

IMPORTANCIA DE LOS ARRECIFES Y DUNAS EN LA PROTECCION DE LA COSTA

SERIE TÉCNICA. El papel de los sistemas naturales en la dinámica costera
en el Caribe mexicano y el impacto de las actividades humanas
en su condición actual



FERNANDO SECAIRA FAJARDO
CÉSAR ARMANDO ACEVEDO RAMÍREZ

IMPORTANCIA DE LOS ARRECIFES Y DUNAS EN LA PROTECCION DE LA COSTA

SERIE TÉCNICA. El papel de los sistemas naturales en la dinámica costera
en el Caribe mexicano y el impacto de las actividades humanas
en su condición actual

**FERNANDO SECAIRA FAJARDO
CÉSAR ARMANDO ACEVEDO RAMÍREZ**

Diseño editorial
ROSALBA BECERRA

Revisión de texto
CARMEN TORRES ARICEAGA

Foto de portada
MARICARMEN GARCÍA/CONANP



Conservando la naturaleza.
Protegiendo la vida.

DR ©2017 The Nature Conservancy-México
www.nature.org

Forma sugerida de citar: Secaira, Fernando y César Acevedo. 2017.
Importancia de los arrecifes y dunas en la protección de la costa.
Serie técnica. El papel de los sistemas naturales en la dinámica
costera en el caribe mexicano y el impacto de las actividades
humanas en su condición actual. The Nature Conservancy, México.

Agradecimientos

Un cordial y sincero agradecimiento a los investigadores que se involucraron directamente en el proyecto mostrando siempre un invaluable disposición a compartir sus conocimiento e información generada en el área Caribe mexicano: María Luisa Martínez, Mireille del Carmen Escudero Castillo, Cecilia Enriquez, Ismael Mariño Tapia, Edgar Mendoza Baldwin, Rodolfo Silva Casarín, Mario Rebolledo-Vieyra, Lorenzo Alvarez-Filip, Alec Torres-Freyermuth, Juan Bezaury y Rosa Elisa Rodríguez.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
LA BARRERA ARRECIFAL PROTEGE LAS COSTAS	3
1.1 La barrera arrecifal disipa la energía del oleaje y mareas de tormenta, reduciendo el impacto sobre la duna costera y la infraestructura	3
1.1.1 Diferencias morfológicas	4
1.1.2 Hidrodinámica	6
1.1.3 Protección en condiciones de tormenta	6
1.1.4 Protección en condiciones estándar o típicas	11
Conclusión	12
Bibliografía	12
1.2 La barrera arrecifal reduce la probabilidad de que el sedimento de las playas sea transportado fuera del sistema, haciendo más factible la recuperación natural del mismo	14
Conclusión	15
Bibliografía	15
1.3 La barrera arrecifal podría incrementar la cota de inundación debido al fenómeno de resonancia	16
Conclusión	18
Bibliografía	18
1.4 La barrera arrecifal propicia un diferencial en la altura de la columna de agua, entre el nivel interno y externo de la laguna arrecifal, provocando corrientes dentro y fuera de ella (mar abierto), lo cual mantiene el flujo de nutrientes y contaminantes	19
Conclusión	20
Bibliografía	20

1.5 La continua presión antropogénica conduce a la degradación del coral y a la disminución de su tasa de crecimiento, comprometiendo la estructura arrecifal	21
1.5.1 El incremento de la temperatura media del mar disminuye la tasa de calcificación de los corales, aumenta la frecuencia y severidad tanto del blanqueamiento de corales, como de enfermedades y huracanes	24
Conclusión	25
1.5.2 La acidificación del mar ha disminuido la tasa de calcificación de los corales en el Caribe mexicano	25
Conclusión	26
1.5.3 La contaminación del agua proviene de las actividades antropogénicas y afecta los arrecifes al propiciar o exacerbar enfermedades en los corales	26
Conclusión	31
1.5.4 Existe una correlación entre la concentración de nutrientes y la presencia de enfermedades en los corales	32
Conclusión	33
Bibliografía	34

LAS DUNAS PROTEGEN LAS PLAYAS Y LA ZONA COSTERA 37

2.1 La vegetación de duna costera consolida el suelo por medio de sus raíces; atrapa y retiene la arena a través de sus hojas y ramas; por lo tanto, el retiro y deterioro de la vegetación expone el sedimento y facilita su remoción por viento y oleaje	37
Conclusión	42
2.2 La duna funciona como reserva de arena que permite compensar la erosión de la playa en fenómenos de tormenta	42
2.3 La duna representa una protección natural ante las marejadas de tormenta, reduciendo la inundación en las zonas interiores a la duna	43
Conclusión	43
2.4 Las bocas de tormenta permiten el desfogue de los humedales interiores hacia el mar y viceversa, permitiendo una liberación de energía, evitando así un mayor daño a la duna y a la infraestructura presente	52
2.4.1 El recambio natural del agua de la laguna	44
Conclusión	44
Bibliografía	45



INTRODUCCIÓN

El Caribe mexicano tiene una gran biodiversidad y es de mucha importancia económica para México por la gran industria turística que en él se desarrolla. Sin embargo es una zona expuesta al embate de huracanes y sus playas están sujetas a procesos erosivos.

Los sistemas naturales como arrecifes de coral, pastos marinos, dunas costeras y manglares son parte inherente a la dinámica costera y su degradación ha alterado la dicha dinámica provocando problemas como la erosión de las playas, mayor ocurrencia de inundaciones por lluvias intensas y mayor riesgo al impacto de las mareas de tormenta de los huracanes.

A pesar de su importancia, el funcionamiento de esos sistemas es poco conocido por los habitantes locales, tomadores de decisión y empresarios, lo cual ha propiciado que sean destruidos o degradados sin conocer las consecuencias negativas que tendrá en la infraestructura costera y sus pobladores.

El funcionamiento de estos sistemas naturales ha sido estudiado por los centros de investigación como el Instituto de Ingeniería y el Instituto de Ciencias del Mar de la UNAM, por el Cinvestav y otras universidades mexicanas y extranjeras, por lo que se cuenta con sólido respaldo científico que comprueba su importancia.

El objetivo de este reporte es demostrar la importancia de los sistemas naturales como medios de protección de la costa, enfocándose en los arrecifes de coral y las dunas costeras por medio de la compilación de información científica reciente, la exposición de sus resultados, la explicación de la metodología utilizada y la compilación de una gran gama de referencias científicas que la respaldan.



Bahía de Akumal. Foto: Fernando Secaira/TNC.

1. LA BARRERA ARRECIFAL PROTEGE LAS COSTAS

1.1 La barrera arrecifal disipa la energía del oleaje y mareas de tormenta, reduciendo el impacto sobre la duna costera y la infraestructura

Existe una amplia documentación sobre la función protectora del arrecife de coral, tan solo en el estudio de Ferrario *et al.* (2014) se encontraron 255 artículos que vinculan los arrecifes con la atenuación del oleaje. Un ejemplo lo encontramos en las costas de Quintana Roo en el Caribe mexicano con el huracán Wilma, uno de los más devastadores que provocó la mayor pérdida económica en México, estimada en 30 mil millones de pesos (Silva *et al.*, 2012; Avelar, 2006). El huracán tocó tierra el 22 de octubre de 2005 entre Cancún y Puerto Morelos, avanzó lentamente por el territorio y regresó al mar 24 horas después, provocando resultados contrastantes; por un lado, se observó una marcada erosión en los ~12 km de playa de Cancún, a nivel tan crítico que tuvieron que hacerse trabajos de recuperación; mientras que en Puerto Morelos se presentó un incremento de hasta 30 m en los anchos de playa (Silva *et al.*, 2006; Mariño-Tapia *et al.*, 2014). La diferencia entre ambos sitios es que Cancún es un sistema de playas expuesto, en tanto que el de Puerto Morelos está protegido por un arrecife de borde (figura 1).

