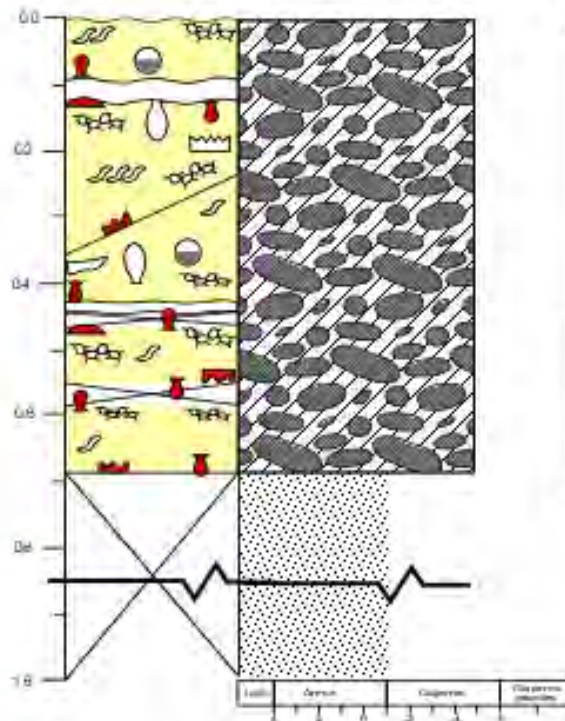


Núcleo PMA-F5 WD: 4.20 m TD: 5.80 m - Stio: Arrecife Frontal en un canal entre dos macizos

| | | |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Imágen de scanner | Taonomía, Textura y composición | Bioerosión e Incrustantes |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------|

