



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



**CARACTERIZACIÓN DE LOS HÁBITATS BENTÓNICOS PRESENTES EN EL  
PARQUE NATURAL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO –  
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 :**

**PAULA ANDREA ZAPATA RAMÍREZ**

**Director de tesis: Dr. Paul Andrew Blanchon**

**Comité tutorial  
Dr. Raúl Aguirre Gómez  
Dra. Susana Enríquez Domínguez  
Dra. María de los Ángeles Liceaga Correa  
Dr. Carlos Mortera**

**Asesor Externo  
M. en C. José Antonio Quintero Pérez**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO UNAM  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
UNIDAD ACADÉMICA DE PUERTO MORELOS  
PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO.  
2011.**



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.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi gratitud y más sinceros agradecimientos a las siguientes personas por su invaluable contribución durante el desarrollo de este estudio:

Mi más sincero agradecimiento al Doctor Paul Blanchon por la dirección de este trabajo, su orientación y por haber confiado en mí, apoyándome en la realización de mis ideas.

A mi chico (Claudio) por su incondicional amor y paciencia, y por su soporte siempre y en todo momento.

A los integrantes de mi comité tutorial por las discusiones constructivas y sus sugerencias de apoyo en el documento.

Al Laboratorio de Hidrografía y Meteorología de la Unidad Académica de Puerto Morelos, por el apoyo logístico durante el trabajo de campo y los datos acústicos proporcionados, especialmente a M. en C. Edgar Escalante Mancera y al M. en C. Francisco Ruíz Rentarí.

A los Doctores: Albert Olioso, John Hedley, Ania Banaszak, José Sobrino, Ben de Mol por sus contribuciones con las observaciones y correcciones sobre el documento y las publicaciones sometidas.

Por el apoyo inestimable de Héctor Núñez con el análisis estadístico de los datos y el entendimiento de las herramientas utilizadas en el trabajo.

A René Ramos Álvarez y Mayelli Hernández Juárez del Instituto de Geografía de la UNAM por su valiosa ayuda y explicaciones para comprender mejor el mundo de los SIG.

A toda mi familia que me animaron con amor a través de la distancia.

Al CONACyT por el apoyo financiero para continuar con mis estudios.

Al personal de la coordinación de posgrado del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Especialmente a la Dra. Gloria Vilaclara por sus sabios consejos y su paciencia.

A Amauri por las interminables horas de campo y por compartir conmigo toda su sabiduría de mar y de la zona de estudio.

A la M. en C. Rosa Rodríguez y el Dr. Eric Jordán por sus valiosas aportaciones al documento.

A los amigos que cerca o lejos siempre han estado ahí para mí en todo momento.

Para mis amigos y compañeros de la UNAM que me proporcionaron un apoyo constante y un ambiente maravilloso para trabajar y estudiar. Para todos mis nuevos "viejos" amigos de Puerto Morelos, mi mayor hallazgo de estos años !!!.

## RESUMEN

Los hábitats marinos están siendo afectados por el calentamiento global, los desastres naturales y por la mayor presión ejercida por parte de la población global. Estos ambientes tienen una urgente necesidad de un eficiente sistema de seguimiento y de programas de manejo que ayuden a mantener sus valores ecológicos, económicos y culturales. La percepción remota puede brindar información para cartografiar y dar seguimiento a los ambientes naturales. En esta tesis se han aplicado técnicas de percepción remota para cartografiar los hábitats bentónicos localizados en el Parque Natural Arrecife de Puerto Morelos en la Península de Yucatán (México) con el objetivo de brindar información de línea base que sirva para futuros seguimientos de los cambios en los ambientes bentónicos del área.

Estas razones y la necesidad de ampliar nuestro conocimiento de los hábitats bentónicos presentes en las costas de Quintana Roo, conducen a que el presente trabajo tenga como objetivo principal el de clasificar y delinear los ambientes bentónicos presentes a lo largo de la costa Noreste de Quintana Roo desde la línea de costa y hasta los 30 m de profundidad.

Para tal fin, se utilizó y recolectó una combinación de información de percepción remota, incluyendo imágenes de satélite y levantamientos batimétricos. Los resultados de la información obtenida en este estudio fueron ensamblados dentro de un sistema de información geográfica (SIG) el cual permitió generar información de línea base con la que se podrán entre otros, generar futuros análisis espaciales de distribución, identificar áreas prioritarias para conservación y/o monitoreo y realizar evaluaciones espacio temporales de cambios, siguiendo perturbaciones medioambientales tales como huracanes, o como el resultado del cambio climático y/o antropogénico.

Por otro lado, una imagen IKONOS y el muestreo de los puntos de control nos proporcionaron información para llevar a cabo una clasificación supervisada de máxima probabilidad (en ENVI 4.5) con la cual también se investigó la fiabilidad del mapa generado, mostrando que fue posible caracterizar el arrecife con una exactitud aceptable para la laguna y a su vez discriminar los tipos principales de hábitats incluyendo la vegetación, los corales y los sustratos desnudos. Este no fue el caso en áreas cercanas a la costa y en la zona del arrecife frontal donde hubo importantes clasificaciones erróneas como también problemas en la delimitación espacial de estructuras evidentes en las imágenes aéreas. Estas dificultades y estos errores ocurrieron tanto en las áreas más profundas entre los 5-8 m donde la profundidad limita la transmisión de la luz (particularmente en el canal rojo), como también en

lugares donde la respuesta espectral de los hábitats fue muy cercana para ser discriminadas. Las posibilidades para mejorar el esquema de clasificación también son discutidas.

## **ABSTRACT**

Global warming, natural disasters and the increased pressure of the global population are threatening marine benthic habitats. These habitats are in urgent need of efficient monitoring and management programs to sustain their biological, economic and cultural values for the global community. Remote sensing can provide information for mapping and monitoring natural environments. In this thesis, these techniques have been utilized to map the benthic habitats of the Puerto Morelos Reef Marine Park in the Yucatan Peninsula, Mexico. The overall objective is to provide a baseline for future monitoring of changes to the marine benthic habitat systems.

The principal focus of this work is to classify and map benthic environments present along the northeast coast of Quintana Roo from the coastline down to 30 m deep. We classified and delineated benthic habitats of the coral reef-lagoon complex in the Park from the shore to the 30 m isobath using a combination of remote sensing data, including satellite imagery and bathymetric surveys. The results obtained in this study were assembled into a geographic information system (GIS) which allowed the generation of baseline information to which others may generate future spatial distribution analysis. This information is critical to identify priority areas for conservation and/or monitoring. Furthermore, this information is useful for evaluation of temporal and spatial changes, resulting from natural environmental disturbances such as hurricanes, or as the result of climate change and / or anthropogenic impacts.

An IKONOS image was used in combination with checkpoint ground sampling and then classified using a supervised maximum likelihood classifier (in ENVI 4.5). I investigated the fidelity of the generated map and demonstrated that it was possible to map the reef/lagoon area with acceptable accuracy and discriminate the main habitat types, including vegetation, corals, and bare substrate. However, this was not the case in areas close to the shore and in the front-reef zone where there were significant misclassifications as well as a inability to delineate spatial structures evident on aerial imagery. These difficulties and limitations occurred in the areas deeper than 5-8 m where depth limits light transmission (particularly in the red channel), or when the spectral response of habitats were too close to be discriminated. The possibilities of improving the classification scheme are discussed.

## **PUBLICACIONES DE APOYO**

Parte del trabajo presentado en esta tesis aparece en publicaciones que están siendo sometidas a revisión. Aunque parte de estos artículos están siendo reproducidos en este documento, en todos los casos se trata de mi contribución personal a estas publicaciones. Los artículos que están directamente relacionados con el trabajo de tesis son:

Zapata –Ramírez, P.A ; Hernández – Nuñez, H; Blanchon, P and Sobrino, J.A (In press). Characterization of marine benthic habitats located at the Puerto Morelos Reef National Park, México incorporating remote sensing data. Proceedings of the 3rd International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing.

Zapata- Ramirez, P.A; Blanchon, P; Oliosio, A; Hernández, H and Sobrino, J.A (Submitted). Fidelity of remote sensing for mapping benthic coral-reef habitats: a case study from a Mexican Marine Park. International Journal of Remote Sensing.



## TABLA DE CONTENIDO

	Página
<b>1 JUSTIFICACIÓN Y SIGNIFICADO DE LA INVESTIGACIÓN</b>	1
1.1 Introducción	1
1.2 Área de estudio	3
<b>2 MARCO CONCEPTUAL</b>	7
2.1 Hábitat bentónico	7
2.1.1 Delineación de los hábitats bentónicos	7
2.1.2 Mapas bentónicos	8
<b>3 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS</b>	10
3.1 Antecedentes	10
3.2 Descripción de métodos para la caracterización de los hábitats bentónicos	15
3.2.1 Métodos de reconocimiento	15
3.3 Percepción remota	15
3.3.1 Métodos acústicos	16
3.3.2 Métodos ópticos	19
3.4 Métodos de clasificación	24
3.4.1 Clasificación no supervisada	24
3.4.2 Clasificación supervisada	25
3.4.3 Librerías espectrales	25
3.5 Métodos de verificación del terreno <i>in situ</i>	26
3.6 Ventajas y limitaciones de los métodos	27
3.7 Métodos de integración de los datos	29
<b>4 PROBLEMA, OBJETIVOS Y METAS</b>	33
4.1 Planteamiento del problema	33
4.2 Objetivos	35
4.2.1 Objetivo general	35
<b>5 METODOLOGÍA</b>	36
5.1 Metodología de caracterización de los hábitats bentónicos	36
5.1.1 Procesamiento preliminar de la información	36
5.2 Obtención de datos	37
5.2.1 Obtención de los datos acústicos	37
5.2.2 Clasificación de los modelos acústicos	42
5.2.3 Análisis de la rugosidad	47
5.3 Obtención de los datos ópticos	49
5.3.1 Características del sensor IKONOS	50
5.4 Procesamiento de los datos ópticos	51
5.4.1 Correcciones atmosféricas	51
5.4.2 Aplicación de la mascara	51
5.4.3 Corrección del brillo solar	52
5.5 Clasificación de datos ópticos	53
5.6 Obtención de datos de campo: video y puntos de control	57

5.7	Verificación de la exactitud de los muestreos	58
5.8	Integración de los datos en el SIG	59
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>61</b>
6.1	Macrohábitat	61
6.1.1	Laguna	62
6.1.2	Arrecife	62
6.1.3	Plataforma	63
6.2	Hábitats	63
6.2.1	Resultados del modelo batimétrico	63
6.2.2	Resultados de la retrodispersión acústica	66
6.2.3	Resultados de los modelos bentónicos	68
6.2.4	Resultados del Índice de posición batimétrica	68
6.2.5	Resultados de los modelos de estructuras bentónicas	70
6.2.6	Resultados del modelo de rugosidad y pendiente	72
6.2.7	Resultados de la evaluación de exactitud del modelo batimétrico	74
6.3.	Resultados videos y puntos de control	75
6.4	Resultado de los métodos ópticos	83
6.5	Resultados de la integración de los datos en el SIG	90
<b>7</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>92</b>
7.1	Macrohábitat y hábitat	92
7.2	Biotopos	102
7.2.1	Limitaciones y exactitud de la clasificación de los biotopos	107
7.3	Posibles mejoras en la clasificación	110
7.3.1	Librerías espectrales	111
7.3.2	Estrategia de la verificación de los datos de campo	111
7.4	Consideraciones generales	111
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>113</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>116</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

		<i>Página</i>
Figura 1	Área de estudio	4
Figura 2	Mapa convencional de la zona de estudio	37
Figura 3	Valores asociados al índice de posición batimétrica (BPI)	41
Figura 4	Valores asociados de pendientes del BPI	42
Figura 5	Proceso de la clasificación acústica	46
Figura 6	Proceso para la determinación de la rugosidad	48
Figura 7	Corrección del brillo	53
Figura 8	Delineación de la zonación geomorfológica del área de estudio	62
Figura 9	Modelo batimétrico en 3D de la zona con el software Surfer	63
Figura 10	Modelo batimétrico en 3D de la zona en Envi y Arcscene	63
Figura 11	Batimetría en 2D del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos	66
Figura 12	Mapa de la retrodispersión acústica de la zona	67
Figura 13	Mapa de las zonas batimétricas del área de estudio	69
Figura 14	Mapa de las estructuras batimétricas del área de estudio	70
Figura 15	Mapa de la rugosidad del área de estudio	72
Figura 17	Histograma de distribución del modelo batimétrico	73
Figura 18	Respuesta espectral de los principales biotopos del área	84
Figura 19	Diferentes biotopos presentes en el área de estudio	86
Figura 20	Mapa resultante de la clasificación supervisada	88
Figura 21	Clasificación predictiva de los hábitats bentónicos	89
Figura 22	Puntos de control dentro de la interface SIG	91

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Descripción y métodos de clasificación de las zona bentónicas	43
Tabla 2 Descripción y métodos de clasificación de las estructuras batimétricas	45
Tabla 3 Características del sensor IKONOS	50
Tabla 4 Clasificación general de los ambientes presentes en el Parque	61
Tabla 5 Resultados estadísticos de la exactitud de los modelos batimétricos	74
Tabla 6 Resultados de la matriz de confusión de la clasificación supervisada	86

## 1. JUSTIFICACIÓN Y SIGNIFICADO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1 Introducción

Las actividades humanas, incluyendo el calentamiento global, están afectando la salud y la productividad de los ecosistemas costeros y han dado lugar a una disminución significativa de la diversidad biológica (Mellin *et al.*, 2010). A pesar de que el pasado, los ecosistemas costeros se han recuperado de las perturbaciones naturales, tales como los ciclones tropicales, en la actualidad estos ecosistemas son cada vez más frágiles y, en algunos casos, su recuperación ha fallado (Hughes *et al.*, 2010). Por lo tanto, estos hábitats tienen una urgente necesidad de una supervisión eficaz de su estado y su manejo, con el cual poder mantener sus valores biológicos, económicos y culturales para la comunidad mundial.

A pesar de que la diversidad local esta moderadamente bien documentada para ciertos grupos taxonómicos y en ciertos sitios, muy poco se sabe acerca de los posibles patrones de variación de la diversidad en largas escalas espaciales, el cual puede ser relativo al conocimiento que se tiene actualmente sobre la variación de la diversidad a escala local. Una barrera para alcanzar este conocimiento es que los hábitats bentónicos continúan estando mal caracterizados, ya que no han sido cartografiados con la suficiente precisión y con una resolución espacial lo suficientemente alta como para apoyar su manejo y su conservación (Costa *et al.*, 2009).

Muchos estudios se han centrado en la relación entre las especies bentónicas y las propiedades físicas del medio ambiente circundante (Wilson *et al.*, 2007; Holmes *et al.*, 2008; Rattray *et al.*, 2009). Estos estudios son cruciales para la definición de los atributos físicos y químicos que pueden describir la distribución potencial de las comunidades ecológicas. Sin embargo, la mayoría de los estudios realizados en todo el mundo prueban que las relaciones entre las comunidades y los parámetros físicos y químicos se han efectuado a escalas locales que son mucho menores que las requeridas para el manejo de los hábitats marinos para los cuales han sido propuestos (Post, 2008). Por lo tanto, las decisiones de manejo de estos hábitats se han basado frecuentemente en información limitada que generalmente se encuentra basada en datos obtenidos por medio de muestreos convencionales *in situ* que generalmente carecen de la resolución espacial y precisión necesaria para tomar dichas decisiones (Scopéltis *et al.*, 2010). Así pues, si se quiere proporcionar evidencia de cambios en los hábitats o del comportamiento de cualquier ecosistema y entender y proteger sus

valores ambientales, es necesario tener un punto de partida, o "de referencia" en el que se realice un inventario de lo que allí se encuentra.

Como un esfuerzo de conservación a desarrollar, la cartografía de los hábitats bentónicos será cada vez más necesaria a fin de vigilar la evolución de los hábitats debido a perturbaciones o como medidas de protección. Los datos de percepción remota tienen el potencial de brindar una visión clara a gran escala de los ambientes bentónicos y brindan datos temporales que pueden ser usados para evaluar eventos en la dinámica de la comunidad (Lim *et al.*, 2009). Las tecnologías de percepción remota han sido ampliamente utilizadas desde la década de los 70s y la investigación en el uso de dichas herramientas sigue aumentando, añadiendo a ello las ventajas obtenidas de nuevos sensores y métodos de procesamiento de datos (Mumby *et al.*, 2004). La cartografía del fondo oceánico ha dejado significantes avances en nuestro entendimiento sobre los procesos que controlan la distribución de los hábitats (NOAA, 2003; ICES, 2007) y han proporcionando inventarios de línea base que son una herramienta importante que permitirá realizar futuros análisis que ayuden a la preservación y conservación de estos hábitats.

Estas razones y la necesidad de ampliar nuestro conocimiento de los hábitat bentónicos presentes en las costas de Quintana Roo, conducen a que el presente trabajo tenga como objetivo principal el de clasificar y delinear los ambientes bentónicos presentes a lo largo de la costa del Parque Natural Arrecife de Puerto Morelos, desde su línea de costa y hasta los 30 m de profundidad.

En este estudio se integraron herramientas (acústicas, ópticas) de percepción remota con datos colectados *in situ* en un intento de poner en práctica e implementar una nueva herramienta de información espacial para la evaluación de los hábitats marinos presentes en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos a lo largo del noreste de la península de Yucatán, México. Evaluaciones previas de los cambios en los hábitats bentónicos del área se basan en el programa CARICOMP (CARibbean Coastal Marine Productivity Program, 1998) el cual está basado en un seguimiento de cinco transectos de 10 m localizados en dos estaciones al interior del Parque (Rodríguez-Martínez *et al.* 2010).

Para caracterizar el estado actual de los hábitats bentónicos presentes en el área, se utilizó y recolectó una combinación de información como son: datos batimétricos obtenidos por medio de una ecosonda Kongsberg EA400, fotografías aéreas y de satélite y video transectos con buceo autónomo. Los resultados de la información colectada en este estudio fueron ensamblados dentro de un sistema de información geográfica (SIG) el cual permitió generar información de línea base. Con estos datos, entre otras aplicaciones, se podrán por ejemplo generar futuros análisis espaciales de

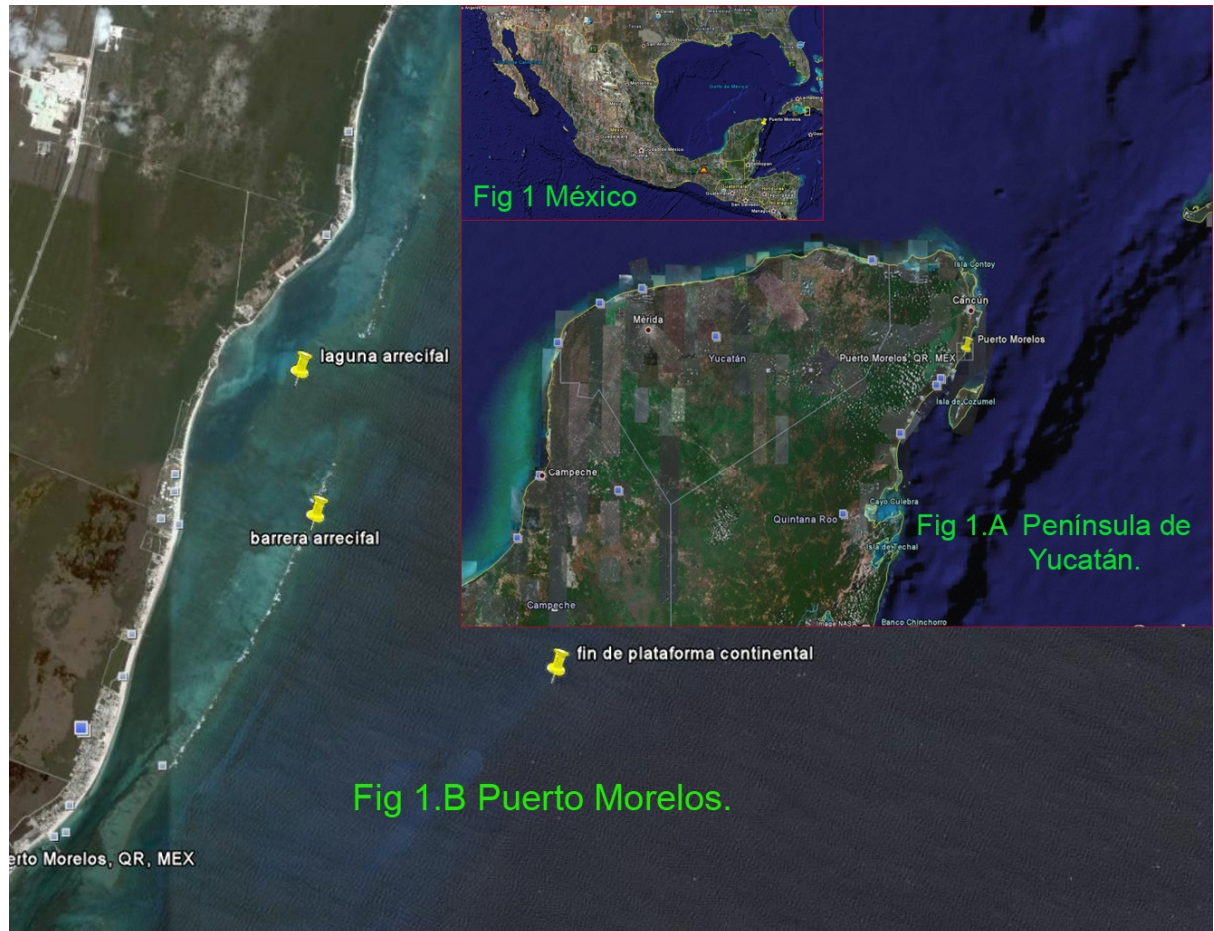
distribución, identificar áreas prioritarias para conservación y monitoreo y/o realizar evaluaciones espacio temporales de cambios, siguiendo perturbaciones medioambientales tales como huracanes, o como el resultado del cambio climático y/o antropogénico.

## 1.2 Área de estudio

La Península de Yucatán (Figura 1.A) hace parte de la provincia de la planicie Costera del Golfo de México (Figura 1) la cual posee una superficie de casi 40,000 km<sup>2</sup>. Su extensión sumergida es conocida como el banco de Campeche el cual forma una vasta plataforma de calizas (Weidie, 1985 En; Ward *et al.*, 1985; Instituto Nacional de Ecología, 2000).

Básicamente todas las rocas superficiales de la península son carbonatos, dando como resultado una gran variedad de características cársticas en donde las aguas pluviales son infiltradas rápidamente por las rocas superficiales formando ríos subterráneos dando como resultado la ausencia de drenajes de agua superficial o ríos (Back, 1985; Instituto Nacional de Ecología, 2000). El agua pasa a través de una inmensa red de cuevas subterráneas y canales para verterse dentro de las aguas marinas a través de los ojos de agua y fisuras (Back, 1985).

El régimen de lluvias varía entre 1,009 mm y 1,489mm por año, disminuyendo conforme se avanza de la costa hacia el continente. La temperatura superficial del agua varia estacionalmente desde 26 C° a 31 C° (Green y Short, 2003). En cuanto a la salinidad el valor promedio es de 35.7 ppm y el rango es de 34,3 a 36.7 ppm. La temperatura ambiente media anual oscila entre os 25 C° y 26.5C y fluctúa entre un rango de 24,7 a 32,8 C° (Instituto Nacional de Ecología, 2000).



**Fig. 1. Área de estudio**

La latitud geográfica de la Península provoca que durante el periodo de verano, cuando el sol alcanza su mayor altura sobre el horizonte, la región esté bajo la influencia del aire marítimo templado y húmedo que se genera en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI); mientras que en la época de invierno, cuando la altura del sol es menor, predominan los vientos alisios del este-sureste. Esta variación produce dos periodos climáticos bien definidos., la estación seca, que se extiende desde enero hasta mayo; y la húmeda, que va de mayo a octubre, con un periodo invernal intermedio denominado de “nortes” (Instituto Nacional de Ecología, 2000).

Por su parte, el estado de Quintana Roo, en la península de Yucatán, tiene aproximadamente 400 Km de litoral marino, de los cuales unos 300 Km corresponden al mar Caribe el cual se encuentra bordeado por una barrera arrecifal discontinua desde el canal de Yucatán hasta la frontera con Belice. Este ecosistema arrecifal forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (Instituto Nacional de Ecología, 2000, Coronado, *et al*, 2007).

A lo largo de la barrera se encuentra el poblado de Puerto Morelos localizado



geográficamente en la costa nororiental del estado de Quintana Roo, entre los 20°50'50.5" latitud norte y 86°52'30.6" longitud oeste, a 35 Km. al sur de Cancún y 34 km al norte de Playa del Carmen sobre la costa. En dicha barrera se encuentra ubicado El Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos perteneciente al municipio de Benito Juárez, el cual fue declarado área natural protegida el 2 de febrero de 1998 (Instituto Nacional de Ecología, 2000).

El Parque cuenta con una superficie total de 9,066-63-11 hectáreas extendidas por 21Km a lo largo de la parte NE de la Península. Por su parte, el arrecife perteneciente al Parque se encuentra situado a 550 m–1.5 km desde la línea de costa. Sus coordenadas geográficas extremas son: 21°00'00" y 20°48'33" latitud norte y 86°53'14.40" y 86°46'38.94" longitud oeste (Instituto Nacional de Ecología, 2000). El área arrecifal está caracterizada por la presencia de bancos coralinos someros sumergidos que están sujetos a una significativa acción del oleaje (Coronado., *et al*, 2007; Rodríguez-Martínez, 2008).

De acuerdo con Jordán (1979, 1980, 1989) y con Ibarra (2008), el desarrollo de los arrecifes incluidos dentro del área de estudio es variable, pudiéndose diferenciar diversas zonas que se pueden describir de la siguiente manera:

**Zona lagunar:** Esta se localiza entre el arrecife y la costa. Su ancho varía entre 350 y 1600 m y su profundidad entre 2 y 6m. El fondo está cubierto principalmente por arena y praderas de fanerógamas marinas (principalmente *Thalassia testudinum* y *Syringodium filiforme*). En algunas zonas aisladas donde aflora el pavimento calcáreo existen "parches" pequeños de comunidades coralinas típicas de fondos duros.

**Zona posterior:** Se localiza entre la zona lagunar y la cresta arrecifal sobre una estrecha plataforma cuya extensión oscila entre 50 y 200 y su profundidad entre 1 y 3m, Presenta la mayor cobertura y diversidad específica de corales escleractinios. Siendo *Acropora palmata*, *Montastraea annularis*, *Porites astreoides*, *Agaricia agaricites* y *Diploria strigosa* las especies dominantes. Entre las formaciones coralinas se encuentran parches de arena gruesas y/o una combinación de praderas submarinas y algas. Las algas también crecen sobre corales muertos.

**Zona de rompiente (o cresta arrecifal):** Es la zona más somera del arrecife. Su extensión oscila entre 30 y 100 m y su profundidad entre 0.5 – 1.5 m aproximadamente. La cobertura coralina tiende a ser intermedia entre las zonas posterior y frontal. Los constructores arrecifales dominantes son *Acropora palmata* y el hidrocoral *Millepora complanata*. Otros organismos conspicuos de la biota son los gorgonáceos. Generalmente, la parte más somera (0.6m y 0.2m) está compuesta

también por pedacería de grava de corales, particularmente de *A. palmata* (Ibarra, 2008).

**Zona frontal:** Según Ibarra (2008), esta zona se divide en 3 subzonas: una de pedacería y dos de macizos y canales, de aproximadamente 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 sustrato de pedacería de coral que está colonizado por colonias esparcidas de *Acropora palmata* y abundantes gorgonáceos. Las dos zonas de macizos y canales 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  $\sim 3$  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.

**Terraza rocosa:** Se encuentra entre la cresta arrecifal y una plataforma arenosa. Jordán, 1979 reporta esta zona con un fondo calcáreo relativamente poco rugoso, que desciende suavemente en dirección perpendicular a la barrera arrecifal, con un ángulo aproximado de  $8$  y  $15^\circ$ . Hacia los 10 m de profundidad las depresiones se ensanchando dando lugar a manchones o extensas áreas arenosas donde se observan rizaduras asimétricas generalmente en sentido paralelo a la formación arrecifal. La terraza de roca se extiende desde la línea de la cresta hasta los 200m mar adentro y presenta de 6 a 16 m de profundidad. Después de la terraza de roca se presenta un escalón de 3m de altura que da inicio a la terraza arenosa (Ibarra, 2008).

**Plataforma arenosa:** En general, a partir de los 20-25 m de profundidad, el sustrato duro desaparece bajo una gruesa capa arenosa, conformando una plataforma que se extiende por varios kilómetros, con una pendiente suave hasta alcanzar el borde del talud continental. Cabe recalcar que poco se sabe acerca de la distribución y/o composición de esta zona.

Por su parte, las mareas no presentan una variación especial fuerte a escala regional, su régimen es mixto y semidiurno (dos pleamares y dos bajamares diariamente) y se presenta un rango de oscilación diurna promedio de alrededor de 20 cm. La oscilación del nivel de mar en el área es pequeña, sin embargo, se pueden presentar oscilaciones considerables dependiendo de los efectos de viento y de la presión. Estos últimos pueden causar efectos de gran magnitud, particularmente durante eventos meteorológicos drásticos como los huracanes, las altura significativa de las olas fluctúa entre 1.78 y 3.34 m (Silva-Casarín *et al.*, 2009).

## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 Hábitat bentónico

Un hábitat o ambiente bentónico está definido como un área de espacio reconocible donde el ambiente físico, químico y biológico es diferente del ambiente circundante (Holmes *et al.*, 2008). Éste puede ser, delimitado tan estrecha o ampliamente como los datos y propósitos lo permitan (Todd *et al.*, 2006).

Por su parte, el Consejo Internacional para la exploración del mar (ICES) define el término hábitat como “un ambiente particular que se distingue por sus características abióticas y por la presencia de sus comunidades biológicas, que operan particularmente pero que su escala y su dinámica espacio temporal es reconocible en un área geográfica determinada (ICES; 2006).

Sensu estricto se ha definido también como la actividad de trazar y delinear la distribución y la extensión de los hábitats para crear un mapa de cobertura completo de los fondos marinos con las fronteras que separan sus distintos hábitats adyacentes (Foster- Smith *et al.*, 2007).

#### 2.1.1 Delineación de los hábitats bentónicos

Con la posible excepción de los arrecifes coralinos, la mayoría de los hábitats no tienen límites “duros”. Sin embargo, los límites entre los hábitats podrían ser calculados representándolos como un punto georeferenciado, punto, línea, polígono, o como una cuadrícula “malla” en un sistema de información geográfica SIG.

En el caso de las mediciones de las fronteras entre los sedimentos por ejemplo (cantos rodados y arena), las delimitaciones en realidad no son tan precisas cuando se realizan en forma de polígonos, ya que estos ambientes se encuentran en un conjunto de límites de transición gradual. ¿Cómo se pueden definir entonces los límites entre cada uno de ellos? La precisión de los polígonos está determinada por la resolución de los datos de campo, la escala del hábitat particular en el área de estudio y los métodos que se utilicen para delimitarlos. Esto facilita el reconocimiento del hábitat como una “área” o “región”.

Según Díaz *et al.*, (2000), los ambientes bentónicos comprenden por lo general, una serie de biotopos y hábitats asociados, usualmente distribuidos en forma de mosaico, que se distinguen entre sí por la naturaleza física del sustrato (sedimentos, escombros coralinos, rocas), por componentes bióticos conspicuos que cubren el fondo (algas, fanerógamas, esponjas, abanicos de mar, etc.) y por poseer elementos característicos de fauna y flora.

Cada uno de estos ambientes constituye una unidad discreta del paisaje, cuya presencia y esquema de distribución dentro de dichas áreas es la respuesta a una serie de procesos geomorfológicos, hidrográficos y biológicos que operan en el corto mediano y largo plazo (acreción coralina, erosión, sedimentación, energía del oleaje, gradientes de profundidad, tectonismo, oscilaciones en el nivel del mar, perturbaciones atmosféricas, etc.). Estos procesos a la vez moldean la identidad geomorfológica y ecológica de cada uno de los hábitats (Díaz, *et al.*, 2000; Castro y Huber, 2003), lo que permite su clasificación dentro de áreas con hábitats similares, o biotopos, que se encuentran estrechamente relacionados con la escala del hábitat y su extensión espacial.

### **2.1.2 Mapas bentónicos**

Los términos cartografía bentónica y cartografía de hábitats bentónicos son a menudo usados como sinónimos para describir la cartografía del fondo marino con el propósito de llevar a cabo la identificación de los hábitats que allí se encuentran. Hay una diferencia sutil pero importante, sin embargo, entre la cartografía general y la cartografía del hábitat bentónico. La distinción es importante porque determina el análisis secuencial y las técnicas de visualización que se utilizan después de que los datos son colectados. La cartografía de los hábitats bentónicos no sólo incorpora información geológica de escala regional, sino que también incluye estudios de alta resolución y realiza análisis de las comunidades biológicas para identificar los hábitats biológicos que se desarrollan en un área determinada (NOAA, 2003).

La elaboración y superposición de dichos mapas, resultan ser en conjunto de gran ayuda, ya que proporcionan una base de datos de fácil ampliación con el fin de realizar evaluaciones del estado actual de los hábitats. Así mismo, con estos mapas se pueden determinar cambios en estos ecosistemas en diferentes escalas espaciales y temporales, y posteriormente ser utilizados para planes de manejo y el uso sostenible de los ambientes más relevantes (Green *et al.*, 2003; Freeman y Rogers, 2003; Brown y Collier, 2008).

#### **2.1.2.1 Aplicaciones y usos de los mapas de hábitats bentónicos**

Durante la última década geólogos marinos han empezado a estar más involucrados en las aplicaciones de las ciencias marinas en las cuestiones biológicas, tales como la caracterización de la estructura y la dinámica de los hábitats. Este es un resultado directo de los avances significativos en la resolución y exactitud de las tecnologías para mapear el fondo marino.

La importancia obvia de los tipos de sustrato del fondo oceánico para la composición y para las características de los hábitats bentónicos y sus comunidades asociadas, han dejado diferentes esfuerzos usando imágenes del fondo en combinación con técnicas de clasificación (Gibbs, *et al.*, 2007; Greene *et al.*, 2007).

Se han analizado mapas acústicos por medio de sistemas de información geográfica (SIG) para extraer diferentes clases acústicas (ver métodos acústicos), que a su vez han sido aplicadas para la identificación de los hábitats bentónicos. Este método se basa en la morfología, las características del sustrato y los requerimientos oceanográficos de los organismos que se encuentran en los hábitats bajo consideración.

Los mapas del fondo han sido utilizados para guiar diferentes tipos de estudios, entre ellos aquellos donde se puedan evaluar los vínculos entre especies, su distribución y sus relaciones espaciales. Estos mapas son cruciales para desarrollar estudios biogeográficos. Adicionalmente, los mapas bentónicos son una herramienta esencial para el manejo integrado de las zonas costeras y la evaluación de los impactos humanos sobre dichos hábitats.

Entre otras virtudes, los mapas de los ambientes bentónicos son herramientas útiles para determinar cambios debidos a impactos naturales o antropogénicos. Por ejemplo, existen muchos estudios que se han centrado en los impactos de la pesca sobre el bentos con el fin de determinar el daño que causa dicha actividad en los organismos y su hábitat. Mapeando estos hábitats durante un largo tiempo los índices de recuperación pueden ser estimados (Green *et al.*, 2003; Mumby *et al.*, 2004; ICES, 2007). Esta herramienta también ha sido ampliamente utilizada para determinar otros fines tales como la creación y delimitación de áreas marinas protegidas, el seguimiento de impactos de huracanes en la costa, los sistemas de monitoreo ambiental, la localización de sitios para acuicultura y el blanqueamiento coralinos entre otros (Mumby *et al.*, 2004; Greene *et al.*, 2007). Este tipo de mapeo y de visualización ayuda a identificar patrones en los datos y en los procesos ambientales.

Una amplia gama de técnicas puede ser utilizada en una variedad de escalas espaciales, dependiendo de los objetivos de la investigación y de los presupuestos disponibles (véase por ejemplo Coggan *et al.*, 2009). Generalmente para realizar este tipo de mapas que definen ensamblajes biológicos o hábitats se utilizan técnicas de percepción remota por medio de las cuales se colectan datos desde un sensor sin realmente impactar o crear disturbios en el fondo marino (NOAA, 2003; ICES, 2007; Rooper y Zimmermann, 2007).

### 3. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

#### 3.1 Antecedentes

Diferentes métodos de evaluación de hábitats bentónicos han sido desarrollados a través de los años para facilitar la incorporación de datos ecológicos, geomorfológicos y oceanográficos en la planificación ambiental y la toma de decisiones, con el fin de buscar la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales marinos.

De igual manera, existen diversos estudios relacionados con el tema de la evaluación del cambio en las coberturas y extensiones de los hábitats bentónicos ocasionados por impactos naturales o antropogénicos o simplemente como procesos evolutivos dentro del sistema. Estos estudios emplean una gran variedad de métodos (ver capítulo 3.2 para la descripción de métodos para la caracterización de los hábitats bentónicos), dentro de los que se resalta el uso de técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica (SIG) como herramientas evaluativas.

En el caso particular del área de Quintana Roo se han realizado diferentes estudios de caracterizaciones y monitoreos in situ de los principales ecosistemas marinos como los arrecifes coralinos y las praderas submarinas. Dentro de estos, los trabajos que se destacan son los realizados por Jordán (1979); Padilla *et al.* (1992); Muñoz-Chaguín 1992; Carricart-Ganivet y Horta-Puga (1993), Van-Tussenbroek (1993); Membrillo-Venegas (1999); Amigos de Sian Ka'an (2001); Hernández- Landa (2004); Enríquez y Pantoja-Reyes (2005); Woods-Ballard *et al.*, (2005); Rodríguez-Zaragoza (2007); Rodríguez-Martínez *et al.*, (2010) respectivamente.

Por su parte, Jordán-Dahlgren, (1989) realiza una descripción del cambio gradual en la geomorfología arrecifal y en la estructura comunitaria que resulta del efecto del gradiente ambiental que existe del Caribe al Golfo de México, así como de los forzamientos externos por los que se ven influenciados. En años posteriores se hicieron algunas mejoras a los estudios de revisión citados y para ello, Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez, (2003) utilizan la información disponible sobre las comunidades de arrecifes coralinos del Atlántico Mexicano, así como de las perturbaciones naturales (climáticas y biológicas) y antropogénicas que los afectan y realizan una evaluación de la condición de la comunidad coralina.

La mayoría de estas caracterizaciones coinciden en el hecho de que el área se encuentra bajo un inmenso crecimiento turístico que ha incrementado en las últimas cuatro décadas debido a sus principales atractivos como el arrecife, sus playas blancas y sus aguas cristalinas. Como consecuencia de este auge se presentan en la zona grandes incrementos en nutrientes que son acarreados finalmente a los

ecosistemas marinos. Igualmente, el aumento de infraestructura hotelera y disposición de basuras es también considerable (Rodríguez-Martínez, 2008).

Esta preocupación por la disminución en el estado de los arrecifes ha llevado al desarrollo de numerosos informes sobre el estado de los ecosistemas de arrecifes de coral, tanto a nivel regional, local y mundial (Woods-Ballard *et al.*, 2005; Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010; Wilkinson, 2008). En el caso de Yucatán estos informes son una síntesis de los esfuerzos de vigilancia locales que utilizan observaciones *in situ*. Sin embargo, independientemente de la metodología utilizada (transectos con cadena, cuadrantes etc.), los estudios realizados *in situ* cubren directamente sólo una pequeña fracción de los arrecifes de las costas Mexicanas. Por lo tanto, estas síntesis ofrecen una estimación muy general de la condición de los arrecifes, pero grandes extensiones de arrecifes permanecen inexploradas.

En consecuencia, pocos estudios se han enfocado a realizar caracterizaciones a mayor escala de los hábitats bentónicos en el área. Garza Perez, (2004) Estructura las comunidades bentónicas en los arrecifes coralinos (Akumal, BocaPaila/Punta Xamach y Mahahual, en el Estado de Quintana Roo) de acuerdo a su categoría de uso. El autor utiliza 8 clases de hábitats para realizar una clasificación supervisada siguiendo la metodología propuesta por Andréfoüet *et al.*, (2003) para evaluar áreas arrecifales mediante imágenes IKONOS. Los autores reportan que los resultados de sus mapas temáticos producto de la clasificación no mostraron una definición espacial precisa de las clases (65.1% de precisión general). Debido a esto, realizan una nueva clasificación supervisada, esta vez con un esquema de nueve clases, en donde separan la clase arena, en arena somera y profunda en la que alcanzaron una exactitud del 66.2% de precisión general.