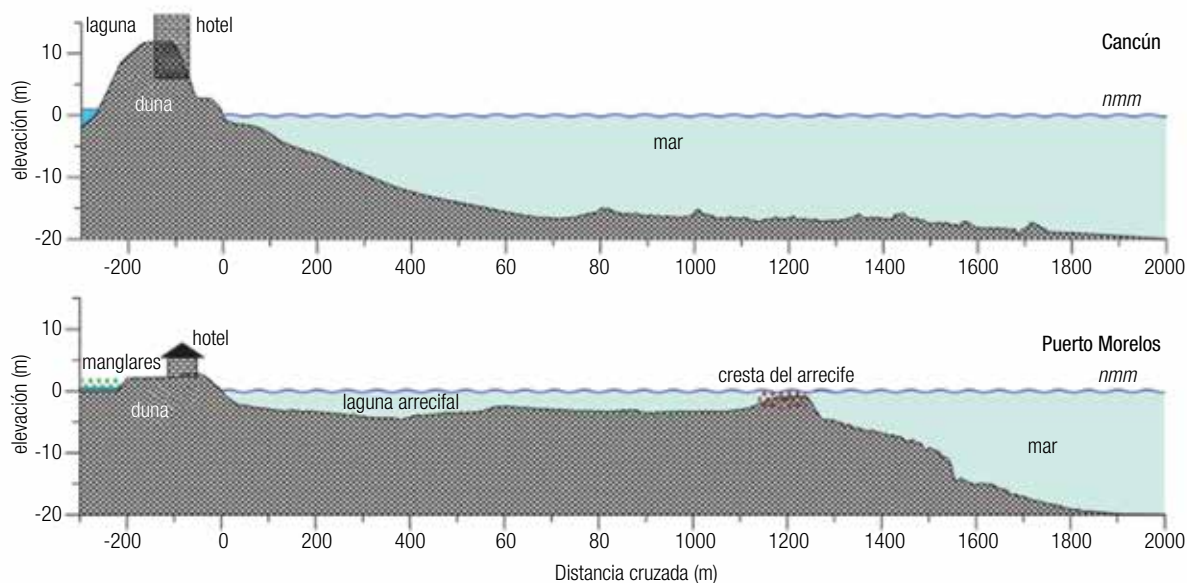


Figura 1. Diagrama esquemático del perfil perpendicular a la costa de las secciones medias de Cancún y Puerto Morelos, a partir de mediciones topográficas y datos batimétricos. El nivel medio del mar (*nmm*) se encuentra referido a 0 m (tomado de Riuz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013).

1.1.1 Diferencias morfológicas

Cancún

Cancún es un sistema de isla de barrera con playa abierta, formada por sedimentos carbonatados de origen biogénico (tamaño promedio de grano, 0.4 mm) y delimitada por dos puntas rocosas: Punta Cancún y Punta Nizuc (figura 2). El complejo

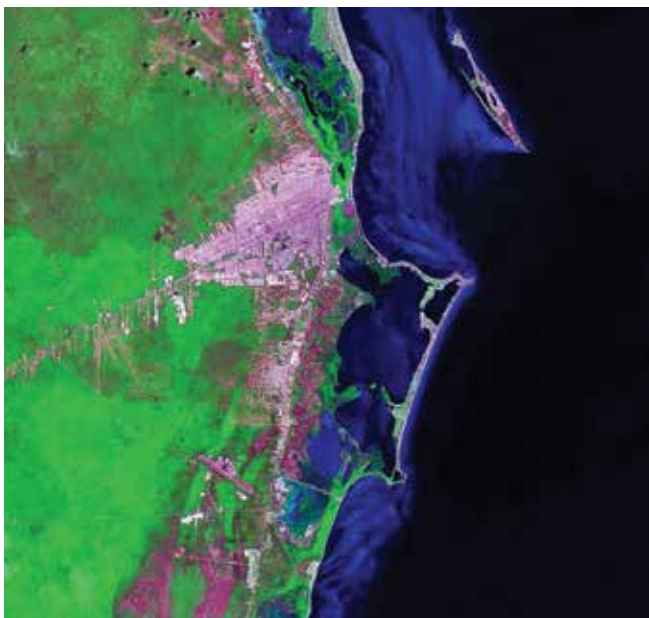


Figura 2. Imagen satelital de la ciudad de Cancún, la isla de barrera y los cuerpos lagunares (Bryant, 2015).

lagunar de Nichupté está formado por cuerpos pequeños, separados parcialmente por acumulaciones rocosas y pantanos de manglar (Guido *et al.*, 2009). Es importante destacar que antes del desarrollo turístico la playa era amplia, con anchos de 100 a 400 m (figura 3), y era protegida por una duna de aproximadamente 12 m de altura sobre el nivel medio del mar (*nmm*). La laguna contaba con dos conexiones permanentes al Caribe: al norte, con el oeste de Punta Cancún, y al sur, con el oeste de Punta Nizuc; además, contaba con aberturas temporales en la cara frontal de la playa que facilitaban el recambio de agua e, incluso, el balance hídrico entre la laguna y el mar (Silva *et al.*, 2006).

En 1970 se empezaron a realizar modificaciones en la isla de barrera para adecuarla a la infraestructura hotelera. Una de las primeras modificaciones fue el relleno de algunas zonas para que el ancho de la isla alcanzara entre 250-300 m y pudiera albergar los grandes hoteles y el campo de golf Pok Ta Pok.

La invasión de la duna y de las playas por la construcción de hoteles continuó en los siguientes años (Rodríguez, 2007). En el cuadro 1 se muestra la evolución de los anchos de playa junto con el número de edificaciones presentes en la zona. La cobertura vegetal sobre la barra que evitaba la pérdida de sedimento desapareció completamente en los años posteriores a 1990.



Figura 3. Punta Cancún en 1967 y 2005 (tomado de Silva *et al.*, 2006).

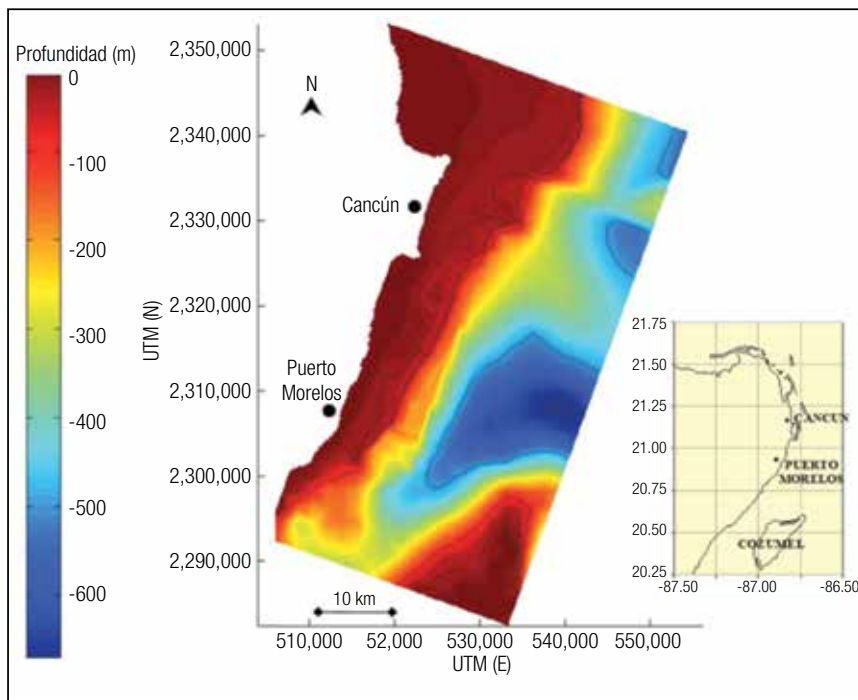


Figura 4. Mapa batimétrico de Cancún y Puerto Morelos (tomado de Mariño-Tapia *et al.*, 2014).