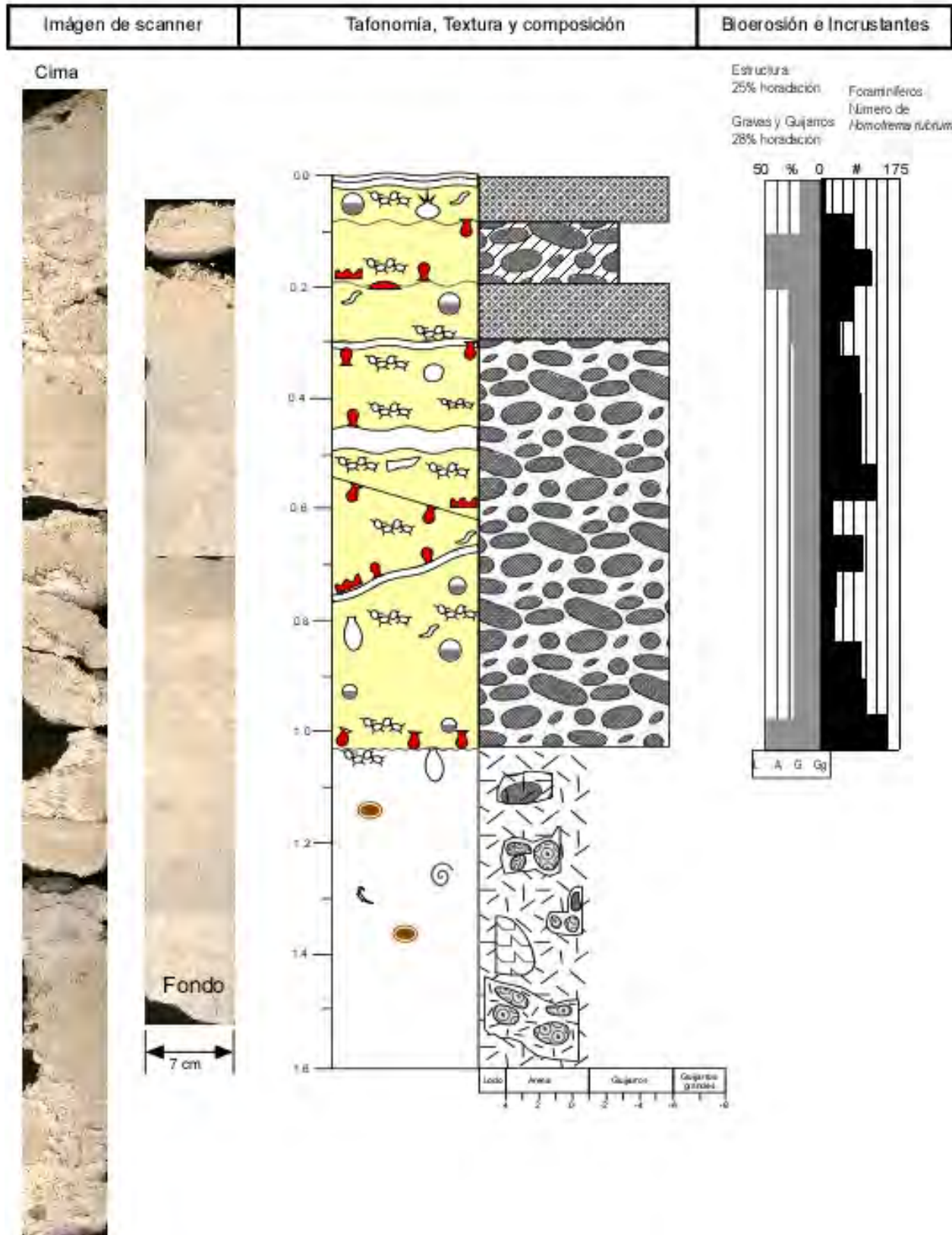


7 cm



Núcleo PMA-F6

WD: 4.1 m TD: 5.70 m Sitio: Arrecife Frontal área plana en un suro entre dos macizos