Garza Perez *et al.*, (2004) realiza una predicción espacial sobre el arrecife de Akumal y para ello utiliza técnicas de modelación y percepción remota. Los autores realizan mapas derivados de un SIG siguiendo un procedimiento de una clasificación jerárquica, en la que obtienen como resultado final un mapa con 8 clases. Posteriormente, los autores comparan éste resultado contra un mapa temático creado por el método tradicional de clasificación supervisada encontrando problemas de clasificación en ambos casos cuando evaluaron por separado las algas verdes (clase 4) y las praderas de fanerógamas (clase 6). Finalmente, encuentran que el método tradicional de clasificación supervisada presenta estimaciones espaciales incorrectas en la estimación de los hábitats.

Acosta-González, (2005) caracteriza los hábitats bentónicos, con énfasis en corales escleractíneos en los arrecifes coralinos de la península de Yucatán por medio de un SIG. El autor analiza por medio del SIG los arrecifes presentes en el Banco Chinchorro y Alacranes, encontrando que el grupo funcional de las macroalgas es el más dominante en ambos arrecifes. Así mismo, realiza un análisis de agrupamiento (Clúster) en donde encuentra un total de 9 hábitats para el arrecife del Banco Chinchorro y 11 para el arrecife presente en Alacranes. Finalmente determina con un análisis estadístico (Anova) que no existen diferencias significativas entre los grandes grupos morfoestructurales representativos en los dos arrecifes estudiados, pero que si existen diferencias entre los corales presentes. El autor concluye que a pesar de que la gran cantidad de hábitats discriminados en ambos sistemas arrecifales parece coincidir con lo encontrado en otros arrecifes de tipo plataforma, es necesaria una estandarización de criterios para la clasificación de hábitat con la cual poder obtener el mismos número de hábitats y así de esta manera poder realizar una mejor comparación entre ellos.

Figuroa- Zavala, (2008), evalúa los cambios en la vegetación en el Sur de la Costa Maya (Uvero – Punta Piedras) utilizando para ello imágenes de percepción remota (de satélite y aéreas) de la zona y estimaciones in situ. Asimismo, este autor, realiza una caracterización del arrecife con técnicas de video transecto con las cuales estima abundancias relativas y composición de la comunidad coralina y de peces.

Existen también algunos trabajos realizados a escala global en los cuales se consideraron estaciones en el Caribe Mexicano. La universidad de Berkeley, publica en el 2003, un atlas sobre la distribución mundial de los praderas de pastos marinos (Green y Short, 2003) en donde se describe un caso de estudio para el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos.

Andréfouet *et al.*, (2003), elaboran una clasificación de los arrecifes coralinos tropicales del mundo en donde incluyen el arrecife de Boca Paila (Quintana Roo) utilizando imágenes de satélite Ikonos. Así mismo, comparan su exactitud con la del satélite Landsat, encontrando que el primero arroja resultados con mayor exactitud. Los autores hacen la observación de que en las aplicaciones científicas y de manejo al menos un 80% de precisión es necesaria y que estas solo se pueden implementar en un esquema de clasificación de 4-5 clases en imágenes IKONOS. Los autores también reportan que la mayoría de las áreas coralinas se clasifican erróneamente en la mayoría de las ocasiones cuando existen coberturas de macroalgas. Los resultados



de su clasificación muestran una exactitud del 77% cuando utilizan de 4 a 5 clases, 71% de 7 a 8 clases, 65% de 9 a 11 clases y 53% para más de 13 clases, demostrando que existe un decrecimiento en la exactitud de la clasificación cuando hay un incremento en la complejidad de los hábitats. Finalmente, argumentan que a pesar de que las correcciones batimétricas a escalas de hábitat podrían mejorar la exactitud total y evitar errores en la clasificación, muchos de estos errores pueden ocurrir simplemente porque zonas muy diferentes son consideradas simultáneamente en el proceso de clasificación, tal es el caso por ejemplo de las zonas del Caribe donde se consideran varias comunidades en la misma clasificación dejando problemas en los resultados finales.

Andréfouët *et al.*, (2005), caracterizan los arrecifes coralinos de la Península de Yucatán, en un proyecto global denominado Coral Millenium Project en el cual desarrollan mapas geomorfológicos arrecifales a partir de diferentes sensores como Landsat TM y ETM. Así mismo, determinan concentraciones de clorofila con imágenes SeaWiFS y temperatura superficial del mar con AVHRR.

Pittman *et al.*, (2007), realizan un mapa predictivo de la riqueza de especies de peces en aguas someras a través de la región del Caribe utilizando imágenes de satélite y sistemas de información geográfica. Los autores encuentran áreas con alta diversidad de especies asociadas con zonas de mayor complejidad batimétrica y de rugosidad. También reportan que la profundidad y la cantidad de hábitats de praderas de fanerógamas y sustratos duros estuvieron en segundo lugar de importancia cuando compararon sus resultados, concluyendo que para futuros estudios de riqueza de especies de peces podría solo ser necesario utilizar técnicas de percepción remota y la complejidad topográfica del terreno. Finalmente, Wabnitz *et al.*, (2008), evalúan las comunidades de pastos marinos a escala regional en el Caribe usando imágenes Landsat e Ikonos, y elaboran mapas bentónicos de la distribución de estos ecosistemas en el que también se incluyen las costas de Yucatán. Los autores evalúan la exactitud de sus resultados a partir de: (i) los datos seleccionados *in situ*; (ii) los patrones detectables en las imágenes Ikonos; (iii) mapas de hábitats publicados con exactitudes documentadas. Encontrando resultados de exactitud que varían entre 46%-88%. A pesar de los bajos resultados reportados en algunas de las áreas evaluadas, los autores argumentan que éstos son aceptables para brindar una adecuada información de línea base para futuras acciones de conservación e investigación en la región.

Madden *et al.*, (2005), desarrollan una clasificación estándar que fuese universalmente aplicable para sistemas marinos y costeros la cual provee una estructura sintetizada de datos que pueden caracterizar los hábitats y reportarlos en una forma estandarizada y los cuales puedan ser agregados y evaluados a través de los paisajes nacionales de U.S.A. La caracterización es aplicable sobre escalas espaciales, (para menos de un metro cuadrado a cientos de Kilómetros cuadrados) y puede ser usado en litorales, zonas bénticas y pelágicas, estuarios y sistemas oceánicos abiertos. La clasificación contiene seis niveles anidados, cada uno conteniendo clases y unidades claramente definidas, ligadas entre niveles de jerarquía y definidas por procesos ecosistémicos y por relaciones espaciales. Los seis niveles están definidos así:

Nivel 1/ Régimen: Diferenciado por una combinación de salinidad, geomorfología y profundidad.

Nivel 2/ Formación: Largas estructuras físicas formadas por ambos elementos agua y sustrato sólido dentro de sistemas.

Nivel 3/ Zona: la columna de agua, el litoral o el fondo oceánico.

Nivel 4/ Macrohábitat: Largas estructuras físicas que contienen múltiples hábitats.

Nivel 5/ Hábitat: una combinación específica de características físicas y de energía que crean lugares apropiados para la colonización y el uso de la biota.

Nivel 6/ Biotopos: características biológicas asociadas con hábitats específicos.

El U.S. Geo-logical Survey (USGS) en colaboración con Coastal and Marine Geology Program and the National Park Service (NPS), desarrollan una clasificación de mapas de hábitats bénticos detallados de línea base y construyen un SIG de los recursos biológicos y geológicos para el parque Nacional Natural Kaloko-Honokōhau en Hawaii, para tal fin utilizan una combinación de técnicas de muestreo in situ e imágenes dentro de las que se resaltan fotografías aéreas, datos batimétricos y videotransectos georeferenciados (Gibbs *et al.*, 2007).

En Europa, el esquema de clasificación EUNIS (Sistema de Información de la Naturaleza Europea) está siendo desarrollado y manejado por el centro de asunto europeo para la protección de la naturaleza y de la biodiversidad (ETC/NPB en París) así como, por la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEE) y por la red Europea de observación e información sobre el medio ambiente (EIONET), estos incorporan los esquemas de clasificación nacionales de los hábitats bentónicos y sus recursos marinos (ICES, 2008).

Estos estudios proporcionan herramientas potenciales para la caracterización de los hábitats bentónicos y cuyo principal objetivo es el de poder comparar entre las áreas. Sin embargo, pocos estudios determinan las dificultades o problemas relacionados con cada técnica o herramienta empleada (es decir, que tan exactas y precisas son al definir hábitats). Por lo que a continuación se realiza una descripción de los métodos más comúnmente empleados para tal fin.

### **3.2.Descripción de métodos para la caracterización de los hábitats bentónicos**

#### **3.2.1 Métodos de reconocimiento**

La adquisición de datos fiables para documentar la ubicación, la distribución y el estado de los hábitats utilizando técnicas convencionales de monitoreo e inspección ecológica son logísticamente difíciles, limitando así su alcance geográfico. Además, esto puede llegar a ser extremadamente caro cuando se trabaja a gran escala.

Actualmente, existen numerosas maneras para coleccionar datos para la exploración del fondo oceánico a gran escala , como por ejemplo sonares de barrido lateral (side scan sonar), ecosondas de mapeo, imágenes de satélite, buceo autónomo, arrastre de un buzo (tower diver survey), buceo a pulmón, sistemas diferenciales de posición global, sumergibles, vehículos operados remotamente (ROV's), colecta de núcleos de sedimento, conteo de especies, fotografía submarina y video transectos (Lundblahn, 2004; Gray y Elliott, 2009).

#### **3.3 Percepción remota**

La percepción remota es la ciencia que obtiene información acerca de un objeto, área o fenómeno a través de análisis de datos adquiridos por un sensor que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno (Chuvieco, 2000). Las plataformas de sensores remotos utilizadas para mapear hábitats bénticos están divididos en dos clases: ópticas y acuáticas. Los sensores remotos ópticos incluyen entre otros todos los datos (principalmente fotografías a color) coleccionados desde satélites o sensores transportados por vía aérea, mientras que los sensores remotos utilizados en el agua, coleccionan datos desde plataformas sumergidas que habitualmente van atadas o son arrastradas por barcos de investigación (NOAA, 2003; ICES, 2007).

Según Green *et al.*, (2000) la percepción remota es una herramienta de gran utilidad para indicar la extensión de los hábitats y la localización de los límites entre estos. Los autores señalan que si estas herramientas se combinan con los muestreos sobre el

campo es posible identificar los hábitats y los factores asociados a éstos. Así mismo, la aplicación de este tipo de técnicas brinda la oportunidad de extender el muestreo en campo al área total de interés por medio del procesamiento digital.

A continuación se presenta una breve discusión acerca de los métodos actuales de exploración los cuales demuestran significantes avances que la ciencia ha realizado en cuanto al desarrollo y la utilización de los recursos para el mapeo.

### **3.3.1 Métodos acústicos**

Avances en la tecnología de la percepción remota han permitido la proyección de imágenes de las regiones del fondo del mar y la construcción de mapas de hábitats bentónicos detallados (Lathrop *et al.*, 2006; Anderson *et al.*, 2008).

Los datos acústicos pueden ser usados para crear modelos digitales de elevación a escalas de metros o sobre cientos de kilómetros cuadrados, generando paisajes marinos con perspectivas nunca antes vistas (ICES, 2008). Herramientas geofísicas como los sonares de barrido lateral, las ecosondas entre otras herramientas pueden ser usadas para mapear hábitats sobre largas áreas debido a que ellas pueden discriminar el tipo de fondo (arena, roca, lodo).

Estos sistemas tienen la posibilidad de obtener una cobertura total de la morfología del fondo oceánico (profundidad) utilizando para ello un conjunto de haces acústicos que se encuentran orientados hacia el lecho marino en una franja a través de la plataforma continental por medio de transductores ubicados en la embarcación.

Los transductores son usados para emitir un pulso de energía, el cual se propaga a través de la columna de agua y que posteriormente es reflejado por el fondo y es recibido nuevamente por el transductor. Éstos están diseñados operacionalmente para obtener alta resolución de imágenes y detección de objetos a lo largo de la superficie del fondo oceánico, dando una estimación relativa de la rugosidad y la dureza de los sedimentos (ICES, 2007). Analizando la forma de la onda reflejada se puede extraer información perteneciente a las propiedades del fondo marino.

Dichos sistemas tienen la habilidad también de coleccionar los valores de retrodispersión (Backscatter), o la intensidad de rendimiento acústico (frecuencia). La retrodispersión es a menudo utilizada para la clasificación de los hábitats bentónicos, mediante características del fondo (por ejemplo, sedimentos consolidados y no consolidados, y las características geomorfológicas). Las ecosondas producen pues información tipo mosaico, mostrando imágenes del fondo oceánico con escalas de grises que proveen una fotografía como un negativo de una imagen, con regiones de luz reflejadas por

aéreas con menos señal acústica (superficies planas, lisas y sustratos suaves geofomas de la topografía con pendientes que se encuentren lejos del remolcador), así como regiones con sombras grises que representan alta señal acústica (sustratos duros o pendientes topográficas inclinadas hacia el remolcador). (ICES, 2007; Rattray *et al.*, 2009).

Así pues, posteriormente, los datos acústicos pueden ser importados como capas raster y la clasificación acústica puede ser hecha usando una aproximación con una clasificación no supervisada, o también puede hacerse basándose en catálogos sobre tipos de sustrato conocidos desde previos estudios que conducirán a clasificaciones supervisadas (ICES, 2007; ICES, 2008).

A menudo, el reconocimiento de las limitaciones de los datos de ecosonda, las intensidades relativas de su señal y atributos morfológicos son utilizadas como descriptores cualitativos para identificar las diferencias en la zonación del hábitat bentónico.

Por otro parte, la tecnología acústica ha sido requerida para obtener alta resolución batimétrica y de clasificación de hábitats del fondo oceánico a través de una continua escala espacial por medio de la construcción de una malla de profundidad.

Esta malla es adquirida a través de mediciones exactas del tiempo de trayectoria y de los ángulos de emisión y recepción de la energía del sonido de los repetidos pulsos enviados desde el transductor. Una visión general de las frecuencias típicas, las profundidades, los anchos de franjas y las resoluciones de los diferentes sensores acústicos pueden encontrarse en Coggan *et al.*, (2009).

Estas herramientas de alta resolución pueden identificar características tales como formaciones arrecifales, volcanes de lodo y la rugosidad del fondo que posteriormente pueden ser ligados a video y fotografías para monitorear los ecosistemas del fondo. Tales datos posibilitan a los biólogos enfocar sus actividades sobre los más importantes hábitats y, cuando estos son entendidos, pueden usar el mapeo geofísico para mostrar la extensión lateral de cada hábitat. Los mismos datos también pueden ser usados para desarrollar una visualización en tres dimensiones (3D) de geo-hidro-biosfera, dando como resultado una base de conocimiento completamente interactiva (HERMES, 2005).

### 3.3.1.1 Modelo batimétrico

Este tipo de modelos sirve para realizar la caracterización de la estructura geomorfológica de los hábitats, obteniendo datos de la profundidad y de su aspecto (orientación de la superficie) en cada uno de los hábitats. Otras de las ventajas de este tipo de modelo es que proporciona información acerca de la distribución de las especies presentes en los hábitats bentónicos y de su relación con otros hábitats (Jenness, 2004; Lundblad *et al.*, 2006; Gibbs *et al.*, 2007).

### 3.3.1.2 Modelo béntico del terreno e índice de posición batimétrica

Los modelos bénticos del terreno (BTM por sus siglas en ingles) son generados a partir de la información acústica (batimétrica) para realizar una cartografía de los hábitats más específica. Los modelos fueron desarrollados en colaboración de la Universidad de Oregón y el Centro de Servicios Costeros de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA) durante los años 2004-2005. Se trata de modelos estadísticos que son generados y mantenidos dentro de un computador y que pueden ser representados de muchas maneras diferentes.

El modelo béntico del terreno ofrece la oportunidad de cartografiar las zonas bénticas, tomando como base la topografía submarina a partir de derivados como las Pendientes y el Índice de Posición Batimétrica (BPI, por sus siglas en ingles) para describir las características del fondo marino (Lundblad, 2004).

El Índice de Posición Batimétrica realiza un cálculo de la media focal donde las celdas de elevación son comparadas con las celdas vecinas dentro de un área definida. Los valores resultantes de la cuadrícula son convertidos a enteros para aminorar el tamaño de almacenamiento de la cuadrícula y para simplificar la simbolización. El BPI es una modificación del Índice de Posición Topográfico (TPI, por sus siglas en ingles) elaborado por Andrew Weiss (2001), utilizado comúnmente para trabajar en ambientes terrestres. No obstante estas aplicaciones pueden ser llevadas al estudio de ambientes bénticos a través del BPI en los que se puede determinar entre otros la geomorfología del fondo (e.g valles y/o crestas).

El índice de posición batimétrica se utiliza para definir la ubicación de las características específicas y las regiones en relación con otras características y regiones dentro del mismo conjunto de datos. Una amplia y fina escala del conjunto de datos del BPI permite al usuario identificar largas regiones y cambios locales dentro del paisaje béntico.

Por su parte, el índice de rugosidad del terreno es una medida de las irregularidades

del terreno definida a partir del coeficiente del área de superficie total sobre el área planar correspondiente. Puede ser utilizado en el medio bentónico para la identificación de áreas de alta biodiversidad debido a la complejidad que presentan sus terrenos (Lundblad *et al.*, 2006).

El aspecto puede ser definido como la dirección de la pendiente y calcula la dirección de las pendientes bajas y la máxima tasa de cambio en sus valores. Estos valores pueden indicar una orientación preferible de la corriente para las comunidades bentónicas. La pendiente calcula la tasa del cambio máximo sobre el cambio en valor de la su celda con el valor de la celda de su vecino y de esta manera identifica la morfología, pero también da un parámetro para las potenciales tasas de sedimentación de material fino que pueden depositarse sobre el terreno, los cuales son letales para algunos organismos bentónicos como por ejemplo los corales.

### **3.3. 2 Métodos ópticos**

Fue en la década de los 80's cuando se efectuaron los mayores avances tecnológicos en óptica y electrónica, llegando a ponerse en funcionamiento operativo sensores que podemos denominar de "tercera generación", por ejemplo, LANDSAT (Thematic Mapper) o SPOT (Haute Resolution Visible). Otros fueron los sensores aerotransportados del tipo A.T.M. (Airborne Thematic Mapper) y del P.M.I. (Programable Multispectral Imager) con resoluciones espectrales y espaciales inimaginables hasta hoy y que son, en gran medida, los protagonistas del nuevo resurgir de la percepción remota que se está produciendo en la actualidad.

Así pues, los sensores instalados en las plataformas espaciales y ubicados a cientos o miles de Kilómetros comenzaron a aportar imágenes que una vez almacenadas en los diferentes tipos de soporte, constituyen el mayor banco de datos geográficos jamás antes utilizado. A ello se suma el constante avance de la información gráfica que permite disponer de equipos que facilitan los tratamientos de las imágenes y posibilidades de manipulación de la información digital insospechadas hasta hoy.

La información de percepción remota óptica más comúnmente utilizada en la actualidad es la usada por los sensores multispectrales a bordo de satélites. Estos sensores adquieren información en un número pequeño de canales del espectro electromagnético, en el rango visible e infrarrojo reflejado, y cuentan con una resolución espacial entre media y baja (que depende del tamaño del pixel). Los sensores hiperspectrales sin embargo cuentan con un gran número de canales,

estrechos y contiguos, que permiten la representación continua de los valores de reflectancia (curvas de reflectancia) que resultan específicas de cada tipo de superficie, a las que se denomina “firmas espectrales”. Estas firmas pueden ser interpretadas en función de tres tipos de información: el albedo o altura de la curva, la forma de la curva y las bandas de absorción específicas (Chuvienco, 2000).

### **3.3.2.1 La luz en las aguas someras**

La percepción remota óptica en ambientes acuáticos ésta limitada por las longitudes de onda visibles que se encuentran entre 400 y 700 nm (Kirk, 1994). La radiación visible es la única porción significativa del espectro electromagnético que penetra en la columna de agua y puede ser reflejada de vuelta al sensor, siendo la azul la más penetrante, ya que a los 70 m. aun conserva un 70-80% de su intensidad en superficie (Hedley, 2008). Un sensor remoto aerotransportado o en un satélite que apunta al cuerpo de agua puede recibir luz de cuatro componentes separados:

1) Por esparcimiento subsuperficial, 2) por reflexión de la luz del cielo a la superficie, 3) por la reflexión de la luz solar directa a la superficie y 4) por esparcimiento dentro de la atmosfera. Solo el primero de estos cuatro flujos lumínicos, contiene información acerca del campo de luz bajo el agua y de la composición del medio acuático (Kirk, 1994).

Por su parte, no toda la radiación que llega al agua penetra en ella: una parte es reflejada inmediatamente y su porcentaje de reflexión depende del estado del mar (e.g la presencia del oleaje aumenta la superficie de reflexión), de la cobertura del cielo (por la cantidad de luz reflejada hacia abajo por las nubes) y de la altura del sol sobre el horizonte (Green *et al.*, 2000). Particularmente, la reflexión difusa es aquella que proviene de la columna de agua y generalmente es más baja, por su parte, la reflexión especular es aquella que ocurre en la superficie y es la causante del brillo en las imágenes.

Cuando nos enfocamos en la señal reflejada por el agua, nosotros podemos ver que ésta está influenciada por diferentes factores. El color del agua está determinado por la dispersión y la absorción de luz visible de las sustancias ópticamente activas que se encuentran presentes en ella. Estas sustancias son el agua en sí misma, el fitoplancton, la colorida materia orgánica disuelta y el material en partículas. Además, en aguas someras, una significativa parte de la luz proveniente del sol puede alcanzar el fondo y en tal caso el fondo también influencia el color del agua (Green *et al.*, 2000). El espectro lumínico emanado desde la superficie oceánica en aguas someras contiene información sobre las propiedades ópticas de los constituyentes del agua marina y del sustrato béntico (Mishra *et al.*, 2006).



Características espectrales específicas (absorción de pigmentos) de los diferentes tipos de fondo están generalmente sombreados por la absorción significativa del agua, lo cual hace el mapeo de áreas benthicas por medios ópticos una difícil tarea (Mishra *et al.*, 2007).

### **3.3.2.2 Firmas espectrales**

El análisis e interpretación de las imágenes de satélite exige conocimientos interdisciplinarios. Una sólida base de física y en especial de radiometría es necesaria para poder entender las imágenes de percepción remota. Todos los elementos geográficos (bosques, arrecifes, ríos, lagos, edificios, etc.) transforman de forma diferenciada la radiación electromagnética que reciben del Sol (Chuvienco, 2000).

Cada tipo de objeto presenta a un nivel de respuesta específico en términos de reflectancia, absorptancia y transmitancia. La variación continua de la reflectancia de un cuerpo en función de la longitud de onda se denomina firma espectral. Esta está afectada por las características físicas y químicas del objeto que interacciona con la energía electromagnética y varía según las longitudes de onda (Chuvienco, 2000; Hochberg *et al.*, 2003).

La firma espectral que captan los diversos sensores utilizados en la percepción remota óptica refleja el comportamiento de los diferentes objetos analizados en función de su mayor o menor capacidad de absorción, transmisión o reflexión de la energía que reciben. Este hecho está condicionado por la estructura y composición del elemento observado. Incluso un mismo objeto puede variar su respuesta espectral en función de su estado y relación con el entorno, permitiendo la percepción remota calibrar variaciones estacionales en los ciclos de la naturaleza.

En general, se ha recurrido a la interpretación visual de imágenes y la clasificación digital. En estos casos, un atributo de la superficie terrestre (por ej. un tipo dado de cobertura) se relaciona con un comportamiento espectral determinado (valores de reflectancia o emisión de la superficie terrestre en distintas longitudes de onda) (Paruelo, 2008).

Dicha emisión se produce en otras longitudes de onda (generalmente más largas) dependiendo de su temperatura en concordancia con la ley de Wien, la cual especifica que hay una relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura. Esto quiere decir que en cuanto mayor sea la temperatura de un cuerpo negro menor es la longitud de onda en la cual emite (Chuvienco, 2000).

La disponibilidad de información espacialmente continua y regular en el tiempo resulta esencial para la elaboración de programas de seguimiento de espacios naturales, ya que potencialmente permite diferenciar las dinámicas naturales de las perturbaciones antrópicas. La percepción remota es muy útil en este sentido ya que permite obtener información espacialmente explícita y estadísticamente representativa (Coppin *et al.* 2004) de variables del ecosistema.

### **3.3.2.3 Métodos de corrección y realce en las imágenes de satélite**

Durante los pasados ocho años, se ha incrementado el número de aplicaciones que utilizan imágenes con alta resolución espacial (Andréfouet y Riegl, 2004; Mumby *et al.*, 2004; Johansen *et al.*, 2008; Roelfsema *et al.*, 2009). Otras mejoras en los enfoques de mapeo basados en imágenes digitales han sido conseguidos a través de la aplicación de las correcciones de imagen que progresivamente son más detalladas tales como ajustes atmosféricos, en la interface aire agua y en la columna de agua (Purkis y Pasterkamp, 2004).

### **3.3.2.4 Correcciones atmosféricas**

La radiancia recibida por el sensor no es exactamente la radiancia que procede de la superficie y esto es debido a que la respuesta radiométrica que le llega al sensor del satélite se modifica a consecuencia de su paso por la atmósfera, pues éste se encuentra situado a bastante distancia de la superficie que se está examinando.

Durante esta trayectoria, el flujo radiante es esparcido y absorbido por los aerosoles atmosféricos, lo que modifica la radiancia que finalmente registran los detectores del sensor desde su objetivo. Específicamente, el proceso de esparcimiento redirecciona energía que se añade como radiancia de ruta extraña (*extraneous path radiance*) a la señal medida por el sensor, mientras que el proceso de absorción atenúa la señal de energía que éste recibe (Lillesand *et al.* 2004; Aronoff 2005). En una imagen, la dispersión de Rayleigh (dispersión de la luz o cualquier otra radiación electromagnética por partículas mucho menores que la longitud de onda de los fotones dispersados) suele ser la más evidente, y es ocasionado por pequeños aerosoles atmosféricos que redireccionan energía de onda corta que se añade a la radiancia de los píxeles (e.g efecto de niebla), reduciendo la visualización de detalles (debido a que la imagen pierde contraste y brillo, es decir, disminuye su detalle radiométrico) e induciendo a una estimación incorrecta de algún parámetro de los hábitats estudiados (debido a que los valores de radiancia se encuentran sobreestimados) (Lillesand *et al.* 2004; Aronoff, 2005).

La corrección atmosférica tratará de eliminar el efecto del esparcimiento de la radiación electromagnética originada por parte de los gases y partículas en suspensión de la atmósfera, para que las variaciones en los modelos sean independientes de las condiciones atmosféricas.

Por otro lado, según el método que se elija, la corrección atmosférica se realiza en base a los datos de radiancias y reflectancias. Numerosos algoritmos de corrección atmosférica han sido desarrollados para su aplicación, caracterizándose por estar enmarcados en una o en varias de las siguientes categorías:

1. Sustracción de la oscuridad del píxel
2. Conversión de la radiancia a reflectancia
3. Regresiones lineales
4. Modelamiento atmosférico.

La elección de uno de los métodos u otros, depende en parte del tipo de datos de los que se dispone.

### **3.3.2.5 Delineación manual de las imágenes**

La clasificación digital de imágenes es, en cierta medida, parecida a la foto-interpretación. En este método, se identifica el patrón visual asociado a cada cubierta (categoría) de acuerdo a una serie de parámetros como son el tono, la textura, la forma, el contexto, la disposición, etc. y después se identifican sobre las fotografías las superficies correspondientes a estas categorías, mediante su semejanza con el patrón-tipo previamente identificado. Estos criterios nos permiten discriminar categorías con un comportamiento espectral parejo, aunque con un significado temático diferente.

### **3.3.2.6 Aplicación de máscara**

Un método automático para enmascarar la tierra y nubes presentes en la imagen fue presentado por Van Hengel y Spitzer, (1991); y Ji *et al.*, (1992). Su propuesta está basada en la absorción total del ancho de banda del infrarrojo por el agua. Como los píxeles terrestres son mucho más reflectivos, una capa podría ser aplicada para seleccionar solo los píxeles de tierra más representativos.

### **3.3.2.7 Corrección del brillo**

El mapeo de los componentes bentónicos por medio de imágenes satelitales puede verse seriamente obstaculizado por el estado de la superficie del agua. Cuando el cielo está despejado y la superficie del agua no es plana, el reflejo espectral de la

radiación incidente oculta el componente bentónico de las datos obtenidos por la percepción remota, con áreas de color blanco brillante que provienen del destello solar (Hedley, 2005). La radiación o radiancia directa originada desde el sol puede también ser reflejada sobre las crestas o valles de las olas, dicha información no contiene ningún dato acerca de los constituyentes del agua o de las características bénticas. La habilidad para reconocer y eliminar las contribuciones de la luz solar es necesaria por lo que diferentes métodos para quitar el brillo han sido propuestos por Hochberg *et al.*, 2003; Hedley *et al.*, 2005.

### **3.4 Métodos de clasificación**

Una clasificación es conocida como el proceso de identificación de píxeles en la imagen con propiedades similares, organizando este dentro de grupos similares y asignándole etiquetas (e.g.: nombres de hábitats) para estos grupos. El producto final de la clasificación es un mapa de hábitats o de otras características de interés.

Existen dos aproximaciones principales para clasificar imágenes digitales: clasificación no supervisada y clasificación supervisada (Green *et al.*, 2000; ICES, 2007). Éstas se diferencian en el grado de intervención del usuario en el proceso.

#### **3.4.1 Clasificación no supervisada**

La clasificación no supervisada es aquella donde el computador automáticamente clasifica los píxeles de una imagen dentro de un número de clases (proporcionadas por el operador) sobre la base de respuestas espectrales similares (Green *et al.*, 2000; Aguirre-Gómez y Morales-Manilla, 2005; ICES, 2007). El programa determina la pertenencia de cada píxel a las diferentes clases de interés de acuerdo a las distribuciones estadísticas de los datos, asumiendo distribuciones normales y probabilidades de ocurrencia. Las clases están producidas usando un algoritmo de agrupación que depende de la naturaleza de los datos. Posteriormente el usuario etiqueta *a posteriori* las diferentes clases obtenidas de acuerdo a su conocimiento del área de estudio.

Un algoritmo ampliamente aplicado para análisis espaciales en métodos ópticos, es el de la técnica repetitiva de organización personal de análisis de datos, ISODATA por sus siglas en inglés (Iterative Self Organising data analysis technique). En este enfoque, el usuario especifica el número de clústeres a identificar y una suposición inicial del lugar donde se localicen los puntos centrales (centroides) de cada uno de los clústeres definidos. El algoritmo calcula entonces a qué clúster pertenece cada píxel, con base en la distancia que lo separa del centroide más cercano (Aguirre-

Gómez y Morales-Manilla, 2005). Después de un primer reconocimiento, los centroides son ajustados a las nuevas clases generadas y el proceso se repite iterativamente. Por consiguiente, el usuario debe definir un número determinado de iteraciones, o bien, definir un criterio aceptable de convergencia del porcentaje de píxeles clasificados (Aguirre-Gómez y Morales Manilla, 2005).

### 3.4.2 Clasificación supervisada

La clasificación supervisada, es aquella donde los datos colectados en el campo son utilizados para identificar los píxeles de un tipo de hábitat particular y acorde con los objetivos de investigación (e.g. Clasificación del tipo de sustrato, biotopos particulares o habitas) con los cuales elaborar mapas con mayor exactitud (Green *et al.*, 2000; ICES, 2007). El usuario elige un grupo de píxeles representativo de cada una de las clases que quiere obtener y lo utiliza como entrenamiento para clasificar la imagen. En este caso existe una elección *a priori* de las clases de interés.

La percepción remota provee entonces, una imagen sinóptica de la superficie de la tierra o del fondo marino Por medio del registro de información numérica de la radiancia medida en cada píxel de cada banda del espectro de una imagen satelital estudiada y a través de procedimientos computacionales se pueden crear mapas de hábitat basados en las imágenes (Cochrane y Lafferty, 2002; Lathrop *et al.*, 2006; Anderson *et al.*, 2008). Tratando ciertos píxeles de referencia como pertenecientes a una categoría específica, la computadora crea una “señal espectral” para cada categoría y procede a codificar todos los demás píxeles en la imagen, creando así un mapa temático (Green *et al.* 2000).

### 3.4.3 Librerías espectrales

Resultados e interpretaciones desde diferentes sitios muestran que actualmente no existe una clasificación estándar aceptada para los hábitats bénticos que se encuentre en uso. Cada autor tiende a utilizar la clasificación más aceptable para una región y un sensor en particular. Algunos intentos se han hecho para diseñar un sistema de clasificación estandarizada para los sensores remotos. No obstante, los sistemas de clasificación se han basado en primer lugar en la geomorfología, la fisonomía, la ecología u otros criterios y su posibilidad de aplicación para todos los sensores (con diferentes resoluciones espaciales y espectrales) disponibles es limitada.

También debe recalcar el hecho de que los ensamblajes bénticos tienden a tener menos límites distintivos que las zonas geomorfológicas haciendo que el mapeo por sensores remotos sea incluso aun más difícil.

Una manera de mejorar esta situación ha sido el desarrollo de clasificaciones estandarizadas con las cuales comparar los resultados de diferentes sitios, (Kutser *et al.*, 2006).

Para continuar con la vanguardia de la evolución de la cartografía digital del sustrato se han desarrollado diferentes algoritmos utilizando librerías espectrales de los tipos de fondo y la cobertura béntica. Las bibliotecas espectrales se utilizan ya sea para limitar el enfoque adoptado o como una herramienta de configuración de parámetros de entrada para cartografiar características específicas (Dekker *et al.*, 2010).

Así pues, la clasificación acústica u óptica puede hacerse usando una aproximación con una clasificación no supervisada, o también puede hacerse basada en catálogos (Librerías espectrales) sobre tipos de sustrato conocidos desde previos estudios para ser usadas y para conducir a clasificaciones supervisadas. Esto sugiere que la clasificación de imágenes basadas en librerías espectrales de diferentes tipos de hábitats bénticos podría ser aplicada en diferentes partes del mundo incluso si no estuvieran disponibles los datos de campo (Hochberg *et al.*, 2003).

### **3.5 Métodos de verificación del terreno in situ.**

Los videos y las fotografías son herramientas muy valiosas en el mapeo de los hábitats bentónicos, ya que estos ofrecen una primera apreciación del fondo en términos del sustrato físico y la biota. Existe un amplio rango de instrumentos, que comienza desde las cámaras convencionales (e.g. Gray y Elliott, 2009) a sofisticados sistemas como los ROV (ICES, 2007).

El uso de cámaras subacuáticas de video, es un método no destructivo, que puede ser manejado sobre todos los tipos de atributos del fondo marino. Ésta práctica puede ser particularmente útil sobre sustratos duros o suelos consolidados, donde métodos de muestreos físicos son inapropiados (ICES, 2007; Gibbs, *et al.*, 2007; Gray y Elliott, 2009). La técnica del video está bien adaptada para inspecciones de campo, ya que largas áreas pueden ser cubiertas bastante rápido y este método puede ser utilizado sin un extenso entrenamiento. Otra ventaja es que permite producir y guardar registros visuales permanentes de los datos colectados y es una fuente útil para identificar datos sobre comunidades bénticas, así como su relación entre los organismos y el sustrato (Holmes, 2008; Gray y Elliott, 2009). El video permite

observaciones de fina escala que pueden documentar detalladamente la interacción de la fauna con el tipo de fondo, que con otro tipo de técnicas no podría ser resuelto (ICES, 2008). Adicionalmente, provee una alta resolución de imágenes del fondo marino y facilita una continua cobertura de las localizaciones del área de estudio (NOAA, 2003).

Un rango de métodos de análisis va desde técnicas netamente descriptivas, que dependen en gran medida del observador, a los métodos plenamente cuantitativos. Este tipo de muestreo in situ sin embargo, tiene sus limitaciones ya que solo cubren una porción pequeña del área de estudio, y no presenta una cobertura espacial continua a través de los puntos o los transectos. El tiempo necesario para colectar una talla apropiada de muestra puede tomar semanas (Mumby *et al.*, 1997; Roelfsema, 2009). Sin embargo, a pesar de que la información colectada en campo proporciona menor cobertura espacial, ésta tiene una mayor exactitud que los productos obtenidos a partir de la percepción remota.

### **3.6 Ventajas y limitaciones de los métodos**

Conforme con Phinn *et al.*, (2000), cuatro categorías de información pueden ser extraídas a partir de datos de percepción remota. Estas incluyen información sobre la configuración, la composición, y los parámetros biofísicos del objeto de estudio, así como sobre los cambios en el tiempo de sus elementos. Si este esquema es adaptado a los estudios de hábitats bentónicos se podrán obtener resultados a partir de las aplicaciones de métodos ópticos, acústicos y de campo que representaran una caracterización más completa del área ya que el uso de esta combinación de técnicas permitirá complementar las limitaciones de una con la fortaleza de otra y viceversa.

La información sobre la configuración de la estructura de los hábitats bentónicos abarca la localización de los hábitats (en dos dimensiones y en un gradiente de profundidad), así como una clasificación geomorfológica. Como ejemplo podríamos mencionar que la mayoría de los arrecifes coralinos son claramente detectables en las imágenes de satélite y estos pueden ser fácilmente localizados. Una de las aplicaciones más exitosas de la percepción remota óptica ha sido la de poder cartografiar las zonas geomorfológicas del arrecife (Mumby *et al.*, 2004). Sin embargo, sólo a través de las imágenes de satélite no es posible apreciar la estructura tridimensional (rugosidad, pendiente, inclinación) que hace posible esta zonación geomorfológica y que puede ser cartografiada más rigurosamente por medio de los métodos acústicos.

Otro de los inconvenientes que presentan los métodos ópticos, es la penetración restringida de la luz visible en la columna de agua, que incrementa gradualmente en sitios con mayor turbidez. Esta es una restricción particular para las aplicaciones marinas que utilizan únicamente percepción remota óptica. Incluso en aguas muy transparentes, solo la parte superior (15 – 30m) de la columna de agua puede ser evaluada (Mumby *et al.*, 2004).

Por lo tanto, la percepción remota óptica puede ser usada para obtener información acerca de las comunidades someras (biotopos), las cuales componen los hábitats bentónicos ya que los métodos acústicos son incapaces de discriminar las comunidades bentónicas basadas en su pigmentación (color). Estas pueden generar también, distinciones detalladas entre especies, en la cuales se puede presentar una evaluación cuantitativa de la cobertura y la densidad de las mismas.

Por su parte, el uso de la percepción remota en hábitats bentónicos ha mostrado claramente algunas ventajas cuando se compara con métodos de evaluación *in situ*. Si no se tiene en cuenta el protocolo aplicado, los muestreos basados en trabajo de campo están espacialmente muy heterogéneamente distribuidos y cubren solo pequeñas fracciones, de los hábitats bajo consideración (Purkis, 2004; Roelfsema, 2009). Estos comúnmente resultan en mallas de información de puntos o transectos, que requieren métodos de interpolación para cartografiar el área de interés. En estos casos lamentablemente existe la posibilidad de que se pierda información sobre los objetos que se encuentran localizados en los sitios adyacentes al muestreo (Mumby *et al.*, 2000).

Este mismo problema se presenta en los métodos acústicos ya que no proveen medidas sinópticas sobre amplias áreas y los mapas habitualmente necesitan también ser interpolados entre las líneas acústicas. Así mismo, los métodos acústicos no pueden ser desplegados en aguas someras (< 0.5m), teniendo que realizar métodos de interpolación tomando como base imágenes de satélite en las que se cubren las áreas por donde el sensor acústico no puede desplazarse.

La percepción remota sin embargo, no puede excluir de ninguna manera las evaluaciones hechas en campo ya que estas son estrictamente necesarias para la verificación de los datos arrojados por la percepción remota. Además, las observaciones hechas en campo, brindan información detallada de la estructura de la comunidad, su estado de conservación, la dinámica de sus poblaciones que pueden ser únicamente colectada *in situ* (Wilkinson *et al.*, 2003). Alternativamente, datos de percepción remota, pueden ser usados para planificar evaluaciones más rentables en



campo, mejorando su eficiencia, y asegurando un adecuado muestreo para todos los hábitats relevantes (NOAA, 2003).