Cuadro 1. Evolución de ancho de playas y número de edificaciones en Cancún (modificado de Ramírez, 2007)

Año	Ancho de playa seca			Número de edificaciones	
	Máximo	Medio	Mínimo	Funcionando	En construcción
1970	106.89	70.95	24.80	-	-
1985	96.45	42.69	6.06	17	9
1990	44.98	17.40	0	54	3
1999	37.13	16.26	0	63	4
2013	50	-	25	-	-

Puerto Morelos

Al igual que en Cancún, el sistema de playas de Puerto Morelos está compuesto por sedimentos carbonatados (tamaño grano, 0.2 mm); sin embargo, se encuentra protegido por un arrecife de borde que se extiende por 27 km (Coronado *et al.*, 2007). La playa es estable, cuenta con anchos de 85 a 90 m y preserva su duna de cerca de 4 m sobre el nivel medio mar (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013). La laguna arrecifal somera (3 a 4 m de profundidad) se encuentra conectada al mar abierto mediante dos entradas en el norte y un canal de navegación en el sur. Los sedimentos se encuentran consolidados por pastos marinos y la zona del arrecife se caracteriza por la presencia de bancos de coral someros expuestos a la acción del oleaje (Coronado *et al.*, 2007).

1.1.2 Hidrodinámica

La marea en ambas zonas es semidiurna y tiene un rango entre 0.32 y 0.07m (media de ~0.17 m). La mayor parte del tiempo (condiciones típicas) las olas se acercan de este/sureste y en los meses de invierno ocurren episodios de oleaje proveniente del norte (figura 5). El 90% de olas incidentes tiene alturas significantes (H_s)¹ de 0.5 a 1.5 m, con período medio (T_m) de 4 a 6 s. Los llamados “Nortes” generan olas más energéticas, con H_s de ~ 2 a 3 m y mayores períodos T_m ~ 6 a 8 s (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013). De mayo a octubre son comunes los huracanes que llegan a generar olas de H_s de 6 a 15 m y períodos de 8 a 12 s (Mariño-Tapia *et al.*, 2014).

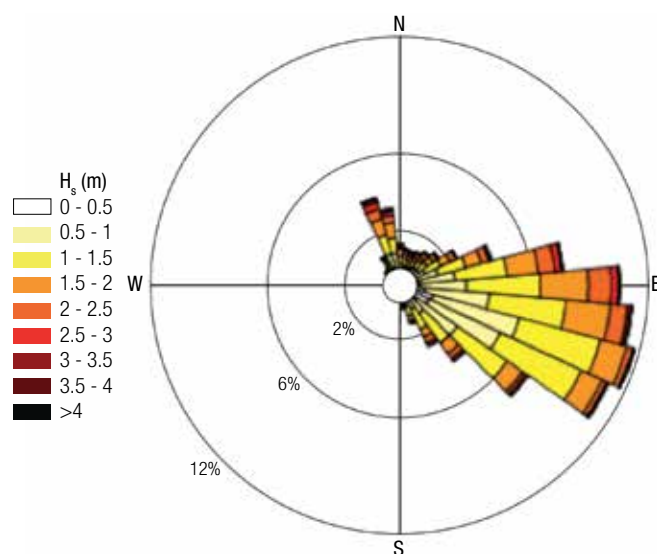


Figura 5. Rosa de oleaje, determinada con datos de la boya 42056, perteneciente a la NOAA; de septiembre 2007 a mayo 2011 (tomada de Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013).

1.1.3 Protección en condiciones de tormenta

La zona donde se encuentran Cancún y Puerto Morelos es una de las más energéticas del Golfo de México y del Caribe debido a las tormentas tropicales (Silva *et al.*, 2012; figura 6). Entre 1948 y 2007 se han presentado 47 huracanes, de los cuales 6 han superado alturas de ola significativa (H_s) de 10 m: Allen (1980), Gilberto (1988), Roxanne (1995), Isidoro (2002), Emily (2005) y Wilma (2005).

El huracán Wilma ha sido uno de los más destructores y provocó la mayor pérdida económica en México. Además, ostenta ser uno de los huracanes con la menor presión registrada (822 mbar) y el crecimiento más rápido, con velocidades de viento de 111.2 km/h a 277.8 km/h en 24 h (Pasch *et al.*, 2014). El huracán afectó las costas de Cancún entre el 20 y 23 de octubre de 2005. Tocó tierra el 22 de octubre entre Cancún y Puerto Morelos; debido a una alta presión al norte de Wilma, el huracán avanzó lentamente y regresó al mar 24 h después al sur del Golfo de México. El paso lento sobre la zona probablemente fue una de las circunstancias que provocó la fuerte erosión de playas en Cancún (Silva *et al.*, 2012).

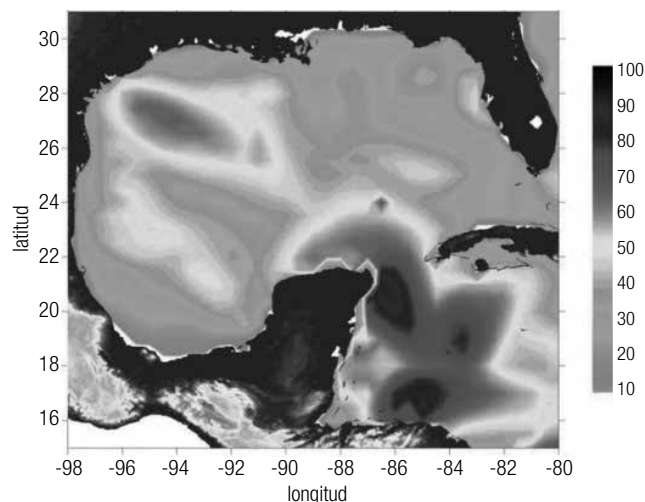


Figura 6. Mapa energético de tormentas y huracanes en el Golfo de México y en el Caribe. El color representa el nivel de energía (normalizada) producida por fenómenos meteorológicos extremos, entre 1958 y 2007 (tomado de Silva *et al.*, 2012).

¹ H_s : Promedio del tercio de olas más grandes de un registro de oleaje.

Observaciones y resultados de campañas de campo

Los efectos en la morfología de las playas de Cancún fueron medidos gracias a la realización de dos trabajos de campo: el primero, en agosto de 2005 después del huracán Emily y el segundo, tres días después de Wilma (Silva *et al.*, 2006). La erosión fue generalizada en los 12 km de las playas de Cancún, sin embargo, se observaron respuestas diferenciales en cuatro zonas según el estudio de Silva *et al.*, 2006 (figura 7):

- La primera sección en la parte sur hacia Punta Nizuc mostró una considerable acreción de entre 10 y 15 m.
- La sección 2 mostró una seria erosión. En abril de 2005 la playa contaba con anchos de 25 a 28 m; después de Wilma la playa desapareció totalmente dejando expuesta la cama rocosa, y a varios edificios con daños estructurales (figura 8).
- La sección 3 también fue erosionada, pero en menor proporción que las secciones 2 y 4. Cabe destacar que esta zona comienza justo en playa Delfines y es la única sección de aproximadamente 1 km que cuenta con duna. La erosión fue cercana a 1 m de altura junto a las edificaciones, pero

el ancho de playa fue poco modificado y fue la que mostró mayor estabilidad.