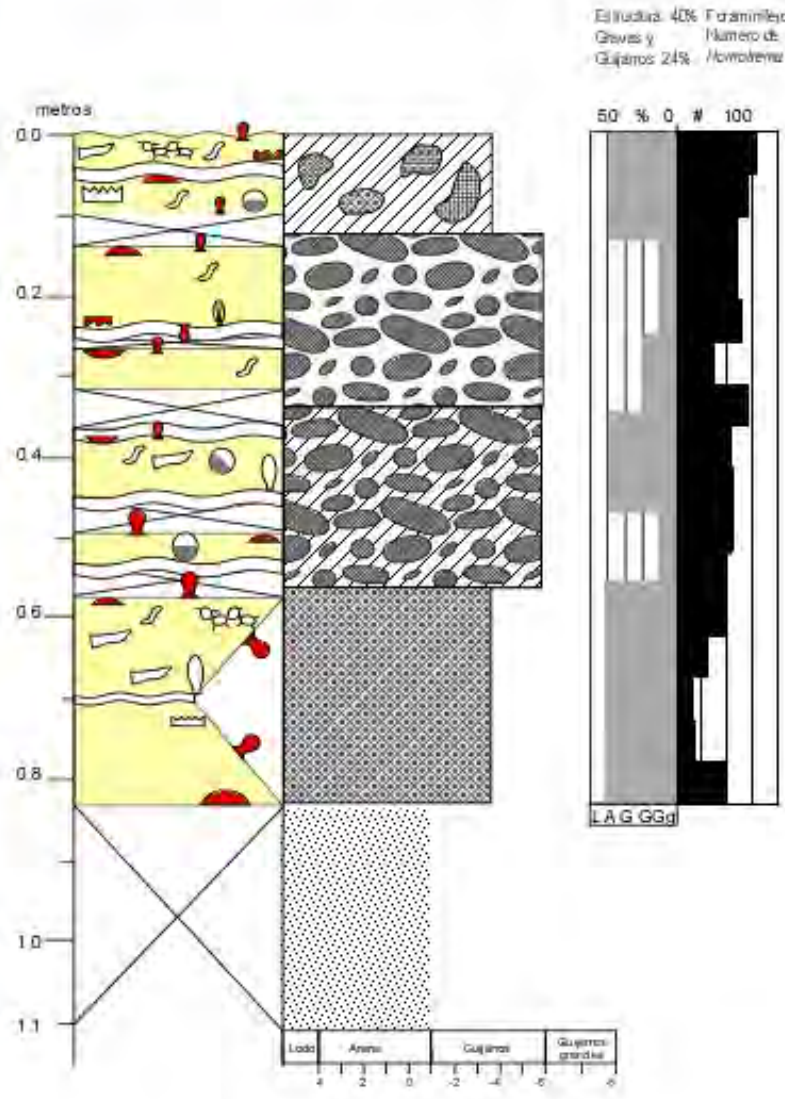


Núcleo PMA-F7 WD: 3.5 m TD: 4.6 m Sitio: Arrecife Frontal, Cerca de la Cresta

| | | |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Imágen de scanner | Tafonomía, Textura y composición | Bioerosión e Incrustantes |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|