Un abordaje completo para realizar una caracterización ideal, podría ser una evaluación multinivel en la cual, las observaciones *in situ* son usadas detalladamente para verificar la adquisición, calibrar y validar los datos aportados por los métodos de la percepción remota (ICES, 2007).

Finalmente, a pesar de que la investigación actual sobre hábitats bentónicos a través de aplicaciones de percepción remota está principalmente dirigida a sensores hiperespectrales, sensores aerotransportados, multibeam, ecosondas multihaz, sísmica de reflexión, entre otros, este tipo de datos no fue integrado en este estudio. Por otra parte, ya que la intención del proyecto es también la de desarrollar una metodología que pueda ser implementada en toda la región del Caribe Mexicano, el coste de este tipo de información es demasiado alto y está fuera del alcance de quienes realizan estos estudios, ya que ni nosotros ni la mayoría de los países poseen los recursos financieros y / o medios logísticos para ejecutar este tipo de campaña. Por ello, los datos multispectrales y las ecosondas son la única opción realista. Tenemos que tener en cuenta que cuando la información más detallada sea requerida para las áreas de interés, este tipo de datos pueden continuar siendo integrados en una fase posterior a esta investigación.

### **3.7 Métodos de integración de los datos**

La etapa siguiente es comparar los datos recolectados *in situ* con los datos proporcionados por la percepción remota. Esto se consigue georeferenciando la ubicación exacta desde la cual la información de campo (e.g.: video transecto) es colectada. De este modo, se permite ligar los datos obtenidos desde la misma ubicación geográfica. De esta manera, los sets de datos pueden ser unidos dando la verificación requerida, y las clases *in situ* pueden ser extrapoladas a todas las regiones que caen dentro de la misma clase acústica u óptica (ICES, 2007).

Las complejas relaciones que existen entre factores físicos, biológicos y químicos de los componentes bentónicos requieren elementos avanzados y de técnicas de análisis integrados para que la comunidad científica y otros, puedan visualizar los patrones de distribución de estos ambientes y al lograrlo puedan hacer inferencias acerca de los procesos que controlan dicha distribución (NOAA, 2003).

La mayor exactitud en las interpretaciones de la clasificación de los hábitats marinos resulta cuando las tecnologías de clasificación son aplicadas en conjunto con otras tecnologías de la percepción remota y con muestreos convencionales (Mumby *et al.*,

2000a). Estos son críticamente buenos para la interpretación de la clasificación y para describir atributos geofísicos y biológicos predominantes de la composición del suelo del mar (Mumby *et al.*, 2000).

El despliegue de una combinación de técnicas de muestreo puede proveer una descripción más realistas de los ecosistemas bénticos, aceptando que la capacidad para discriminar entre los tipos de hábitats sobre los argumentos biológicos puede ser frecuentemente dependiente del método utilizado (Gibbs *et al.*, 2007; ICES, 2007). De la misma manera, una combinación de técnicas de interpretación visual, clasificaciones no supervisadas, entradas de información de campo y técnicas de clasificaciones supervisadas proveen los más exactos mapas de hábitats bentónicos (Mumby *et al.*, 2000).

Con el fin de crear los mapas bentónicos resultantes, todos los sets de datos deben ser integrados con toda la información generada a través de la combinación de técnicas utilizadas. La herramienta ideal para cumplir dicha integración es un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una tecnología de manejo de datos geográficos formado por equipos electrónicos (hardware) programados adecuadamente (software) que permiten manejar una serie de atributos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos con base en los criterios impuestos por el equipo técnico y científico (personal). Estos nos permiten ver, integrar, analizar, interpretar y visualizar datos de muchas maneras que revelan relaciones, patrones y tendencias en forma de mapas.

En las últimas décadas el uso del SIG para manejar información espacial ha aumentado significativamente entre los científicos. Hoy en día es una herramienta de uso común que se puede utilizar para consultar grandes bases de datos y para visualizar, a través de modelos predictivos complicados, patrones de pequeña y larga escala, (ESRI, 2005). Algunos de los más avanzados análisis incluyen técnicas geoestadísticas y de correlación usadas para la interpolación (y extrapolación) de puntos basados en verificaciones del terreno y de mallas de alta cobertura.

Este tipo de herramienta ha surgido debido al gran volumen de datos recogidos multidisciplinariamente y a la necesidad de difundir resultados entre la comunidad científica y los usuarios finales en un espacio organizado. La compilación de datos espaciales en formato SIG será de beneficio inmediato para la mayoría del personal

interesado en el manejo integrado de las zonas costeras mexicanas en sus futuras investigaciones.

La percepción remota es una de las tecnologías asociadas a los SIG aportando nuevas posibilidades a la actividad de generación de mapas. Estas posibilidades se pueden resumir en las siguientes preguntas, las cuales podemos contestar mediante la utilización de un SIG: ¿Qué está en...? (una localidad dada), ¿Dónde está...? (bajo una condición dada), ¿Qué ha cambiado desde...? (tendencias), ¿Qué patrones espaciales presenta? (patrones), ¿Qué pasaría si...? (Modelación) (Reut *et al.*, 1985; Mitchell and Hughes Clarke, 1994; Stewart *et al.*, 1994; Barnhardt *et al.*, 1998; McRea *et al.*, 1999 En: Lathrop, *et al.*, 2006).

Los resultados obtenidos en la investigación pueden ser mostrados como tramas espaciales, tablas o puntos que permiten un rango de información para ser incorporados dentro del SIG. Las capas del sistema tienen como objetivo facilitar un flujo natural de información desde el punto de la colecta de los datos, a la publicación, y en última instancia a la integración en el sistema (ESRI 1992).

La implementación del SIG permitirá el manejo de información espacial en la cual se podrán visualizar patrones de distribución de los ambientes bentónicos en el área a través de la implementación de modelos. En el caso del presente estudio se podrá observar la ubicación y extensión de los ambientes bentónicos que podrían ser afectados por una combinación de diferentes factores físicos, químicos y biológicos.

Métodos predictivos de modelización pueden ser utilizados para generar mapas que produzcan representaciones de áreas geográficas que correspondan a las necesidades de las especies sobre la base de varios parámetros ambientales. Los organismos bentónicos son ideales para métodos de predicción descriptiva debido a su carácter sésil y en algunos casos, como en el de los corales, por su longevidad. Estos ahora son reconocidos como hábitats vulnerables por muchos gobiernos.

Este proyecto está enfocado en el ecosistema arrecifal ya que este es el predominante a lo largo de la costa Noreste de Quintana Roo. Cabe destacar que pocos estudios empíricos sobre las interacciones entre los hábitats se han llevado a cabo y que esto justamente se debe atribuir parcialmente a la carencia de mapas bentónicos en la mayoría de las regiones (Kendall., *et al* 2001).

El proyecto no sólo proporcionará información de los procesos físicos y biológicos responsables de estructurar los hábitats bentónicos si no que también proporcionará los

datos críticos para manejar y conservar los ecosistemas costeros presentes en el área de estudio. Los mapas generados servirán como herramientas para futuras estrategias de manejo y conservación en una zona de gran importancia económica y turística en México.

## **4. PROBLEMA, OBJETIVOS Y METAS**

### **4.1 Planteamiento del problema**

El manejo de impactos naturales y humanos sobre los hábitats bentónicos marinos requieren que sus áreas naturales sean identificadas, caracterizadas y mapeadas sobre un rango jerárquico de escalas. Asimismo, el conocimiento de la distribución de los hábitats bentónicos y de los factores que la regulan no es sólo fundamental para la conservación y el manejo de los ecosistemas marinos, sino que proporcionan un marco para evaluar cambios medioambientales inducidos por el calentamiento global y otras perturbaciones antropogénicas.

Para entender y proteger estos valores ambientales nosotros necesitamos saber que existe allí. Los mapas de hábitats bentónicos son la base para la mayoría de monitoreos y programas de manejo. En el Estado de Quintana Roo ya existen estudios básicos sobre la estructura de los ambientes marinos, como descripciones del arrecife y de la pradera submarina, y se han comenzado a realizar monitoreos de salud arrecifal desde hace más de cuatro años (Rodríguez – Martínez., *et al* 2010). Dentro de estas evaluaciones, se han definido factores naturales y antropogénicos como los responsables del deterioro generalizado que se ha venido observando en dichos ambientes. Sin embargo, el conocimiento de la distribución de los hábitats bentónicos en el área se encuentra muy fragmentado, ya que no se ha realizado hasta la fecha una caracterización general o integradora de la distribución de los hábitats bentónicos en el área y no existen mapas de la estructura bentónica de los mismos que ayuden a definir políticas de manejo y conservación en un área natural de gran importancia para México.

Con el fin de alcanzar un uso sostenible del manejo de los hábitats bentónicos, nosotros necesitamos incrementar el conocimiento de los hábitats bentónicos presentes en el Parque Natural Arrecife de Puerto Morelos, lo cual demanda una clasificación a una escala cartográfica más amplia. La distribución de los hábitats es un importante indicador del estado de los ambientes presentes, sin embargo, mapas precisos son difíciles de adquirir. Mapas de hábitats con métodos convencionales (buceo), como se han venido desarrollando hasta la fecha para la zona, brindan gran información valiosa para el Parque (ver antecedentes), sin embargo, estos han estado limitados por el tiempo y la mano de obra necesaria para monitorear el Parque y se han concentrado únicamente en largos tramos de la línea de costa. Restringiendo sus medidas a un limitado número de sitios claves y concentrando la mayor parte del esfuerzo en la comunidad coralina.

Solo hasta ahora, un limitado número de sitios de hábitats bentónicos presentes en la Península, han sido cartografiados en cierta medida en las que se incluyan las interpretaciones de los diferentes hábitats asociados (Garza – Pérez, (2004); Acosta – González, (2005)). Sin embargo, el grado de detalle y los métodos usados frecuentemente varían grandemente entre áreas de estudio y los sistemas de clasificación empleados suelen estar diseñados para una ubicación específica objeto de la investigación. Por otro lado, comparaciones entre estudios y áreas son difíciles, y la mayoría de los sitios a lo largo de la Península no han sido cartografiados en absoluto.

A esto podemos añadir, que existen varios esquemas universales de clasificación de hábitats (ver antecedentes) que no siempre están bien adaptados para poder incorporar los entornos de los hábitats bentónicos y la complejidad de sus estructuras dentro de una misma caracterización. Asimismo, estudios de cartografía de hábitats bentónicos han tenido la dificultad de proveer una zonación adecuada que sea aplicable para ambos sistemas bénticos, tanto para las estructuras emergentes como para las sumergidas (tales como los arrecifes mesofóticos). Estos pueden ser determinados usando un set de datos ópticos y acústicos ampliamente disponibles. El problema técnico con los datos ópticos es que están limitados por la profundidad y que existe una dificultad de que se aplique en aguas por debajo de los 15 m de profundidad. Por otro lado, el problema con los datos acústicos es que éstos están restringidos a profundidades superiores a los 1.5 m debido al acceso de la embarcación entre otras limitaciones (ver 3.6 ventajas y limitaciones de los métodos).

Esto significa que es imposible, utilizando por separado estos datos, caracterizar completamente la zonación béntica de estos hábitats en donde las zonas comúnmente se extienden desde el área de rompiente hasta la zona de ruptura de la plataforma.

Por lo que una caracterización llevada a cabo en conjunto, por medio de percepción remota óptica y acústica, proporcionará una amplia cobertura espacial del área generando así información útil de línea base para el Parque que podrá ser de ayuda para futuras investigaciones.

Los resultados obtenidos en la presente investigación, podrán ser usados para diseñar nuevos y/o mejorar los planes de manejo en los que se integre la percepción remota con el monitoreo en campo. Por lo tanto, el problema de investigación es cómo mejorar la integración del trabajo de campo y los enfoques de la percepción remota óptica y acústica para incrementar las capacidades de monitoreo de las zonas costeras Mexicanas.

## **4.2 Objetivos**

### **4.2.1 Objetivo general**

Caracterizar la ocurrencia y el estado actual de los hábitats bentónicos presentes en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos con el fin de generar información de línea base que proporcione nuevos conocimientos sobre la biodiversidad, estructura y distribución de los ecosistemas en el área.

#### **4.2.1.1 Objetivos específicos**

Realizar una caracterización de los hábitats bentónicos por medio de mapas obtenidos con la ayuda de la percepción remota y los sistemas de información geográfica (SIG), en los que se tendrán en cuenta la distribución, ubicación y extensión de los mismos. La caracterización se llevara a cabo por medio de descripciones ecológicas, batimétricas y geomorfológicas de los factores físicos (profundidad, tipo de sustrato disponible entre otros) que limitan su distribución en la región

Integrar la información cartográfica básica disponible en formato digital y generar, con el apoyo de un sistema de información geográfica (SIG) cartografía temática de los hábitats bentónicos presentes en el área de estudio.

## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1 Metodología de caracterización de los hábitats bentónicos**

La caracterización de los hábitats bentónicos presentes en el Noreste de Quintana Roo (Arrecife de Puerto Morelos) y la determinación de su estado de condición se abordó desde tres puntos de vista: la percepción remota, la modelación espacial descriptiva y la investigación en campo.

Para el manejo de las imágenes de este proyecto, se ha elegido el paquete informático ENVI 4.5, como software específico para realizar el tratamiento y los análisis de las imágenes de satélite. ENVI, “Entorno para visualización de Imágenes” (Environment for Visualizing Images), fue comercializado o puesto en venta por primera vez en 1994, por la empresa Estadounidense ITT Visual Information Solutions de Boulder, Colorado. Es un sistema de procesamiento de imágenes diseñado para proporcionar análisis espectral de datos obtenidos por percepción remota desde aviones y satélites. Este sistema genera un entorno potente, para presentar y analizar imágenes de cualquier tamaño y tipo de datos en un amplio rango de plataformas y está completamente escrito en IDL (Interactive Data Language), que es un potente lenguaje de programación basado en matrices, que proporcionan un procesamiento de imágenes integrado, grandes capacidades de visualización y herramientas fáciles de usar.

#### **5.1.1 Procesamiento preliminar de la información**

Siguiendo la metodología de entrenamiento descrita por diferentes autores (Gonzalez y Eberlin, 1997; Chuvieco, 2002), una primera familiarización con los métodos de la percepción remota se llevó a cabo mediante la delineación manual de imágenes ortorectificadas de abril del 2005, obtenidas con el programa *Google-Earth-Pro* (Imágenes Quickbird). La delineación fue comparada con un mapa cartográfico convencional (Figura 2).



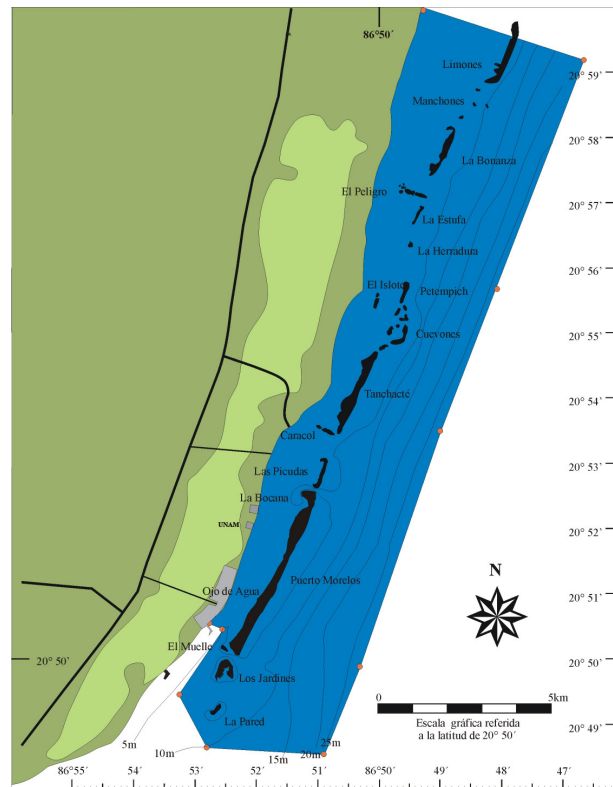


Figura 2. Mapa convencional de la zona de estudio proporcionado por el INEGI.

Posteriormente, la información fue corroborada en el área de estudio mediante observaciones *in situ* (videos), con una imagen Ikonos 2006 y con los datos obtenidos por los modelos acústicos los cuales se describen a continuación.

**NOTA:** Para obtener una mejor precisión de los datos se trabajó con la proyección UTM Zona 16 norte con Datum WGS84.

## 5.2 Obtención de datos

### 5.2.1 Obtención de los datos acústicos

El muestreo batimétrico fue conducido desde una embarcación equipada con una ecosonda Kongsberg EA400 durante el 2005. Los datos fueron obtenidos y proporcionados por el Laboratorio de Hidrografía y Meteorología de la Unidad Académica de Puerto Morelos (datos sin publicar). El análisis de dicha información se realizó durante una estancia de investigación llevada a cabo en la Universidad de Barcelona en el grupo de Investigación de Geociencias Marinas durante los meses de Enero del 2010 a Junio del 2010.

La EA400 está diseñada operacionalmente para obtener una alta resolución de detección de objetos a lo largo de la superficie del fondo oceánico. Dando una estimación relativa de la rugosidad y la dureza de los sedimentos (ICES, 2007), la cual es calculada por una comparación de ecos mediante una señal de baja frecuencia (38 KHz) con una señal de alta frecuencia (200 KHz). El área cubierta por la transmisión del sonido está determinada por la frecuencia de amplitud del cono del ángulo del transductor y la profundidad del agua. El ángulo del cono puede variar entre diferentes tipos de transductor. Una frecuencia de 38 KHz puede dar un ángulo de  $21^\circ$ , con un ancho de cobertura que es aproximadamente  $2/3$  de la profundidad del agua. Una frecuencia de 38 KHz cubre aproximadamente un diámetro circular de área de 20 pies (6 m) a una profundidad de 30 pies (9.14m). Por su parte, una frecuencia de 200 KHz presenta un ángulo de cono estrecho de  $7^\circ$ , con un ancho de cobertura que es aproximadamente  $2/10$  de la profundidad del agua. Un ángulo de  $7^\circ$  (frecuencia 200 KHz) cubre aproximadamente un área de diámetro circular de 6 pies (1.82m) a 30 metros de profundidad. Cuando se usa el modo en ambas frecuencias como en el caso del presente estudio, la unidad transmite ambas frecuencias al mismo tiempo, dando la posibilidad de tener una larga cobertura y continuar reteniendo una buena resolución del fondo. De esta manera, la unidad usa la frecuencia estrecha (200 KHz) para desplegar información detallada del fondo, manteniendo “zonas muertas” al mínimo, y el ángulo de cono de amplia frecuencia (38 KHz) para cubrir largas áreas (Kongsber, 2005).

Una de las ventajas que el equipo presenta es que los efectos de los cambios en la velocidad del sonido dentro de los perfiles de la columna de agua están reducidos (NOAA, 1996; Kongsberg, 2005).

La metodología de campo empleada por el Laboratorio de Hidrografía y Meteorología de la Unidad Académica de Puerto Morelos consistió en efectuar barridos paralelos y perpendiculares a la costa desde una embarcación de la Unidad Académica de Puerto Morelos en la que la ecosonda iba sujeta e interconectada a su vez con un GPS. El área cuyos datos se recolectaron, abarcaba desde la línea de costa (~1m de profundidad) hasta una profundidad de ~30 m bordeando el arrecife. Por su parte, se realizaron transectos cada 100 m aproximadamente en la zona de la laguna y de 500 m a partir del arrecife frontal. La antena de la unidad de GPS fue directamente colocada encima del transductor lo que permitió grabar la posición geográfica de cada una de las líneas acústicas con un mínimo de error.

Los datos colectados durante el 2005 fueron posteriormente utilizados durante la estancia de investigación para la construcción del modelo batimétrico y béntico del Parque Arrecife de Puerto Morelos.

### **5.2.1.1 Procesamiento de los datos acústicos**

#### **5.2.1.1.1 Generación del modelo digital batimétrico (MDB).**

El método más conveniente y eficiente para el análisis es la creación de una malla o red regular de puntos o celdas en una cuadrícula con un valor de elevación (profundidad para este caso) almacenados para cada punto de la red.

Los datos de la ecosonda en formato vector (x, y, z) son colectados a lo largo de los transectos realizados durante el muestro. Sin embargo, la información del área entre líneas adyacentes de los transectos no se obtiene durante el recorrido de la embarcación. Con el fin de rellenar estos vacíos en la información los datos de profundidad deben ser entonces interpolados entre las líneas de los transectos cuando se realiza la construcción de la malla (Grid).

A lo largo de este trabajo me referiré a Grid "mallas", como a la información contenida en una cuadrícula que posee un tipo específico de información geográfica utilizado por ArcInfo y ArcView. Una malla es en esencia una imagen de trama en la que se refiere cada píxel como una "célula o celda" y tiene un valor particular asociado a ella. Para el desarrollo de los modelos digitales batimétrico (MDB), el valor de la celda refleja la elevación en metros del punto central en esa celda.

De esta manera, a partir de los datos vector colectados con la ecosonda se obtuvo una matriz de coordenadas geográficas (latitud y longitud) de cada punto registrado de profundidad. Esta información fue transformada en ENVI a formato raster por medio de una interpolación (Kriging). En la interpolación se calculan valores para los puntos no muestreados basados en los valores de los puntos más cercanos muestreados, reduciendo así la varianza de los puntos muestreados más dispersos. A partir de este método se obtiene la malla que refleja los contornos de la profundidad. Como dato recordatorio general, todos los algoritmos aplicados a las mallas tienen la función de interpolar los valores de los datos que pertenecen a la distribución de algún dato de entrada. El término "gridding" proviene del hecho de que todos los valores interpolados están ordenados en una malla rectangular (Royle, 1981; Oliver, 1990).

La resolución espacial de la malla o red se define por la distancia entre los puntos que es constante en ambas direcciones (es decir, a lo largo de las filas y las columnas de la malla). La resolución vertical del modelo es determinada por la precisión numérica con la que se almacena esta elevación. La malla está poblada por lo general por las estimaciones de la elevación, de modo que la exactitud del modelo es la diferencia entre cada estimación y la verdadera elevación en ese punto de la malla (ver precisión de los modelos acústicos).

Inicialmente, el grid se integró a un programa de creación de superficies en tercera dimensión (Surfer, Golden Software Inc.), para obtener un modelo tridimensional del área de estudio. Visto que el resultado visual no era el esperado (Figura 9) ya que no se lograba apreciar detalladamente las geoformas presentes en el área, se decidió realizar el MDB en ENVI 4.5 y posteriormente se exportó al software Arcscene (ESRI) en donde se aplicó una exageración de 5m con el fin de poder tener un realce mayor sobre la geoforma arrecifal. Para dotar de más realismo el modelo batimétrico (MDB) se efectuó la sobreposición de una imagen de satélite Ikonos de alta definición por medio del software ENVI 4.5 (Geographic Imaging). Posteriormente, se realizó una animación 3D del MDB (Ver Figura 10 y video anexo CD). Así mismo, el modelo se añadió como una capa adicional dentro del sistema de información geográfica (SIG). Posteriormente, los datos de la batimetría fueron nuevamente remuestreados y se aplicó una interpolación de la ponderación de la distancia inversa (Inverse Distance Weighting, IDW). Este nuevo análisis se realizó con el fin de decidir cual era el método más apropiado en particular para el presente estudio, ya que los rangos de datos de entrada en la interpolación inversa están más cerca que los datos de entrada del método de interpolación Kriging.

Sin embargo, para el presente estudio se tomó la decisión de utilizar el método Kriging ya que está basado en la teoría de variable regionalizada que asume que la variación espacial en el fenómeno representado por valores  $z$  (profundidad) son estadísticamente homogéneos a través de toda la superficie (por ejemplo, el mismo patrón de variación puede ser observado en todas las localidades sobre la superficie). A partir del grid resultante (modelo digital de elevación) de la batimetría y utilizando los modelos desarrollados por Jassen (2004), implementados en el programa ArcGIS, en la herramienta de análisis espacial, se generaron las variables zonas batimétricas, estructuras, rugosidad y pendientes sobre el grid que cubre el área de estudio y con métodos de interpolación se generaron los mapas correspondientes.

La precisión de los modelos desarrollados dependió de la densidad espacial de los puntos o contornos a partir de los cuales se realizó la interpolación del modelo. En general, el mapa de contornos fue un ingrediente esencial para modelar el terreno, dando datos tanto cuantitativos como cualitativos (este último mediante la definición de la forma del paisaje).

El grid batimétrico en formato raster fue analizado en la extensión de análisis espacial del ArcView y en ArcInfo grid y posteriormente el grid definitivo fue re proyectados dentro de la zona 16 UTM usando la extensión de "Reproject Grids". Los mapas utilizan una nueva clasificación que podría ser extendida al resto de los arrecifes de la

Península. A continuación se describen los pasos metodológicos para la construcción de los modelos, la elaboración de los mapas y la evaluación de la exactitud.

### 5.2.1.1.2 Generación del modelo bentónico (BTM)

El modelo bético del terreno (BTM) funciona interactivamente como una extensión dentro de la barra de herramienta de ArcMap (software ArcGis), donde utiliza el conjunto de datos batimétricos, para examinar y clasificar el ambiente bético.

Este modelo ofrece la oportunidad de mapear las zonas béticas, tomando como base la topografía submarina a partir de derivados como las pendientes y el Índice de Posición Batimétrica (BPI) para describir las características del fondo marino. El Índice de Posición Batimétrica realiza un cálculo de la media focal, donde las celdas de elevación son comparadas con las celdas vecinas dentro de un área definida. Los valores resultantes de la cuadrícula son convertidos a enteros para aminorar el tamaño de almacenamiento de la cuadrícula y para simplificar la simbolización. Como he comentado, el BPI es una modificación del Índice de Posición Topográfico (TPI) elaborado por Andrew Weiss (2001), utilizado comúnmente para trabajar en ambientes terrestres. No obstante, estas aplicaciones pueden ser llevadas al estudio de ambientes béticos a través del BPI.

Los valores positivos del BPI corresponden a regiones altas dentro del área circundante y pueden ser asociados a crestas o cordilleras. Los valores negativos denotan características y regiones bajas dentro del área circundante, que son asociadas a valles o depresiones. Cuando el BPI es cero está asociado a regiones planas o bien en áreas de inclinación constante cercanas a cero.

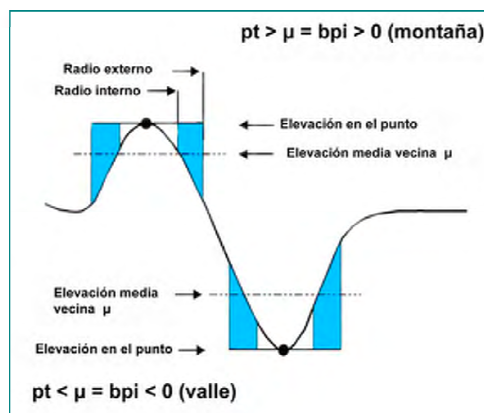


Figura 3. Muestra que los valores positivos del BPI son asociados a montañas, mientras que los valores negativos son asociados a valles.

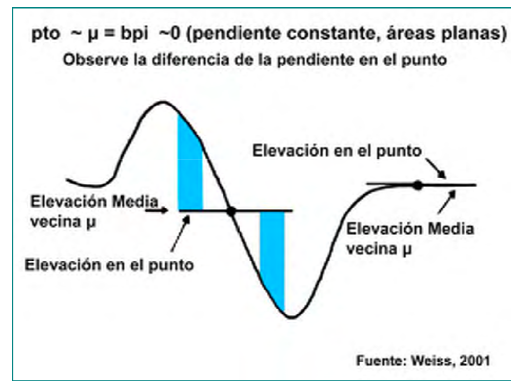


Figura 4 Muestra las áreas donde los valores del BPI están cerca o igual a cero. La pendiente del terreno en un punto dado se utiliza para determinar la posición batimétrica.

El índice de posición batimétrica fue calculado a dos diferentes escalas con el fin de resaltar ambas, largas y pequeñas estructuras. El resultado final es un grid que muestra la localización de cada pixel y su relación con los pixeles que lo rodean.

### 5.2.2 Clasificación de los modelos acústicos

A partir del Modelo Batimétrico se derivaron los índices de posición batimétrica y las pendientes, los cuales a su vez, basado en un nuevo esquema de clasificación logra combinar estos dos derivados con la batimetría original, para obtener un Modelo Bentónico. Este está basado en un esquema de zonas (las depresiones, las cuestas, plano, las crestas) y estructuras (característica más finas dentro de las zonas bentónicas) en el área estudio.

El modelo emplea un diccionario en programación XML (eXtensible Markup Language) para realizar la clasificación de las estructuras y de las zonas bénticas, basados en una serie de condiciones para asignar las clases (estructuras y zonas).

En este estudio aplicamos la clasificación utilizada en el documento Introduction to the Benthic Terrain Modeler (BTM) para arrecifes tropicales.

Esquema de clasificación de las zonas:

Este esquema utiliza una característica superficial del fondo basada en un rango de valores de amplia escala del índice de posición batimétrico y valores de la pendiente.

1. Crestas: Puntos altos en el terreno donde el índice de posición batimétrico es positivo con valores superiores a una desviación estándar de la media en dirección positiva.

2. Depresiones: Puntos bajos en el terreno en donde el índice de posición batimétrica es negativo con valores mas grandes que la desviación estándar de la media en dirección negativa.
3. Áreas planas: Puntos planos en donde el terreno donde hay valores cercanos a cero en el índice de posición batimétricos que están dentro de una desviación estándar de la media. Áreas planas tienen una pendiente que es menor o igual a 5.
4. Pendientes: Puntos pendientes en el terreno donde los valores del índice de posición batimétrico son cercanos a cero y los valores se encuentran dentro de una desviación estándar de la media. Las pendientes tienen valores que son mayores a 5. En otras clasificaciones las pendientes también son llamadas escarpes.

Tabla 1. Descripción y métodos de la clasificación de las zonas.

<b>ID</b>	<b>Descripción</b>	<b>Método</b>
1	<i>Crests / crestas</i>	$B-BPI \geq 100$
2	<i>Depressions / depresiones</i>	$B-BPI \leq -100$
3	<i>Flats / plano</i>	$B-BPI > -100$ and $B-BPI < 100$ and $slope \leq gentle$
4	<i>Slopes / pendientes</i>	$B-BPI > -100$ and $B-BPI < 100$ and $slope > gentle$

### 5.2.2.1 Clasificación de las estructuras

Características superficiales del fondo basadas en el índice de posición batimétrico que combina un rango de valores de fina y amplia escala, valores de pendiente y profundidad.

1. Depresiones estrechas: Una depresión donde ambas características (la fina y amplia) dentro del terreno son más bajas que sus alrededores.
2. Depresión local en áreas planas: Una depresión de fina escala dentro de un amplio terreno plano.
3. Depresión lateral en pendiente media: Una depresión de escala fina que lateralmente corta una pendiente.
4. Depresión en crestas: Una depresión de escala fina dentro de un terreno de cresta, generalmente en donde la cresta es amplia.

5. Depresión ancha en fondo abierto: Una depresión de amplia escala con forma de U donde las características de fina escala son planas o tienen una pendiente constante.
6. Ancho y plano: Una amplia área plana donde el terreno contiene pocas características de escala fina.
7. Plataforma: Una amplia área plana donde el terreno contiene pocas, características de escala fina.
8. Pendiente abiertas: Una pendiente constante donde el valor de la pendiente esta entre 5 y 70 y existen pocas, características de fina escala dentro de un terreno amplio.
9. Crestas locales en depresiones: Una cresta de fina escala en un terreno deprimido.
10. Cresta local en áreas planas: Una cresta de fina escala dentro de un terreno plano más amplio.
11. Cresta lateral con pendiente media: Una cresta de fina escala que lateralmente divide una pendiente. Esto a menudo parece a una repisa en el medio de la pendiente.
12. Cresta estrecha: Una cresta en donde ambas características (fina y amplia) dentro del terreno son más altas que sus entornos.



Tabla 2. Descripción y métodos de clasificación de las estructuras.

<b>ID</b>	<b>Descripción</b>	<b>Método</b>
1	Narrow depression / <i>depresión estrecha</i>	$F-BPI \leq -100$ and $B-BPI \leq -100$
2	Local depression on flat / <i>depresión local en áreas planas</i>	$F-BPI \leq -100$ and $B-BPI > -100$ and $B-BPI < 100$ and $slope \leq gentle$
3	Lateral midslope depression / <i>depresión lateral en pendiente media</i>	$F-BPI < -100$ and $B-BPI > -100$ and $B-BPI < 100$ and $slope > gentle$
4	Depression on crest / <i>depresión en crestas</i>	$F-BPI \leq -100$ and $B-BPI \geq 100$
5	Broad depression with an open bottom / <i>depresión ancha en fondo abierto</i>	$F-BPI > -100$ and $F-BPI < 100$ and $B-BPI \leq -100$
6	Broad flat / <i>plano ancho</i>	$F-BPI > -100$ and $F-BPI < 100$ and $B-BPI > -100$ and $slope \leq gentle$ and $bathy \leq shallow$
7	Shelf / <i>arrecife</i>	$F-BPI > -100$ and $F-BPI < 100$ and $B-BPI > -100$ and $slope \leq gentle$ and $bathy > shallow$
8	Open slopes / <i>pendientes abiertas</i>	$F-BPI > -100$ and $F-BPI < 100$ and $B-BPI > -100$ and $slope > gentle$ and $slope \leq extreme$
9	Local crest in depression / <i>crestas locales en depresiones</i>	$F-BPI \geq 100$ and $B-BPI \leq -100$
10	Local crest on flat / <i>cresta local en áreas planas</i>	$F-BPI \geq 100$ and $B-BPI > -100$ and $B-BPI < 100$ and $slope \leq gentle$
11	Lateral midslope crest / <i>cresta lateral con pendiente media</i>	$F-BPI \geq 100$ and $B-BPI > -100$ and $B-BPI < 100$ and $slope > gentle$
12	Narrow crest / <i>cresta estrecha</i>	$F-BPI \geq 100$ and $B-BPI \geq 100$

En donde:

B-BPI = cuadrícula (grid) de la escala gruesa del BPI.

F-BPI = cuadrícula (grid) de la escala fina del BPI.

*slope* = cuadrícula (grid) de la inclinación derivado de la batimetría.

*gentle* = el usuario define el valor de la pendiente indicando una inclinación suave. *bathy* = cuadrícula de alta resolución de la batimetría

En este esquema, el término de escala gruesa se refiere a las características del fondo que fueron definidas ampliamente en la escala de la malla del índice de posición batimétrica (BPI). Por su parte, el término escala fina se refiere al dato fino que fue descritos en la malla del BPI.

El siguiente gráfico describe, de manera sencilla, los procesos que utiliza el modelo para generar la clasificación de las estructuras y de las zonas bénticas.

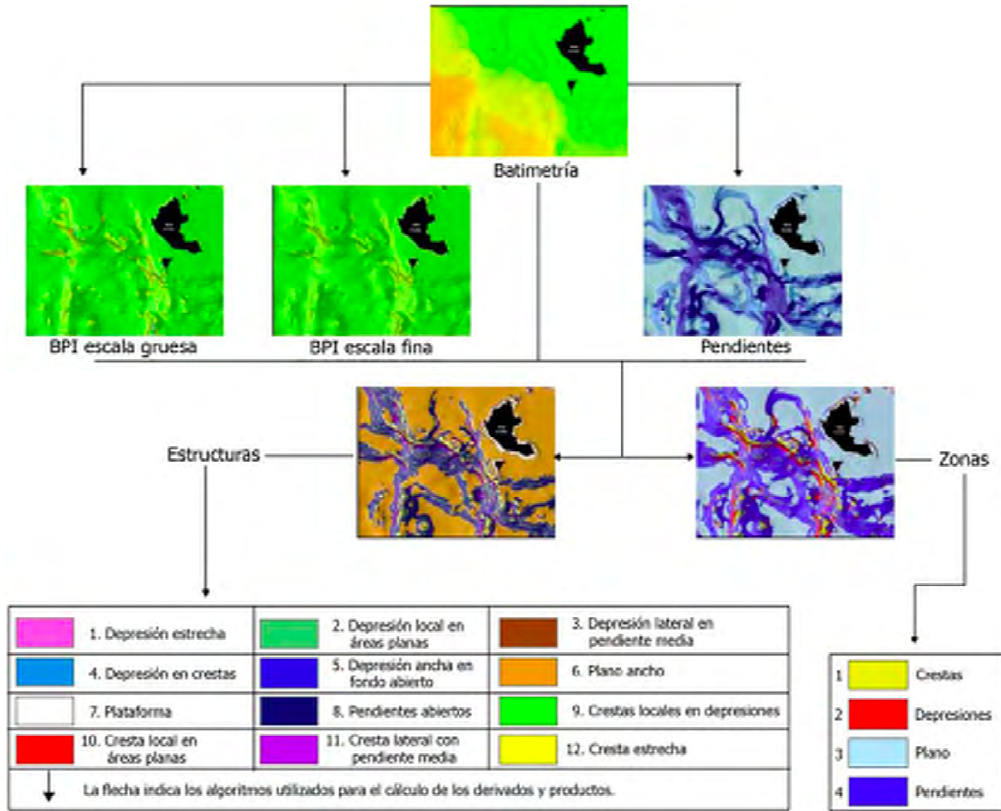


Figura 5. Descripción gráfica del proceso de clasificación del Modelo Bentónico mediante el cual, a partir del modelo batimétrico, se generan los índices de posición batimétrica y el mapa de pendientes. Éstos serán combinados con la batimetría original para generar la clasificación de las estructuras y zonas bentónicas.

Por medio de ArcMap se activa la herramienta Benthic Terrain Modeler donde el primer paso es activar el asistente del BTM para generar, paso a paso, el modelo bentónico.

El segundo paso es introducir la carpeta donde se generarán todos los derivados producidos durante la ejecución del modelo en formato ESRI GRID. Luego se introduce el modelo batimétrico del arrecife (btm\_p), el cual tiene una resolución de 50m m por píxel.

El siguiente paso consiste en crear el Índice de Posición Batimétrica a escala gruesa. La escala gruesa fue usada para buscar largas estructuras, tales como valles o crestas. En este caso se asignó un radio interno (inner radius) de 1 y un radio externo (outer radius) de 5, obteniendo así un factor de escala de 500.

La próxima ventana de diálogo es para crear el Índice de Posición Batimétrica a escala fina. Este fue utilizado para buscar pequeñas estructuras, tales como crestas a lo largo de zonas de pendientes o valles dentro de áreas planas de gran extensión (Lundbland, 2004). En este paso se asignó un radio interno de 1 y un radio externo de 2,

obteniendo un factor de escala de 300, al que denominamos ““bpip\_300””. Resultados de amplia y fina escala pueden ser combinados con la pendiente y la batimetría para delinear zonas bénticas generales y estructuras más específicas.

El procedimiento estadístico para encontrar el índice de posición batimétrica a escala amplia y fina se basa en el principio de la geografía en la que cosas cercanas unas de otras son mas parecidas que cosas que se encuentran mas lejos. Usando este principio, se puede establecer la búsqueda del radio o del vecino asumiendo que a medida que las ubicaciones se alejan mas de la ubicación de predicción, los valores medidos tienen menos autocorrelación espacial con los valores desconocidos de la localización que se esta prediciendo. De esta manera, se pueden eliminar los lugares que están más lejos y que tienen poca influencia. No solo hay menos relación con los lugares que están mas lejos, es posible que estos puedan tener una influencia negativa si estos están localizados en una zona muy diferente a la ubicación que se está prediciendo.

Así mismo, la búsqueda de los radios controla la velocidad de cómputo, cuanto menor sea el radio de búsqueda, mas rápido pueden hacerse las predicciones. Como resultado, este es un método común para limitar el número de puntos que se utilizan al hacer una predicción mediante la especificación de un barrio de búsqueda de los puntos vecinos. La forma específica del barrido de búsqueda limita hasta dónde y por dónde buscar los valores medidos para ser utilizados en la predicción (Philip et al., 1982; ESRI, 2005).