- La sección 4, en el extremo norte, mostró la mayor erosión, la playa desapareció y la cama rocosa quedó expuesta; el nivel de erosión continuó por 3.5 km hacia el norte, disminuyendo gradualmente.

En cuanto a Puerto Morelos, se tienen mediciones *in situ* de la atenuación del oleaje por el arrecife de coral, el cual disipó más de 90% de la energía (figura 9) (Blanchon *et al.*, 2010). Lamentablemente, no se realizaron perfiles de playa como en Cancún, pero fue posible supervisar los cambios comparando fotografías *in situ* y satelitales (QuickBird) antes y después de Wilma, específicamente en los meses de abril y octubre de 2005. En este caso, se observó una acreción de hasta 30 metros en el ancho de playas. Las imágenes satelitales muestran que la duna fue erosionada en varias secciones aun y cuando tenía vegetación, lo cual probablemente contribuyó a la acreción de playas (figura 10, Mariño *et al.*, 2014). Los efectos fueron inusuales por lo que se utilizaron modelos numéricos para explicar lo ocurrido (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013; Mariño-Tapia *et al.*, 2014).

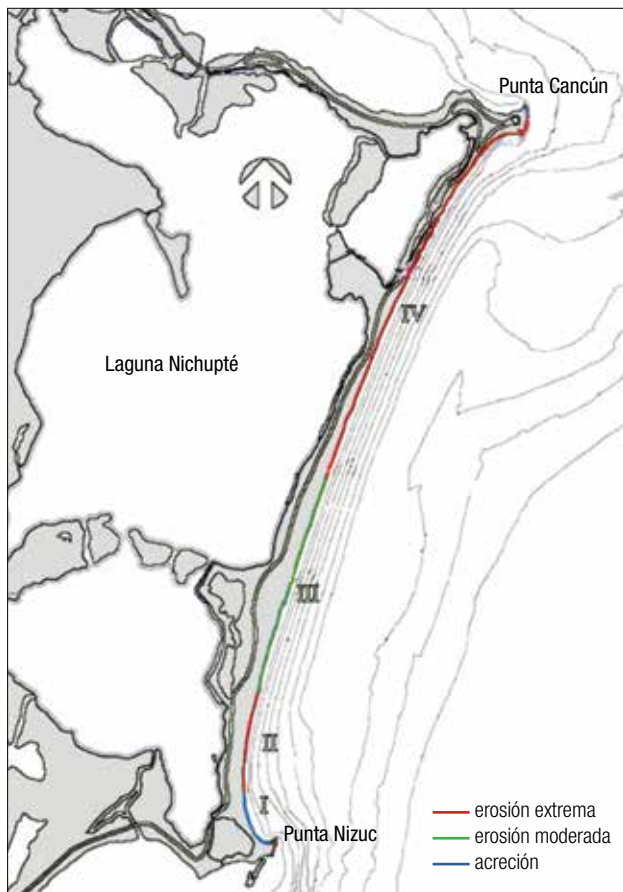


Figura 7. Zonas respecto al grado de erosión provocado por el huracán Wilma.

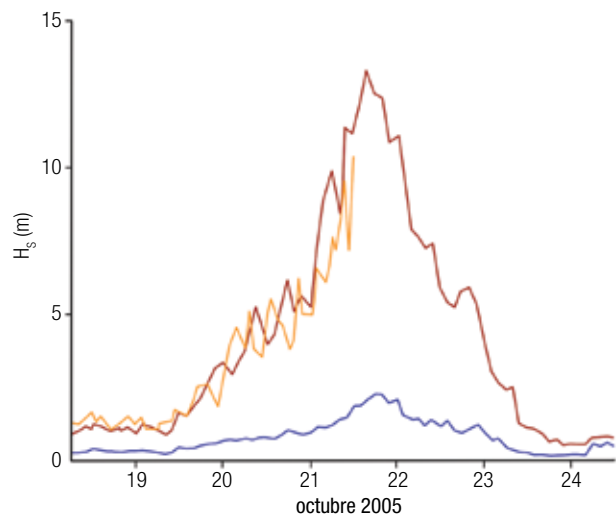


Figura 9. Altura de ola significativa en Puerto Morelos y Cancún durante el huracán Wilma, en 2005. Rojo, en la parte externa del arrecife de Puerto Morelos (CICESE); amarillo, en Cancún (Silva, R.) y azul, en la parte interna de la laguna de Puerto Morelos (tomada de Blanchon *et al.*, 2010).



Figura 8. Sección 2, antes y después del Huracán Wilma (tomado de Silva *et al.*, 2006).



Figura 10. Efectos del huracán Wilma. Las imágenes superiores corresponden a Cancún; las imágenes inferiores a Puerto Morelos (tomada de Mariño *et al.* 2014).

Modelación

Para comprender estos escenarios tan contrastantes se utilizó un modelo enfocado a tres momentos importantes de la tormenta: 1] 20 de octubre, 00:00, cuando entra la marea de tormenta; 2] 21 de octubre, 18:00, en el punto máximo del oleaje; 3] 23 de octubre, 12:00, cuando el ojo del huracán hace contacto en tierra y la dinámica de vientos cambia abruptamente (figura 11).

El modelo nos muestra cómo la hidrodinámica cambia abruptamente entre las dos regiones debido a las diferencias morfológicas (figuras 12, 13 y 14). Previsiblemente, bajo estas condiciones, desde el inicio de la marea de tormenta y hasta que el huracán tocó tierra el 23 de octubre, Cancún presentó fuertes corrientes hacia fuera de la costa. Estas corrientes suelen ser las que dominan las condiciones hidrodinámicas en la región somera, y son las causantes de transportar grandes cantidades de arena fuera del sistema, por lo que el intenso

transporte de arena (dirección sur-este) durante 50 horas provocó la grave erosión de las playas (Mariño *et al.*, 2014).

En el caso de Puerto Morelos las condiciones fueron distintas. Al inicio de la marea de tormenta el oleaje incidente fue menor y el transporte de arena fue hacia la costa, es decir, hacia adentro del sistema. En su punto máximo, el 22 de octubre, el transporte de arena fue en dirección sur-este, sin embargo, fue mucho menor adentro que afuera de la laguna. Cuando el huracán tocó tierra el nivel del agua descendió rápidamente permitiendo que el arrecife incrementara su capacidad para disipar el oleaje, lo cual evitó que la arena continuara saliendo del sistema. Estas condiciones probablemente indujeron el depósito de arena, y junto con el aporte de la duna (véase hipótesis de la duna costera) provocaron el ensanchamiento de las playas de Puerto Morelos (Mariño *et al.*, 2014).

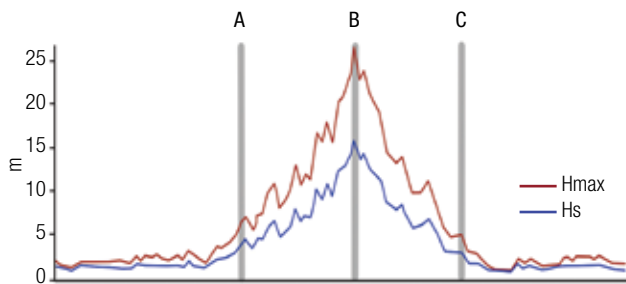


Figura 11. Altura ola máxima (Hmax); significativa (Hs) medida durante el huracán Wilma con un perfilador de corriente AWAC (Nortek), instalado a 20 m de profundidad frente a la cresta arrecifal de Puerto Morelos (tomado de Mariño *et al.*, 2014).