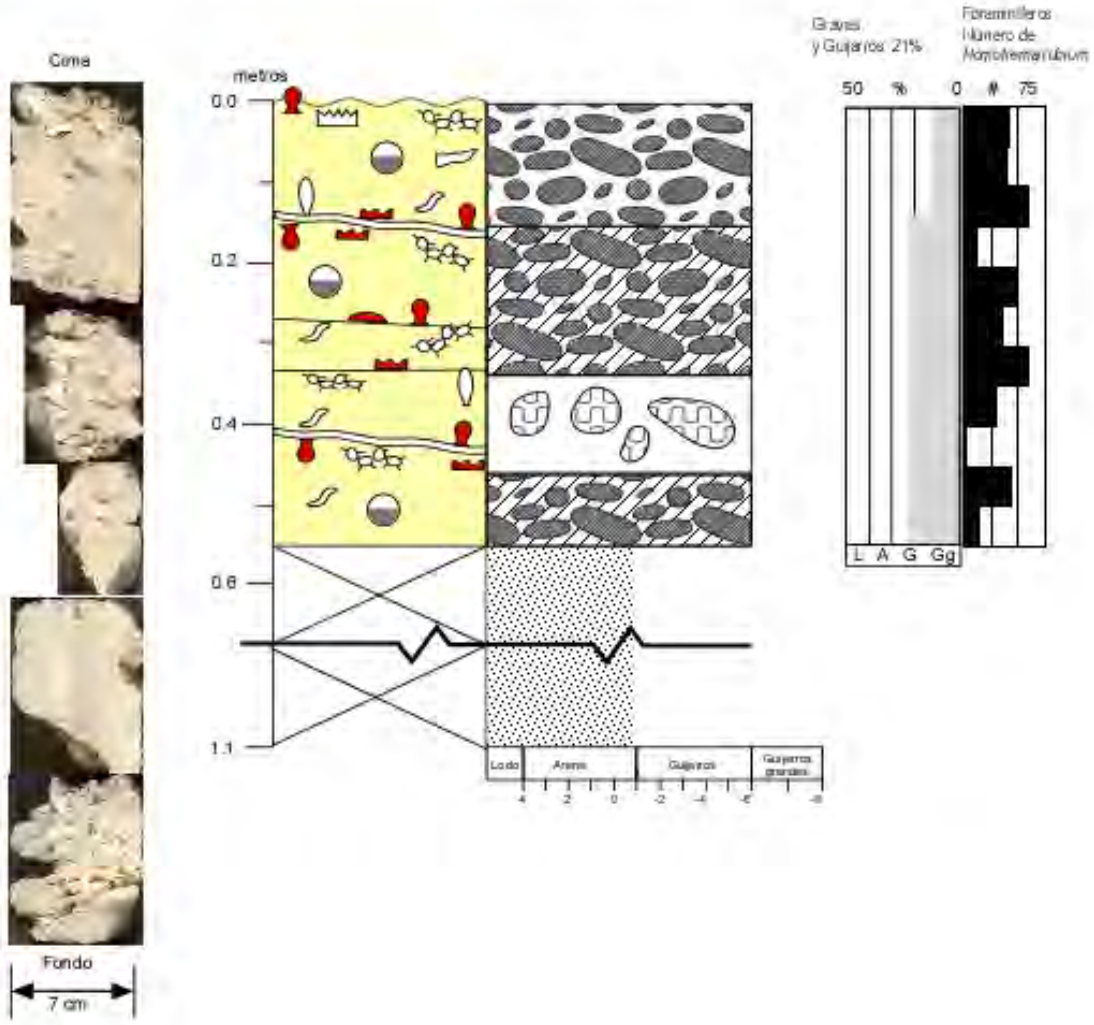
7 cm



Estructura: 40% Foraminíferos
 Gravas y Número de
 Guijeros 24% *Novolobos rubrum*

Núcleo PMA-F8 WD: 2.0 m TD: 3.10 m Sitio: Arrecife Frontal cerca de la Cresta arrecifal

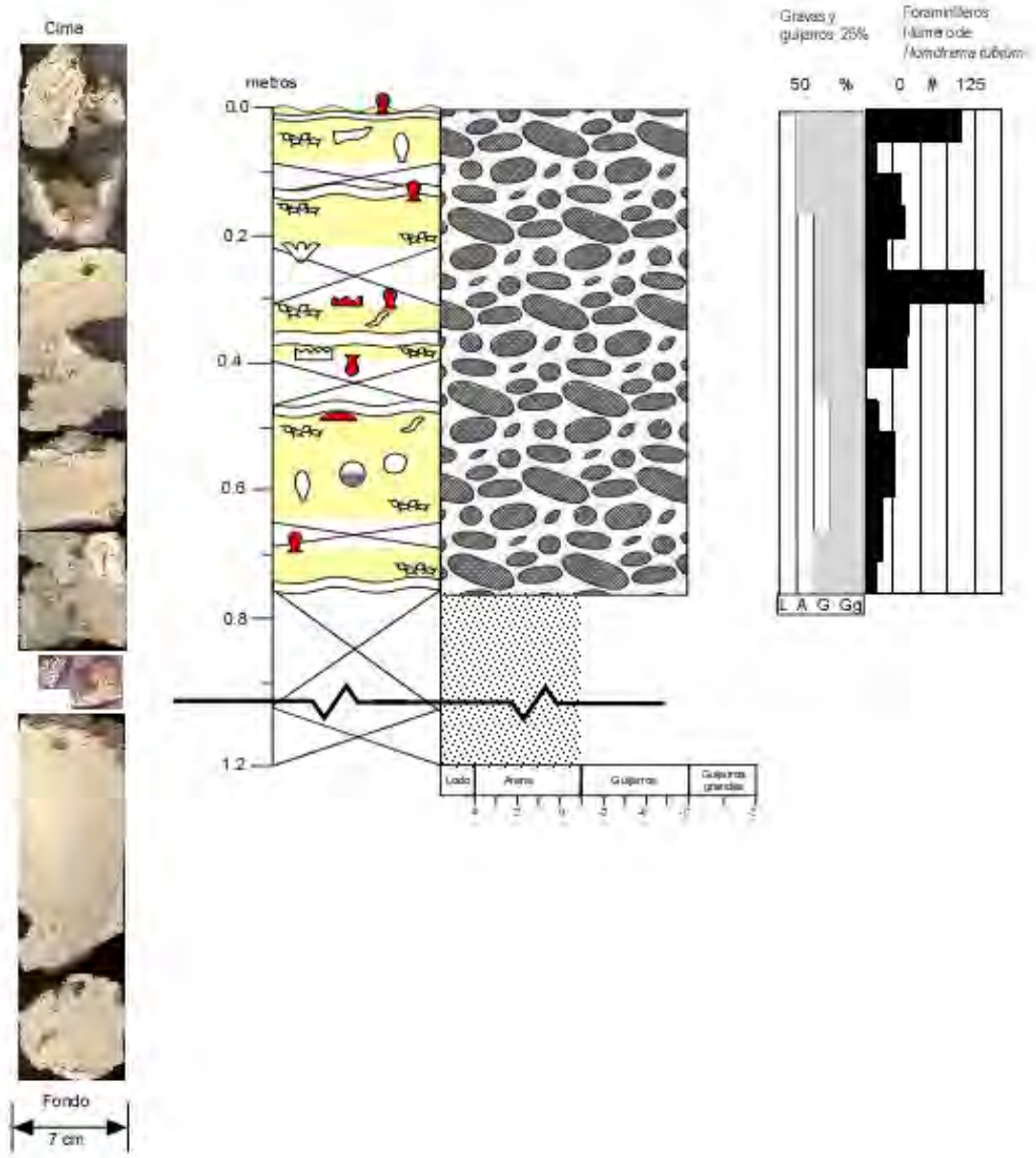
| | | |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Imágen de scanner | Tafonomía, Textura y composición | Bioerosión e Incrustantes |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|