### **5.2.3 Análisis de la rugosidad**

Los mapas resultantes sirvieron como línea base para una clasificación más detallada del hábitat. Las zonas son un excelente retrato del fondo, sin embargo, estas no describen el tipo de sustrato o la complejidad del paisaje marino. La rugosidad puede ser definida como la estructura física del fondo, y es un elemento clave indicador de la complejidad del hábitat (Dunn y Halpin, 2009).

La rugosidad, fue obtenida a partir de una segunda derivación de la batimetría que representa en buena medida la complejidad estructural del hábitat béntico. Esta fue obtenida siguiendo la metodología implementada por Janness, (2004) por medio de la extensión “Elevation Grids” en ArcView en combinación con la extensión del análisis espacial. El algoritmo utilizado emplea un análisis de 3x3 celdas vecinas para calcular el área de superficie basada en una interpretación en 3D de las interpretaciones de elevación individuales de cada celda. Los puntos centrales tridimensionales de 9 celdas son utilizados para calcular la distancia euclidiana entre el punto de centro de la celda focal y el punto de centro de cada uno de los centros focales restantes de las 8

celdas circundantes. El siguiente paso es calcular la longitud de la superficie de las líneas que conectan cada una de las 8 celdas circundantes con una línea adyacente a esta para obtener la longitud de los lados de los 8 triángulos proyectados en el espacio tridimensional en donde todos se encuentran en el punto central de la celda (Figura 6). Valores de rugosidad cercanos a uno indican áreas planas, localidades suavizadas y valores altos indican áreas con alto relieve. La rugosidad fue clasificada extendiendo las clases usadas (UEP) de los videotransectos. Las clases fueron asignadas con divisiones de las desviaciones estándar en ArcView 3.3. Las siguientes divisiones fueron usadas para cada sitio: Muy alto (Desv. Est >3), Alto ( Desv. Est 2-3), Medio alto (Desv. Est 1-2), Media (Desv. Est 0-1), Media Baja (Media), Baja (Desv. Est -1-0). El set de datos finales de la rugosidad arroja estas cinco clases basada en los datos raster del grid y sobre su desviación estándar.

Posteriormente, la rugosidad fue asociada con los atributos grabados en los videos durante las inmersiones y con los comentarios que fueron anotados durante las observaciones de campo.

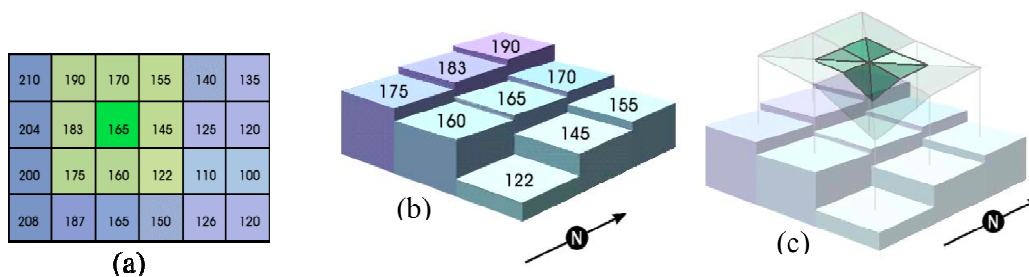


Figura 6. La rugosidad se determino siguiendo la metodología propuesta por Janness (2004) en donde se aplicaron los siguientes pasos: A) Pequeños modelos digitales de elevación (MDB) con valores de elevación sobrepuestos en cada celda. Usa una "ventana de movimiento" que calcula la superficie de área de cada celda basada en la elevación proveniente del valor de elevación de sus 8 celdas circundantes. B) Usando los valores de elevación de la figura (a) en donde las celdas representan la cantidad necesaria para calcular el área central de las celdas (b). C) Las celdas pueden ser visualizadas como un set de columnas adyacentes en donde cada una alcanza su valor respectivo de elevación (c).

#### 5.2.4 Precisión de los modelos batimétricos

La evaluación formal de la precisión de los datos batimétricos se resumió en la Tabla 5. La tabla muestra los estadísticos más representativos con los que se probó la exactitud del modelo batimétrico y a partir del cual se generaron los demás modelos acústicos. Todo modelo digital batimétrico está sujeto a dos fuentes de error. El primer tipo se denomina aleatorio y representan una sobre o sub estimación de los valores reales de la profundidad como resultado del azar. Estos errores no muestra un patrón determinado, en promedio su valor es igual a cero y los errores positivos y negativos

tienen una frecuencia similar. El segundo tipo se denomina sistemático y también representan una sub ó sobre estimación de los datos de la profundidad; sin embargo, a diferencia de los primeros, tienen un patrón determinado y su promedio no es igual a cero (Maling, 1989). A continuación se describen los estadísticos disponibles para evaluar los errores asociados a un modelo digital batimétrico cuyos resultados se resumen en la tabla 5.

Cuando no existe sesgo, el promedio de la variable es igual su valor verdadero. Para aplicar este concepto a un MDB es necesario comparar las profundidades derivadas del mismo con otra fuente de información con un mayor grado de exactitud; por ejemplo, con valores más exactos como los colectados directamente en el campo como en el caso del presente estudio (Weibel y Heller, 1991). La comparación resulta en una serie de diferencias denominadas (*residuos*), cuyos valores pueden ser positivos o negativos. Estas diferencias se expresan estadísticamente como, error absoluto promedio y raíz cuadrada del error medio cuadrático (Shearer, 1990):

### **Error absoluto medio**

El error absoluto promedio indica la tendencia central de la distribución de errores sin considerar su signo y su valor es mayor o igual a cero. Este valor representa mejor el error esperado del MDB.

### **Raíz cuadrada del error medio cuadrático**

La raíz cuadrada del error medio cuadrático (RCEMC) es una expresión matemática que captura tanto la magnitud como la variabilidad de las desviaciones de una serie de puntos de muestreo.

## **5.3 Obtención de los datos ópticos**

Con el dramático incremento en la percepción remota a partir de la década de los 90's seis instrumentos, llamados Landsat TM, ETM+, SPOT, ASTER, IKONOS y Quickbird (Mumby and Edwards, 2002; Hochberg *et al.*, 2003; Purkis, 2004; Roelfsema, 2009), han sido comúnmente utilizados para cartografiar ópticamente los hábitat bénticos.

A pesar de que actualmente no existe ninguna duda acerca de que la manera óptima para mapear ópticamente ambientes bentónicos someros es con el uso de sensores hiperespectrales aerotransportados (e.g: CASI), los cuales proporcionan la resolución espacial y espectral necesaria para discriminar corales vivos de muertos y colonias a escala (Mumby *et al.*, 2004) hay que tener en cuenta que los muestreos con sensores aerotransportados están en desventaja por su alto costo. Este puede superar grandes

órdenes de magnitud en resolución si se compara con las imágenes de satélite. Por estas razones, el potencial de datos adquiridos a través de satélites se mantiene activo en la investigación y dicha investigación esta comúnmente enfocada para aplicaciones de monitoreo de hábitat bénticos (Purkis, 2004).

### 5.3.1 Características del sensor Ikonos

El satélite Ikonos es un sensor multispectral de alta resolución espacial que obtiene datos en cuatro bandas de 4m de resolución nominal y datos pancromáticos a 1m nominal de resolución (Tabla 3). La imagen utilizada para el presente estudio fue adquirida el 10/03/2006. Este sensor ha sido utilizado ampliamente con el fin de diferenciar tipos de comunidades bénticas (Mumby and Edwards 2002, Andréfouët *et al.* 2003, Purkis 2004; Scopéltis *et al.*, 2010) desde los 5 m y hasta los 30 m de profundidad dependiendo de la transparencia del agua (Rielg y Purkis, 2005).

El área evaluada en el presente estudio se encuentra enteramente dentro de la zona fótica somera, mediciones con el disco Secchi tomadas en el arrecife frontal durante 10 años (250 días de mediciones) mostraron que en promedio la visibilidad fue de 21 m con una desviación estándar de 3 m (Rodríguez – Martínez *et al.*, 2010). En raras ocasiones (< 5%) la visibilidad fue más baja que 15 m. Como consecuencia, nuestra expectativa es que el área tiene el potencial para ser clasificada ópticamente usando una imagen de satélite IKONOS hasta una profundidad de 20 m y tal vez hasta los 30 m acorde con los propuesto por Rielg y Purkis, (2005).

La resolución espacial de la imagen IKONOS brinda detalles de las comunidades bentónicas de escalas de 2 a 5 m (Mumby y Edwards, 2002). La imagen adquirida se encontraba radiométricamente y geométricamente corregida por el proveedor (GEOEYE).

Tabla 3. Ikonos Resolución espacial y espectral.

<b>Bandas</b>	<b>Rango espectral ( m)</b>	<b>Rango del color</b>	<b>Resolución (m en nadir)</b>
1	0.45 – 0.52	Azul	4x4
2	0.52 – 0.60	Verde	4x4
3	0.63-0.69	Rojo	4x4
4	0.76 – 0.90	Infrarrojo cercano	4x4
Pan	0.45 – 0-90	Pancromático	4x4

## **5.4 Procesamiento de los datos ópticos**

### **5.4.1 Corrección atmosférica**

Como ya se ha dicho, numerosos algoritmos de corrección atmosférica han sido desarrollados para su aplicación en distintas partes del mundo, caracterizándose por estar enmarcados en una o varias de las siguientes categorías:

- 1.- Sustracción de la oscuridad del píxel
- 2.- Conversión de radiancia a reflectancia
- 3.- Regresiones lineales
- 4.- Modelamiento atmosférico

La elección de unos métodos u otros, depende en parte del tipo de datos de los que dispongamos. En este sentido, el Módulo de Corrección Atmosférica de ENVI proporciona diferentes opciones de análisis en función de sus necesidades específicas, que van desde una fase técnica física avanzada, a un método on-the-fly para su uso de tratamiento de datos en tiempo real.

De los modelos de corrección atmosférica se escogió la técnica de la sustracción de oscuridad del píxel (Dark Object Subtract) por ser un modelo sencillo, cuya aplicabilidad ha sido manifestada en las diferentes modificaciones a las que ha sido sometido, para perfeccionar su algoritmo (Chávez, 1998). La técnica de la sustracción de oscuridad del píxel (Dark Object Subtract) asume que los valores mínimos del píxel deben realmente ser ceros y este valor de nivel digital es el resultado de la introducción aditiva de error por atmósfera. Hay que aclarar que, hasta Chávez (1989), los modelos consideraban que la transmisibilidad de la atmósfera era constante (todo lo que se refleja, se transmite). No obstante, en la modificación que propone Chávez en 1996, la transmisibilidad deja de considerarse constante, teniéndose en cuenta las transmisibilidades de la atmósfera por cada banda.

En el caso de ENVI, el método de Dark Subtract se asemeja al propuesto por Chávez en 1989, en el que se considera que la transmisibilidad de la atmósfera es constante, o sea, igual a 1.

### **5.4.2 Aplicación de la máscara**

Se aplicó una máscara en ENVI 4.5 de la superficie terrestre y de las nubes presentes en la imagen (Figura 18). Los vectores basados en la máscara fueron

subsecuentemente puestos en formato raster y valores de 0 fueron aplicados a todos los píxeles que representaron el área de la máscara, siguiendo la metodología propuesta por Ji *et al.*, (1992).

### 5.4.3 Corrección del brillo solar

El brillo superficial del agua es causado por el reflejo de la luz solar sobre la superficie del agua, y varía en función del ángulo de incidencia de la luz y en función de las crestas y pendientes de las olas que produce el viento. Este brillo dificulta el reconocimiento visual de las características de los objetos bajo la superficie (Arce 2005) y se encuentra ampliamente distribuido en el campo visual de imágenes aéreas y satelitales, en especial en aquellas de alta resolución. Para corregir este efecto en las imagen Ikonos se aplicó el algoritmo descrito por Hochberg *et al.*, (2003).

Este algoritmo utiliza el infrarrojo cercano (banda 4), asumiendo que presenta una máxima absorción y una pérdida mínima de radianza sobre aguas claras. Pretendiendo que este efecto es relativamente constante sobre toda el área, sin importar la longitud de onda, el IRC se utiliza para caracterizar el área. Luego, es escalado por la intensidad absoluta del brillo en cada uno de la bandas del espectro visible (bandas 1, 2 y 3). Por último, el resultado se resta de cada una de las bandas del espectro visible para remover el efecto de brillo superficial.

El primer paso, utilizando las imágenes previamente corregidas por el efecto de atmósfera, fue obtener el valor mínimo y máximo de la banda 4, así como la posición del píxel (línea-columna) dentro de la imagen. Después, utilizando la posición del píxel donde se registraron los valores extremos de la banda 4, se obtienen los valores de las bandas del visible (1, 2 y 3) y se calcula la diferencia ( $Lg$ ) para cada una de las bandas. Utilizando la diferencia de los valores extremos de la banda 4 se genera una constante ( $fg$ ) en base a la siguiente fórmula:

$$fg = BIRC / Lg IRC$$

Donde:

BIRC = Banda 4

LgIRC = Diferencia de valores extremos de la banda 4

Por último, para obtener la imagen corregida por el brillo superficial y aplicando la metodología propuesta por Hochberg *et al.* (2003), se utilizó la siguiente fórmula (la cual se programó en Arcgis):

$$BigI_{int} = Bi(l,c) - fg(l,c) * Lgi$$

Donde:



Biglint = Banda  $i$  corregida por brillo de la superficie del agua

$B_i$  = Bandas  $i$  del espectro visible (azul, verde y rojo)

$F_g$  = Constante

$L_g$  = Diferencia de los valores para cada banda  $i$

La figura 7 muestra que el impacto visible sobre la corrección del brillo es significativo sobre el arrecife frontal el cual estaba dominado por el set de olas en el momento de la adquisición de la imagen.

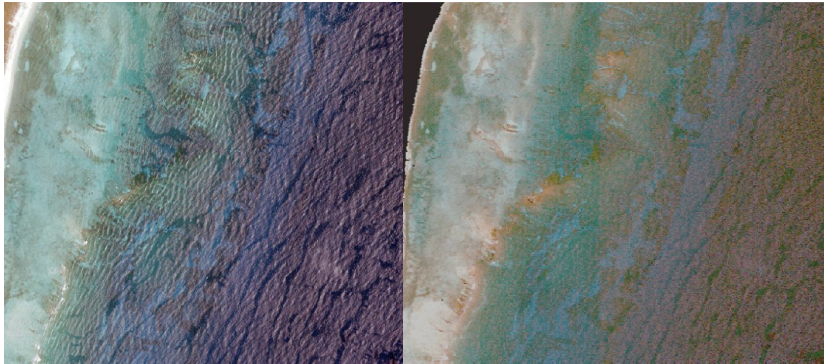


Figura 7. 1 Km del área total de la imagen IKONOS (Izquierda) antes (Derecha) después de la corrección del brillo

### 5.5 Clasificación de datos ópticos

Cada uno de los tipos de fondo presentes puede también ser definido sobre diferentes niveles de detalle. Esto depende de la técnica aplicada en campo, la resolución descriptiva del sensor remoto disponible, la experiencia técnica y las necesidades temáticas del usuario (Mumby y Harborne, 1999).

#### 5.5.1 Clasificación no supervisada

En la clasificación no supervisada cada píxel de la imagen es asociado a una clase espectral sin que el usuario tenga conocimiento previo del número o identificación de las diferentes clases de la imagen. Esto es hecho a través de algoritmos de agrupamiento.

Se realizó una clasificación no supervisada con todas las bandas del multiespectral en el programa ENVI 4.5. Este programa automáticamente clasifica los píxeles de la imagen dentro de un número de clases (10 clases y 5 iteraciones seleccionados para este caso) sobre la base de espectros similares; dichas clases se produjeron utilizando un algoritmo (clúster) ISODATA, el cual es bastante empleado en paquetes de procesamiento de imágenes como ENVI.

La clasificación no supervisada, se realizó con el fin de tener una referencia espacial para identificar en campo algunos aspectos de interés. En particular, para este estudio estos pasos ayudaron a conocer la distribución de las diferentes zonas geomorfológicas dentro del área y los cambios asociados a la batimetría de la región obtenida con los métodos acústicos previamente descritos en el documento.

Por otra parte, el trabajo de campo el cual se describe más detalladamente en la sección 5 fue diseñado dividiendo visualmente la imagen en tres áreas (laguna, cresta, arrecife frontal) utilizando los patrones espaciales de la estructura béntica evidente en la imagen IKONOS, la cual fue combinada con la clasificación no supervisada ISODATA.

### **5.5.2 Clasificación supervisada**

La clasificación supervisada se llevó a cabo siguiendo los métodos descritos por Andréfouet *et al.*, 2003; Purkis, 2004 y Garza, 2004.

La clasificación de datos multiespectrales es un proceso de tres pasos que identifica clusters estadísticamente, para agrupar píxeles en diferentes clases:

- 1) entrenamiento, que es el proceso de definir el rango espectral de cada clase (firma espectral).
- 2) evaluación de firma espectral, se analizan las diferentes firmas espectrales para evaluar su representatividad
- 3) toma de decisiones, proceso de ordenar todos los píxeles de la imagen en clases (definidas por las firmas espectrales revisadas) usando algoritmos matemáticos llamados “reglas de decisión”.

La clasificación supervisada de la imagen generalmente va seguida por un análisis de precisión, que se refiere a la correspondencia entre la clase nominal y la clase “verdadera”. Con las variables registradas en campo en cada estación de muestreo y los datos de radiancia registrados en las imágenes para cada estación, se hace un análisis exploratorio con un método multivariado de análisis de correspondencia canónica (CCA) y se seleccionan las variables significativas que se relacionen con los valores espectrales de cada estación por medio de un análisis Kappa. Las estaciones se agrupan en clases y se procede a efectuar el entrenamiento. Se efectúa una clasificación supervisada utilizando las tres primeras bandas espectrales de la imagen IKONOS (azul, verde, rojo) y con las clases espectrales previamente definidas sobre la imagen corregida. El canal del infrarrojo cercano (NIR) no fue utilizado en la clasificación debido a que este canal no contiene mucha información del fondo debido a la fuerte absorción por el agua y se usó para la corrección del brillo en la imagen.

Esta primera clasificación se evalúa y se optimiza (corrigiendo las firmas espectrales) y se clasifica nuevamente hasta obtener la precisión deseada. Este estudio utilizó el esquema de clasificación estándar desarrollado por Mumby (2000) y modificado por Andréfouët et al. (2003) en el proyecto: Coral Millennium Project tomando en cuenta los hábitats específicos presentes en el arrecife de Puerto Morelos.

Estudios realizados por Mumby y Edwards (2002) indican que el algoritmo de clasificación de máxima probabilidad (maximum-likelihood) funciona mejor en el caso de la clasificación del tipo de fondo. Este algoritmo de clasificación está basado sobre derivaciones estadísticas de los píxeles de entrenamiento de la imagen, que son representativos de cada tipo de fondo los cuales han sido determinados en la base de datos por el intérprete. Por otro lado, el número de píxeles de entrenamiento de cada tipo de clase depende de la heterogeneidad de la clase y de la resolución espacial del set de datos utilizados. Clases espectralmente homogéneas solo necesitan un número mínimo de píxeles de entrenamiento para poder determinar estadísticas confiables. Contrariamente, clases muy heterogéneas, requieren un largo set de entrenamiento con el fin de incorporar sus diferentes características. Finalmente, cuanto más grande sea la resolución espacial de los datos, más cantidad de píxeles son requeridos y con mayor resolución, la diferencia entre clases para cada clase podría incrementar (Chen y Stow, 2002). Por necesidad, la selección de los píxeles de entrenamiento se basó en evidencias subjetivas, como la posición en la estructura del arrecife o las características espectrales de cada tipo de comunidad bentónica presente.

#### **5.5.2.1 Precisión de la clasificación supervisada**

La evaluación formal de la precisión se resumió en una matriz de error estándar (Tabla 4). La matriz resulta de la comparación de los valores del píxel y de las verificaciones en campo con el correspondiente valor del píxel en el resultado de la clasificación. La matriz tabula el nivel de acuerdo entre la clase temática en un lugar determinado en el mapa y al mismo tiempo en el dato de referencia (Congalton, 1991); tabulaciones a lo largo de la diagonal representan los casos en los que la categoría asignada acertó los valores reales, mientras que las tabulaciones en diagonal representan los errores y se tabulan como total en los márgenes. Este error marginal representa el error proporcional por categoría, mientras que el error de omisión se utiliza como base para juzgar la adecuación de la asignación, y, el error de comisión como un medio para determinar la forma de fijar el mapa para aumentar la precisión (Eastman, 2003). La precisión general se calcula dividiendo el número de píxeles clasificados correctamente por el número total de la matriz (Congalton, 1991). Por otra parte, la exactitud del productor se refiere a la probabilidad de que un píxel de referencia se

clasificó correctamente (es decir, mide el error de omisión), mientras que la exactitud del usuario indica la probabilidad de que un pixel clasificado en el mapa representa la categoría en el campo (es decir, mide el error de la comisión) (Congalton, 1991).

Una exactitud de la clasificación global se obtuvo mediante el cálculo de precisión de Tau (Purkis 2004; Roesfelman 2009). Estadísticamente, este representa la exactitud sobre el mapa en relación con el medio ambiente verdadero, calculando la posibilidad del acuerdo entre la referencia y los resultados de una clasificación al azar. Este parámetro no solo representa la exactitud general, sino que también tiene en cuenta el número de errores de clasificación (Roelfsema, 2009). El cálculo de la precisión se determina de la siguiente manera:

Donde:

P0: Concordancia total

M: Número de hábitats

I: ith habitat

N: Número de los sitios

ni: Total en la fila del hábitat i

xi: Valor diagonal por hábitat (número correcto de asignaciones por hábitat i)

$$T = \frac{P_0 - P_r}{1 - P_r} \quad P_r = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^M n_i * x_i$$

Finalmente, se aplicó el coeficiente KAPPA, a los resultados obtenidos. Este coeficiente es altamente difundido para medir la exactitud de los mapas. Éste, calcula el grado de ajuste entre la imagen clasificada y la realidad observada en el campo por medio de los video-transectos y los puntos de control.

Según Congalton (1991), el coeficiente se calcula de la siguiente manera:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

Siendo:

N: número total de píxeles de referencia

$X_{ij}$ : número de observaciones en la fila i y columna j.

$X_{i+}$ : Totales marginales de la fila i.

$X_{+i}$ : totales marginales de la columna i.

r: número de filas en la matriz

Valores de K cercanos a 1 revelan un muy buen acuerdo entre la realidad observada y el mapa obtenido. Contrariamente, valores próximos a 0 sugieren que el acuerdo observado es sólo debido al azar.

### **5.6 Obtención de datos de campo: video y puntos de control**

Los videos y las observaciones visuales son necesarios para probar la exactitud de las caracterizaciones que han sido llevadas a cabo con otros recursos como la percepción remota y los datos obtenidos acústicamente.

Con base a la información procesada en la fase preliminar y de entrenamiento (imágenes de satélite, Google Earth y mapas producidos en estudios anteriores) (Figura 2) se escogieron las estaciones de muestreo a lo largo del área de estudio.

El muestro fue diseñado dividiendo visualmente el área en tres zonas (laguna, cresta, arrecife frontal) utilizando los patrones espaciales de las estructuras bénticas evidentes en la imagen IKONOS y con la ayuda de la información obtenida en el procesamiento preliminar de la información (delineación manual de las imágenes de Google Earth. Ver numeral 5.1.1).

También se tuvo en cuenta la evaluación visual de los patrones espaciales de la geomorfología arrecifal evidente en la clasificación no supervisada de la imagen Ikonos del área de estudio utilizando ENVI 4.5. Las diferentes combinaciones de los colores del pixel en la imagen y la textura de los grupos de pixeles fueron asumidas para representar la mayoría de los tipos de hábitats bentónicos presentes en el área de estudio. El color verdadero de las características bénticas y su profundidad, los colores formados por los pixeles de la imagen, y la distribución espacial de estas características determinó la textura de los grupos de pixeles. Los videos y los puntos de control fueron localizados con el fin de cubrir largas variaciones en la geomorfología presente y el mayor número de tipos de comunidades bénticas presentes en el área. Los puntos de control fueron entonces aleatoriamente escogidos dentro de cada una de las tres zonas (alrededor de 100 puntos en cada zona). La selección de los sitios fue similar a previos métodos que han sido aplicados en estudios sobre largas áreas arrecifales en las que se ha utilizado imágenes Landsat, Quikbird, Ikonos para mapear características geomorfológicas (Purkis, 2004; Mumby *et al.*, 2004; Roelfsema, 2009).

Se realizaron un total de veinticinco salidas de campo con buceo autónomo recreativo entre Octubre del 2008 y Febrero del 2009, en las que se recolectó información de la estructura y composición bentónica por medio de video (U.S.

Geological Survey, 2000; ICES, 2007; Holmes *et al.*, 2008) y en 289 puntos de control en total.

La metodología que se utilizó para georeferenciar los puntos fue la siguiente: mientras que dos buzos grababan imágenes de los puntos de control previamente elegidos y tomaban anotaciones de las observaciones, un tercer integrante en superficie tomaba los puntos GPS de los recorridos hechos por los buzos. Estas coordenadas geográficas se anexaron a una base de datos donde se anotaron también los atributos observados durante los buceos, tales como la denominación (puntos de referencia en la línea de costa), la profundidad, las coberturas dominantes en términos de Unidades Ecológicas de Paisaje (UEP), una descripción del fondo y su geomorfología en términos del relieve.

Para definir las UEP se tuvieron en cuenta la(s) especies o sustratos dominante(s) en cada video, tomando como regla que se le daría denominación específica a cada una de ellas siempre que la cobertura constituyera el 50% o más del total del área muestreada. En los demás casos, en los que la cobertura no superara el 10% del total del paisaje, las unidades fueron definidas como fondos arenosos, colonias aisladas o como otro tipo de hábitat bentónico (Atributos espaciales que también hacen parte de la base de datos del SIG).

Para tal fin se tuvo en cuenta la clasificación empleada por Madden *et al.*, (2005) (ver antecedentes de investigación) a partir del Nivel 4 (Macrohábitat) y a partir de las zonas geomorfológicas previamente descritas por Andréfouët *et al.*, (2003) en la zona de estudio. Además, se hicieron anotaciones del estado de salud del arrecife (de la presencia de enfermedades asociadas a los corales) y se anotó el número perteneciente a cada video respectivamente (U.S. Geological Survey, 2000; ICES, 2007; Holmes *et al.*, 2008). Estos metadatos se aplicaron para complementar la caracterización de los datos ópticos y acústicos. Sin embargo, los cálculos de la cobertura bentónica son estimaciones generales. Estos datos pueden utilizarse para ver grandes diferencias, pero no pueden ser utilizados para procesos estadísticos a escala fina.

## **5.7 Verificación de la exactitud de los muestreos**

Muchos de los puntos evaluados en campo en este estudio han sido monitoreados por previas investigaciones (Jordan, 1979; 1980; 1989). En ellas se encontró información acerca de las zonas bénticas y de la composición de sus organismos más conspicuos. La información obtenida en cada punto de control fue ligada a su posición geográfica por medio de un GPS y la estimación de la cobertura de las principales UEP presentes

en el área fue almacenada en la base de datos hasta el nivel más bajo de clasificación taxonómica posible. En segundo lugar, la localización de los diferentes videos y puntos de control colectados en campo fueron predeterminados sobre la imagen Ikonos, utilizando para ello el SIG y siguiendo la metodología propuesta por Purkis, (2004), en las que se posicionaron los puntos de control con el fin de representar los límites de los parches presentes entre los hábitats.

Las coordenadas finales de los puntos de control fueron extraídas a partir de las imágenes de satélite y los modelos acústicos y fueron utilizadas para localizar las ubicaciones en el campo a través del SIG. Posteriormente, los atributos de cada uno de los puntos de control colectados en esta investigación, así como de los previos estudios fueron usados para confirmar la clasificación de las zonas, estructuras e información derivada de las imágenes de satélite.

### **5.8 Integración de los datos en el SIG**

La integración de la información en el SIG permitió la conexión entre los diferentes tipos de datos. Sin esta integración no sería posible realizar inferencias acerca del comportamiento de los datos en el mundo real. Los mapas resultantes fueron analizados en el SIG en donde se identificaron las diferentes clases obtenidas por medio de los respectivos procesos de clasificación.

Mapas bentónicos han sido analizados por medio de SIG con el fin de extraer información de diferentes clases, tanto acústicas como ópticas, las cuales posteriormente fueron aplicadas para la identificación de los hábitats del fondo marino. En particular para el caso de los modelos bénticos del terreno, se generó un modelo básico del muestreo acústico para la cartografía de los hábitats. Este se desarrolló aplicando un contexto SIG, siguiendo los métodos desarrollados por Janness, (2004) y (Lundblad, 2004) que han sido previamente descritos en el procesamiento de los datos acústicos (sección 5.2.1.1).

Usando ArcMap, los puntos de control de los videos fueron sobrepuestos a la imagen clasificada y los mapas acústicos resultantes, con el fin de extraer las asociaciones de los datos con los tipos de biotopos (UEP) observadas sobre los videos siguiendo la metodología propuesta por Ropper y Zimmermann (2007).

La aplicación de la tecnología SIG basada en los datos colectados y posteriormente tratados, permitieron guiar y enfocar mejor las observaciones con las que se pudo asignar rápidamente la distribución de los hábitats presentes en el área. Finalmente, las clasificaciones realizadas junto con los datos obtenidos en campo permitieron esquematizar la extensión actual de los hábitats bentónicos en mapas cartográficos y

temáticos.

Los mapas finales y sus respectivos atributos físicos, batimétricos y ecológicos, constituyeron así las entidades de entrada del SIG, las cuales permitirán futuras evaluaciones de cambios en las condiciones geomorfológicas y ambientales de los hábitats bentónicos presentes en el Parque Natural Arrecife de Puerto Morelos.



## 6. RESULTADOS

Los resultados del presente documento siguen el flujo de las características de clasificación descritas por Madden *et al.*, (2005) las cuales se describen en la tabla 4. En general algunos de los hábitats presentes en los 3 macrohábitats comparten semejanzas, tal es el caso de los sedimentos no consolidados que se encuentran presentes tanto en la zona lagunar como en la plataforma. Zonas de crestas que no solo se encuentran presentes entre el arrecife frontal y anterior, sino que también se desarrollan al interior de la zona lagunar y entre la terraza rocosa, como pequeñas crestas que generalmente se encuentran colonizadas por la UEP Octocorales –corales mixtos (Oct-Cmix). Zonas de depresiones que se presentan al interior de la laguna formando el canal de navegación, en las bocanas, dividiendo la cresta arrecifal principal y entre los escalones presentes en la plataforma formando canales profundos (Figura 13 y 14) y finalmente, UEP que pueden estar bien representadas en los tres Macrohábitats presentes en el Parque.

Tabla 4. Resultado de la clasificación de los ambientes presentes en el Parque Nacional Natural Arrecife de Puerto Morelos.

<b>Macrohábitat</b>	<b>Laguna</b>	<b>Arrecife</b>	<b>Plataforma</b>
<b>Hábitat</b>	- zona lagunar somera - zona lagunar profunda	- Arrecife anterior - Cresta - Arrecife posterior	- Terraza rocosa - Terraza arenosa
<b>Biotopos</b>	UEP	UEP	UEP

La tabla 4 resume los resultados de la clasificación de los ambientes presentes en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos los cuales son discutidos individualmente a continuación.

### 6.1 Macrohábitat

La caracterización de los macrohábitat se pudo determinar mediante la delineación manual de polígonos (Figura 8) alrededor de los tonos de la imagen y las texturas que representan discretas características del fondo. Así mismo los resultados obtenidos por medio de la retrodispersión acústica (Backscatter), los modelos de las zonas bentónicas y con los atributos observados durante las salidas de campo soporto dicha delineación.

En la imagen pudieron identificarse los rangos geomorfológicos más generales de la zona y fue posible delinear los principales macrohábitats presentes en el área (Figura 8). A continuación se describen los rangos sedimentológicos del área a partir de las

observaciones hechas en campo, la información secundaria y las delineaciones manuales realizadas sobre el Google Earth. Estos resultados fueron seguidamente corroborados con los análisis acústicos de los datos.

### 6.1.1 Laguna

La laguna presenta sedimentos de arena calcárea donde el trabajo constante de organismos infaunales provocan que el fondo se encuentre suelto y sea inestable. Este tipo de sedimento también está bastante bien representado en las zonas profundas de la plataforma continental.

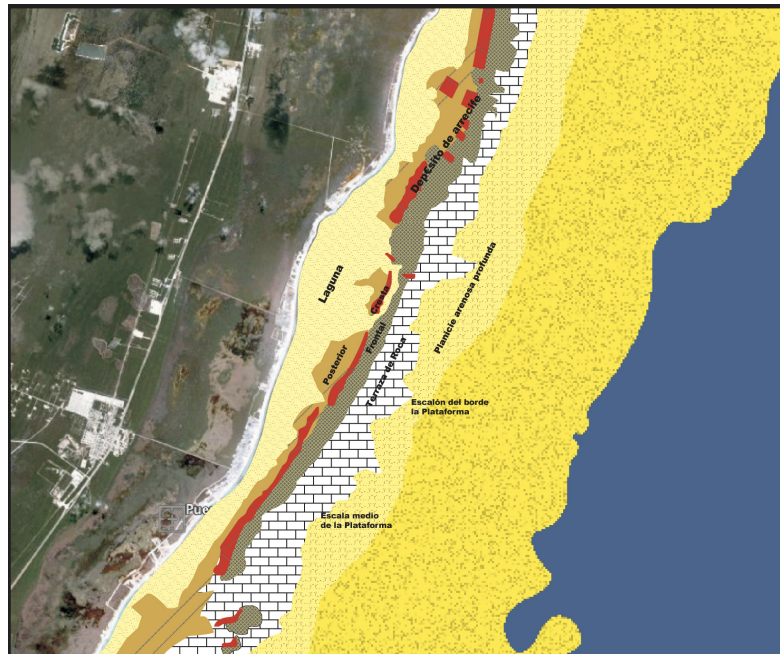


Figura 8. Resultado de la delineación manual de la zonación geomorfológica del área de estudio.

Generalmente, este tipo de sedimento puede venir derivado de bioclastos del esqueleto de diferentes organismos (fragmentos de corales, algas, foraminíferos, moluscos entre otros) y/o de estructuras no esqueléticas como los oolitos y oncoïdes.

### 6.1.2 Arrecife

El arrecife posterior y frontal por su parte está caracterizado por la presencia de arenas muy gruesas a grano grueso que exhibe una transición en el tamaño medio de grano. En muchas áreas del arrecife se observa también la presencia de cantos rodados como depósitos de tormentas en especial en el arrecife frontal y posterior. Sin embargo la presencia de estos cantos fue más conspicua en el arrecife frontal en

donde la energía del oleaje y la abrasión es mucho mayor que en el arrecife posterior que es la zona más protegida del arrecife.

En la cresta arrecifal por su parte, se observa generalmente la roca calcárea desnuda y a menudo recubierta por algas filamentosas, la presencia de sedimentos en esta área es mínima debido a la permanente acción del oleaje.

### 6.1.3 Plataforma

Después de pasar el área arrecifal en dirección al mar abierto, se presenta una terraza rocosa que en algunas ocasiones esta colonizada por octocorales, posteriormente el sustrato duro desaparece dando paso nuevamente a una gruesa capa arenosa, conformando una plataforma que se extiende por varios kilómetros hasta alcanzar el borde del talud continental.

## 6.2 Hábitats

### 6.2.1 Resultados del modelo batimétrico

En la figura 9 se muestran los resultados iniciales del modelo batimétrico, desarrollado en el software Surfer. Nótese como se ve la profundidad del canal de navegación que alcanza profundidades de 8 m ubicado en la parte Sur de la laguna arrecifal, frente al muelle del poblado de Puerto Morelos ( $20^{\circ}48'33''$  Latitud Norte y los  $-86^{\circ}87'33.80$  Latitud Oeste) y hacia el Norte, el corte de la zona de cresta que permite la entrada de embarcaciones a la laguna por la Bocana grande ( $20.88.67$  Latitud Norte y los  $-86.84.61.82$  Latitud Oeste) con profundidades de hasta 7 m y la bocana chica ( $20.87.52$  Latitud Norte y los  $-86.85.03.10$  Longitud Oeste), con profundidades de hasta 6.50m.

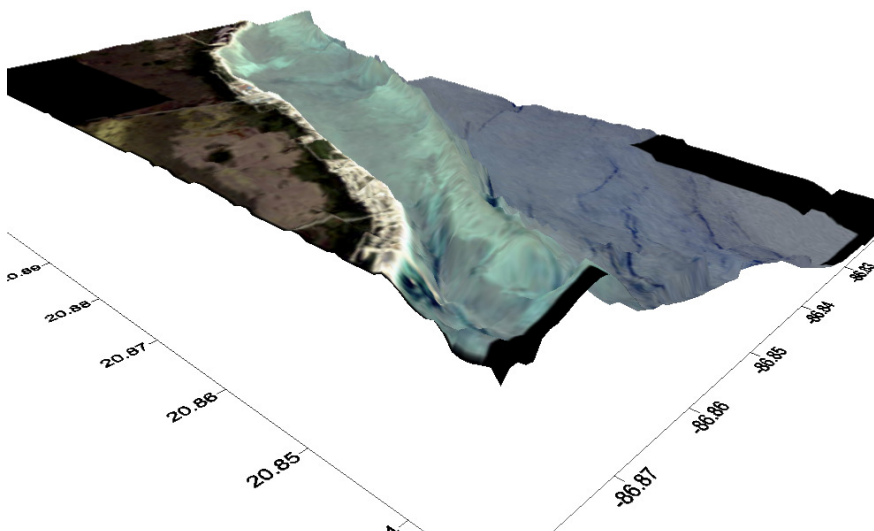


Figura 9. Modelo 3D y ubicación geográfica del área en el programa de creación de superficies Surfer Golden Software Inc.

El modelo batimétrico tiene una resolución de 50 m x 50 m, y se creó a partir de 32030 puntos de registro batimétrico que fueron colectados por el Laboratorio de Hidrografía y Meteorología de la Unidad Académica de Puerto Morelos durante el 2005 y con referencias de la imagen de satélite Ikonos. En el video anexo a este documento se muestra la modelación en 3D a la que se le aplicó una exageración al modelo de 5 m para observar la forma y el contorno de parches arrecifales dispersos en la laguna.

En la imagen de modelo 3D de ArcScene (Figura 10 ) se muestra el resultado de la modelación batimétrica y su correlación con la imagen de satélite Ikonos. Cada dato batimétrico y su respectiva georeferencia fueron asociados al pixel georeferenciado de la imagen Ikonos 2005. Usando los métodos de interpolación anteriormente descritos. Las tres primeras bandas de la imagen (azul (445-516nm), verde (506 – 595nm) y roja (632 -698nm) fueron entonces correlacionadas con los datos batimétricos colectados.

Nótese por ejemplo en los resultados derivados de ese método, como se observa el ensachamiento de la laguna en sentido Sur Norte, el arrecife franjeante y la suave pendiente a la plataforma arenosa. Así mismo, se puede observar las representaciones de la extensa pradera de fanerógamas mezclada con parches arrecifales que se desarrollan en su interior. Sin embargo, fijese como con una evaluación a simple vista de la imagen no es posible separar estos dos biotopos debido a la similaridad de la respuesta espectral de sus pixeles.

Los resultados obtenidos de este modelo servirán como línea base y se podrá utilizar la información generada a partir de los registros de la correlación de las bandas verde, azul y la profundidad de los datos colectados con la ecosonda. La información podrá ser extrapolada a otras áreas de la imagen de satélite que no fueron muestreadas con la ecosonda y producir una batimetría estimada de la región.

Con respecto a los resultados estadísticos arrojados por el modelo batimétrico se encontraron profundidades mínimas de -32,66, máximas de 1,05m (Figura 11), una media de -14,87m y una desviación estándar de 10,64.