Metodología de Mariño *et al.*, 2014

El modelo numérico utilizado para analizar la hidrodinámica y el transporte de sedimentos en las condiciones del huracán Wilma, fue el DELF 3D. Se utilizó un área de 50 x 30 km (figura 4) con una malla de 152 x 249 puntos; resolución mínima de 125 m; 10 niveles verticales con coordenadas sigma y con paso de tiempo de 0.2 min. La propagación de oleaje utilizó datos medidos con un perfilador acústico (Nortek), instalado a 20 m de profundidad frente a Puerto Morelos y fue implementado mediante el modelo SWAN. Los modelos de oleaje, flujo e hidrodinámico se encuentran acoplados. El modelo de oleaje calcula los coeficientes de estrés, de radiación, los cuales son introducidos al modelo de flujo para el cálculo de corrientes. El modelo hidrodinámico evalúa las alturas de la columna de agua implementadas para la refracción de las corrientes que afectan la propagación del oleaje.

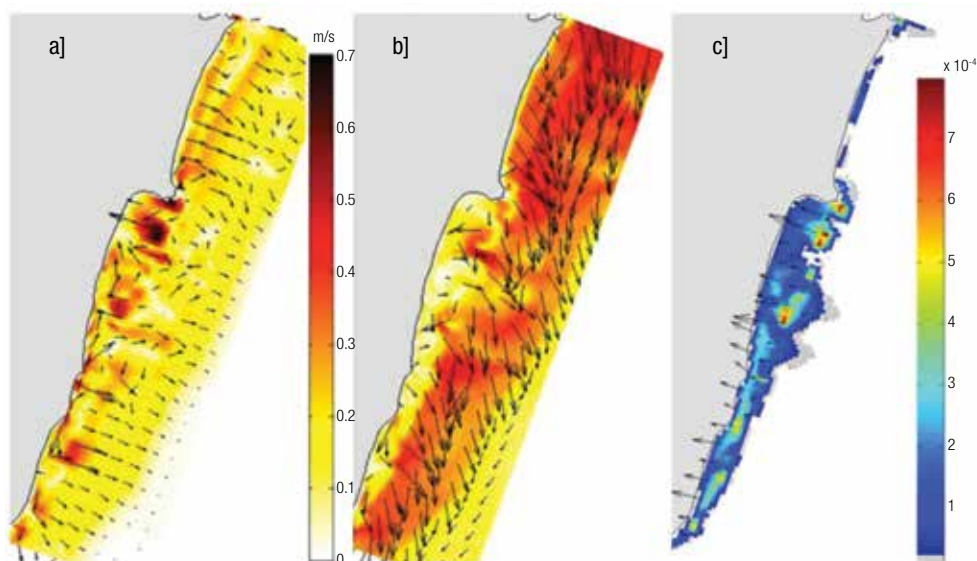


Figura 12. Modelo para el 20 de octubre 00:00. a) oleaje + forzamientos por elevación de la superficie; b) oleaje + viento + forzamientos por elevación de superficie; c) transporte de sedimentos, escenario con viento, $\text{m}^3/\text{m/s}$ (tomado de Mariño *et al.*, 2014).

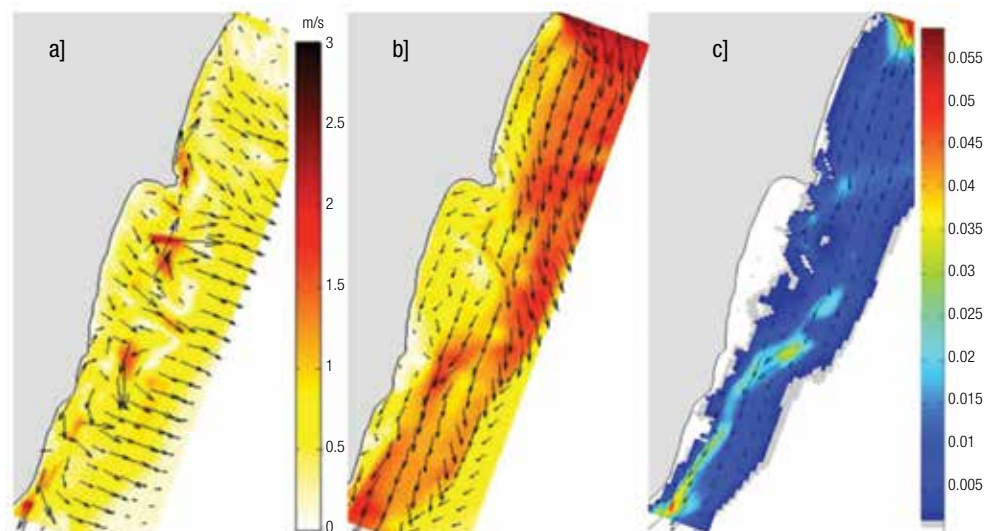


Figura 13. Modelo para el 22 de octubre 18:00. a) oleaje + forzamientos por elevación de la superficie; b) oleaje + viento + forzamientos por elevación de superficie; c) transporte de sedimentos, escenario con viento, $\text{m}^3/\text{m/s}$ (tomado de Mariño *et al.*, 2014).

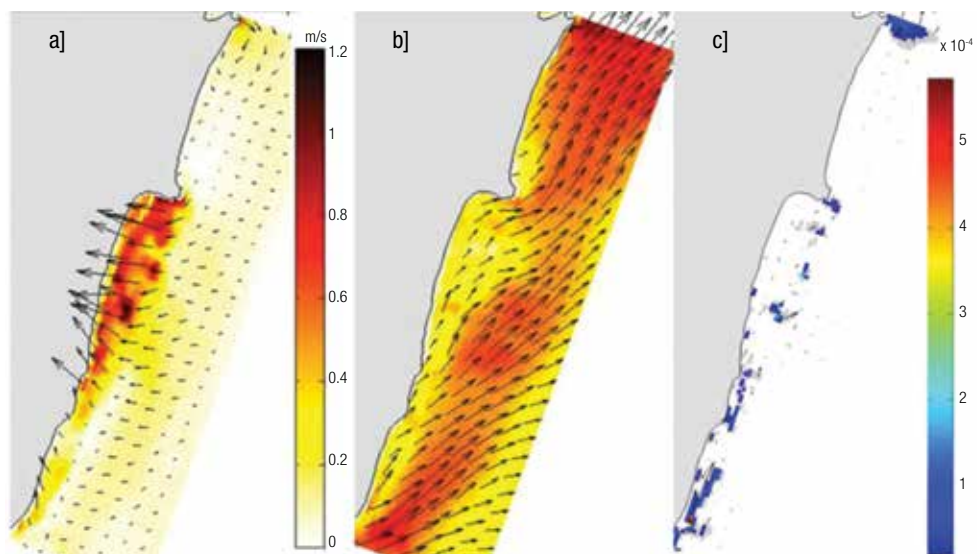


Figura 14. Modelo para el 23 de octubre 12:00. a) oleaje + forzamientos por elevación de la superficie; b) oleaje + viento + forzamientos por elevación de superficie; c) transporte de sedimentos, escenario con viento, $\text{m}^3/\text{m/s}$ (tomado de Mariño *et al.*, 2014).

1.1.4 Protección en condiciones estándar o típicas

Resultados de la campaña de campo (Ruiz de Alegria-Arzaburu et al., 2013)

El arrecife provee protección no sólo en condiciones de tormenta, sino también en condiciones de calma, es decir, con el oleaje típico de la zona. Para corroborarlo, en Cancún y Puerto Morelos se analizaron perfiles de playa cada 3 o 4 meses, entre septiembre de 2007 y junio de 2009, véase figura 15 (Ruiz de Alegria-Arzaburu et al., 2013). Los resultados mostraron que la playa protegida por el arrecife de borde en Puerto Morelos es menos dinámica que la playa expuesta en Cancún. Para las mismas condiciones de oleaje, Puerto Morelos mostró en la mayor parte de sus playas los cambios de altura de menos de 0.5 m, mientras que en Cancún fueron de hasta 2 m (Ruiz de Alegria-Arzaburu et al., 2013), es decir, que hay zonas de Cancún con cuatro veces más transporte de arena que Puerto Morelos.