Núcleo PMA-F9

WD: 4.0 m TD: 5.20 m Sitio: Canal entre dos maizos (in the groove between two spurs)

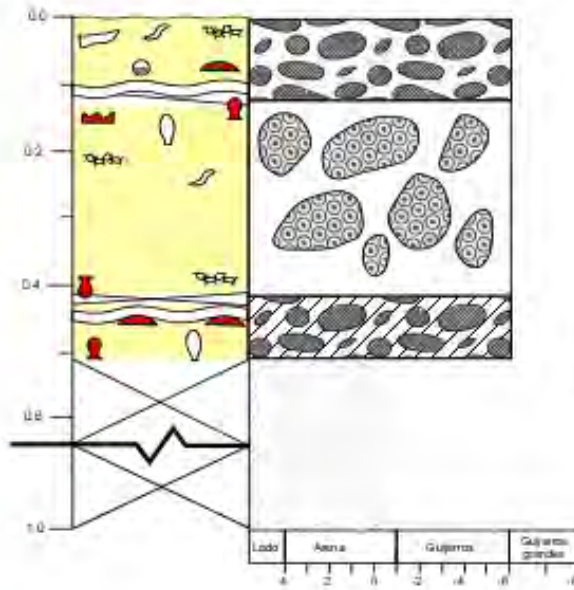
| | | |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Imágen de scanner | Tafonomía, Textura y composición | Bioerosión e Incrustantes |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|



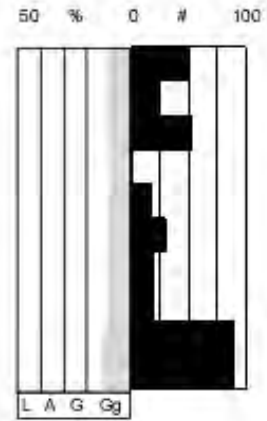
Núcleo PMA-F10

WD: 3.0 m TD: 4.0 m Sitio: A 40 m de la cresta rumbo al mar

| | | |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Imágen de scanner | Tafonomía, Textura y composición | Bioerosión e Incrustantes |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|