## MODELO BATIMÉTRICO 3D DEL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS

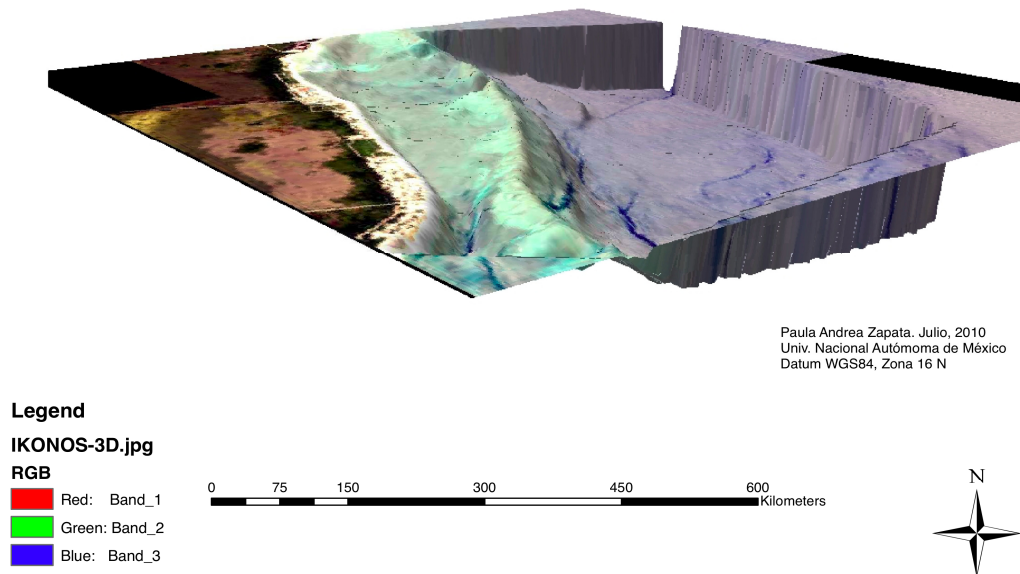


Figura 10. Resultados del modelo digital batimétrico en 3D desarrollado en ENVI 4.5 y Arcscene (ESRI). En la imagen se observa el solapamiento de la imagen Ikonos 2005 sobre el grid de datos batimétricos y los resultados gráficos sobre modelación en 3D del MDB.

En el modelo se puede observar la morfología típica de un arrecife bordeante. A partir de la playa se presenta una laguna arrecifal dominada por la pradera submarina, arenales y parches coralinos en donde la topografía del fondo presenta pocas variaciones en la profundidad que oscila entre los -2 y -4 metros aproximadamente (Figura 11). Como una división entre la laguna arrecifal, el arrecife posterior y el arrecife frontal se encuentra una cresta arrecifal que presenta una topografía más compleja que puede presentar un desarrollo moderado formando parches coralinos agregados o consolidados a un desarrollo notable con porciones emergidas en donde la profundidad oscila entre -0,001 y -1 aprox. Siguiendo a la cresta se observa el arrecife frontal de variable extensión a lo largo del Parque que presenta límites de profundidad con la plataforma rocosa que oscilan entre los -7m y los -11m. Por su parte la terraza rocosa muestra límites de profundidad con la plataforma arenosa profunda entre los -21m y los -24m aproximadamente, para seguir así con una delicada pendiente que cae hasta los -30m de profundidad (Figura 10 y 11).

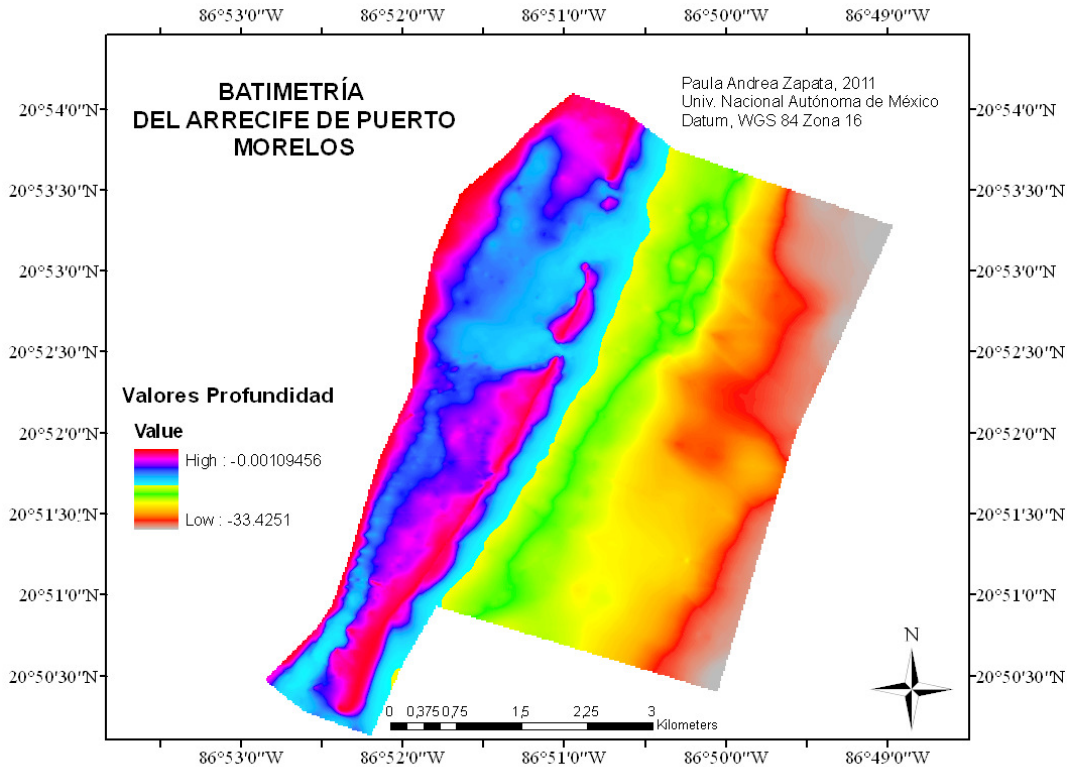


Figura. 11. Batimetría en 2D del Parque Arrecife de Puerto Morelos, los colores indican los cambios de profundidad con sus respectivos valores en el GIS. Profundidades más altas en rojo y magenta alcanzan valores de 1.059 m, por el contrario bajas profundidades en rojo y amarillo alcanzando profundidades de hasta -32.66 m.

### 6.2.2 Resultados de la retrodispersión acústica

La ecosonda también arrojó un extensivo set de datos de retrodispersión acústica que representa la variación del fondo marino del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos con las que fue posible reconocer los hábitat y biotopos que se desarrollan al interior de los macrohábitats. Esta retrodispersión acústica derivada de los datos de la ecosonda mostró que las rocas y los sedimentos presentes en estas zonas tienen un amplio rango de variación de la retrodispersión ya que muchos de los afloramientos presentan diversas áreas con rocas expuestas y bolsas de sedimentos que absorben algo de la energía acústica. Así mismo, las rocas tienen una variación batimétrica, desde media hasta muy alta debido a que las rocas expuestas tienen un amplio rango de relieve especialmente en la zona de las crestas arrecifales.

La intensidad de los tonos de gris refleja la intensidad de la respuesta acústica que fue grabada en cada ubicación (Figura 12). Colores iluminados (blancos) simbolizan áreas que tienen un retorno acústico muy alto, o sustratos que son altamente reflectivos como el pavimento de roca calcárea que se observa en la cresta arrecifal principalmente. Los tonos oscuros simbolizan bajo retorno acústico, o donde el sonido

es absorbido por sustratos como las arenas o el fango. Nótese la diferencia de la tonalidad entre la laguna arrecifal y la plataforma arenosa profunda (Figura 12).

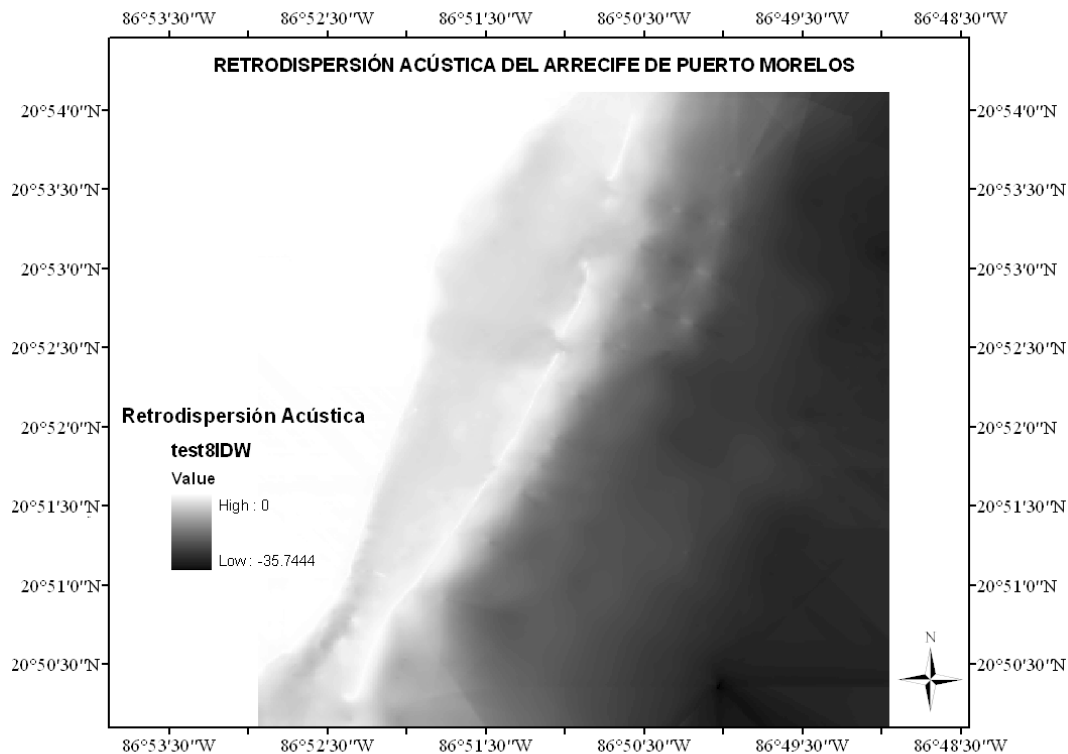


Figura 12. Retrodispersión acústica (Backscatter) georeferenciada en el Parque Arrecife de Puerto Morelos. Áreas claras son sitios con con alto retorno acústico mientras que áreas oscuras son sitios con bajo retorno acústico.

La arena gravosa y limosa esta correlacionada con una restrodispersión menos intensa que la roca, con una variación medio alta de la retrodispersión, y con una variación batimétrica desde muy baja hasta mediana. Este tipo de material de sedimentos como los presentes en la laguna o en la plataforma no devuelve tanta energía acústica por que algunas de las señales son refractadas dentro de los sedimentos y absorbidas. La arena de estructura gravosa tiene una variación de medio a alta en la retrodispersión, ya que estos sedimentos generalmente se encuentran cerca de las crestas, como en el caso de los depósitos de escombros coralinos, éstos también se localizan en la plataforma arenosa profunda como en las zonas de transición de la terraza rocosa.

Las zonas areno limosas presentes en la laguna tienen un amplio rango de retrodispersión acústica pero menores que el de las arenas no consolidadas. Esto es debido a que el tamaño más pequeño de grano refleja menor energía acústica y

permite más penetración, lo que lleva a una absorción más grande de la señal acústica. Arenas limosas fueron encontradas tanto en y alrededor de afloramientos, en los escalones en los que se divide el arrecife frontal norte, como sobre la suave y uniforme plataforma lagunar en donde los sedimentos están generalmente ocupados por la pradera submarina conformada por fanerógamas y una comunidad de algas arrecifales.

Sedimentos limosos se relacionan con baja retrodispersión acústica pero tiene un amplio rango de variación en la retrodispersión y la variación en la batimetría. Esto posiblemente es debido a la presencia de fanerógamas que ayudan a la consolidación de los sedimentos en estas áreas. Los limos son similares a la arena fina, aunque, estos tienen una retrodispersión acústica más baja ya que éstos absorben la mayoría de la energía acústica debido a su alto contenido de agua y baja densidad de partículas. Los limos también cubren un amplio rango de variación de la retrodispersión y de la batimetría debido a que pueden estar localizados atrapados en bolsas dentro de los afloramientos como en el caso de las depresiones y en algunos casos en los canales o en la plataforma lagunar en donde generalmente se observó la presencia de la pradera submarina.

Arenas menos consolidadas y cantos rodados se encontraron presentes en las zonas del arrecife posterior y frontal, así como en una zona de depósito de tormenta ubicada cerca al muelle principal de Puerto Morelos (Figura 13 y 14).

### **6.2.3 Resultados de los modelos bentónicos**

En un paso siguiente, se utilizó la herramienta de análisis espacial para obtener pendientes y múltiples escalas de posición batimétrica partiendo de la batimetría original. Los resultantes "grid" derivados fueron combinados con nuevos algoritmos (ver métodos) para desarrollar los siguientes productos finales: índice de posición batimétrica de zonas, estructuras, pendientes, y mapas de clasificación de la rugosidad para el área de estudio.

### **6.2.4 Resultados del Índice de posición batimétrica**

Los resultados de Índice de posición batimétrica presentan escalas dependientes de la red batimétrica; diferentes escalas fueron usadas para identificar características de amplia y fina escala sobre el paisaje marino (ver métodos). Además, con la aplicación de los demás algoritmos en el análisis espacial fue posible realizar inferencias espaciales acerca de la estructura general del paisaje marino.



Los métodos de clasificación del índice de posición batimétrico identificaron cuatro zonas: crestas, depresiones, zonas planas y pendientes.

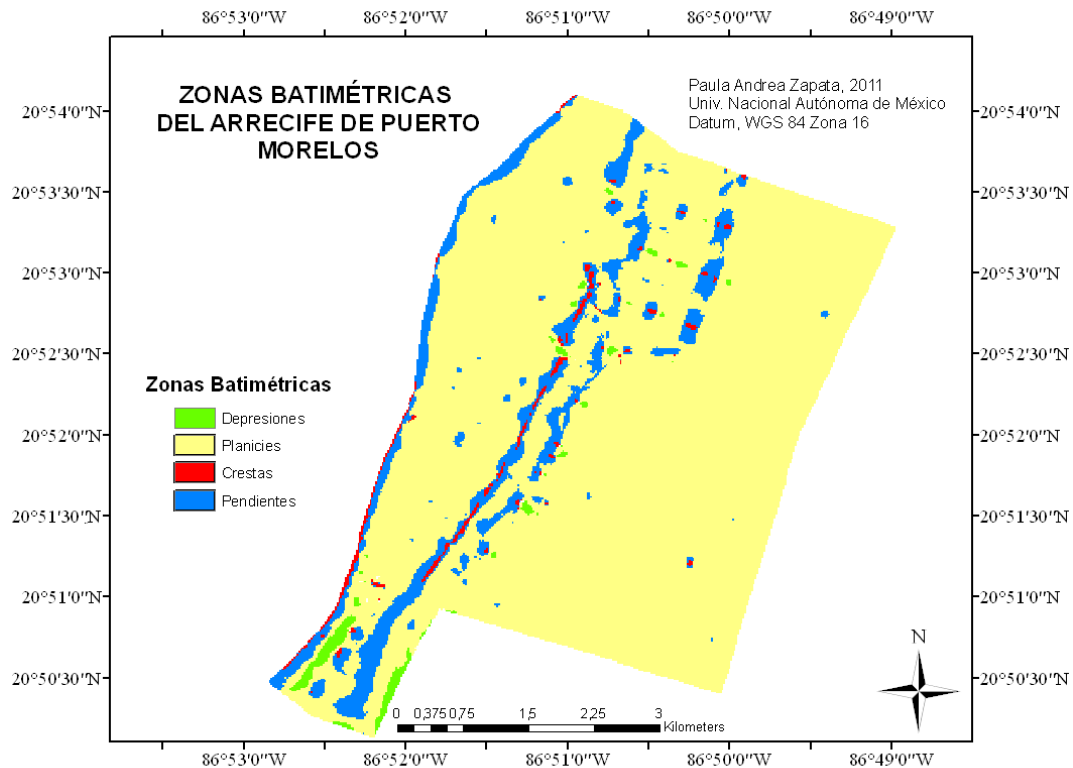


Figura 13. Mapa de las zonas batimétricas derivado de los resultados del MBT.

En este modelo fueron utilizadas 364 columnas y 397 filas del grid. El tamaño de la celda en x e y fue de 18.58m x 18.58m respectivamente. En cuanto a los resultados de los parámetros estadísticos se obtuvo una media de 7,679m y una desviación estándar de 2,095m.

Se reliazaron análisis espaciales dentro del ArcGis y se encontró que las depresiones ocupan 0,297 Km, Zonas planas 23,149 Km (este valor incluye la laguna y la zona de la plataforma arenosa profunda que fue muestreada), las crestas 0,277 Km y las pendientes 2, 422 Km.

### 6.2.5 Resultados de los modelos de estructuras bentónicas

Con respecto a los resultados de las estructuras se utilizaron para la creación del modelo 135 columnas y 148 filas. El tamaño de la celda (x y y) fue de 50m x 50m. Los resultados estadísticos arrojaron valores de media de 7,71 y una desviación estándar de 2,077.

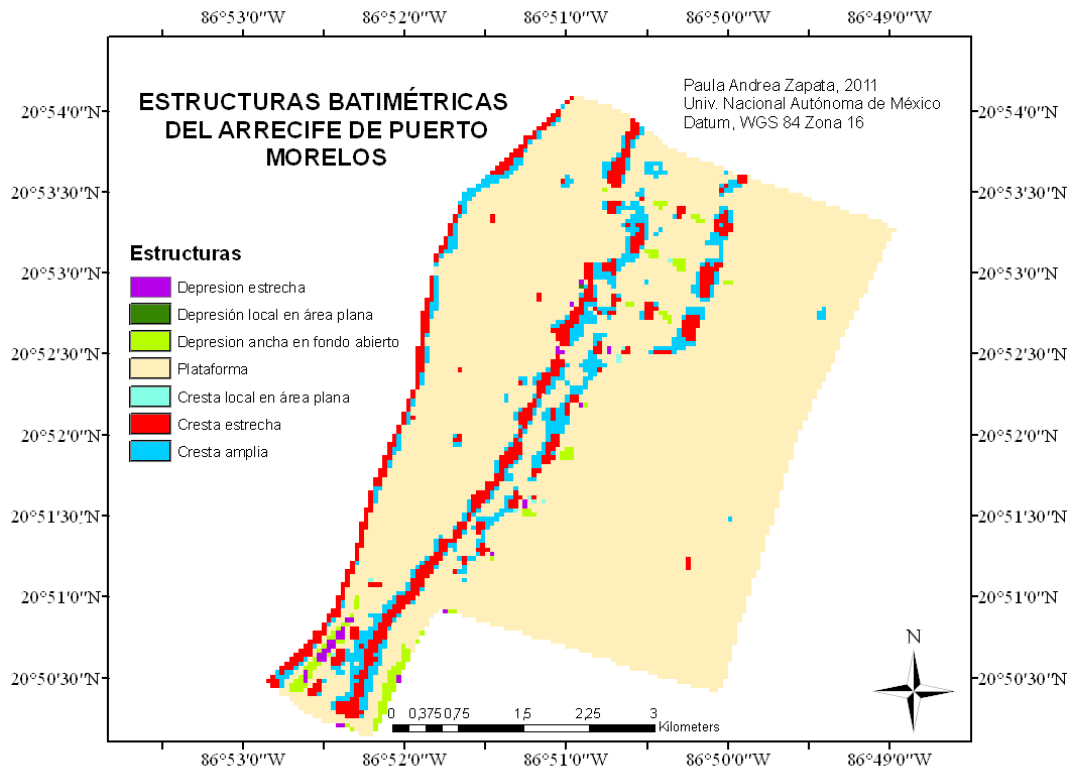


Figura 14. Estructuras batimétricas derivadas del modelo bentico del terreno.

Las estructuras dentro de las zonas muestran mas detalles del terreno. A lo largo de la barrera arrecifal y en otros sectores del área se observa una cresta amplia que ocupa 1.59 Km aproximadamente, seguida por una cresta estrecha de 1.73 Km Por su parte, las demás estructuras mostraron extensiones inferiores a 1 Km de longitud, a excepción de la plataforma arenosa profunda y somera que ocupa una extensión de 22.4 Km aproximadamente. En el mapa se observan claramente las áreas de depresión estrecha en morado (0.9 Km) en las que se destaca por ejemplo el área del canal de navegación del Puerto de Puerto Morelos y la bocana chica. Estas depresiones podrían ser interpretadas como puntos de erosión dentro de zonas de fracturas.

La mayoría de los parches arrecifales presentes en la laguna están bien definidos. Sin embargo, no se observa en ellos una orientación determinada en el substrato

subyacente (Figura 14). Esta forma de crecimiento ilustra un crecimiento rápido y lateral del arrecife sobre las pendientes que se desarrollan sobre los afloramientos rocosos allí presentes.

A los 20.85.13 Latitud Norte y los -86.86.98.11 Longitud Oeste por ejemplo, se observa claramente la cresta estrecha formada por el depósito de tormenta que fue observado y grabado durante las salidas de campo. La cresta estrecha formo una pared perpendicular a la cresta arrecifal, conformada en su totalidad por fragmentos de *Acropora Palmata* ya colonizados por tapetes de algas filamentosas. (video cd rom).

Por el contrario y al lado completamente opuesto a los 20.89.29 Latitud Norte y los -86.84.96.45 de Longitud Oeste, se observa la cresta local en área plana formando el islote que se encuentra rodeado por *Porites porites* y praderas de fanerógamas.

Se puede observar que existe mayor homogeneidad en la estructura de la cresta estrecha entre la zona de jardines y la bocana chica. Por el contrario, entre Tanchacté y Petempich el arrecife no aflora constantemente, pudiéndose observar en las zonas de cresta estrecha y cresta amplia áreas en donde el arrecife es mas profundo y no se muestra en la superficie. En estos lugares encontramos una serie de pequeños bajos sucesivos separados entre sí y que en algunas ocasiones están divididos por depresiones estrechas como en el caso de la Bocana chica.

Así mismo, en la misma zona (Tanchacté - Petempich) pero en dirección a la plataforma continental, el modelo muestra zonas sumergidas formadas por terrazas de lozas calcáreas que afloran en el borde del segundo escalón de la plataforma y que delimita a la terraza de roca. Al interior de estas lozas se observa la formación de crestas amplias y estrechas en las que el desarrollo coralino es incipiente aunque se observa la presencia esporádica de octocorales y esponjas. En especial esta zona no es claramente visible desde el aire como se puede observar en las imágenes de satélite, y por lo tanto, no aparecen en otros mapas generados del área de estudio en estudios previos al presente.

Finalmente, la presencia de depresiones en fondo abierto (Figura 14) es únicamente visible en el canal de navegación en la zona de la laguna arrecifal. Las demás zonas en donde se observo la mayoría de este tipo de estructura se presentaron después del arrecife frontal en la terraza de roca, lo que concuerda con los resultados del análisis de retrodispersión acústica que detecta estos lugares que forman bolsas o reservorios de sedimentos al interior de dichas depresiones que se extienden en número y tamaño a medida que la profundidad aumenta.

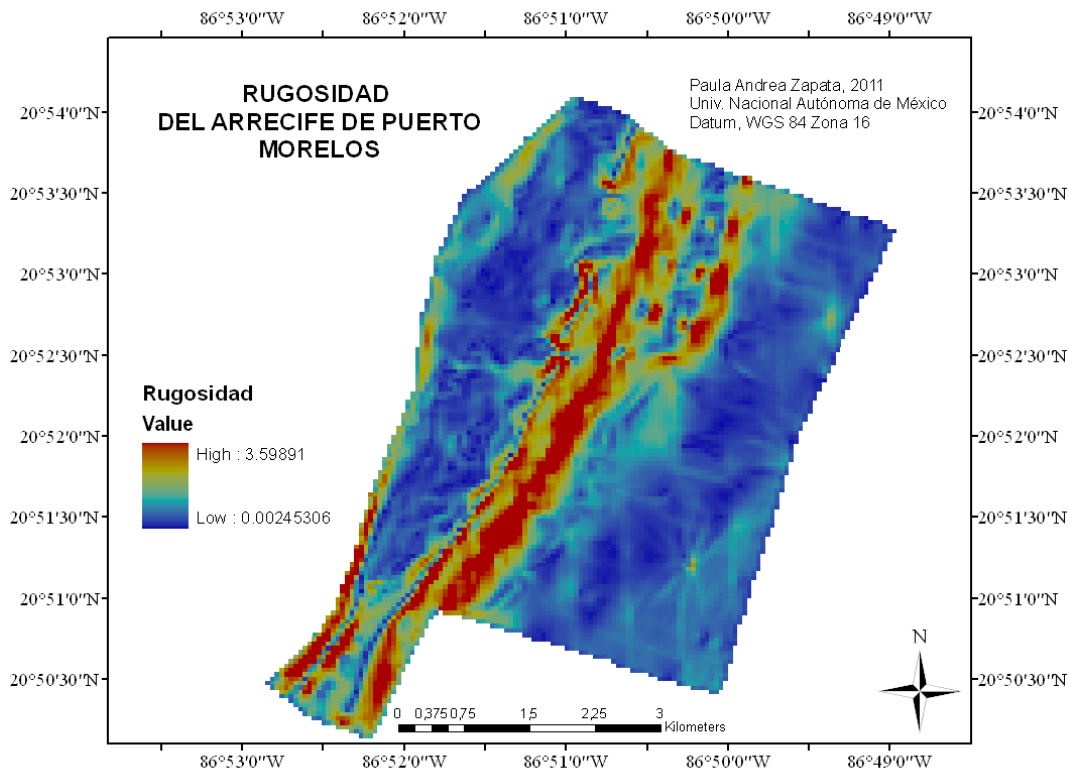


Figura 15. Mapa de rugosidad de la zona de estudio en donde valores de alta rugosidad se denotan en rojo intenso y se en donde se presentan valores superiores a 3 y áreas planas o de pendiente constante se denotan en azul oscuro con valores mínimos de 0.

### 6.2.6 Resultados del modelo de rugosidad y pendiente

Para el desarrollo del mapa predictivo de la rugosidad se tuvieron en cuenta los siguientes términos en un determinado orden los cuales fueron incluidos en el modelo final: 1) la variación del aspecto, 2) la diferencia entre la pendiente desde el análisis de celdas vecinas 3x3, 3) La desviación estandar de la pendiente ((Muy alto (Desv. Est >3), Alto ( Desv. Est 2-3), Medio alto (Desv. Est 1-2), Media (Desv. Est 0-1), Media Baja (Media), Baja (Desv. Est -1- 0)), 4) el logaritmo de la distancia para áreas con alta pendiente, 5) la superficie del área de radio y 6) el análisis de escala fina dentro del índice de posición batimétrico. Todos estos pasos se llevaron a cabo por medio de calculos de regresiones lineales obtenidos con la herramienta de mapa algebraico dentro del ArcMap.

En los resultados del modelo de rugosidad, las zonas planas aparecen como valores por debajo de cero mientras que las crestas aparecen como valores positivos en donde en sus casos mas extremos pueden encontrarse valores de hasta 3.59 de desviación estándar. Valores mucho mas extremos representan características

bénticas mucho más extremas, como en el caso de la cresta arrecifal. Por su parte, áreas planas o áreas con valores de pendiente constante como las observadas en algunas zonas de la laguna y la plataforma arenosa profunda producen valores cercanos a cero.

La zonas con mayor rugosidad y complejidad mostradas por el análisis de la rugosidad y la pendiente fueron las zonas en las que se encontro mayor cantidad de biotopos y por ende mayor biodiversidad (Figura 15 y 16).

Los resultados son consistentes con las observaciones de campo en donde se encontraron claras distinciones entre las zonas de alta rugosidad y pendiente y las áreas de sustratos duros y blandos, lo que permitio una combinacion de los poligonos obtenidos a través de los modelos y los resultados de campo sin que se presentara en los resultados un exceso de sobrelapamiento.

En la zona Norte del área de estudio por ejemplo a a la altura de los 20.83.78 Latitud Norte y los -86.83.78.22 Latitud Oeste se observan altos valores de rugosidad (2,15) que concuerda con la presencia de zonas de cavernas y canales profundos a su alrededor que alcanzan los -13m de profundidad, muy característicos de esta zona. Razon por la cual en varios de los documentos encontrados acerca del área de estudio esta zona es denominada cuevones.

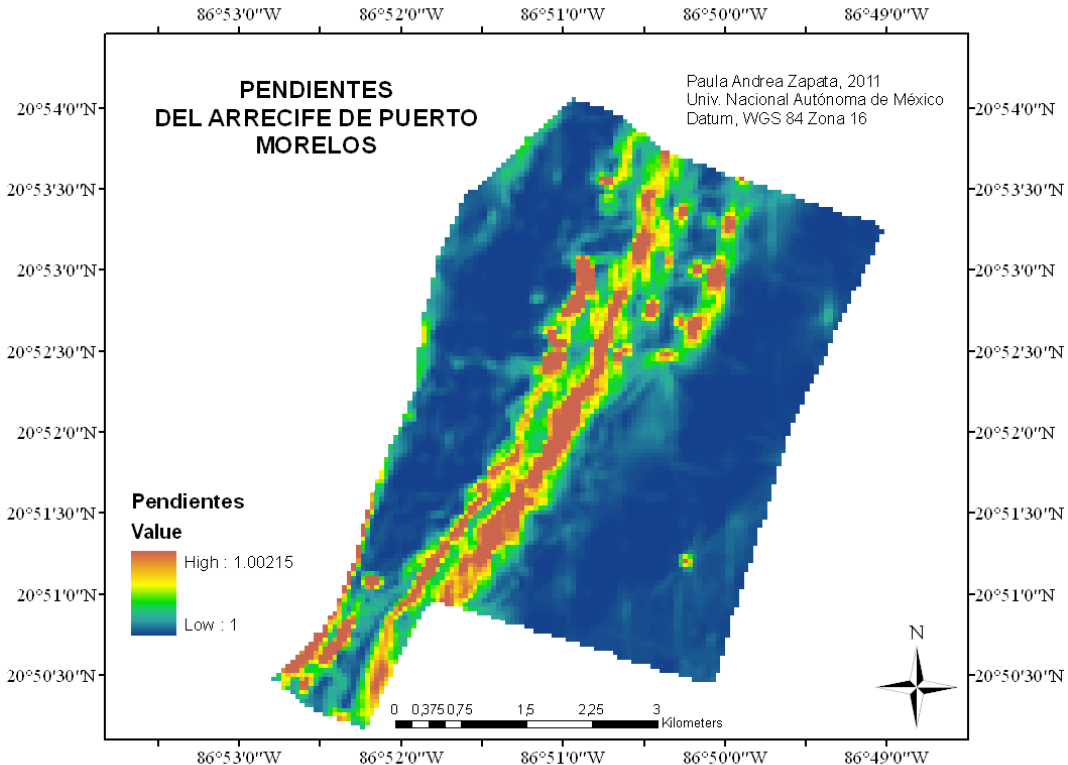


Figura 16. Mapa de pendientes de la zona de estudio en donde valores de alta pendiente se denotan en rojo intenso y áreas planas o de pendiente constante se denotan en azul oscuro.

El modelo batimétrico desarrollado en este estudio permitió tener una cobertura del 100% del fondo con el que posteriormente se desarrollaron mapas cartográficos de la distribución de dos de las variables medioambientales usadas en la caracterización del área: profundidad y reflectividad del fondo. Usando la distribución espacial de los rangos de estos dos factores y con la ayuda del análisis de las imágenes de satélite fue posible llevar a cabo la caracterización de los ensamblajes y definir los principales biotopos que se presentan en el área. Por su parte, el índice de posición batimétrico fue usado para definir la ubicación de características específicas y regiones que están relacionadas con otras características y regiones dentro del mismo set de datos. Estos parámetros permitieron también indicar una preferible orientación de las comunidades bentónicas.

Por ejemplo, los corales formadores de arrecife, generalmente se observaron en profundidades someras y altas pendientes. Su distribución parece estar en dirección a la topografía local y a las anomalías en la morfología del fondo. Éstos, aparecen entre valores de rugosidad de 1- 3. Todos ellos están reportados sobre sustratos duros o sobre afloramientos de pavimento calcáreo y en pendientes localizadas. En contraste, en la parte profunda del área de estudio se observaron corales esporádicos especialmente gorgonáceos y pequeños reclutas de corales mixtos (Cmix) sobre la plataforma arenosa en lugares donde el pavimento calcáreo aflora conformando la UEP Octocorales – Corales Mixtos.

### 6.2.7. Resultados de la evaluación de exactitud del modelo batimétrico

Tabla 5. Resultados de los estadísticos descriptivos utilizados para la evaluación de la exactitud de los modelos acústicos. Valores en metros.

<b>Sesgo</b>	0.0133 m
<b>Error absoluto medio</b>	0.2195 m
<b>Raíz cuadrada del error medio cuadrático</b>	0.4552 m

Por su parte, la figura 17 muestra el histograma de errores del modelo batimétrico. El histograma muestra la distribución de los errores en la población de datos del modelo (número de puntos en el cual cierto número de errores ocurren). La gráfica muestra que solo el 4.2% de los datos tienen errores mayores a 1 m y que solo el 11% de los datos tienen errores mayores a 0.5 m.

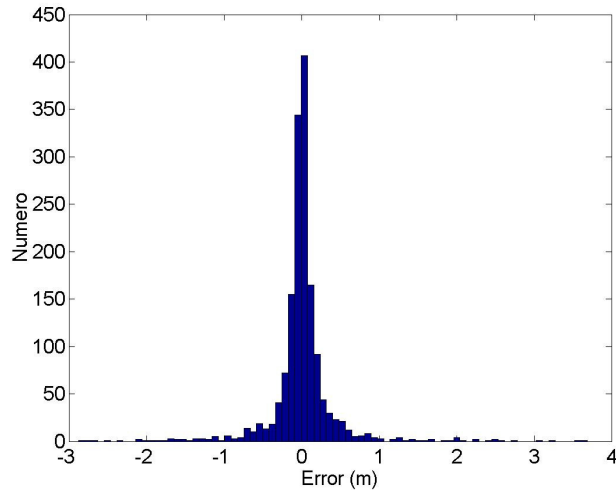


Fig 17. Histograma de frecuencia de la distribución de los errores del modelo batimétrico. Los errores representan la diferencia entre los datos y el modelo. Los números representan los puntos con estos errores. Cada barra tiene una amplitud de 10 cm.

Estos resultados demuestran que el modelo es bastante confiable cuando se compararon los datos reales de campo colectados directamente por la ecosonda con los datos obtenidos por el modelo.

### 6.3 Resultados videos y puntos de control

Se realizaron un total de veinticinco salidas de campo con buceo autónomo recreativo, en las que se recolectó información de la estructura y composición bentónica por medio de video y puntos de control. En los lugares de muestreo se tomaron puntos GPS que se anexaron a una base de datos en donde se anotaron también los atributos observados durante los buceos, tales como la ubicación, la profundidad, las coberturas dominantes en términos de UEP, una descripción del fondo y su geomorfología en términos del relieve. Además se hicieron anotaciones del estado de salud del arrecife (de la presencia de enfermedades asociadas a los corales) y se anotó el número perteneciente a cada video respectivamente.

Paralelamente, se desarrolló otra base de datos como medio de soporte en las que se listaron las especies coralinas más importantes de la zona y del Caribe en general y en las que para cada una de las especies se describieron generalidades como la profundidad en la que se desarrollan, el tipo de hábitat en donde se encuentran y algunas características de su crecimiento y ubicación dentro de los hábitats bentónicos. Esto se hizo con el fin de analizar espacialmente la distribución de los corales (principales constructores arrecifales) dentro del área de estudio, el ambiente bentónico más conspicuo y heterogéneo en la zona.

Varios de los puntos de control y los videos se relacionan con el modelo batimétrico y su Imagen Ikonos, las zonas y estructuras batimétricas, y las áreas de rugosidad y pendiente, lo que permitió una buena exactitud de valoración de la forma de distribución de los hábitats.

La batimetría junto con el análisis de retrodispersión acústica, proporciono atributos con respecto a muchos sitios someros en el Parque. Como ejemplo por un lado tenemos las praderas de fanerógamas que se encontraron a profundidades entre los 3 y 4m. Mientras que por otro lado también obtenemos información sobre la presencia de arenas y limos en estas mismas áreas y profundidades.

El análisis de los videos y los puntos de control produjeron 13 unidades ecológicas de paisaje de acuerdo a una combinación de clasificaciones propuestas por diferentes autores (Madden *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2000; Andréfouët, *et al.*, 2003; Purkis, 2004). Su distribución estuvo caracterizada por factores dependientes de la profundidad, la pendiente, la rugosidad, la localización dentro del macrohábitat y su distribución con respecto a las estructuras bentónicas. Por otra parte, es conocido que tipos de fondo estructuralmente idénticos pueden ser funcionalmente muy diferentes cuando se localizan en diferentes sitios de la plataforma. En algunas ocasiones las UEP pueden estar representadas en mas de un macrohábitat, como es el caso por ejemplo de la laguna en donde el pavimento calcáreo aflora en algunos lugares dando paso a la formación de parches arrecifales dominados por UEP específicas que pueden también desarrollarse en el arrecife posterior o frontal.

La zona de planicie lagunar constituida por sedimentos no consolidados (arena y limo) estuvo representada por la pradera submarina y por la presencia de macroalgas asociadas. Generalmente estas dos UEP fueron observadas en sitios con muy baja rugosidad y pendiente (ver figuras 15 y 16). En cuanto a la profundidad, estas unidades se encontraron en el rango de -1m a -6m. A continuación se describe cada unidad por separado con respecto a las observaciones de campo y los videos.

### ***Unidad macroalgas***

Se caracteriza por la gran exuberancia de las algas frondosas que crecen sobre un sustrato de sedimentos no consolidado y en donde se observan pequeñas colonias de corales masivos muy dispersos sobre el fondo. Las principales especies son *Halimeda incrassata*, *Penicillus* spp, *Rhipocephalus* spp, *Lobophora variegata* y *Dictyota* spp. Así mismo, presenta una fauna acompañante compuesta por organismos que no se



encuentran en otras unidades, como lo son ciertas especies de gasterópodos, y equinodermos.

### ***Unidad Praderas de fanerógamas***

Característica de fondos vegetados por pastos marinos, principalmente por *Thalassia testudinum*, seguida en su orden por *Syringodium filiforme* y *Halodule wrightii*. Algunos corales pétreos, como *Manicina areolata*, y *Porites porites* forma *divaricata* entre otros, se observaron dispersos en algunos sectores de la pradera. Esta unidad es la más representativa de la laguna arrecifal del área de estudio, constituyendo así un componente dominante del paisaje de la plataforma somera. Por otro lado se observaron parches monoespecíficos de *Syringodium filiforme*, especialmente en el arrecife posterior de la estación de Jardines. En algunos sitios de la pradera se presentan también algunas macroalgas (*Halimeda incrassata*, *Penicillus* spp y *Rhipocephalus* spp). Dentro de esta unidad se observaron también invertebrados como la estrella *Oreaster reticulatus*, el erizo *Lytechinus variegatus* y el caracol rosado *Strombus gigas*.

Por su parte, dentro de la laguna se localizaron pequeños parches arrecifales que se desarrollan sobre afloramientos de pavimento calcareo de la plataforma que están expuestos. En algunos casos se observó también la presencia de depósitos de tormenta principalmente constituidos por fragmentos de *Acropora palmata* y en otros casos parches de la misma especie en posición de vida que conforman el andamiaje arrecifal en donde se puede encontrar la UEP de Octocorales – Corales Mixtos. Como un ejemplo se encuentran los parches arrecifales que se encuentran cerca del muelle fiscal de Puerto Morelos en donde se observaron numerosas colonias *Gorgonia flabellum*, *Muriceopsis flavida* and *P/exaura homomalla* sobre los restos de *A.palmata*. Estos lugares alcanzan a formar pequeñas crestas al interior de la laguna (figura 13).

### ***Unidad Porites porites.***

Esta unidad se encontró en lugares de media a baja exposición y sometida a alto intercambio de agua, como detrás o bajo la cresta. En la zona del Islote, la unidad está muy bien representada y se encuentra mezclada con praderas de fanerógamas a una profundidad de -2,68m. Esta se desarrolla sobre una estructura de cresta amplia

en donde el relieve es ondulado y con poca inclinación presentando valores de rugosidad de 0,56 y una pendiente de 1.

### ***Unidad Agaricia tenuifolia***

Esta unidad se encontró en crestas amplias, terrenos ondulados, rugosidades de aproximadamente 1.50 y con poca exposición al oleaje. Generalmente, se observó en el arrecife posterior formando pequeños parches y oscilando en profundidades de -4m a -6m. La unidad está desarrollada casi completamente por sustrato duro coralino denso. Esta estuvo mejor representada en el sector de la bocana chica y frente al hotel Ceiba del Mar. En los dos puntos de control la unidad estuvo invadida por *Halimeda* sp y rodeada por sedimentos finos cubiertos con *Thalassia* y *Syringodium*. Axial mismo, se observó el crecimiento de *P. porites* sobre la especie lo que muchas veces hizo difícil la distinción de sus límites batimétricos y geográficos.