Modelación (Ruiz de Alegria-Arzaburu et al., 2013)

Se implementó el modelo de oleaje SWAN para determinar la dinámica de las dos zonas. El modelo fue calibrado con mediciones de instrumentos anclados dentro y fuera de la laguna de Puerto Morelos. El resultado muestra que el arrecife de Puerto Morelos puede disipar el 65 y 40% de la energía del oleaje ($H_s=3$ m, $T=7$ segundos) proveniente del noreste y del este, respectivamente; mientras la morfología de Cancún disipa entre 25 y 15%. Por lo tanto, el arrecife tiene la capacidad de reducir entre 40 y 35% más de la energía del oleaje proveyendo mayor protección.

Otro escenario que se probó fue la degradación del coral, para lo cual se simularon tres casos: 1] un arrecife con 1 m más de altura; 2] un arrecife degradado, con 1 m de altura menos y 3] con 2 m de altura menos. En el caso 1 se obtuvo una reducción de 10% de la energía del oleaje, semejante a las condiciones actuales del arrecife. En los casos 2 y 3 se obtuvo un aumento de la energía del oleaje de 10% y 20% respectivamente.

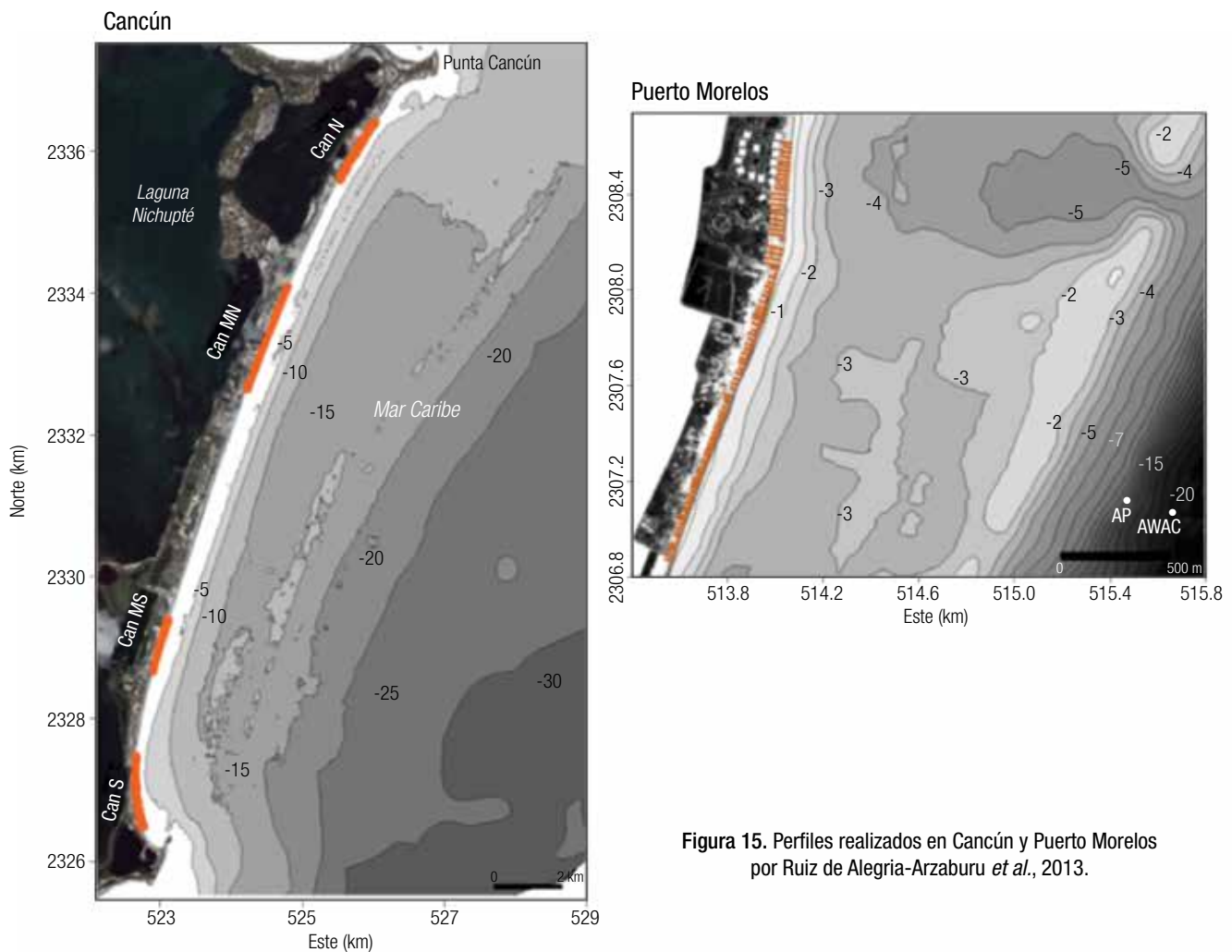


Figura 15. Perfiles realizados en Cancún y Puerto Morelos por Ruiz de Alegria-Arzaburu et al., 2013.