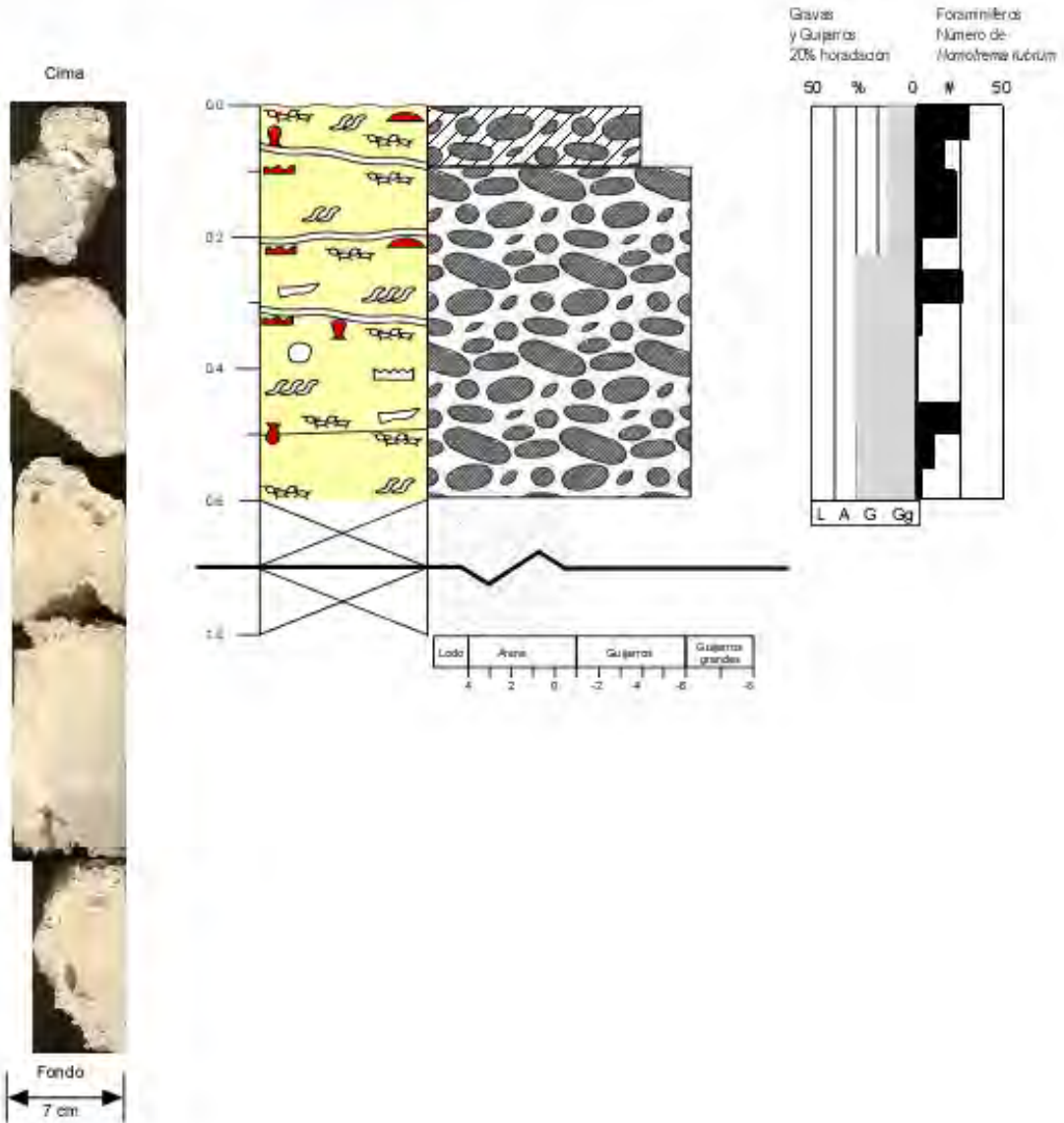
Gravas y guijeros: 12%
Foraminíferos: Número de *Homotrypa rubrum*