La mayoría de los puntos de control someros están atribuidos a la presencia de la unidad *Millepora – Palythoa*, Algas sobre escombros y Restos de *Acropora* a profundidades que oscilan alrededor del metro de profundidad.

### ***Unidad Millepora – Palythoa***

Se encuentra en la cresta estrecha en donde la rugosidad presenta valores cercanos a 2 aproximadamente y en donde la exposición al oleaje es máxima y a veces emergente (cuando baja la marea)

La zona de rompiente a lo largo de la cresta arrecifal es especialmente, en donde se observa la asociación de corales *Millepora complanata*, *M. alcicornis* y *Palithoa caribbea*. Así mismo, los esqueletos coralinos están cubiertos en buena parte por algas frondosas, especialmente *Dyctiota* spp., y algas costrosas.

### ***Unidad Restos de Acropora palmata***

Como testigos de antiguas barreras se encuentran fragmentos muertos y ocasionalmente setos en posición de vida de *Acropora palmata*, que se están consolidando y sirven como andamio para otras especies. Esta unidad se ubica en la

cresta arrecifal, y se observo tanto en la cresta estrecha como en la cresta amplia. Generalmente se observo en lugares con gran movimiento de agua debido al oleaje y la corriente y donde el relieve es irregular. La rugosidad varía entre valores 1.80 y 2 aproximadamente, en cuanto a la profundidad se encontró entre -0,44m y -2, 25.

Esta unidad está muy bien representada en el sector de la Bocana, en donde se observaron octocorales que se desarrollaron sobre los restos de la especie y en donde también en algunos lugares dentro de la cresta se observa la recuperación de la misma.

### **Unidad Algas sobre escombros**

Dentro de esta unidad se encuentran numerosos hábitats cuyo componente principal en la actualidad lo constituyen las algas y que se presume en un pasado fueron ambientes con activo crecimiento coralino. Los escombros corresponden principalmente a *Acropora palmata* y *A. cervicornis*, que en la actualidad hacen parte de un sustrato calcáreo que se encuentra sobre sedimento no consolidado (arenas). Estos escombros se encuentran cubiertos por una gran variedad de algas que varían en su composición dependiendo del área y la profundidad. Se destacan *Dictyota* spp, *Lobophora variegata*, *Halimeda* spp y las especies constituyentes de los céspedes algales.

Es un componente importante del paisaje a lo largo de la barrera arrecifal y se observo especialmente en lugares en donde la cobertura de corales acropóridos fue importante en el pasado y ubicados cerca de la cresta y en algunos sitios en el arrecife anterior, esta bien representada tanto en estructuras de cresta amplia y cresta estrecha.

Esta unidad se observo con gran cobertura en Jardines somero y en Punta Tanchacté.

### **Unidad Arena-Escombros coralinos**

Esta unidad se caracteriza por presentar fondos cubiertos por arenas gruesas calcáreas y escombros coralinos. Generalmente se observa en la zona del arrecife anterior detrás de la barrera y en algunas zonas de la laguna arrecifal. Estos fondos suelen ser un producto de la acumulación de material calcáreo que es transportado por el oleaje y las corrientes, especialmente durante las tormentas, desde las zonas frontales de los arrecifes. La cobertura biótica es reducida debido a que se trata de ambientes por lo general abrasivos. Es la unidad típica de las terrazas lagunares en los complejos arrecifales oceánicos del Caribe y en las zonas de post-cresta de los

arrecifes franjeantes con rompiente en algunas áreas de la costa continental del Caribe.

### **Unidad *Montastraea spp. con Restos de Acropora cervicornis***

Aunque su rango de profundidad es semejante al de la unidad de *Acropora palmata*, este hábitat se halla en zonas donde la intensidad de la corriente es menor y el relieve es generalmente plano a ondulado, a veces con inclinación leve. Está localizada en un amplio sector de la barrera arrecifal.

La proporción del sustrato duro es casi totalmente aportada por restos de *Acropora cervicornis*. En general, la cantidad de coral vivo es baja y está conformada por *Montastraea faveolata* y *Montastraea annularis* acompañados por *Porites astreoides*, *Porites porites*, *Colpophyllia natans*, *Agaricia tenuifolia*, *Millepora alcicornis*, *Agaricia agaricites* y *Millepora complanata*, entre otras especies. En lugares más profundos se vuelve un ambiente más mixto en cuanto a composición de escleractíneos, y a su vez aumentan los octocorales dentro de los que se resalta la presencia de *Eunicea mammosa*.

Esta puede ser una zona somera y casi monoespecífica de escombros de *A. cervicornis* (de no ser por las algas acompañantes), hasta una zona de mayor profundidad, primordialmente del complejo *Montastraea annularis*, sobre escombros de dicha especie ramificada.

Los restos coralinos están cubiertos en su mayoría por algas frondosas (*Dyctiota spp.*, *Amphiroa spp.*, *Jania spp.*) y costosas. Es común encontrar restos de *P. porites* y *A. tenuifolia* en especial hacia los bordes o donde cambia la pendiente o se encuentra la presencia de grandes canales de arena, comportándose como una zona de transición hacia otras unidades, por lo cual es difícil reconocer sus límites geográficos. Esta se observa en especial en áreas como Punta Petempich, Punta Tanchacté, La bocana del Islote, La bocana y Casa Peligros somero.

### **Unidad *Montastraea spp.***

Comprende un amplio rango de profundidad y de distribución horizontal, con relieve plano e inclinado, altos porcentajes de coral vivo y de sustrato blando. En esta unidad

se puede hacer una división según la profundidad y la composición de especies de coral. Una zona de poca a media profundidad donde predominan *M. annularis* y *M. faveolata* con otras especies de corales masivos (*C. natans*, *P. astreoides*, *S. siderea*, *M. cavernosa*, *Diploria* spp.), algas frondosas y algunos octocorales, generalmente presente a lo largo de la barrera y en el arrecife posterior. Una zona profunda (por debajo de 10 m), donde predomina *M. franksi* con otras especies de hábito en costras o platos como *A. agaricites* (en sus diferentes formas), *Leptoseris cucullata*, *Mycetophyllia* spp. y *M. cavernosa* en el arrecife frontal, además con algas frondosas, céspedes, octocorales y esponjas. Esta unidad ha sido observada especialmente en porciones representativas del arrecife frontal así como en el posterior de las estaciones de muestreo, Casa Peligros, Punta Petempich, La bocana en donde se observaron grandes colonias y Punta Tanchacte.

### **Unidad Corales Mixtos**

Tanto su composición como las características físicas de este hábitat son muy variadas. El rango de profundidad es amplio y presenta diferentes geoformas, sobre planos, canales entre otros, donde gran parte del sustrato es duro, con una alta riqueza de especies tanto de corales pétreos como blandos, esponjas y algas (céspedes, costrosas, frondosas). El porcentaje de coral vivo es muy alto, la proporción de sustrato blando es mayor que en otras unidades y se observa una alta representación de organismos de otras categorías, Entre las principales especies están *Diploria strigosa*, *P. porites*, *A. tenuifolia*, *Montastraea* spp., *C. natans*, *S. siderea*, *P. astreoides*, *Pseudopterogorgia americana*, *Pseudoplexaura* spp. y esponjas.

Pese a que se puede encontrar en casi todos los ambientes, está mejor representada en zonas un poco mas profundas y de relieve ondulado como las que caracterizan el arrecife frontal o posterior en las estructuras de crestas amplias con valores de rugosidad entre 1 – 2. Aquí se desarrollan sobre sustratos duros que se encuentran divididos por canales de arena como los presentes en el área de Punta Petempich y Punta tanchacte, donde se observan colonias de escleractinios usualmente adoptando formas de pagoda o de teja. Se observo generalmente con más frecuencia en zonas en donde la profundidad oscila entre los -5m y los -8m.

La diversidad y cobertura de algas, esponjas y octocorales es generalmente alta. Se destacan géneros como *Sargassum*, *Styopodium* y *Lobophora* entre las algas, *Gorgonia* sp. y *Plexaura* sp. entre los octocorales y numerosas esponjas.

Debido al gran número de especies de coral, se puede comparar con las unidades **Montastraea spp (Mon)** y **Octocorales-Corales mixtos (Oct-Cmix)**, de las que se diferencia por los porcentajes de cobertura de corales y octocorales respectivamente.

### **Unidad Octocorales-Corales mixtos**

Esta unidad se encuentra muy bien representada a lo largo del área de estudio y su composición coralina es muy similar a aquella de la unidad **Corales Mixtos**, diferenciándose de ésta por la elevada cantidad de octocorales y por estar localizada en zonas donde la turbulencia y las corrientes son apreciables.

Se caracteriza por la gran cantidad de octocorales los cuales se encargan de darle a este hábitat su aspecto inconfundible de Jardín submarino, de donde le viene el nombre de “Jardines” a una de las estaciones del área de estudio. Los octocorales dominantes de estos ambientes pertenecen a los géneros *Gorgonia*, *Plexaura* y *Pseudoplexaura*. La composición coralina es muy diversa, con representantes de casi todas las especies conocidas para el Caribe (*Montastraea* spp, *Diploria* spp, *Mycetophyllia* spp, *Madracis* spp, *Agaricia* spp, entre otras). De igual forma, las algas se encuentran muy bien representadas, destacándose especies como *Sargassum hystrix*, *Styopodium zonale*, *Martensia pavonia* y *Lobophora variegata*. Esta unidad se encuentra muy bien representada en toda el área de estudio, especialmente en las estaciones de Jardines profundo y somero, Casa Peligros somero, Ojo de agua profundo y La bocana Chica.

La unidad refleja unos patrones de zonación a larga escala espacial muy marcados en el área, pero que son menos sensitivos a los factores que determinan la estructura comunitaria de los corales escleractinios. La disponibilidad del sustrato y las fuerzas de la acción de la marea son los más importantes factores que afectan la estructura de esta unidad en donde su representante más importante es la presencia de los gorgonáceos.

Como ya se mencionó anteriormente, esta unidad está bien representada en los parches de la laguna arrecifal en donde las especies dominantes son *Gorgonia flabellum*, *Muriceopsis flavida* and *Plexaura homomalla*. Sin embargo, por ejemplo en la zona lagunar en la estación de Jardines somero que se caracteriza por presentar una planicie de pavimento calcáreo que forma extensos canales de arena que los divide, en donde el relieve está ausente y no se presenta ningún tipo de rugosidad visible, las especies *Pseudopterogorgia americana* y *Pterogorgia anceps* parecen ser las dominantes. Mientras tanto, en zonas donde el sustrato está limitado por escombros coralinos y la energía del oleaje es alta, *Gorgonia flabellum* predomina.

Por su parte en la zona arrecifal, la unidad presenta una zonación también bien demarcada. En las estructuras de cresta amplia y estrecha tanto en el arrecife frontal y en algunas ocasiones en la zona de rompiente, entre los -5m y los -10m *Gorgonia flabellum* parece ser la especie dominante. Finalmente, en las zonas más profundas (-19 a -24m) en donde el pavimento calcáreo aflora formando crestas estrechas de mayor cobertura (especialmente al Norte del área de estudio, (figura 14) y la rugosidad se encuentra entre 1 y 2, *Eunicea mammosa* y *Gorgonia ventalina* son las especies mejores representadas.

### **Unidad Arena**

Esta unidad se caracteriza por la poca presencia de organismos, presentándose generalmente el fondo desnudo. Frecuentemente, se presento formando canales someros y profundos que separan las estructuras arrecifales. Esta unidad se observo por ejemplo muy bien representada en las zonas de depresiones estrechas como las del canal de navegación y la Bocana chica. También se presento muy marcadamente separando las estructuras del segundo escalón de la plataforma.

## **6.4. Resultado de los métodos ópticos**

A partir de las mediciones de campo, trece clases fueron suficientes para abarcar los hábitats bentónicos presentes en el área. Sin embargo, el numero biotopos (UEP) observados en campo fue inapropiado para probar separadamente la exactitud de la cobertura de cada tipo de fondo cuando se aplicó la clasificación supervisada de la imagen Ikonos 2006. Un ensayo de clasificación supervisada con estas trece clases no dio una buena precisión: Tau= 48%. Mumby y Green (2000), evaluaron que una exactitud del 80% es requerida para propuestas de manejo. Esta exactitud fue alcanzada después de que las trece clases originales fueron combinadas en seis clases mas amplias, alcanzando una exactitud de 79%.

Las nuevas clases quedaron reagrupadas de la siguiente manera:

### **Cobertura coralina esparcida (Clase 1).**

Octocorales – Corales Mixtos

*Porites porites*

*Agaricia tenuifolia*

*Montastraea* con Restos de *Acropora cervicornis*

Millepora – palythoa

### Fondos vegetados (Clase 2)

Macroalgas

Praderas de fanerógamas.

### Arena somera (Clase 3)

### Densa cobertura coralina viva (Clase 4)

Corales Mixtos

*Montastraea* spp

### Coral muerto y sustrato duro (Clase 5)

Arena – Escombros coralinos

Restos de *Acropora palmata*

Algas sobre escombros

### Arena profunda (Clase 6)

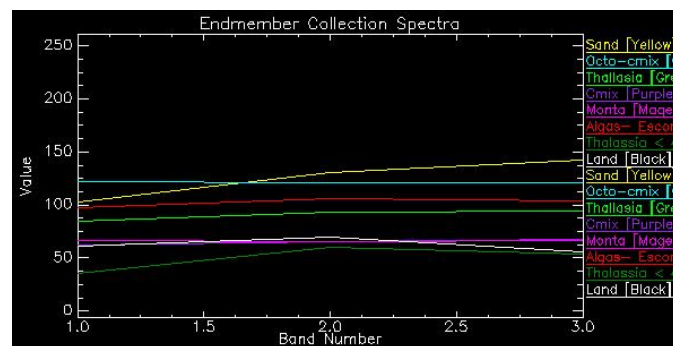


Figura 18. Ejemplo de la similitud en la respuesta espectral encontrada en los diferentes biotopos observados en campo. Nótese por ejemplo, la similitud entre las algas y las fanerógamas marinas y/o la similitud entre la unidad y *Montastraea* y *Thalassia testudinum* la mejor exponente de la unidad de Praderas de Fanerógamas.

Los datos de los puntos de control tomados en campo fueron analizados y usados para crear las áreas de interés. Éstas fueron usadas para extraer las firmas de entrenamiento de la imagen Ikonos para la clasificación supervisada. Sin embargo, a pesar de esta reagrupación de los biotopos en un número menor de clases, la discriminación de los diferentes tipos de fondo continuó dificultando el uso de los sets



de los datos derivados del sensor, esto se presentó principalmente debido a la similitud espectral de los 13 biotopos observados en la zona de estudio (Figura 18).

Dada su similitud espectral las praderas de fanerógamas y de algas marinas se fusionaron en una sola clase. Del mismo modo, la clase corales muertos se fusionó con sustratos duro. Además, las clases de corales inicialmente definidas se fusionaron en dos clases (densa cobertura coralina y coralina cobertura esparcida) en la clasificación final. Esta fusión se realizó con el fin de mantener la información específica sobre la estructura del arrecife, que principalmente se encuentra relacionada con la densa cobertura coralina. Una vista típica de cada uno de las seis últimas clases se presenta en la figura 19.

La tabla 6 representa las matrices de error determinadas por la clasificación basada en la imagen Ikonos. La evaluación de la exactitud de la clasificación revela que los datos de la imagen IKONOS permitió cartografiar la arena (clase 3) y el coral muerto/sustrato duro (clase 5) con una buena exactitud (97% y 92% exactitud del usuario respectivamente), las praderas de fanerógamas y las algas (clase 2) fueron cartografiadas con buena exactitud (85%), pero la exactitud del usuario para las clases de densa cobertura coralina y de cobertura coralina esparcida (clases 1 y 4) fueron bajas a 61% y 65% respectivamente. Esta baja exactitud fue también confirmada por el error de omisión (0.447) en la clase de cobertura coralina esparcida por el largo error de comisión (0.462) de la clase densa cobertura coralina en la matriz de error, en los elementos que se presentan fuera de la diagonal surge de la confusión entre los corales esparcidos y la densa cobertura coralina. Algunas confusiones también ocurrieron entre las clases 2 y 4 (error de comisión 6/52) y entre las clases 6 y las clases 4 y 1 (error de comisión 3/47 y 5/47 respectivamente). Lo que indica que en algunos casos como por ejemplo se está sobreestimando o subestimando la cobertura real de los biotopos.

Así mismo, al calcular el estadístico K, se obtuvo como resultado 0.72. El estadístico Kappa (k) o "Khat", mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar.

El estadístico, intenta delimitar el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación, presidiendo el causado por factores aleatorios. Este valor, indica que el proceso de clasificación fue del 72 %. Nótese que el valor Khat (0.72), es menor que el de la precisión total (78%) calculado previamente.

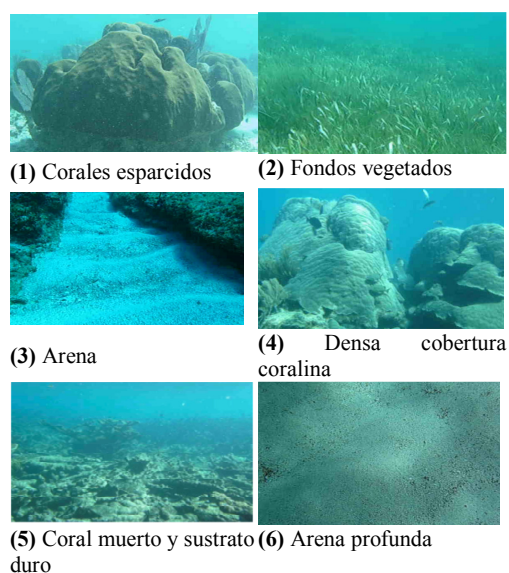


Figura 19. Diferentes biotopos localizados en el arrecife de Puerto Morelos

La diferencia entre estas dos mediciones se debe principalmente a la diferencia de procesamiento de la información de la matriz de confusión. La precisión global sólo incluye los datos de la diagonal principal y excluye los errores de omisión y comisión, mientras que el estadístico KHAT incorpora los elementos que no pertenecen a la diagonal principal, sino a los renglones y las columnas marginales

Tabla 6 Matriz de verificación de error de la clasificación supervisada de la imagen Ikonos. La matriz de error contiene una tabulación de la cantidad de los puntos de muestreo que se encuentran en cada posible combinación con las categorías verdaderas y las asignadas. Como puede verse las tabulaciones a lo largo de la diagonal representan los casos en los que la categoría asignada coincide con el valor verdadero. Cada línea corresponde a los datos de los puntos de control y las columnas representan los resultados de la clasificación de los mismos puntos.

CLASES	1	2	3	4	5	6	Total	Error de Comisión
1 Corales esparcidos	21	1	0	8	0	2	32	0.344
2 Fondos vegetados	1	64	1	1	2	0	69	0.073
3 Arena	0	1	29	0	0	0	30	0.033
4 Densa cobertura viva	13	6	0	28	1	4	52	0.462
5 Coral muerto y sustrato duro	0	1	0	0	58	0	59	0.017
6 Arena profunda	3	0	0	5	1	38	47	0.192
Total	38	73	30	42	62	44	289	
Error de Omisión	0.447	0.123	0.033	0.333	0.065	0.136		0.177

Analizando el mapa de forma más general, varios errores de clasificación fueron evidentes y no fueron contabilizados en la tabla 6. A pesar de que la laguna estuvo generalmente bien representada por la clasificación (en especial las praderas de fanerógamas - algas y la arena) muchos lugares a lo largo de la costa fueron clasificados como coral muerto y sustrato duro cuando en realidad es arena. También se muestran áreas de densa cobertura coralina cerca de la costa y en el centro de la laguna donde solo pequeños parches arrecifales existen y en donde los corales son dominantes únicamente al interior del parche, pero la pradera cubre densamente el fondo que rodea el parche arrecifal, en este caso, los píxeles son espectralmente muy similares y la clasificación de píxeles como los de la pradera (clase 4) están asumidos para presentar una dominancia del tipo de fondo de los corales realmente (Clase 1). Dicha confusión da como resultado una falsa asignación dentro de otra categoría. La cresta y el arrecife anterior estuvieron generalmente bien clasificados.

En el caso del arrecife frontal, la clasificación dio menos información en la identificación de los hábitats. Fondos duros y depósitos arrecifales están erróneamente clasificados como praderas y como la clase densa cobertura coralina viva a lo largo del área de alta energía del arrecife frontal (Figura 20 y 21).

Este no es un hábitat de crecimiento para la pradera, desde que este tipo de biotopo requiere baja energía del oleaje y sustratos no consolidados como la arena o los limos. Sin embargo, si podría existir un crecimiento de algas sobre los fragmentos allí presentes, razón por la cual se puede presentar dicha clasificación en esas zonas.

Varias zonas bentónicas claramente presentes están ausentes en la clasificación, incluyendo la terraza de roca y el escalón del cambio de pendiente que separa la zona de la terraza arenosa profunda como puede verse en la Fig. 21. La clasificación muestra el área dominada por arena con menores sitios de praderas.

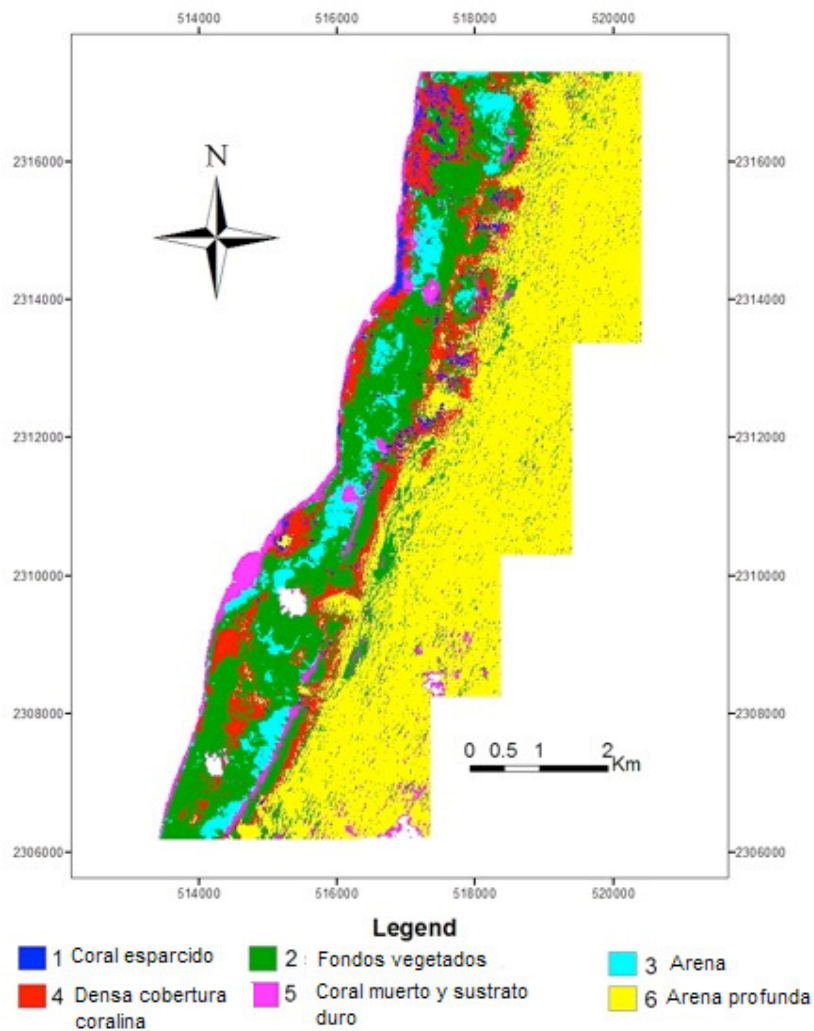


Figura. 20. Mapa de la clasificación supervisada de los biotopos marinos localizados en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. Una tercera parte de la parte Sur del parque no aparece en el mapa debido a la presencia de nubes en la imagen.

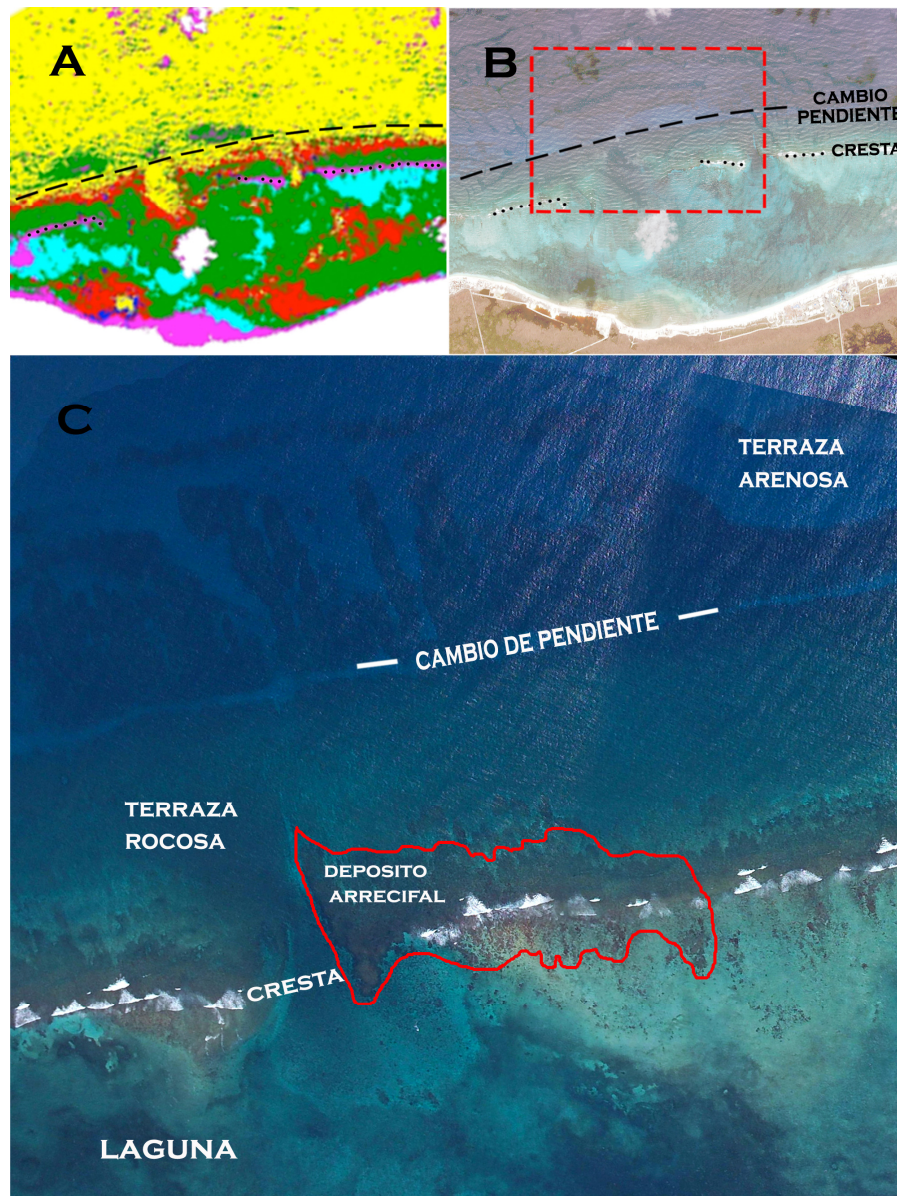


Figura 21. A) Clasificación predictiva de los hábitats bentónicos delineando el perímetro entre la cresta y el escalón del cambio de pendiente B) Realce en verdadero color de la imagen IKONOS de la misma área C) Fotografía área del área de la caja roja en la imagen B, mostrando la posición del depósito arrecifal (contorno rojo).

Algunas de las diferencias observadas fueron un resultado del nivel de discriminación entre las categorías de mapeo de los biotopos y/o las diferencias en la penetración de la luz en la columna de agua. Esto ocurrió por ejemplo en lugares donde la unidad denso coral muerto (Clase 5) fue erróneamente clasificada como fondos vegetados a lo largo de la cresta arrecifal un área de alta energía. Por otra parte, los escombros coralinos y las algas sobre escombros también (Clase 5), presentaron varios

inconvenientes en la clasificación. Suelos desnudos como las arenas podrían estar colonizados por una delgada capa de algas que altera la reflectancia espectral del tipo de fondo. Similarmente, una distinción tuvo que hacerse cuando se decidió agregar la clase escombros coralinos dentro de la clase arena ya que también comparten similitudes espectrales.

### **6.5 Resultados de la integración de los datos en el SIG**

Todos los datos obtenidos fueron integrados dentro del SIG. Dicha integración permitió la visualización y comparación de los datos obtenidos en campo por medio de los videos y los puntos de control con los datos acústicos y ópticos generados a través de los diferentes métodos de clasificación.

El proyecto SIG fue utilizado en el presente estudio para guiar más concentradamente las observaciones hechas en campo así como los muestreos acústicos. La figura 22. muestra un ejemplo de la interface SIG que fue utilizada con los puntos de control a partir de los cuales se realizó el entrenamiento para la clasificación supervisada de los datos ópticos. Así mismo, los mapas acústicos fueron analizados por medio del SIG con el fin de extraer las diferentes clases acústicas, las cuales fueron aplicadas para la identificación de los diferentes tipos de fondos bentónicos presentes en el área (ver resultados de los métodos acústicos). La aplicación del SIG permitió así guiar más en concreto las observaciones y cartografiar rápidamente la distribución de los hábitats bentónicos. La compilación de los datos acústicos y ópticos dentro del SIG también permitió la interpretación de la distribución de los hábitats bentónicos dentro del área y la relación entre el set de datos.

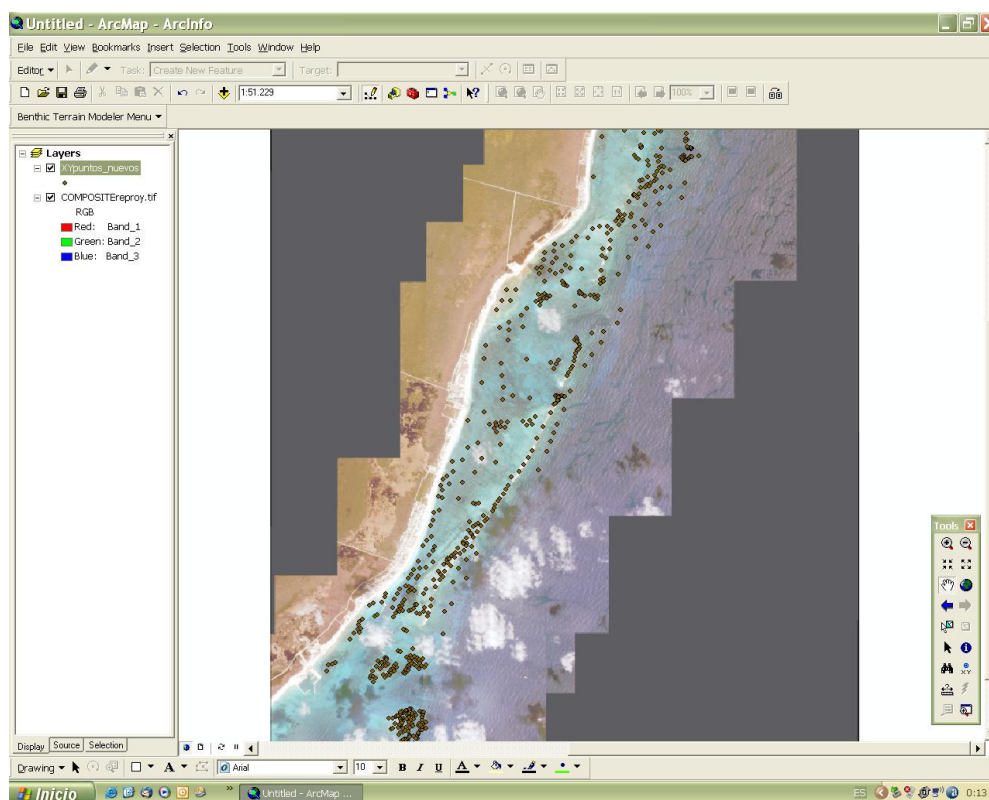


Figura 22. Puntos de control dentro del SIG. Los puntos permitieron la fase de entrenamiento de la Imagen Ikonos, a partir de la cual se realizó la clasificación supervisada.

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1 Macrohábitat y hábitat

La investigación aquí presentada está basada en dos supuestos. En primer lugar, que las técnicas de percepción remota pueden mapear con precisión la morfología de los ambientes bentónicos presentes en el Parque Arrecife de Puerto Morelos, y segundo, que los patrones morfológicos observados reflejan el tiempo integrado de respuesta del crecimiento de los hábitats ante los factores ambientales imperantes en la zona que controlan su desarrollo. Los resultados preliminares no refutan los supuestos presentados por otros investigadores y en ellos se recalca que el conocimiento de las propiedades físicas del fondo es necesario para entender los procesos de cambios medioambientales, la morfología submarina, los procesos sedimentarios, la inestabilidad del fondo y la naturaleza de los hábitats marinos (Nasser y Hatcher, 2000; Hopley *et al.*, 2007; Rattray *et al.*, 2009) y en donde, la composición del fondo y su estabilidad son uno de los principales controles que limitan el desarrollo del ecosistema.

Para describir la zonación arrecifal (Done 1983) propuso que esta no es causada por la variabilidad ambiental en sí misma, sino por su estratificación en la superficie arrecifal, en donde grandes porciones de topografía uniforme están caracterizadas por condiciones fóticas, hidrodinámicas y de sustrato que abarcan solo una fracción de la variabilidad total del ecosistema. Las características topográficas a pequeña escala brindan información puntual de la distribución de los hábitats en la zona, por el contrario un patrón ambiental a gran escala conforma los macrohábitats presentes los que a su vez están determinados por la historia geológica y la localidad geográfica la cual se ha mantenido constante a través del tiempo ecológico.

Los resultados acústicos obtenidos en este estudio, revelan que el ambiente arrecifal está asociado con irregularidades positivas del fondo tales como; crestas amplias, crestas estrechas, crestas en fondos planos (como en el caso de los parches arrecifales de la laguna) y con pendientes localizadas. La geomorfología y la zonación biótica del arrecife de Puerto Morelos han sido descritas con gran detalle (Jordán, 1979; Jordán, 1989). Estos primeros estudios arrojaron interpretaciones de los patrones que controlan el crecimiento del arrecife y se basaron sobre observaciones de campo hechas en puntos de muestreo específicos en el área con técnicas de monitoreo convencionales para la época de estudio (e.g: método de la cadena). El autor 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 el la zona protegida el desarrollo es elevado. Los resultados de la presente investigación confirman los hallazgos previos reportados por el autor para el área de estudio. Las observaciones hechas en el presente estudio muestran que en la porción norte del arrecife frontal solo se encuentran algunas pequeñas plataformas de pavimento calcáreo con poca rugosidad y pendiente dominadas por octocorales, algas y pequeñas colonias de coral escleractíneo conformando la UEP Octocorales-Corales mixtos, mientras que zonas del arrecife anterior se encontraron generalmente dominadas por las UEP Corales Mixtos y *Montastraea* spp. en las que se observaron áreas con alta rugosidad, diversidad y mayor desarrollo arrecifal.

Resultados de otras investigaciones en el mundo, son coherentes con los encontrados en la presente investigación y los reportados por Jordán, (1989). Hopley *et al.*, (2007) presento un comprensivo punto de vista general acerca de la geomorfología del arrecife y sus efectos sobre la distribución de la biota en escalas de plataformas continentales. Los autores describen la extensiva variedad en la geomorfología (e.g facies arrecifales), cobertura biótica (corales, algas etc), y la importancia que tiene el tipo de sustrato para entender el ambiente arrecifal.

Al igual que los resultados encontrados en esta investigación los autores muestran que los arrecifes protegidos por el oleaje y las crestas arrecifales son zonas con una mayor diversidad de especies de coral. Así mismo, reportan que el arrecife posterior y la cresta exterior muestran el mas alto crecimiento y desarrollo arrecifal y que generalmente esta zona esta caracterizada por una estructura de una superficie compleja con una significativa formación coralina que se encuentra interrumpida por canales similares a los observados a lo largo de la zona Norte del estudio, más específicamente entre la zona de Tanchacté y Petempich, en donde se observa claramente la formación de los canales que separa las zonas de crestas (Figura 13 y 14).

De la misma manera se observó que la ocurrencia de cualquier ensamblaje coralino en el área de estudio está ligado a la disponibilidad de fondos duros cementados que fueron identificados con el análisis de retrodispersión acústica y que las crestas que se encuentran constituidas de estos fondos duros, están frecuentemente cubiertas por sedimentos móviles y por capas de arena de pocos centímetros de espesor. Se identifico también que las áreas más céntricas de fondos duros detectados por los

análisis acústicos son los mejores sustratos para el asentamiento de larvas coralinas. En estas áreas se desarrollan ensamblajes de pequeños corales.

Otros resultados similares en cuanto a la zonación geomorfológica de los hábitats fueron también reportados en otros arrecifes presentes en el Estado de Quintana Roo, tal es el caso de las descripciones hechas por Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez, (2003), quienes realizan una descripción general para los arrecifes presentes en el Caribe Mexicano, los resultados reportados por Garza – Pérez, (2004), para los arrecifes de Akumal, Boca Paila/Punta Yuyum y Mahahual y el arrecife de Punta Maroma, Ibarra, (2010), entre otros.

La presencia de pequeños parches en la laguna, los afloramientos observados en la terraza rocosa del segundo escalón de la plataforma mejor representada en la zona en Norte del área de estudio y la morfología de la larga cresta que presenta un mayor ensanchamiento en el Norte que en el Sur, reflejan variaciones en la forma del arrecife de Puerto Morelos mostrando que allí existen diferentes facies en el crecimiento y desarrollo de los hábitats.

Para el arrecife de Mahahual por ejemplo Garza – Pérez, (2004), reporta resultados muy similares a los del presente estudio. El autor describe que en la zona Norte de Mahahual solo se encuentran algunas pequeñas plataformas de pavimento calcáreo dominadas por octocorales, algas y pequeñas colonias de coral escleractíneo. Mientras que en la cresta arrecifal en la porción central, el autor reporta que la pendiente arrecifal presenta un sistema de macizos y canales muy desarrollado en el primer escalón de la plataforma y que esta zona de transición se encuentra dominada por pavimento calcáreo y grandes colonias de *Montastraea faveolata* que se va ensanchando y perdiendo complejidad topográfica hacia el sur. Finalmente, describe canales de arena, muy conspicuos en el norte que se mezclan con el primer y el segundo escalón de la pendiente hacia el sur y que este segundo escalón también presenta este gradiente de disminución de complejidad de norte a sur.

Es evidente que en el Caribe los arrecifes actuales que se encuentran a profundidades mayores son más antiguos que sus contrapartes de aguas someras, los cuales sólo pudieron haberse formado durante etapas posteriores a la trasgresión holocénica marina (Gueister 1977; Blanchon y Jones, 1977), momento en que se presume se origino la plataforma continental (Castro del R, 1976). Todo parece indicar que el inicio (start up) del hábitat béntico actual tuvo lugar después de un periodo erosivo. Una vez que la sedimentación empezó las formaciones coralinas iniciaron su proceso de acreción en dirección vertical activando el desarrollo y la extensión de la capa

biológica, manteniéndose en marcha el proceso (Keep up). La estructura se mantuvo progresivamente obstruida con sedimentos y el espacio de acomodación de los organismos estuvo limitado por los mismos. A pesar de esto, el desarrollo continuo (catch up) en la medida que el ritmo sedimentario continuó su proceso.

Nasser (2000), reporta que la proporción de la pendiente arrecifal con respecto a la superficie plana refleja el potencial de la acreción (acumulación) lateral, ya que es el crecimiento de los corales en las pendientes el que suministra de escombros coralinos a las planicies arrecifales. Cuando el asentamiento empieza, los escombros coralinos que se encuentran alrededor de las crestas sirven como sustrato duro para el nuevo asentamiento de especies (Geister, 1977)

Estos sustratos están formados por la precipitación de carbonato de calcio en la columna de agua y sus bordes están frecuentemente cubiertos por sedimentos móviles que tienen pocos centímetros de espesor. Por lo tanto, las zonas más centrales como las crestas estrechas tienen sustratos más duros siendo, de este modo, sitios más apropiados para el asentamiento de las larvas coralinas. En estas áreas, el desarrollo de densos ensamblajes de pequeños corales fue observado durante las campañas de campo. A medida que el coral crece, el crecimiento rápido y más agresivo de *Acropora* empieza a monopolizar el espacio, sombreando el lento crecimiento de favides, poritides y siderastreidas.