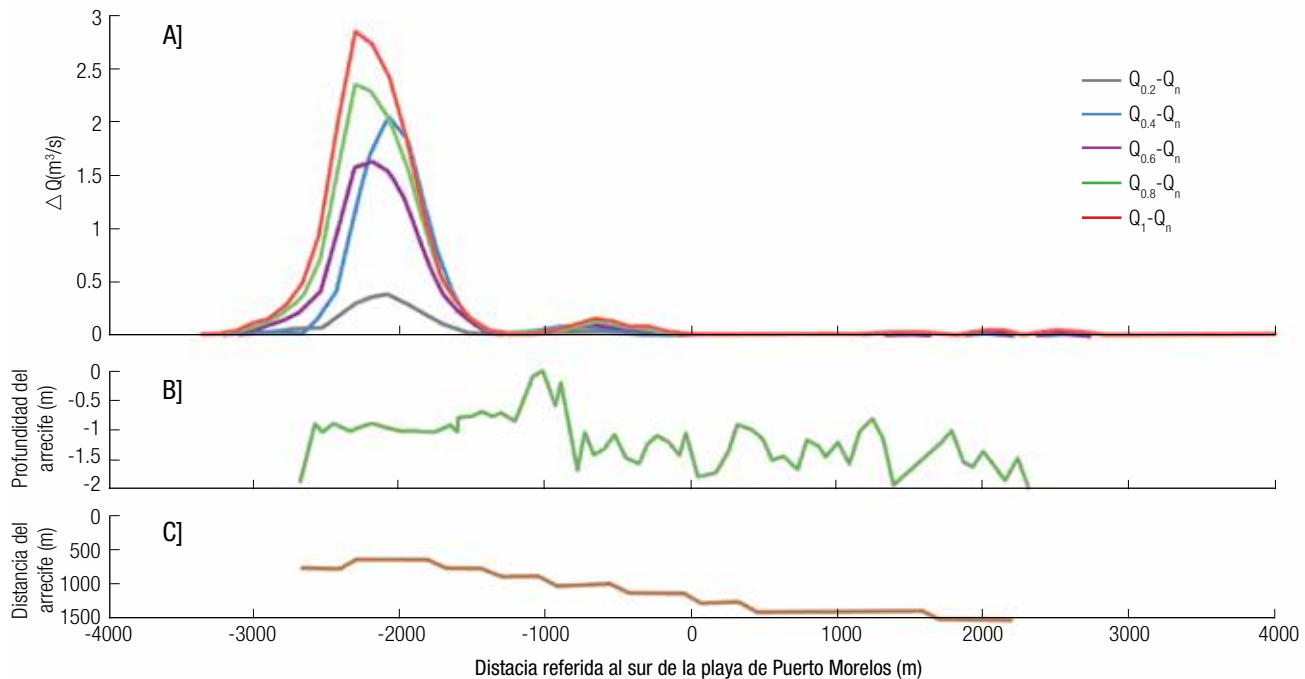


Figura 16. A) Diferencia entre el transporte actual de sedimentos y el transporte de sedimentos en el caso hipotético de erosión de la cresta arrecifal de 0.2 a 1 m, B) altura actual de arrecife, C) distancia entre la barrera arrecifal y la costa. El eje x corresponde al largo de la barrera arrecifal (~ 4.5 km). Los estudios se llevaron a cabo entre 0 y 2000 m, véase figura 16 (tomado de Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013).

Se encontró que el transporte de sedimentos obtenido a partir de los valores del modelo SWAN (altura y dirección del oleaje) y las profundidades, responde directamente a la degradación del arrecife. Mientras más se degrade la cresta arrecifal, mayor es el transporte de sedimentos, figura 16 (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013). El efecto parece ser mucho más evidente cuando la barrera arrecifal se encuentra más cercana a la costa, lo cual refuerza su importancia en la dinámica de sedimentos.

Conclusión

Es impresionante el contrastante entre los cambios provocados por Wilma en las playas de Puerto Morelos y Cancún. Mediante la modelación fue posible reproducir el transporte de sedimentos durante la tormenta, explicando cómo la barrera arrecifal redujo el efecto del oleaje y en algunos momentos cambió totalmente la dinámica, propiciando la acumulación de arena en Puerto Morelos. En contraste, el huracán provocó una corriente que transportó la arena por cerca de 50 horas fuera del sistema de Cancún, erosionando sus playas.

También se pudieron analizar las diferencias bajo condiciones típicas. Se encontró que el arrecife de Puerto Morelos disipa entre un 30 y 45% más energía del oleaje que una

playa sin arrecifes, lo cual reduce el transporte de sedimentos y, consecuentemente, la playa es más estable. Finalmente, se confirmó que la pérdida en la altura de la barrera arrecifal en un metro reduce la capacidad de disipación de oleaje en un 10%, lo que provoca un aumento en el transporte de sedimentos e incrementa la erosión de la playa.

Bibliografía

- Avelar, C. F. 2006. Daños ocasionados por el huracán Wilma en Cancún. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural* 11:1-19.
- Blanchon, P., R. Iglesias-Prieto, E. Jordán-Dahlgren y S. Richards. 2010. Arrecifes de coral y cambio climático: vulnerabilidad de la zona costera del estado de Quintana Roo. *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* 229-248.
- Bryant A. Geology News and Information, en <www.geology.com> (consultado el 16 de octubre de 2015).
- Coronado, C., J. Candela, R. Iglesias-Prieto, J. Sheinbaum, M. López y F.J. Ocampo-Torres. 2007. On the Circulation in the Puerto Morelos Fringing Reef Lagoon. *Coral Reefs* 26 (1): 149-63. doi:10.1007/s00338-006-0175-9.
- Escudero, M. C. 2011. Análisis de la hidrodinámica del oleaje en la costa de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Tesis de Maestría. Universidad de Cantabria. 171 p.
- Ferrario, F., M.W. Beck, C.D. Storlazzi, F. Micheli, C.C. Shepard y Laura Airolidi. 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications* 1-9. doi:10.1038/ncomms4794.

Metodología de Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013

La campaña consistió en perfiles perpendiculares a la costa espaciados 20 m desde el límite de las edificaciones hasta aprox. 0.5 m de profundidad costa afuera, medidos en cuatro zonas de las playas de Cancún y a lo largo de Puerto Morelos (figura 16), cada 3 o 4 meses, entre septiembre 2007 y mayo 2011, los cuales fueron procesados para calcular modelos de elevación digitales en tres dimensiones. Además, se adquirieron datos batimétricos mediante una ecosonda (double-frequency SyQuest Bathy 500 DF) acoplada a un GPS diferencial, a través de trayectos perpendiculares de cerca de 2 km, espaciados 100-400 metros, para profundidades de entre 1 y 20 m, con limitaciones de muestreo sobre la cresta y en la zona de "surf", solventadas con interpolaciones lineales. Los datos fueron complementados con bases de

datos de ETOPO-1, (NOAA-NGDC) y analizados mediante Funciones Empíricas Ortogonales, las cuales buscaban dividir los datos en funciones espaciales (valores de Eigen) asociadas a un coeficiente temporal (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013), similar a lo realizado en un análisis de componente principales.

Para el modelo hidrodinámico se utilizaron los datos de oleaje y viento proporcionados cada hora por la boya 42056 - NOAA que se encuentra a 4 684 m de profundidad y a ~250 km al Sur de Cancún. También fueron utilizados 3 instrumentos: 1] un AWAC (perfilador acústico de oleaje y corriente) instalado de mayo a septiembre de 2007 a 2 km costa fuera de Puerto Morelos, a 20 m de profundidad y 2] un Aquadrop de julio a septiembre 2011 dentro de la laguna a 3 m de profundidad y 3] un Aquadrop

en el mismo periodo en la parte externa de la barrera arrecifal, a 15 m de profundidad. Los datos recopilados fueron utilizados para implementar el modelo de propagación de oleaje. El modelo de mareas fue proporcionado por CI-CESE. La modelación del oleaje se llevó a cabo mediante el modelo SWAN (Simulating Waves in Near-shore), en un dominio con profundidades de hasta 675 m y con resolución de 125 m. No fue tomado en cuenta el viento y cabe destacar que se utilizó una rugosidad uniforme (longitud de rugosidad, $K_w = 0.1$) a lo largo de todo el dominio. El objetivo del modelo fue estudiar la respuesta del sistema a modificaciones estructurales del arrecife. Para evaluar el grado de protección del arrecife, se utilizó la movilidad de sedimentos, siguiendo el enfoque energético de Bagnole, 1963.

Fondo Nacional de Fomento al Turismo (Fonatur), en <<http://www.fonatur.gob.mx/>> (consultado el 15 de octubre 2015).

Fraga, J., G. Villalobos, S. Doyon, A. García (coords.). 2008. Descentralización y Manejo Ambiental-Gobernanza Costera en México. Plaza y Valdez Ed. México. 365 pp.

Goda, Y. 2000. *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific. Singapore. 462 pp.

Guido, P., A.C. Ramírez, L. O. Godínez, S.L. Cruz y A.L. Juárez. 2009. Estudio de la Erosión Costera en Cancún y La Riviera Maya, México. *Avances en Recursos Hidráulicos* 20 (junio a octubre): 41-56. <www.revistas.unal.edu.co>.

Mariño-Tapia, I., C. Enriquez, E. Mendoza Baldwin, E. Escalante Mancera. 2014. Comparative Morphodynamics between Exposed and Reef Protected Beaches under Hurricane Conditions. *Coastal Engineering* 1-9.

Medellín, G., J.A. Brinkkemper y C.M. Appendini. 2015. Runup parameterization and beach vulnerability assessment on a barrier island: a downscaling approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* 3(5): 3077-3117. doi:10.5194/nhessd-3-3077-2015.