Núcleo PMA- F11

WD: 2.0 m TD: 3.0 m Sitio: A 30 m de la cresta arrecifal rumbo al mar

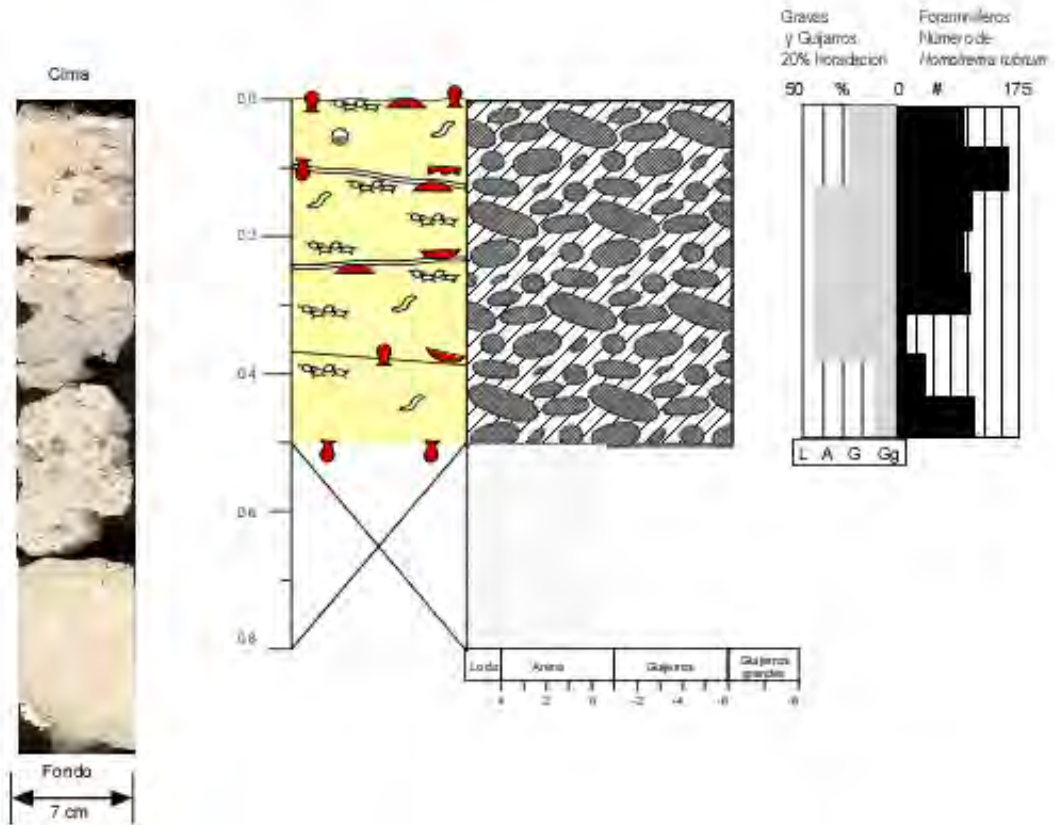
| | | |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Imagen de scanner | Tafonomía, Textura y composición | Bioerosión e Incrustantes |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|



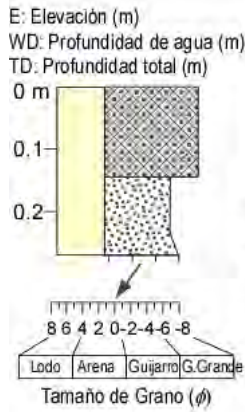
Núcleo PMA- F12

WD: 1.5 m TD: 2.3 m Sitio: a 20 m de la cresta arrecifal rumbo al mar

| | | |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Imágen de scanner | Tafonomía, Textura y composición | Bioerosión e Incrustantes |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|



LLAVE



1. Estructura Primaria
- A. palmata*
 - M. annualis*
 - S. siderea*
 - D. strigosa*
 - Mussa sp*
 - Porites sp*
 - Agaricia sp*

2. Sedimento
- Arena cementada
 - No consolidada
 - Gravas de *A. palmata* Cementada
 - No consolidada
 - Gravas de *A. palmata* con matriz de arena
 - Geopetal normal, invertido
 - Huellas de raíces
 - Restos de bivalvos
 - Restos de gasterópodos

3. Estructura Secundaria
- Costras Corallinas
- > 1 cm abundante
 - 0.1 - 0.5 mm común
 - 0.1 mm presente
 - indiferenciado
- Millepora sp.*
C. utricularis
- Vermetidos
 Serpulidos
 indiferenciado
- Homotrema rubrum*
- Relieve bajo
 - Relieve alto
 - Ramificada

4. Modificación de la Estructura
- Entobia isp*
 - Aca sp.*
 - Cliona laticavicola*
 - Thoosa sp.*
 - indiferenciado
- Trypanites isp*
- > 5 individuos Abundante
 - 2 - 5 individuos Común
 - 1 individuo Presente
- Gastrochaenolites isp*
- > 5 individuos Abundante
 - 2 - 5 individuos Común
 - 1 individuo Presente
- Lithophaga*
- Matriz de *Halimeda*
 - Superficie erosional