Los primeros estudios en la zona (Jordan, 1979, 1980) son concordantes con estos procesos. Jordan, (1980) reporta a *Acropora palmata* como la especie dominante en el arrecife posterior y co-dominante con *Millepora complanata* en la zona de rompiente con coberturas de 31.68% y 14.46% respectivamente. A pesar de la morfología ramificada que la especie presenta, esta es relativamente sensitiva al estrés por sedimentación (Purkis, 2004) y por lo tanto, tienden a ser encontradas en lugares en donde menos sedimentación puede ser resuspendida durante las tormentas, lo que permite que puedan volver a establecerse sobre corales. Como ejemplo tenemos los centros de parches con sustratos duros, como los observados en la laguna arrecifal. Cuando un punto culminante se acerca en este ensamblaje, parches densos monoespecificos de *Acropora* se desarrollan en el centro del pavimento calcáreo. Estos parches densos tienen una talla limitada (la cual es una función fundamental y determinante de las tasas de crecimiento versus la frecuencia de la perturbación), pero que se expande activamente en dirección lateral permitiendo que la estructura arrecifal crezca más ampliamente.

La expansión lateral de las estructuras arrecifales probablemente se deba a la fusión con las múltiples agrupaciones de estructuras adyacentes. Incrementos en la corriente causa crecimientos alargados de las estructuras arrecifales, paralelos a la dirección de la corriente o a lo largo de los canales del fondo. Merino y Otero (1983), realizaron un estudio sobre la dinámica de las corrientes en la zona. Los autores reportan una velocidad promedio de la corriente de 10 cm/s dentro de la laguna arrecifal, con un máximo de 50 cm/s en las discontinuidades de la rompiente arrecifal (bocanas y puerto), en donde se observaron depresiones estrechas posiblemente como resultado de la velocidad del transporte sedimentario y en donde los análisis de retrodispersión acústica detectaron bolsas o reservorios de sedimentos al interior de las mismas.

De acuerdo a dichos autores, las corrientes dominantes se mueven en dirección nor-nordeste y sur-suroeste. Sin embargo, a pesar de que el flujo de agua marina frente a las costas de Quintana Roo es motivado por la Corriente de Yucatán con dirección permanente hacia el norte la cual afecta directamente el arrecife frontal, cerca de la costa suelen presentarse contracorrientes importantes (Coronado *et al.*, 2007) que determinan la dirección y forma de la acreción arrecifal.

Por su parte, el oleaje también participa en la formación de corrientes cerca de la costa, las cuales normalmente son responsables en buena medida del transporte litoral de sedimentos al interior de la laguna y por ende en el desarrollo de la expansión lateral de las estructuras bentónicas allí presentes. Coronado *et al.*, (2007), reportan que las olas producidas por vientos del noreste alcanzan fuera del arrecife de Puerto Morelos una altura promedio de 0.93 m, mientras que las motivadas por vientos del sureste llegan a 0.70 m. Dentro de la laguna arrecifal, la altura del oleaje es mucho menor, con una altura promedio de 0.14 m.

Si los vientos provenientes del noreste ocasionan el mayor oleaje en la zona, es razonable suponer que el transporte litoral dominante a lo largo de la costa sea hacia el sur. El hecho de que se observe un mayor desarrollo en las zonas y estructuras batimétricas en el lado norte y que se pierda complejidad estructural en dirección sur representa un elemento importante que parece confirmar dicha suposición (Figuras 13 y 14), lo que podría afirmar que las corrientes hacia el sur son un evento bastante frecuente, así como lo es el transporte litoral en esa misma dirección. De esta manera las corrientes locales realzan las causas de la interacción entre las masas de agua y la topografía del fondo que controla la sedimentación (Coronado *et al.*, 2007) y dirige la distribución de los hábitats.

Por su parte, la acreción vertical de las estructuras arrecifales como las crestas, modifican la corriente del fondo ya que éstas actúan como un estructura elevada. Ellas están compuestas principalmente por piezas coralinas que estas llenas de sedimentos de grano grueso y de restos de carbonato, probablemente con superficies irregulares en el tope de las crestas.

Las observaciones hechas en campo y los resultados obtenidos por los modelos de zonas y estructuras bentónicas muestran que los canales y las crestas están orientados en la dirección del oleaje que se genera en condiciones normales. Rooney *et al.*, (2008), describe que los canales, crestas y/o surcos, son el resultado de procesos complementarios: elevadas tasas de acumulación de carbonatos sobre las crestas y erosión acelerada de las estructuras en los canales. Estas características de crecimiento han sido moldeadas por el tiempo integrado de la fuerza y de la energía del oleaje (Nasser, 2000; Davis y Fitzgerald, 2004) acelerando la formación de dichas estructuras Rooney *et al.*, (2008).

El espacio entre las crestas y los canales está controlado por el poder del oleaje, como una función de la altura y el periodo de las olas (Davis y Fitzgerald, 2004; Rooney *et al.*, 2008) y podría ser una respuesta armónica a la frecuencia dominante del rompimiento de las mismas (Storlazzi *et al.*, 2003). Storlazzi *et al.*, (2003) también encontró que los surcos y los canales que se encuentran en aguas más someras y más energéticamente expuestas de las plataformas arrecifales tienden a tener baja amplitud y alta frecuencia en la morfología, como los canales observados en la zona de Jardines. En contraste, estructuras de surcos y canales como los observados en la Bocana Chica y Cuevones, los cuales se encuentran más protegidos por la profundidad y por el poder y ángulo de las olas, desarrollan altas amplitudes y bajo perfil de frecuencia. Los autores también reportan que las dimensiones de los canales y los surcos son relativamente estables en los fondos con alta energía, pero exhiben gran variabilidad en profundidades de ambientes más protegidos (Storlazzi *et al.*, 2003).

En efecto, se detecto que las crestas que constituyen los fondos duros son inclusive más dispersas que los sedimentos no consolidados que ocupan 23.14 Km del área estudiada. Esto soporta la idea de que el constante movimiento a través de corrientes y olas como por ejemplo a través de los canales cercanos a la costa (bocanas, canal de navegación, entre otros) son necesarios para mantener el sedimento no consolidado que posteriormente alimenta a la zona lagunar. De esta manera, la presencia de las largas crestas observadas, influyen las condiciones

medioambientales de la zona, canalizando el flujo de sedimentos y de materia orgánica desde la plataforma continental adyacente.

En periodos desfavorables como durante la resuspensión de sedimentos ocasionada por tormentas y huracanes, y/o periodos subóptimos como estrés térmico, el desarrollo de las comunidades arrecifales y bentónicas es menos activo. Es conocido que el poder de las olas ejerce un control directo sobre el crecimiento de los arrecifes modernos y sobre las tasas de crecimiento de la morfología coralina individual (Blanchon *et al.*, 1997; Geister, 1977; Hill *et al.*, 2009).

El estrés provocado por las altas tasas de sedimentación probablemente obliga a los corales a crecer en una dirección vertical. El área de superficie que contiene corales vivos decrece y sus zonas de desarrollo se limitan a las mejores ubicaciones dentro del hábitat bentónico. Solo durante periodos intermitentes de tasas bajas de sedimentación el arrecife puede poner en marcha su crecimiento y desarrollar zonas saludables nuevamente. Con respecto a esta idea, Blanchon *et al.*, (1997), estudiaron la importancia de las tormentas en el desarrollo de las facies arrecifales. Los autores identifican 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*.

El modelo digital del terreno, los modelos bentónicos (figura 11,13 y 14) y observaciones hechas en campo muestran que posiblemente en la actualidad, los corales simplemente cubren la morfología subyacente y no están construyendo una estructura tridimensional, sugiriendo que las repetidas perturbaciones provocadas por la alta frecuencia de intensos huracanes (Gilberto en 1988, Mitch en 1998 y Wilma en el 2005) y tormentas, así como los elevados incrementos en la temperatura del agua en la zona (en 1982, 1983, 1987, 1998, 2005 como los más representativos (Burke y Maidens, 2005), disparan posiblemente la mortalidad coralina, suprimiendo el típico desarrollo continuo del crecimiento arrecifal propuesto por Neuman y Macintyre, (1985) y sugiriendo que estas condiciones han prevalecido en la zona y posiblemente han condicionado un desarrollo interrumpido y de menor magnitud.

El presente estudio muestra que la expresión espacial lateral de esta teoría en la actualidad es incipiente, y que ahora al parecer los ensamblajes detuvieron su estrategia de construcción (give up). Neuman y Macintyre (1985), quienes distinguieron el proceso de mantiene - alcanza - cesa (Keep up, catch up, give up),

proponen que el cese de acreción arrecifal puede ser el resultado de diferentes razones. Entre ellas están, el aumento acelerado en el nivel del mar, el cual incrementa la profundidad del agua hasta el punto donde la producción de carbonato no puede continuar, el cambio imprevisto en las condiciones oceanográficas tales que el ambiente ya no es propicio para la rápida producción de carbonato y los procesos de sedimentación no carbonatada; o una combinación de estos factores. Con lo que respecta a los cambios en las condiciones oceanográficas, éste al parecer es una de las razones más prevalentes en el área de estudio, ya que se ha reportado un aumento constante de nutrientes en la columna de agua al interior de la laguna en los últimos años (Hernández- Terrones *et al.*, (2010); Rodríguez-Martínez *et al.*, (2010)).

Las observaciones realizadas en campo muestran que la mayoría de los ensamblajes se encuentran rodeados por un crecimiento coralino esparcido que nunca llegara a la etapa de construcción de la estructura arrecifal en tres dimensiones. Esto soporta los resultados encontrados por Ward *et al.* (1985), quien reporto para la zona, que la acreción del arrecife moderno es mínima y que las características geomorfológicas actuales están determinadas por la morfología de las antiguas estructuras del pleistoceno.

Resultados similares fueron también mostrados por Riegl (2002), en las Bahamas, indicando que la naturaleza episódica de depósitos de carbonato impacta sobre la discontinuidad espacial de las facies en la zona. El autor observo que grandes regiones de la plataforma están sustentadas por sedimentos antiguos, mientras que la acreción moderna solo crea una delgada capa en concordancia con lo observado en este estudio.

Muy recientemente, Lorenzo – Alvarez *et al.*, (2009), reportaron que los arrecife del Caribe están empezando a perder complejidad estructural mostrándose cada vez más homogéneos y planos a través de toda la región en donde la estructura tridimensional a declinado aproximadamente en un 45 % en los sitios muestreados por su estudio. Los autores muestran que la perdida de complejidad estructural no es lineal y que ha ocurrido sobre distintas fases que coinciden cercanamente con eventos de larga escala que han afectado los ecosistemas arrecifales del Caribe como los presentados durante la mortandad generalizada de los Acroporidos (Bellwood y Hughes, 2001; Gardner *et al.*, 2003), la cual se presento como resultado de la enfermedad de la banda blanca. La enfermedad diezmo aproximadamente el 90 por ciento de la especie estructuralmente dominante, exponiendo su frágil esqueleto ramificado a la

erosión y los huracanes que probablemente condujo a su colapso en los años siguientes (Aronson y Precht, 2001).

Los bajos niveles de cobertura coralina, y presumiblemente la acreción arrecifal en ese momento pudo también haber incrementado las tasas de erosión de la estructura geológica subyacente que ya no se encontraban protegida por el crecimiento activo de corales duros. Todos los eventos importantes que probablemente han impactado en la complejidad del arrecife han ocurrido en medio de un ambiente de cambios no solo en cuanto a la abundancia de corales si no también en la composición de la comunidad (Lorenzo – Alvarez *et al.*, 2009).

Es bien conocido que en zonas de muy alta frecuencia y magnitud de perturbaciones la diversidad también es suprimida debido a la alta variabilidad del ambiente que reduce el éxito reproductivo y la capacidad de la comunidad para madurar o ser recolonizada antes de que el siguiente evento de perturbación se presente nuevamente (Post, 2008).

Estudios recientes (Rodríguez - Martínez *et al.*, 2010) reportan resultados similares en un estudio temporal (1993 – 2005), realizado en las estaciones del CARICOMP en el área de estudio. Los autores encuentran coberturas coralinas bajas a pesar de que la densidad es relativamente alta, ya que las colonias reportadas fueron pequeñas (el 75% de colonias muestreadas presentaron diámetros menores a los 10 cm), sugiriendo altas tasas de reclutamiento coralino pero bajas probabilidades de supervivencia para poder alcanzar grandes tamaños.

En relación al tema Jordán (1989), presentó un modelo para explicar el porqué de se presenta esta 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.

El autor concluye que el bajo desarrollo del arrecife coralino especialmente en la zona frontal se debe a determinantes históricas que han propiciado condiciones de alta severidad ambiental para los corales escleractínios que, sumado a procesos destructivos naturales como los ocurridos por los Acroporidos,



determinan que el desarrollo del arrecife sea lento y que sea interrumpido por el paso de huracanes de alta intensidad (de categorías 4 y 5 en la escala Saffir-Simpson), por lo que la lentitud del proceso de crecimiento adquieran una frecuencia relativa alta.

En contraste, facies lagunares en donde las praderas de fanerógamas son el principal biotopo constituyente y la sucesión ecológica del Atlántico tropical tiende a estar dominada por *Thalassia testudinum*. Algunos autores han propuesto impactos positivos al daño mecánico de las tormentas sobre las praderas en el largo plazo, ya que perturbancias moderadas podrían ayudar a mantener la diversidad de especies en el ecosistema (Fourqurean y Rutten, 2004). Los huracanes causan pérdida de macrófitas benthicas por tres mecanismos: adelgazamiento mecánico, depositación de sedimentos, y erosión de los sedimentos subyacentes. Las tormentas generan parches desnudos en la densa pradera de *T. testudinum* siendo esta colonizada por macrófitos de sucesión temprana, como algas verdes calcáreas y por *Halodule wrightii* y *Syringodium filiforme* aumentando así la diversidad de la pradera disturbada (Williams, 1990).

Rodriguez – Martinez *et al.*, (2010) encontró un incremento constante en la biomasa de la pradera de Puerto Morelos en un periodo de 12 años (1993 – 2005). Posteriormente, los autores reportan que el impacto del huracán Wilma (2005) en las estaciones de muestreo del estudio en general no fueron severas con excepción de la vegetación de la estación del sitio costero, el cual fue enterrado por una capa de sedimentos de 1.1.5m de espesor y que para el 2009 se presentó colonizada por algas y por *Halodule wrightii* y *Syringodium filiforme* confirmando así la hipótesis postulada por Fourqurean y Rutten (2004).

Shapiro y Rohmann (2006), también encuentran en un estudio temporal evaluado con imágenes Landsat, que la pradera costera de la laguna de Vieques, Puerto Rico, ubicada a menos profundidad podría ser más vulnerable a fuertes tormentas comparada con la pradera ubicada en el centro de la laguna, la cual no parece haber sido adversamente afectada durante el tiempo de estudio. Los autores encuentran un decrecimiento en la densidad entre 1985 y 2000 en las zonas cercanas a la costa, aunque las praderas siguen siendo el biotopo dominante en el área. Intuyendo, que las praderas ubicadas en el centro de la laguna podrían haber estado más aisladas de las tormentas debido al aumento en la profundidad.

Además de este papel en el mantenimiento de la diversidad, ha sido propuesto que remoción periódica de sedimentos, materia orgánica, y biomasa por huracanes o tormentas puede ser necesario para la homeostasis a largo plazo de la pradera (Fourqurean y Rutten, 2004). La relativa resiliencia de las praderas al enterramiento no es desconocida ya que éstas habitan frecuentemente áreas con sedimentos móviles. Kendall *et al.*, (2004) especula que los huracanes podrían en efecto estimular el crecimiento de la pradera bajo ciertas condiciones, mejorando la condición de polinización, dispersando las semillas, y propagando la vegetación. Esto podría dar una explicación plausible del porque incluso en ciertas áreas, la pradera continua incrementando incluso durante periodos de mayor actividad de huracanes.

## 7.2 Biotopos

A pesar de que las especies muestran asociaciones con la variabilidad topográfica de los terrenos bénticos (Rattay *et al.*, 2009) y que la estructura del hábitat es frecuentemente asumida para predecir y calcular su función. No obstante, si el nivel de los recursos son una consecuencia de la interacción entre la estructura del hábitat y los factores físicos y biológicos, la estructura del hábitat puede no ser suficiente para poder predecir el significado funcional de un hábitat (Gutiérrez y Iribarne, 2004).

Múltiples estudios han demostrado que las tres dimensiones estructurales del hábitat pueden tener efectos importantes sobre la abundancia de especies particulares, así como sobre la estructura de la comunidad o la riqueza de especies (Brown y Collier, 2008, Brown *et al.*, 2010). Las medidas de la estructura del hábitat son generalmente buenas calculadoras del tamaño del cuerpo y/o de la asociación de organismos debido a las restricciones que la estructura del hábitat impone ante el acceso del organismo o su movimiento (Freeman and Rogers, 2003). Sin embargo, la respuesta de los organismos a la estructura del hábitat no es necesariamente predecible desde, únicamente, sus propiedades de arquitectura. Los procesos físicos pueden, claramente, influenciar sobre la estructura del hábitat en una variedad de sistemas y es probable que diferentes fenómenos desempeñen un papel preponderante dentro del desarrollo de los ambientes.

El uso de propiedades abióticas tiene la ventaja de que los parámetros físicos tales como, la profundidad del agua, la pendiente y las propiedades de los sedimentos, pueden medirse con relativa facilidad y consistentemente en amplias zonas (Post, 2008). Es bien conocido que las especies no se distribuyen de forma aleatoria entre los diferentes hábitats. Por ejemplo, la batimetría es uno de los aspectos más

relevantes en la dinámica ecológica de los hábitats bentónicos. Numerosos estudios muestran que la diversidad de especies está íntimamente relacionada a la profundidad (Purkis, 2004; Hogrefe, 2008). La profundidad es un importante modificador de la distribución de las comunidades biológicas a través de (1) atenuación de la luz, que influye en el crecimiento de especies fotosintéticas y (2) la exposición a la acción de la superficie del oleaje que aumenta en ambientes de alta energía con fuertes asociaciones encontradas entre la profundidad y la estructura de la comunidad biótica (Iampietro *et al.*, 2005).

La luz decae exponencialmente con el incremento de la profundidad y la tasa de decrecimiento es dependiente del tipo de material disuelto y en suspensión (Browne *et al.*, 2010). Esta, ha sido considerada uno de los factores medioambientales para tener en cuenta en la variabilidad en la biomasa, la abundancia y la productividad de las fanerógamas marinas y el factor principal para el establecimiento de la pradera en sus límites de distribución con respecto a la profundidad (Enriquez y Pantoja – Reyes, 2005; Ralph *et al.*, 2007).

Ralph *et al.*, (2007), muestran que la biomasa tiende a decaer cuando la profundidad aumenta presentándose una reducción en la densidad de haces. Los resultados de este estudio son consistentes con los reportados por Enriquez y Pantoja – Reyes, (2005) quienes reportan la presencia de praderas de fanerógamas entre los -1 y -4m de profundidad en el área de estudio. Cuando se desplegaron los puntos de muestreo sobre el modelo digital batimétrico estos se sobrelaparon perfectamente sobre el área sombreada en azul oscuro en el modelo (ver figura 11).

En sistemas de aguas someras costeras, la atenuación de la luz en la columna de agua es altamente variable debido entre otros factores a la resuspensión de sedimentos no consolidados. La resuspensión de sedimentos por acción del oleaje podría dominar la variabilidad espacial y temporal del coeficiente de extinción de la luz en el área de estudio (Enriquez y Pantoja – Reyes, 2005).

Enriquez y Pantoja – Reyes, (2005), encuentran que las diferencias entre sitios con diferente profundidad y coeficiente de atenuación de la luz hacia el fondo (down-welling), resulta en variaciones significantes en la morfología del dosel de la pradera, indicando que la luz podría dominar la respuesta morfológica de *Talassia testudinum* en la laguna arrecifal de Puerto Morelos.

Sin embargo, observaciones realizadas en el presente estudio por medio de los análisis de retrodispersión acústica indican que la distribución de las praderas en el área podría también estar relacionada con la disponibilidad del tipo de sedimentos. Los resultados muestran que zonas areno limosas generalmente estuvieron cubiertos por vegetación especialmente por *Talassia testudinum*. En estos sitios el sonido fue absorbido con mayor intensidad por los sustratos allí presentes a diferencia de sedimentos desnudos como los presentes en la plataforma profunda. Así mismo, los limos presentes en la laguna mostraron rangos de variación en la batimetría que fueron correlacionados con la presencia o ausencia dentro de la pradera contrastando los sedimentos superficiales (limos y sedimentos desnudos) con y sin *T. testudinum* y con variaciones en la biomasa presente que se observó durante los puntos de control en campo. *Thalassia testudinum* ha sido descrita como una especie capaz de alterar los sedimentos superficiales, atrapando finas partículas en su sistema de raíces y permitiendo que se presente una consolidación de los sedimentos (Gray y Elliott, 2009). Los resultados acá presentados indican que las frecuencias acústicas fueron capaces de distinguir áreas caracterizadas por la presencia de fanerógamas. Freitas *et al.*, (2008) también encuentra que métodos acústicos aplicados en la Bahía de Cádiz pudieron reflejar no sólo la influencia de los sedimentos pero también la de las características biológicas en las que se incluye la vegetación marina.

Por su parte, diferentes estudios muestran que la diversidad de especies coralinas tiende a incrementar en función de la profundidad, alcanzando su máximo entre los 20 – 30m y disminuyendo con profundidades mayores (Adrefouet *et al.*, 2001; Mumby *et al.*, 200). Ese efecto de profundidad resulta en una zonación muy marcada en la comunidad arrecifal como la observada en el área de estudio, en donde la mayor concentración de corales se encontró restringida entre los – 1 m y los -10 m.

Los límites superiores de profundidad de los corales hermatípicos están controlados por varios factores físicos y biológicos, mientras que su profundidad máxima depende en gran medida de la disponibilidad de luz. Hay que tener en cuenta que la luz es primordial para la fotosíntesis de las algas simbiotas y que los corales están restringidos a aguas claras y someras. La disponibilidad de la luz para las zooxantelas simbióticas fotosintéticas es un control primordial del entorno sobre el prospero desarrollo de las comunidades bentónicas y el desarrollo de las verdaderas estructuras arrecifales en la mayoría de las áreas (Browne *et al.*, 2010).

Además, la fotosíntesis influye positivamente en la calcificación de los corales y se ha demostrado que bajo condiciones reducidas de luz, los corales producen esqueletos

más frágiles los cuales son más propensos a la fractura (Yentsch *et al.*, 2002; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007; Kleypas, 2007)

Cuando la luz se atenúa en el agua, la radiación fotosintéticamente disponible (PAR) empieza a ser rápidamente limitante del crecimiento y la acreción arrecifal. Es habitual que esto vaya acompañado por una disminución de la cobertura coralina y por el desarrollo de diferentes zonas bentónicas dependiendo de su relación lumínica (Browne, *et al.*, 2010). No obstante, algunos autores sugieren que normalmente las zooxantelas presentes en los corales pueden adaptarse a estos cambios en el campo lumínico cambiando las características de sus sistemas fotosintéticos (Iglesias-Prieto *et al.*, 1992; Yentsch *et al.*, 2002).

Los resultados encontrados en el presente estudio muestran que la distribución de los biotopos presenta una transición en la composición, la abundancia y la morfología coralina desde la profundidad de las zonas de planicies hacia las zonas de pendientes. Las observaciones muestran también que la estructura tridimensional del arrecife afecta el campo lumínico de los corales que pueden encontrarse en zonas más expuestas o más cubiertas que dependen de la estructura circundante. Browne *et al.*, (2010) encontró que no existe un rango de profundidad exacto y de exposición al campo lumínico en los ensamblajes bentónicos presentes en la gran barrera Australiana, ya que los diferentes componentes bentónicos presentes en el área variaron entre sitios con diferentes características geomorfológicas.

Por su parte, elevadas temperaturas pueden causar eventos de blanqueamiento que resultan en la expulsión de las zooxantelas simbiotes y/o en una reducción de la concentración de los pigmentos fotosintéticos (Brown, 1997). A pesar de que los corales podrían recuperarse del blanqueamiento (Iglesias- Prieto *et al.*, 1992), el efecto potencial, tanto fisiológico como ecológico es de amplio alcance. Esto se debe principalmente a que el blanqueamiento resulta de la ruptura de la relación simbiótica con la zooxantelas.

La relación simbiótica es de gran importancia ya que al parecer el blanqueamiento parece ser iniciado por la inactivación de las funciones de los simbiotes fotosintéticos (Iglesias- Prieto *et al.*, 1992). En este contexto, las algas fotosintéticas son un elemento clave en la formación de los arrecifes modernos (Colombo-Bellota *et al.*, 2010).

Eventos de blanqueamiento han sido reportados en el área de estudio en 1995, 1997, 1998 y 2005, pero no con anterioridad a estas fechas (Jordan y Rodríguez – Martínez, 2003). El evento de blanqueamiento de 1998 dejó un extensivo impacto a lo largo de la barrera Mesoamericana. Sin embargo, al parecer, los arrecifes Mexicanos fueron menos afectados por la mortalidad que los arrecifes de Honduras y Belize (Kramer y Kramer, 2002).

Riegl (2001), sugiere que repetidas perturbaciones inducidas por anomalías de calentamiento disparan las mortalidades masivas de coral, suprimiendo también el desarrollo típico de la puesta en marcha del crecimiento arrecifal propuesto por (Neuman y Macintyre, 1985). Por otra parte, desde el punto de vista fisiológico, ha sido demostrado también que el blanqueamiento reduce el crecimiento coralino, las tasas de calcificación y la capacidad reproductiva de los corales (Hoegh – Guldberg y Fine, 2005). Efectos ecológicos podrían reducir el rango de la resiliencia resultando en reemplazamientos de especies coralinas más resistentes al estrés o por último, a un cambio de fase a la dominancia de especies no constructoras de arrecife.

A parte de los eventos naturales descritos anteriormente hay que tener en cuenta que Puerto Morelos está ubicado dentro de una zona turística que se encuentra expuesta a un amplio rango de impactos antropogénicos (pesca, desarrollo hotelero, el vertido incontrolado de aguas residuales entre otros) que podrían estar jugando un papel importante en la variabilidad de los hábitats bentónicos del área.

Los biotopos presentan también una zonación muy marcada, relacionada principalmente con la profundidad y la exposición. Las observaciones realizadas en el presente estudio y los resultados obtenidos por medio de los modelos bentónicos y batimétricos indican posiblemente que la ocurrencia actual de los hábitats bentónicos presentes en el área está relacionada con la velocidad de la corriente dentro de un limitado intervalo de la profundidad del agua. El incremento en la velocidad de la corriente, limita la presencia de coberturas sedimentarias y facilita la presencia de afloramientos rocosos para los organismos sésiles como por ejemplo para las comunidades caracterizadas por gorgonáceos, especialmente *Eunicea mammosa* y *Gorgonia ventalina* muy bien representadas en los afloramientos profundos del segundo escalón del arrecife frontal. Estos organismos que se alimentan de partículas en suspensión, requieren una alta tasa de materia orgánica particulada en la columna de agua y su biomasa depende positivamente de la dinámica del agua (Sánchez *et al.*, 2008). Contrariamente, los sistemas lagunares muestran fuertes procesos sedimentarios y altos niveles de materia orgánica pareciendo ser hábitats apropiados

para organismos detritívoros como los equinodermos y moluscos que generalmente se observaron habitando las densas praderas de fanerógamas marinas.

### **7.2.1 Limitaciones y exactitud de la clasificación de los biotopos**

La geomorfología y la zonación biótica del arrecife de Puerto Morelos está bien descrita (Jordan Dahlgren and Rodríguez Martínez, 2003; Rodríguez Martínez *et al.*, 2010), y por lo tanto presenta una buena oportunidad para evaluar la fidelidad de la clasificación de los hábitats bentónicos usando técnicas de percepción remota óptica. A partir de los resultados del análisis estadístico en la tabla 5, y desde la consistencia del mapa comparado con una imagen aérea, es evidente que la calidad de la clasificación difiere entre zonas. Las comunidades bénticas lagunares fueron en general bien clasificadas, en particular la arena y la clase vegetación (praderas de fanerógamas y algas). Contrariamente, muchos errores de clasificación ocurren en la zona del arrecife frontal y cerca de la costa. En particular la clasificación del arrecife frontal muestra áreas dominadas por arena con minorías de fanerógamas-algas donde en realidad el área consiste en un escalón a la terraza rocosa.

Dos fuentes principales de error pueden explicar los errores de la clasificación: primero, confusión entre similares firmas espectrales de las comunidades bénticas del fondo, los cuales son inherentes para sensores con largos anchos de banda tales como IKONOS y, segundo: modificaciones de la respuesta espectral con la profundidad de la columna de agua.

#### **7.2.1.1 Confusión espectral**

Muchas comunidades bénticas localizadas en el área de estudio tienen similares firmas espectrales debido a que sus curvas de reflectancia están dominadas por pigmentos fotosintéticos (Hedley y Mumby, 2002; Roelfsema, 2009). Esta fue la razón para unir las praderas de fanerógamas con las de algas (en la clase 2). La firma espectral de los corales saludables también está dominada por la presencia de clorofila en sus zooxantelas simbióticas. Esto explica parcialmente la confusión entre las clases de corales (expuesta en la tabla 4, clases 1 y 4) así como la confusión entre las clases de corales y de vegetación cercanos a la costa. Confusiones similares fueron obtenidas por (Purkis, 2005) quien concluye que la división entre las dos clases de corales es arbitraria y no representa una ruptura natural con la realidad. La unión de las dos clases de coral (cobertura coralina esparcida y densa cobertura coralina) podría haber mejorado significativamente la exactitud de la clasificación

desde que la mayoría de errores de la clasificación fue debida a la confusión entre las clases de corales. Sin embargo, este paso de agrupamiento no se realizó ya que en este caso de estudio es necesario mantener la información acerca de la estructura del arrecife, particularmente dada en la clase densa cobertura coralina que está constituida por los principales formadores arrecifales en el área. Además, si se considera las dos clases de corales juntas puede dar una información valiosa acerca de la cobertura de los corales vivos en el área, la cual puede ser usada para evaluar eventos de blanqueamiento e impactos de huracanes.

A pesar de que las praderas de fanerógamas, las algas y los corales tienen similares reflectancias espectrales, ellos pueden usualmente ser diferenciados por patrones en su organización espacial: tipos de fondo dominados por corales son típicamente heterogéneos, mientras que áreas de praderas son relativamente homogéneas (Mumby and Edwards, 2002). Variaciones en la organización espacial y la heterogeneidad pueden también ser factores contribuyentes para las diferencias en la exactitud obtenidas para la cartografía de hábitats marinos en diferentes localidades geográficas (Lim *et al.*, 2009). Adicionalmente, las dificultades de los errores de clasificación han sido reportados por previos estudios en similares hábitats bentónicos, donde la exactitud total del mapa decrece con un incremento en la complejidad o la riqueza de las comunidades bénticas (Purkis, 2004; Roelfsema, 2009; Lim *et al.*, 2009).

Otra fuente de confusión resulta desde firmas espectrales similares entre la arena somera en la costa y la clase corales muertos/sustrato duro. Estos errores de clasificación pueden ser debido a la elevada reflectancia de la arena de la línea de costa la cual muestra reflectancia similar a la de los corales muertos (Schalles *et al.*, 2000). También, en la zona del arrecife anterior, sustratos de corales muertos consisten en fragmentos de *Acropora Palmata* donde las depresiones intersticiales rápidamente se llenan con sedimentos no consolidados y fragmentos ramificados, por lo tanto produciendo una confusión similar con la arena (Purkis, 2004).

Finalmente, confusiones también resultan cuando los sustratos de roca desnuda están cubiertos con una capa de algas, transformando claramente su firma espectral (Hochberg *et al.* 2003, Roelfsema 2009). Esto podría parcialmente explicar la confusión entre las praderas/algas y el coral muerto/sustrato duro visto en el arrecife frontal.



### 7.2.1.2 Modificaciones espectrales

La razón principal de los errores en la clasificación en el área del arrecife frontal podría sin embargo, estar relacionada con el impacto de la absorción de la radiación desde la columna de agua. IGOS (2003) encontraron que cuando se usa información colectada en la parte roja del espectro, la clasificación fue restringida a aproximadamente 5-6m. La información de la luz roja es esencial para mostrar diferencias significativas en el contenido y la actividad de la clorofila, y de esta manera para una clasificación detallada. Para sustratos profundos, solo los anchos de banda azul y verde están disponibles para la clasificación lo cual limita la detección de características prominentes en el arrecife (Maeder *et al.* 2002). Esta limitación es concordante con las medidas de irradiancia hiperespectral llevadas a cabo en el área en el 2010 (Veal *et al.* 2011, Banaszak comunicaciones personales) las cuales muestran que el límite de penetración de la banda roja fue de 12m (50m y 90m en las bandas verde y azul, respectivamente). Este efecto en la profundidad podría por lo tanto explicar el problema del arrecife frontal, ya que cambios en las respuestas espectrales con la profundidad del agua incrementa el riesgo de confusión entre los hábitats (Purkis 2005, Mishra *et al.* 2006). El efecto diferencial de la absorción espectral en el agua también interactúa con la absorción diferencial o la dispersión producida por sustancias disueltas o partículas tales como fitoplancton o elementos minerales. Sin embargo, no se tiene información sobre las condiciones de la columna de agua en el momento de adquisición de la imagen para analizar estos impactos. Por otro lado, correcciones de profundidad han sido propuestas para tener en cuenta la atenuación de la luz (Andréfouët *et al.* 2003, Hedley *et al.* 2005). Sin embargo, estas no fueron aplicadas en el presente estudio ya que el diseño de muestreo en campo tiene en cuenta las variaciones en los hábitats los cuales no son independientes de la profundidad. La implementación de dicha corrección también recae sobre la substracción del valor de la profundidad del agua desde cada uno de los pixeles, asumiendo un comportamiento similar con respecto al tipo de sustrato y la profundidad del agua el cual no se cumple en la práctica (ver. Holden y LeDrew 2002). Resolver tales problemas podría basarse en el uso futuro de modelos de transferencia de radiación en el agua (e.g: Hedley, 2008). El procesamiento de la corrección del brillo solar también afecta la exactitud de la respuesta espectral, en particular cuando la señal original es dominada por el brillo y las correcciones son largas. Esto debería parcialmente tenerse en cuenta para las dificultades en la clasificación del área del arrecife frontal desde que este estuvo fuertemente afectado por el brillo de las olas.

Adicionalmente, se demostró que no solo los gradientes ecológicos son importantes para llevar a cabo la clasificación supervisada, sino que también lo es la composición de la complejidad estructural y la geomorfología que influyen el rendimiento de la clasificación, en donde su exactitud está limitada por la pendiente y el aspecto de la topografía bentónica (Holden y LeDrew, 2002), la disposición en 3-D del arrecife (Hochberg et al., 2003) y el resultante efecto de la luz y la sombra (Hochberg et al., 2003; Hedley, 2005).

Hábitats bénticos en donde existen asociaciones de biotopos más complejas requieren resoluciones espaciales mayores, en las cuales la resolución espacial del sensor debería ser capaz de registrar la variabilidad interna de cada tipo de biotopo antes que la variabilidad entre los biotopos causada por una organización espacial muy heterogénea (Andréfouet *et al.*, 2003).

### **7.3 Posibles mejoras en la clasificación**

La clasificación de los hábitats bentónicos por medios ópticos está supeditada a la correcta exactitud temática de la cartografía de todos los hábitats bentónicos. Como se ha demostrado para Puerto Morelos, sin embargo, un obstáculo fundamental en obtener esta información a partir de los datos de percepción remota óptica es la confusión o modificación de las firmas espectrales en aguas más profundas que 5-6 m, o en áreas impactadas por las olas oceánicas (IGOS, 2003). Tal vez por eso los intentos de clasificar los hábitats bentónicos por medios ópticos han estado hasta ahora restringidos a zonas someras con una mínima actividad de olas tales como los arrecifes de plataforma y las lagunas (Andréfouët *et al.* 2006). Sin embargo, los hábitats de aguas más profundas se desarrollan en las áreas de alto oleaje y gran parte de su diversidad biológica se concentra en áreas de pendiente del arrecife frontal, justo por debajo de la base de las olas (e.g. Sheppard 1982, Blanchon 2011). Como consecuencia, una combinación de técnicas de percepción remota son necesarias para aumentar la precisión en dichas áreas (Mumby *et al.*, 2000).

Hay varias combinaciones posibles que podrían mejorar las clasificaciones: en primer lugar, el uso de librerías espectrales y/o datos hiperespectrales es un requisito básico para poder discriminar las características espectrales de los hábitats bentónicos, (Karpozuli *et al.* 2004, Dekker *et al.* 2010). Segundo, la combinación de técnicas ópticas y acústicas da una mayor exactitud a la caracterización de los elementos bióticos y geomorfológicos (Gibbs *et al.* 2007, ICES 2007). Y finalmente, realizar

mejoras en las verificaciones del muestreo en campo es necesario para entrenar las clasificaciones (Roelfsema 2009).

### **7.3.1 Librerías espectrales**

La exactitud de los datos ópticos multiespectrales pueden ser mejorados utilizando firmas espectrales colectadas desde la biota *in situ* (Karpouzli *et al.* 2004). La consistencia de estas firmas en las diferentes regiones (Hochberg *et al.* 2003, Kutser *et al.* 2006), implica que el uso de librerías espectrales sería muy valioso para la cartografía bentónica inter-regional (Kutser *et al.*, 2006). Por ejemplo, Karpouzli *et al.*, (2004) utilizó librerías espectrales para aumentar el número de clases y por lo tanto mejorar la clasificación de los hábitats bentónicos. Sin embargo, dicho uso está supeditado a las correcciones precisas de los efectos atmosféricos y de la atenuación de la luz en la columna de agua.

### **7.3.2 Estrategia de la verificación de los datos en campo**

Mejorando la verificación en campo puede ayudar en obtener mejores clasificaciones de los hábitats. A pesar de que el método de los puntos de control es una manera rápida y de bajo costo para recoger los datos para la calibración y la validación, Roelfsema (2009) muestra que el uso de transectos lineales puede incrementar la representatividad espacial de la colección de datos para el entrenamiento y la validación de la clasificación. También podría ser posible incrementar la exactitud de la clasificación en futuros estudios añadiendo más puntos de control en áreas donde los errores de clasificación ocurrieron (e.g: disminuyendo los errores de comisión). Este puede ser llevado a cabo ya sea regresando al campo poco tiempo después de la adquisición de la imagen, o a la hora de diseñar una nueva campaña para la nueva adquisición de la imagen.

## **7.4 Consideraciones generales**

Al parecer el destino del desarrollo de los hábitats bentónicos depende de la intensidad de la corriente y de la habilidad de los organismos especialmente los corales para crear las acumulaciones que permanezcan en la corriente. En este sentido, las formaciones arrecifales están forzadas a acumularse verticalmente durante periodos de alto estrés sedimentario y pueden extenderse lateralmente durante periodos de no sedimentación y corrientes fuertes. Al parecer, las características geomorfológicas acá presentadas podrían indicar los procesos del crecimiento lateral (pendientes arrecifales, crestas y capas de arena lagunar) que

reflejan las condiciones modernas del crecimiento arrecifal influenciado por las condiciones hidrodinámicas imperantes en el área.

Las diferentes zonas arrecifales (laguna, cresta, pendiente) presentan a su vez características heterogéneas, lo que deriva en la definición de diferentes biotopos, dominados por comunidades adaptadas al tipo e intensidad de los factores ambientales presentes. No obstante, otros factores biológicos que no fueron tenidos en cuenta en el presente estudio, tales como, la disponibilidad de recursos, la relación predador – presa y la competición ínter especificaría podrían también jugar un importante rol en los patrones de distribución local de los hábitats y este tipo de estudio debería ser también objeto de seguimiento futuro.

## 8. CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta tesis fue el de caracterizar la presencia y el estado actual de los hábitats bentónicos presentes en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos con la cual se generara información de línea base que proporcionara nuevos conocimientos sobre la biodiversidad, estructura y la distribución de los ecosistemas en el área. Este objetivo se cumplió con los resultados obtenidos mediante la implementación de los métodos acústicos y ópticos empleados, que muestran claramente que las escalas naturales pueden ser estimadas utilizando información espacial, no solo basada en la abundancia de especies, si no también basadas en la abundancia de hábitats, la cual será útil para monitorear la dinámica del ecosistema a nivel del hábitat. Los resultados sugieren que los tipos de hábitat presentes en el área de estudio son componentes de una dinámica conectada oceanográfica, biológica y sedimentológicamente que permiten una estimación del nivel del sistema a una longitud de escala.

La naturaleza y la extensión de los hábitats bentónicos presentes en el Parque Natural Arrecife de Puerto Morelos fueron cartografiados utilizando una completa cobertura de datos acústicos, ópticos y de videos georeferenciados que validaron la información obtenida con las técnicas de la percepción remota.

Este estudio estuvo diseñado con el fin de reducir la brecha entre la geología y la biología del crecimiento de los hábitats bentónicos mediante técnicas innovadoras de medición y de enfoques analíticos. Los resultados acá presentados mejoraran nuestro entendimiento sobre procesos fundamentales que controlan el crecimiento, la geomorfología y la productividad de los hábitats presentes en el Parque Arrecife de Puerto Morelos. Las metodologías acá aplicadas podrían ser extendidas al resto de la plataforma de Yucatán.

Se presenta la aplicación de procesos de clasificación automática de imágenes utilizando técnicas de clasificación de árboles de decisión con los cuales se logró realizar una caracterización de amplia escala de los hábitats bentónicos del Parque Natural Arrecife de Puerto Morelos ubicado en el Noreste de Quintana Roo. Los datos acústicos (batimetría, retrodispersión acústica y productos derivados) así como los datos ópticos (clasificaciones supervisadas) fueron integrados con las observaciones de campo colectadas utilizando métodos de videos para modelar los sistemas de entrenamiento y de la evaluación de los mismos. Las técnicas de clasificación adoptadas en este estudio presentan una ventaja substancial sobre los métodos

tradicionales anteriormente usados en el área y presentan una importante información interactiva para futuros estudios de cartografía marina en el área. El estudio fue exitoso en alcanzar sus objetivos: (1) diferentes métodos fueron aplicados con el fin de caracterizar los hábitats bentónicos presentes en el Parque, (2) nuevos esquemas de clasificación fueron desarrollados para identificar índices de posición batimétricos (depresiones, pendientes, planicies, crestas), estructuras así como, métodos de clasificaciones supervisadas de los diferentes biotopos presentes por medio de métodos ópticos, y (3) información de evaluaciones visuales en campo (videos) fueron asociadas con las clasificaciones resultantes.

No obstante, los resultados de la clasificación supervisada de la imagen Ikonos deben ser considerados con precaución, ya que para tener datos con buena exactitud en este tipo de técnica lo ideal es que el muestreo en campo coincida con el tiempo real de la imagen de satélite, hecho imposible de realizar en este trabajo dado que la imagen corresponde a un archivo anterior al muestreo.

Por otro lado, se investigó la fidelidad de la imagen multiespectral IKONOS combinada con los datos de verificación en campo (puntos de control), para cartografiar los hábitats bentónicos presentes en el Parque Natural Arrecife de Puerto Morelos. Fue posible cartografiar los hábitats con una exactitud aceptable en las zonas lagunares y discriminar los principales tipos de hábitats, incluyendo áreas de fanerógamas, corales y sustratos desnudos. Este no fue el caso, sin embargo, de las áreas cercanas a la costa y a la zona del arrecife frontal, donde se presentaron errores de clasificación importantes, así como el fallo en delinear estructuras espaciales evidentes en las imágenes aéreas.

Estas dificultades y fallos ocurrieron en áreas más profundas que 5-8 m donde la profundidad limita la transmisión de la luz (particularmente en el canal rojo), en donde las respuestas espectrales de los hábitats estuvieron demasiado cerca para poder ser discriminadas, o en donde las correcciones del brillo en la imagen fueron demasiado largas. Confusiones espectrales fueron también una razón principal para fusionar las 13 clases inicialmente definidas dentro de 6 clases de categorías más amplias que figuran en la clasificación final, lo que limita claramente la evaluación de la biodiversidad en la zona.

Este estudio muestra que la percepción remota y los SIG son recursos que proveen información complementaria para la diferenciación de los hábitats biológicos. La habilidad para determinar características bióticas a través de mapas es importante ya

que proporciona una nueva dimensión de la información para la gestión de nuestros ecosistemas costeros. Los mapas y metadatos producidos en este estudio presentan una evaluación de línea base de la situación actual y el alcance de los hábitats bentónicos presentes en el Parque Arrecife de Puerto Morelos. Sin embargo, para usar esta metodología en futuras evaluaciones del cambio climático y/o el impacto de los huracanes en el área, mejoras en las capacidades para cartografiar son necesarias, tanto en términos de la discriminación de los hábitats bentónicos como en la discriminación de las estructuras espaciales. Añadir nueva información, como las librerías espectrales, podría mejorar la exactitud del mapa y de la riqueza temática. Pero incluso añadiendo esta información, la evaluación de la exactitud del cambio en la detección a partir de imágenes de series de tiempo es problemática, en particular resolviendo las diferentes exactitudes vinculadas a la variación en las olas, el flujo de sedimento, y las condiciones atmosféricas.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, A. 1989. Composición y estructura de la comunidad de corales hermatípicos en tres zonas representativas de la región de Santa Marta (Punta Betín, Isla Morro Grande y Ensenada de Granate, Mar Caribe, colombiano). Tesis Biol. U. Nal de Colombia. Facultad de Ciencias. Dpto. de Biología. Bogotá. 242 p.
- Acosta-González, G. 2005. Caracterización de hábitat bentónico con énfasis en corales escleractinos en los arrecifes coralinos de la península de Yucatán por medio de un SIG. Tesis de maestría, CINVESTAV – I.P.N. Unidad Mérida. México. 14pp.
- Aguirre-Gómez, R y Morales Manilla, L.M. 2005. Análisis espectral del arrecife coralino de Cayos Arcas, Campeche, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 57. pp. 7-20.*
- Amigos de Sian Ka'an. 2001. TALLER DE CAPACITACION PARA EL MONITOREO DE ARRECIFES. XCALAK, QUINTANA ROO. MEXICO Mayo del 2001 (Resumen). *Guaymas, Sonora, México: Conservación Internacional.*
- Anderson, J.T; Van Holliday, D; Kloser, R; Reid, D.G and Simard, Y. 2008. Acoustic seabed classification: Current practice and future directions. *ICES Journal of Marine Science, Volume 65, Issue 6, Pages 1004-1011.*
- Andréfouët, S; Berkelmans, R; Erkelmans, R; Odriozola, L; Done, T., Oliver, J. and Muller-Karger, F., 2002, Choosing the appropriate spatial resolution for monitoring coral bleaching events using remote sensing. *Coral Reefs, 21*, pp. 147-154. DOI: 10.1007/s00338-002-0233-x
- Andréfouët, S; Kramer, P; Torres-Pulliza, D; Joyce K.E; Hochberg, E.J; Garza-Pérez, R; Mumby, P.J; Riegl, B; Yamano, H; White, W.H; Zubia, M; Brock, J. C; Phinn, S.R; Naseer, A; Hatcher, B.G and Muller-Karger, F.E. 2003. Multi-site evaluation of IKONOS data for classification of tropical coral reef environments. *Remote Sensing of Environment 88*, 128–143p.
- Andréfouët, S., F. E. Muller-Karger, J. A. Robinson, C. J. Kranenburg, D. Torres-Pulliza, S. A. Spraggins, and B. Murch. 2006. Global assessment of modern coral reef extent and diversity for regional science and management applications: a view from space. *in* Y. Suzuki, T. Nakamori, M. Hidaka, H. Kayanne, B. E. Casareto, K. Nadaoka, H. Yamano, M. Tsuchiya, and K. Yamazato, editors. 10th International Coral Reef Symposium. Japanese Coral Reef Society, Okinawa, Japan. CDROM. 1732-1745p.
- Andréfouët, S. 2008. Coral Reef Habitat Mapping Using Remote Sensing: A User vs Producer Perspective. Implications for Research, Management and capacity building, *Journal of Spatial Science*, 53, pp 113 – 129.
- Aronoff S. 2005. Remote sensing for GIS managers. New York, USA. ESRI Press. 487 p.
- Aronson, R. B. & Precht, W. F. 2001 White-band disease and the changing face of Caribbean coral reefs. *Hydrobiologia 460*, 25–38. (doi:10.1023/A:1013103928980).
- Back, W. 1985. Hydrogeology of the Yucatan In W.C. Ward, A.E. Weidie and W. Back (Eds.) *Geology and Hydrogeology of the Yucatan and Quaternary Geology of Northeastern Yucatan Peninsula*. 120 – 124p. New Orleans: New Orleans Geological Society Publications.
- Bastida – Zavala, J.R; Beltran-Torres, AU; Gutierrez-Aguirre, M.A y de la Fuente-Betancur, G. 2000. Evaluación rápida de los arrecifes de parche de Mahahual, Quintana Roo, México. *Revista de Biología Tropical*. 48 (1): 137-143p.



Barnhardt, W.A., Kelley, J.T., Dickson, S.M. and Belknap, D.F., 1998. Mapping the Gulf of Maine with sidescan sonar: a new bottom-type classification for complex seafloors. *Journal of Coastal Research* 14 (2), 646-659p.

Barrios, L. 2000. Evaluación de las principales condiciones de deterioro de los corales pétreos en el Caribe colombiano. Monografía. M. Sc. Biol. Mar. Univ. Nal. de Colombia. Santa Marta. 160 p.

Bejarano, S; Mumby, P.J; Hedley, J.D and Sotheran, I. 2010. Combining optical and acoustic data to enhance the detection of Caribbean forereef habitats, *Remote Sensing of Environment*, 114, pp. 2768–2778.

Bello -Pineda, J; Liceaga -Correa , M. A and Hernández- Nuñez, H. 2005. Using aerial video to train the supervised classification of Landsat TM imagery for coral reef habitats mapping. *Environmental Monitoring and Assessment*. 105: 145–164p.

Bellwood D.R, Hughes, T.P. 2001. Regional –scale assembly rules and biodiversity of coral reefs. *Science* 292: 1532 – 1534.

Bianchi, G and Hoisaeter, T. 1992. Relative merits of using numbers and biomass in fish community studies. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 85:25-33.

Blanchon, P. 2011. Geomorphic Zonation. In *Encyclopedia of Modern Coral Reef: Structure, form and process*, D. Hopley (Ed.), pp. 469-486 (Springer-Verlag Earth Science Series). DOI 10.1007/978-90-481-2639-2

Blanchon, P. and Jones, B. 1997. Hurricane control on shelf edge--reef architecture around Grand Cayman. *Sedimentology*, 44, 479-506.

Bonet, F. 1967. 'Biogeología subsuperficial del Arrecife Alacranes, Yucatán', Instituto de Geología, UNAM. México.

Brown, B.E. 1997. Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs*: 16, Suppl.: S129—S138.

Brown, C.J. and Collier, J.S. 2008. Mapping benthic habitat in regions of gradational substrata: An automated approach utilising geophysical, geological, and biological relationships. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 78, 203e214p.

Browne, N.K; Smithers, S.G and Perry, C.T. 2010. Geomorfology and community structure of Middle Reef, central Great Barrier Reef, Australia: an inner- shelf turbid zone reef subject to episodic mortality events. *Coral Reefs*, 29:683–689.

Burke, L., and J. Maidens. 2004. *Reefs at Risk in the Caribbean* 80 pp., World Resources Institute, Washington, D. C.

Buttler, M; Leblanc, C; Belbin, A. and Macneil, J. 1986. Marine Resource mapping: an introductory manual. FAO. Fish. Tech. Pap.. 274:1-256p.

Camarena -Luhrs, T y Salazar-Vallejo. 1991 Estudios ecológicos preliminares de la zona sur de QUINTANA ROO. Centro de Investigaciones de Quintana Roo. Dirección de investigación científica.

CARIBBEAN COASTAL MARINE PRODUCTIVITY (CARICOMP). 1998. Caribbean coral reef, seagrass and mangrove sites. Editado por Byorn Kjerfve, UNESCO, Paris. 374 p.

Carricart-Ganivet, J. P., & G. Horta-Puga. 1993. Arrecifes de coral en México. En: Biodiversidad Marina y Costera de México. 81-92. Salazar-Vallejo, S. I. y N. E. González (Eds) CONABIO/CIQRO, México. 856 pp.

- Cendales, M. H. 1999. Cartografía, composición y estado actual de los biotópos marinos arrecifales de Isla Rosario, Isla Barú y de los Bajos intermedios del Archipiélago del Rosario. Trabajo de grado Biol. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Bogotá. 113p.
- Chapin, F.S; Mork, K; Solvang, R and Plumtre, A. 2000. Edge Effects on the Understory Bird Community in a Logged Forest in Uganda. *Conservation Biology*. 14 (1): 265-276p.
- Chuvieco, E. 2000. "Fundamentos de Teledetección especial". Ediciones RIALP, Madrid.
- Cochrane, G.R and Lafferty, K.D. 2002. Use of acoustic classification of sidescan sonar data for mapping benthic habitat in the Northern Channel Islands, California. *Continental Shelf Research* 22, 683–690p.
- Cogan, C.B; Todd, B.J; Lawton, P and Noji, T. T. 2009. The role of marine habitat mapping in ecosystem-based Management. *ICES Journal of Marine Science Advance Access published August 6*.
- Colombo-Pallotta, MF., Rodríguez-Román, A and Iglesias-Prieto, R. 2010. Calcification in healthy and bleached *Monatatraea faveolata*: evaluating the role of glycerol and oxygen. In Press. *Coral Reefs*. DOI
- Congalton, R.G., R.G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, **37**, pp. 35-46.
- Congalton, R.G., R.G. Oderwald, and R.A. Mead, 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 49:1671-1678.
- Coronado, C; Candela, J; Iglesias-Prieto, R; Sheinbaum, J; López, M. and F. Ocampo-Torres. 2007. On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon. *Coral reefs*. Volume 26, Number 1: 149-163.
- Costa, B.M; Battista, T.A and Pittman, S.J. Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystem, *Remote Sensing of Environment*, **113**, pp. 1082–1100.
- Cruz-Palacios, V., B.I. van Tussenbroek. 2005. Simulation of hurricane-like disturbances on a Caribbean seagrass bed. *J. Exp. Mar. Biol.Ecol.* 324: 44-60.
- Cruz-Palacios, V and van Tussenbroek, B. 2005. Simulation of hurricane-like disturbances on a Caribbean seagrass bed. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 324: 44– 60.
- Davis, R.A and FitzGerald, D.M., 2004. *Beaches and Coasts*. Blackwell Science Ltd (Malden, Maryland: USA), pp. 353 – 370.
- Dekker, A.G; Anstee, J.M., Botha, E.J; Park, Y.J; Daniel, P; Malthus, T.J.M; Phinn, S.R and Leiper, I.A, 2010, *Methods for Seagrass, Macro-algae and Coral Reef Spectral Measurements*. In *Art, Science and Applications of Reflectance Spectroscopy Symposium*, ASD Inc. and IEEE GRSS, February 23-25, 2010, Boulder, Colorado.
- Díaz, J; Barrios, L.; Cendales, M; Garzón-Ferreira, J; Geiste, J; López-Victoria, M; Ospina, G; Parra – Velandia, F; Pinzón, J; Vargas-Angel, B; Zapata, F y Zea, S. 2000. Áreas coralinas de Colombia. *Publicación Especial. INVEMAR*. Santa Marta. 176p.
- Díaz, R.J., Solan, M. and Valente, R.M., 2004, A review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality, *Journal of Environmental Management*, **73**, pp. 165–181.

- Dunn, D.C y Halpin, P.N. 2009. Rugosity-based regional modeling of hard-bottom habitat. *Marine Ecology Progress Series*. Vol 377: 1-11.
- Dahouh-Guebas, F 2002. The use of remote sensing and GIS in the sustainable management of tropical coastal ecosystems. *Environment, Development and Sustainability* 4: 93–112p.
- Done T. 1983. Coral zonation: its nature and significance. Chapter 7 *In Perspectives in coral reefs*. DJ Barnes (editor). AIMS Contribution No. 200. Hong Kong, 277 pp.
- Dustan, P. Florida Keys: An environmental Evaluation. 2000. *Seas at The Millenium*. 405-414p.
- Duyf, F. (ED.) V. 1985. Atlas of the living reefs of Curaçao and Bonaire (Netherlands Antilles). Foundation for Cultural Cooperation. Holanda. 38p.
- Eastman, J.R. 2003, *IDRISI Kilimanjaro. Guide to GIS and Image Processing. Manual Version 14*, pp. 1-305 (IDRISI Production).
- Enriquez, S and Pantoja – Reyes. N. I. 2005. Form-function analysis of the effect of canopy morphology on leaf self-shading in the seagrass *Thalassia testudinum*. *Oecología* 145: 235–243, doi:[10.1007/s00442-005-0111-7](https://doi.org/10.1007/s00442-005-0111-7).
- Etter, A. 1991. Introducción a la ecología del paisaje: Un marco de integración para los levantamientos ecológicos. IGAC. Bogotá.
- Figueroa Zavala, B. 2008. Evaluación de la sección Uvero –Punta Piedras Costa Maya, Quintana Roo, México: Contribución enfocada al manejo del hábitat. Tesis presentada como requisito parcial para optar para el grado de Maestro e Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural. Ecosur. 114p.
- Fourqurean, J. W and Rutten, L. M. 2004. The impact of hurricane Georges on soft- bottom, back reef communities: site- and species- specific effects in South Florida seagrass beds. *Bulletin of Marine Science* 239, 75(2): 239–257.
- Freeman, S.M; and Rogers, S.I. 2003. A new analytical approach to the characterization of macro-epibenthic habitats: linking species to the environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56. 749–764p.
- Freitas, R., Rodrigues, A. M., Morris, E., Perez-Llorens, J. L., and Quintino, V. 2008. Single-beam acoustic ground discrimination of shallow water habitats: 50 kHz or 200 kHz frequency survey? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78: 613–622.
- García-Gil, S; Durán, R and Vilas, F. 2000. Side scan sonar image and geologic interpretation of the Ría de Pontevedra seafloor (Galicia, NW Spain). *SCI. MAR.*, 64 (4): 393-402p.
- Gardner J.V; Field, M. E; Lee, H and Edwards, B. E. 1991. Ground-Truthing 6.5-kHz Side Scan Sonographs What Are We Really Imaging?. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, N0. B4, Pages 5955-5974.
- Gardner, T. A., Coté , I. M., Gill, J. A., Grant, A and Watkinson, A. R. 2003. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*. 301,958 – 960.
- Garza – Perez, J.R. 2004. Información y Manejo para la Protección de la Biodiversidad de la Barrera Arrecifal de México: Evaluación de Variables, Modelación Espacial del Hábitat y SIG. Tesis de Doctorado, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Unidad Mérida. Departamento de Recursos del Mar. 189p.
- Geister, J. 1977. The influence of wave exposure on the ecological zonation of Caribbean coral reefs. *Proc. 3rd Int. Coral Reef Symp.*, Miami, 1: 23-29.

- Genovese, S. J and Witman J. D. 2004. Wind-mediated diel variation in flow speed in a Jamaican back reef environment: effects on ecological processes. *Bulletin of Marine Science*, 57 (2): 281 – 293.
- Gibbs, A.E., Cochran, S.A., Logan, J.B, and Grossman, E.E., 2007, Benthic habitats and offshore geological resources of Kaloko-Honnok-ohau National Historical park, Hawai'i: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006- 5256, 62 p.
- Gray, J.S and Elliott, M. 2009. *Ecology of Marine Sediments. From Science to Management*. Second edition. Oxford. University Press. 242p.
- Green, E.P., Mumby, P.J., Edwards, A.J. and Clark, C.D. (Eds.). 2000. *Remote Sensing Handbook of Tropical Coastal Management. Coastal Management Sourcebooks, 3*, UNESCO (Paris: France), pp. 57-65.
- Green, E.P and Short, F.T. 2003. *World Atlas of Seagrass*. Prepared by the UNEP World Conservation Monitoring Centre. University of California Press, Berkeley, USA. Case Study 23.3 Puerto Morelos Reef National Park.
- Greene, H.G; Bizzarro, J.J; O'Connell, V.M and Brylinsky, C.K. 2007. Construction of digital potential marine benthic habitat maps using a coded classification scheme and its application. *Special Paper - Geological Association of Canada. Issue 47, 2007, Pages 141-155*.
- Gutiérrez, J.L. and Iribarne, O.O. 2004. Conditional Responses of Organisms to Habitat Structure: An Example from Intertidal Mudflats. *Oecologia*, Vol. 139, No. 4, pp. 572-582.
- Hedley, J.D. and Mumby, P.J. 2002, Biological and remote sensing perspectives on pigmentation in coral reefs, *Advances in Marine Biology*, **43**, pp. 277- 317.
- Hedley, J. D., Harborne, A. R., and Mumby, P. J. 2005. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*. 26, 2017–2112.
- Hedley, J. 2008. A three-dimensional radiative transfer model for shallow water environments. *Opt. Express* 16: 21887–21902, doi:[10.1364/OE.16.021887](https://doi.org/10.1364/OE.16.021887).
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le Cossec, A and Monroy-Ríos, E. 2010. Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution*. 12p
- Hill, J., Tetzlaff, D., Curtis, A and Wood, R. 2009. Modeling shallow marine carbonate depositional systems. *Computers & Geosciences* doi:[10.1016/j.cageo.2008.12.006](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.12.006).
- Hughes, T.P; Graham, N.A.J; Jackson, J.B.C; Mumby, P.J and Steneck, R.S. 2010. Rising to the challenge of sustaining coral reef resilience, *Trends in Ecology & Evolution*, **25**, pp. 633-642.
- Hochberg EJ, Atkinson MJ, and Andréfouët S 2003. Spectral reflectance of coral reef bottom-types worldwide and implications for coral reef remote sensing. *Remote Sens Environ* 85:159–173.
- Hochberg, E. J., Andréfouët, S., & Tyler, M. R. 2003. Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 1724–1729.
- Hoegh-Guldberg, O and M. Fine. 2005. Coral bleaching following wintry weather. *Limnol. Oceanogr.*, 50(1), 265–271.
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.J., Hooten, A.J., Steneck, R.S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C.D., Sale, P.F., Edwards, A.J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C.M., Iglesias-Prieto,

- R., Muthiga, N., Bradbury, R.H., Dubi, A and Hatzioles, M.E. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318:1737-1742
- Holden, H and Ledrew, E. 2002. Measuring and modeling water column effects on hyperspectral reflectance in a coral reef environment, *Remote Sensing of Environment*, **81**, pp. 300-308.
- Holmes, K.W; Van Niel, K.P; Radford, B; Kendrick, G.A and Grove, S.L. 2008. Modelling distribution of marine benthos from hydroacoustics and underwater video. *Continental Shelf Research* 28, 1800– 1810p.
- Ibarra – Fernandez, M.S. 2010. Geomorfología y facies del sistema arrecifal de Punta Maroma, México. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Univ. Nacional. Autónoma de México. 77p.
- ICES. 2007. Acoustic seabed classification of marine physical and biological landscapes. ICES Cooperative Research Report No. 286. 183 pp.
- Iglesias-Prieto, R., Matta, J.L., Robins, W.A and Trench, R.K. 1992 The photosynthetic response to elevated temperature in the symbiotic dinoflagellate *Symbiodinium microadriaticum* in culture. *Proc Natl Acad Sci USA* 89:10302–10305
- IGOS, 2003, IGOS Coral reef sub-theme report, IGOS (Integrated Global Observing Strategy), ICRAN (International Coral Reef Action Network), UNEP (United Nations Environment Programme) <http://coral.unep.ch/igoscrrp.htm>
- Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2000. Programa de Manejo del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. México. Primera Edición.
- Jenness. S. 2004. Calculating landscape surface area from digital elevation models. *Wildlife Society Bulletin*. 32 (3): 829 – 839.
- 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. 1980. Arrecifes coralinos del Noreste de la Península de Yucatán: Estructura comunitaria, un estimador del desarrollo arrecifal. Tesis doctoral, U.A.C.P. Unive, Nal. Aut. Méx. 118p.
- Jordán, E. 1989. Gorgonian community structure and reef zonation patterns on Yucatán corals reefs. *Bulletin of Marine Science*, 45 (3): 678-696.
- Jordán, E and 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.
- Jordan-Dahlgren, E and R.E. Rodriguez-Martinez. 2003. "The Atlantic coral reefs of Mexico," in *Latin American Coral Reefs*. J. Cortes, ed. (Amsterdam: Elsevier Press, 2003), 149p.
- Karpouzli, E; Malthus, T.J and Place, C.J. 2004. Hyperspectral discrimination of coral reef benthic communities in the western Caribbean, *Coral Reefs* 23 pp. 141-151.
- Kendall, T. Battista, and Z. Hillis-Starr. 2004. Long term expansion of a deep *Syringodium filiforme* meadow in St. Croix, US Virgin Islands: the potential role of hurricanes in the dispersal of seeds. *Aquat. Bot.* 78: 15–25.
- Kirk, J.T.O, 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge.

- Kleypas, J.A. 2007. Constraints on predicting coral reef response to climate change. In: Aronson RB (ed) Geological approaches to coral reef ecology. Springer, New York, pp 386–424.
- Kongsberg. 2005. EA 400/600 Sidescan. Echo sounder with combined Sidescan and depth soundings. Kongsberg Maritime AS, Norway.
- Kramer, P.A and P.R. Kramer. 2002. "Transient and Lethal Effects of the 1998 Coral Bleaching Event on the Mesoamerican Reef System." *Proceedings of the Ninth International Coral Reef Symposium 2*:1175-1180.
- Kutser, T; Miller, I and D.L.B, Jupp, 2006. Mapping coral reef benthic substrates using hyperspectral space-borne images and spectral libraries, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **70**, pp. 449- 460.
- Lathrop, R.G; Cole, M; Senyk, N and Butman, B. 2006. Seafloor habitat mapping of the New York Bight incorporating sidescan sonar data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **68**. 221-230.
- Lillesand T.M, R.W Kiefer, J.W Chipman. 2004. Remote sensing and image interpretation. New York, USA. Wiley. 763 p.
- Lim, A; Hedley, J.D; Ledrew, E; Mumby, P.J and Roelfsema, C. 2009. The effects of ecologically determined spatial complexity on the classification accuracy of simulated coral reef images, *Remote Sensing of Environment*, **113**, pp. 965–978
- Lundblad, E.R. 2004. The Development and Application of Benthic Classifications for Coral Reef Ecosystems Below 30 m Depth using Multibeam Bathymetry: Tutuila, American Samoa. A Thesis submitted to Oregon State University. In partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science.
- Lundblad, E.R; Wright, D.J; Miller, J; Larkin, E.M; Rinehart, R; Naar, D.F; Donahue, B.T; Anderson, S.M and Battista, T. 2006. A Benthic Terrain Classification Scheme for American Samoa, *Marine Geodesy*, **29**, pp. 89–111.
- Ma, Z and R.L, Redmond. 1995. Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **61**, pp. 435-439.
- Madden, C.J; Grossman, D.H and Goodin, K.L. 2005. Coastal and marine systems of North America. Framework for an ecological classification standard: version II. NatureServe, Arlington, Virginia.
- Maeder, J; Narumalani, S; Rundquist, D; Perl, R; Schalles, J; Hutchins, K and J, Keck. 2002. Classifying and mapping general coral-reef structure using IKONOS data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **68**, pp. 1297–1305.
- Maling, D.H. 1989. Measurements from maps. Principles and methods of cartometry. Pergamon Press. Oxford. Pp.153-177.
- Martínez, S. 2003. Cambio temporal en la estructura de la comunidad coralina del área de Santa Marta-Parque Tayrona (Caribe colombiano). Trabajo de grado Ecología. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Bogotá. 106p.
- McREA, J.R; Greene, H.G; O'CONNELL, V. M and Wakefield W.W. 1999. Mapping marine habitats with high resolution sidescan sonar. *OCEANOLOGICA ACTA - VOL. 22 - N° 6*. 679 – 686p.
- Mellin, C; Cresswell, I.D and L.C Radke. 2010. On the use of abiotic surrogates to describe marine benthic biodiversity, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **88**, pp. 21-32.

- Membrillo-Venegas N. 1999. Descripción de los paisajes arrecifales en la laguna del Arrecife Alacranes, Yucatán, México. Tesis de Maestría. CINVESTAV, Unidad Mérida-IPN. 119 pp.
- Merino, I. M. y L. D. Otero. 1991. Atlas Ambiental Costero de Puerto Morelos, Quintana Roo. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM/CIQRO. 80 pp.
- Mishra DR, Narumalani S, Rundquist D and M.P, Lawson. 2006. Benthic habitat mapping in tropical marine environments using QuickBird imagery. *Photogramm Eng Rem S* 72:1037–1048
- Mumby, P.J. and Green, E.P., 2000a. Field survey: Building the link between image and reality. *In*: Green, E.P., Mumby, P.J., Edwards, A.J. and Clark, C.D. (Eds.), *Remote Sensing Handbook of Tropical Coastal Management*. Coastal Management Sourcebooks, 3, UNESCO (Paris: France), pp. 57-65.
- Mumby, P.J., 2000b. Methodologies for defining habitats. *In*: Green, E.P., Mumby, P.J., Edwards, A.J. and Clark, C.D. (Eds.), *Remote Sensing Handbook of Tropical Coastal Management*. Coastal. Management Sourcebooks, 3, UNESCO (Paris: France), pp. 131-140.
- Mumby, PJ; Hedley, JD; Chisholm, JRM; Clark, CD; Ripley, H y Jaubert, J 2004. The cover of living and dead corals from airborne remote sensing. *Coral reefs*.
- Mumby, P.J; Skirving, W; Strong, A.E; Hardy, J.T; Ledrew, E.F; Hochberg, E.J; Stumpf, R.P and L.T, David. 2004. Remote sensing of coral reefs and their physical environment, *Marine Pollution Bulletin*, 48, pp. 219–228.
- Mumby, P.J and A.J, Edwards. 2002. Mapping marine environments with IKONOS imagery: enhanced spatial resolution can deliver greater thematic accuracy, *Remote Sensing of Environment*, 82, pp. 248–257
- Nasser, A and B.G, Hatcher. 2000. Assessing the integrated growth response of coral reefs to monsoon forcing using morphometric analysis of reefs in Maldives. *In Proceedings 9th International Coral Reef Symposium*, Bali, Indonesia, 23-27 October 2000, Vol. 1.
- NOAA. 1996. Coral remote sensing workshop. Proceedings and recommendations. Sheraton, Brickell Ave. Miami, Fl. September 17 – 18.
- NOAA, Costal Services Center. 2003. Techniques for spatial analysis and visualization of benthic mapping data. Final Report SAIC Report No 623.
- Oliver, M.A. 1990. Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems* 4: 313-332.
- Padilla, C., D. Gutiérrez, M. Lara and García, C. 1992. Coral Reefs of the Biosphere Reserve of Sian Ka'an, Quintana Roo, México. *Proceedings of the Seventh International Coral Reef Symposium*, Guam, Vol. 2: 986-992.
- Pandolfi, J.M . 2002. Coral community dynamics at multiple scales. *Coral reefs* 21: 13-23 p.
- Picket, S; Wu, J and Cadenasso, M. 1999. Patch dynamics and the ecology of disturbed ground: A Framework for synthesis. 707- 722. *In*: Walker, L.R., editor. *Ecosystems of Disturbed Ground*. Elsevier, Amsterdam.
- Pittman, S.J; Christensen, J.D; Caldow, C; Menza, C and Monaco, M.E. 2007. Predictive mapping of fish species richness across shallow-water seascapes in the Caribbean. *Ecological Modelling* 204, 9–21p.
- Post, A. 2008. The application of physical surrogates to predict the distribution of marine benthic organisms. *Ocean and Coastal Management* 51: 161–179p.

- Purkis, S.J. 2004. Calibration of satellite images of reef environments. PhD Thesis Universiteit Amsterdam. Faculty of Earth and Life Science. Department of Sedimentology and Marine Geology. The Netherlands. ISBN 90-9017043-5. 205p
- Purkis, S.J and Pasterkamp. 2004. Integrating in situ reef- top reflectance spectra with Landsat TM imagery to aid shallow- tropical benthic habitat mapping. *Coral reefs* 23 (1).
- Purkis, S.J., 2005, A “reef-up” approach to classifying coral habitats from IKONOS imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **43**, pp. 1375-1390.
- Quintino, V., Freitas, R., Mamede, R., Ricardo, F., Rodrigues, A. M., Mota, J., Pérez-Ruzafa, A, and Marcos, C. 2010. Remote sensing of underwater vegetation using single-beam acoustics. – *ICES Journal of Marine Science*, 67: 594–605.
- Ralph, P.J; Durako, M.J; Enríquez, S; Collier, C.J and Doblin, M.A. 2007. Impact of light limitation on seagrasses. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 350:176–193.
- Rattray, A; Ierodiaconou, D; Laurenson, L; Burq S and Reston, M. 2009. Hydro-acoustic remote sensing of benthic biological communities on the shallow South East Australian continental shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 84 pp. 237–245.
- Reed, R.A., M.K. Nolen, M.E. Zolensky, I. Bankman, J. Giles, P. Lang, M.I. Mishchenko, and M.N. Ross, 2005: Lidar backscatter properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rocket exhaust particles. *J. Spacecraft Rockets*, **42**, 711-715.
- Reut, Z., Pace, N.G and M.J.P, Heaton. 1985. Computer classification of sea beds by sonar. *Nature* 314, 426-428p.
- Rex, M.A; Stuart, C. T and Etter, R.J. 2001. Do deep-sea nematodes show a positive latitudinal gradient of species diversity? The potential role of depth. *Marine Ecology Progress Series*. Vol. 210: 297–298.
- Riegl, B. 2001. Inhibition of reef framework by frequent disturbance: examples from the Arabian Gulf, South Africa, and the Cayman Islands. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol* 175: 79-1001.
- Riegl, B and S.J, Purkis. 2005. Detection of shallow subtidal corals from IKONOS satellite and QTC View (50, 200 kHz) single-beam sonar data (Arabian Gulf; Dubai, UAE), *Remote Sensing of Environment*, 95, pp. 96- 114.
- Rodríguez-Zaragoza, F.A. 2007. Biodiversidad y funcionamiento de los sistemas arrecifales costeros del Caribe Mexicano. Tesis de Doctorado. CINVESTAV-Mérida, Departamento Recursos del Mar. Instituto Politécnico Nacional, Mexico. 344 pp.
- Rodríguez-Martínez, R. 2008. Community involvement in marine protected areas: The case of Puerto Morelos reef, Mexico. *Journal of Environmental Management*, *Journal of Environmental Management*. Vol 88, Issue 4. Pp 1151 – 1160.
- Rodríguez-Martínez, R.E; Ruíz-Rentería, F; Van Tussenbroek, B; Barba-Santos, G; Escalante-Mancera, E; Jordán-Garza G and Jordán-Dahlgren, E 2010. State and environmental tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP site, Mexico. *Revista de Biología Tropical*.
- Roelfsema, C.M. 2009. Integrating field and remotely sensed data for assessment of coral reef and seagrass habitats. PhD Thesis. The University of Queensland. School of Geography, Planning and Environmental Management. Australia. 251p.
- Roelfsema, C.M., S.R. Phinn, N. Udy and P. Maxwell. 2009. An Integrated Field and Remote Sensing Approach for Mapping Seagrass Cover, Moreton Bay, Australia. *Journal of Spatial Science*. 56, 1 June 2009.



Rooney J, Wessel P, Hoeke R, Weiss J, Baker J, Parrish F, Fletcher CH, Chojnacki J, Garcia M, Brainard R, Vroom P (2008) Geology and geomorphology of coral reefs in the northwestern Hawaiian Islands. In: Riegl BM, Dodge RE (eds) Coral Reefs of the USA. Coral Reefs of the World, Vol 1, Springer, pp. 515-567.

Rooper y Zimmermann. 2007. A bottom-up methodology for integrating underwater video and acoustic mapping for seafloor substrate classification. *Continental shelf research* 27. 947-957.

Royle, A.G., F.L. Clausen, and P. Frederiksen. 1981. Practical Universal Kriging and Automatic Contouring. *Geoprocessing* 1: 377-394.

Sánchez, F; Serrano, A; Parra, A; Ballesteros, M and Cartes, J.E. 2008. Habitat characteristics as determinant of the structure and spatial distribution of epibenthic and demersal communities of Le Danois Banck (Cantabria Sea, N. Spain). *Journal of Marine Systems* 72: 64–86.

Scopélitis, J; Andrefouet, S and C, Largouet. 2007. Modelling coral reef habitat trajectories: Evaluation of an integrated timed automata and remote sensing approach, *Ecological Modelling*, 205, pp. 59-80.

Scopélitis, J; Andrefouet, S; Phinn, S; Arroyo, L; Dellau, M; Cros, A and P, Chabanet. 2010. The next step in shallow coral reef monitoring: Combining remote sensing and in situ approaches, *Marine Pollution Bulletin*, 60, pp. 1956–1968. doi:10.1016/j.marpolbul.2010.07.033.

Shalles, J.F; Maeder, J.A; Rundquist, D.C; Narumalani, S and J, Keck. 2000. Close range, hyperspectral reflectance measurements of coral and other reef substrates. In *Proceedings 9th International Coral Reef Symposium*, Bali, Indonesia, 23-27 October 2000, Vol. 2.

Sheppard, C.R.C. 1982. Coral populations on reef slopes and their major controls, *Marine Ecology Progress Series*, 7, pp. 83–115.

Silva-Casarín R, Mendoza-Baldwin E, Escalante-Mancera E, Mariño-Tapia I, Ruiz-Rentería F. 2009. Oleaje inducido por el huracán Wilma en Puerto Morelos, Q. Roo, México. *Ingeniería hidráulica en México* 24: 93-109

Stewart, W.K; Jiang, M and Marra, M., 1994. A neural network approach to classification of sidescan sonar imagery from a midocean ridge area. *Journal of Oceanic Engineering* 19 (2), 214-223p.

Storlazzi CD, Logan JB and ME, Field. 2003. Quantitative morphology of a fringing reef tract from high-resolution laser bathymetry: Southern Molokai, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin* 115:1344-1355.

Todd, B.J., Kostylev, V.E., and Shaw, J. 2006. Benthic habitat and sun-illuminated seafloor topography, Browns Bank, Scotian Shelf, offshore Nova Scotia. *Geological Survey of Canada, Map 2092A*, scale 1:100 000.

Valdes, C. 1995. *Ecología del paisaje. Aspectos conceptuales y metodológicos para levantamientos integrados*. IDEADE. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

Veal, C.J; Guendulain-García, S.D; Kelvin, J.M; Hough-Guldberg, O and A.T, Banaszak. 2011. Assessment and characterization of aquatic light fields and water quality within ecologically significant lagoons and coral reefs of the Mexican Caribbean, Meso-American Barrier Reef System, *Submitted*.

Wabnitz, C.C; Andréfouët, S; Torres-Pulliza, D; Müller-Karger, F.E and Kramer, P.A. 2008. Regional-scale seagrass habitat mapping in the Wider Caribbean region using Landsat sensors: Applications to conservation and ecology. *Remote Sensing of Environment* 112, 3455–3467p.

Ward, W.C; Weidie, A.E and 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.

Weibel, R and Heller, M. 1991. Digital terrain modelling. *In* Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. y Rhind, D.W. (Eds.). Geographical Information Systems. Longman, Scientific & Technical. Vol.1: 269- 297p.

Wilson, M; O'Connell, B; Brown, C; Guinan, J.C and Grehan, A.J. 2007. Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. *Marine Geodesy*, 30: 3–35.

Williams, S.L. 1990. Experimental Studies of Caribbean Seagrass Bed Development. *Ecological Monographs*. Vol 60 No 4: 449-469p.

Woods-Ballard, J.A; Rix, C.E and Gwenin, S.R (eds). 2005. Global Vision International, Mahahual Annual Report, Global Vision International, México Report Series No. 001.

Yentsch, C.S., Yentsch, C.M., Cullen, J.J., Lapointe, B., Phinney, D.A. and Yentsch, S.W. 2002. Sunlight and water transparency: cornerstones in coral research. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 268: 171-183.