NOAA: Rip and Longshore Currents, en <<http://www.srh.noaa.gov/bro/?n=ripcurrentdefinition>> (consultado 3 enero 2016).

Pasch, R.J., E.S. Blake, H.D. Cobb y D.P. Roberts. 2014. *Tropical Cy-*

clone Report: Hurricane Wilma. National Hurricane Center-USA. Vol. 1. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

Ramírez, E. 2007. Evaluación Morfodinámica de la Playa Comprendida entre Punta Cancún y Punta Nizuc en el Estado de Quintana Roo, México. Tesis de Maestría. DEPEI-UNAM.

Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., I. Mariño-Tapia, C. Enriquez, R. Silva y M. González-Leija. 2013. The Role of Fringing Coral Reefs on Beach Morphodynamics. *Geomorphology* 198. Elsevier B.V. 69-83. doi:10.1016/j.geomorph.2013.05.013.

Sheppard, C., D.J. Dixon, M. Gourlay, A. Sheppard y R. Payet. 2005. Coral mortality increases wave energy reaching shores protected by reef flats: Examples from the Seychelles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64(2-3): 223-234. doi:10.1016/j.ecss.2005.02.016.

Silva, R., I. Mariño-Tapia, C. Enriquez-Ortiz, E. Mendoza Baldwin, E. Escalante Mancera y F. Ruiz-Rentería. 2006. Monitoring shoreline changes at Cancun beach, Mexico: Effects of Hurricane Wilma. *Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 3491-3503.

Silva, R., G. Ruiz-Martínez, I. Mariño-Tapia, G. Posada Vanegas, E. Mendoza Baldwin y E. Escalante Mancera. 2012. Manmade Vulnerability of the Cancun Beach System: The Case of Hurricane Wilma. *CLEAN-Soil, Air, Water* 40(9): 911-19. doi:10.1002/clen.201100677.

1.2 La barrera arrecifal reduce la probabilidad de que el sedimento de las playas sea transportado fuera del sistema, haciendo más factible la recuperación natural del mismo

Como hemos visto en cuanto al transporte de sedimentos, una playa protegida como la de Puerto Morelos es menos dinámica que una playa expuesta como la de Cancún (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013). Es decir, el arrecife ayuda a mantener los sedimentos en el sistema o al menos que sean transportados a menor velocidad. Dos de los mecanismos que determinan el transporte de sedimentos son la corriente paralela a la costa y la deriva litoral (figura 17).

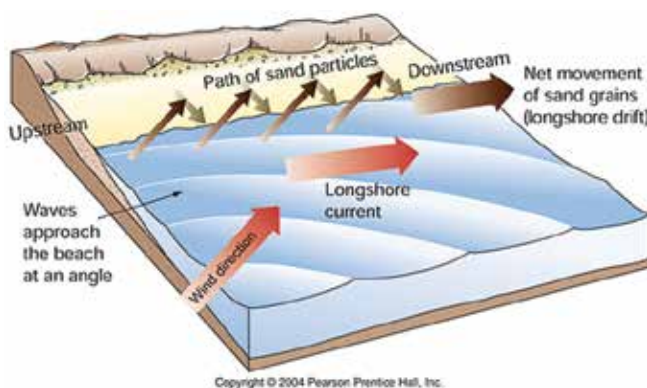


Figura 17. Esquema de corriente paralela a la costa y deriva litoral.

Las olas generalmente inciden con cierto ángulo sobre la línea de costa y conforme se acercan a la playa van interactuando con el fondo; del mismo modo, cuando las olas rompen, generan una tensión o estrés (tensor de radiación)² que actúa sobre el agua misma, empujándola hacia una dirección derivada del ángulo de incidencia, lo que genera una corriente conocida como **paralela a la costa** (NOAA, 2015). Esta corriente es responsable, dependiendo de las condiciones, del transporte de sedimentos (Goda, 2000). Los grupos de olas incidentes no rompen en un solo punto, sino a lo largo de una zona. Por lo tanto, la corriente paralela a la costa presenta un gradiente de velocidad en función de la profundidad y el ángulo de incidencia, véase figura 18 (Goda, 2000).

La **deriva litoral** es generada en una forma similar. Conforme las olas inciden sobre la playa (con cierto ángulo), generan un movimiento de "zigzag" sobre la cara de la playa (figura 17). Este movimiento acarrea el sedimento hacia arriba y hacia abajo, pero el ángulo de incidencia genera un transporte neto en dirección paralela a la costa (NOAA, 2015).

El mecanismo de transporte está influenciado por la energía del oleaje incidente: mientras más altas sean las olas, mayor será el transporte, considerando un ángulo y una pendiente fijas (NOAA, 2015). Estas dos corrientes, la paralela y la de deriva, son capaces de modificar a línea de costa. Por ejemplo, en el caso de Puerto Morelos (figura 19) se ha observado que las entrantes más pronunciadas (tramos 1, 3, 5, 7, 11 y 12) coinciden con zonas litorales ubicadas frente a las bocas (Escudero, 2011). Las bocas son los sitios donde el oleaje conserva mayor energía y, por lo tanto, se espera que el transporte de sedimentos sea mayor. El tramo 7 además está frente a una

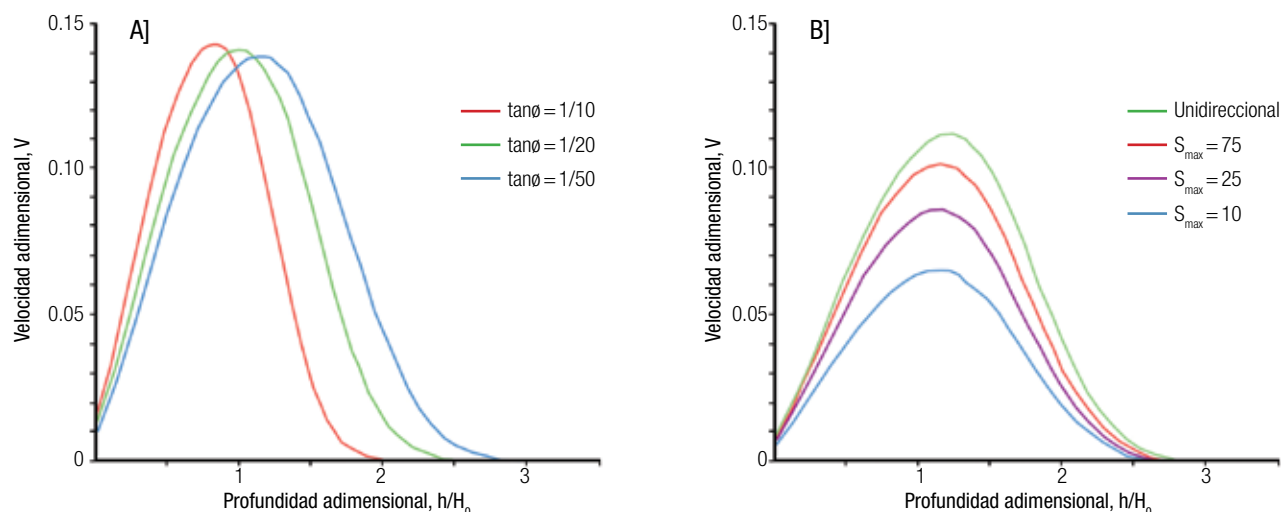


Figura 18. A] Velocidad de la corriente paralela a la costa respecto a la profundidad, con un modelo de ruptura aleatorio en función de la pendiente, con ángulo fijo; B] en función del parámetro de dispersión, s_{max} (dado por el producto del espectro de frecuencia de Bretshneider-Mitsuyasu y la función de dispersión direccional de Mitsuyasu), con pendiente fija (1/50) (tomadas de Goda, 2000).

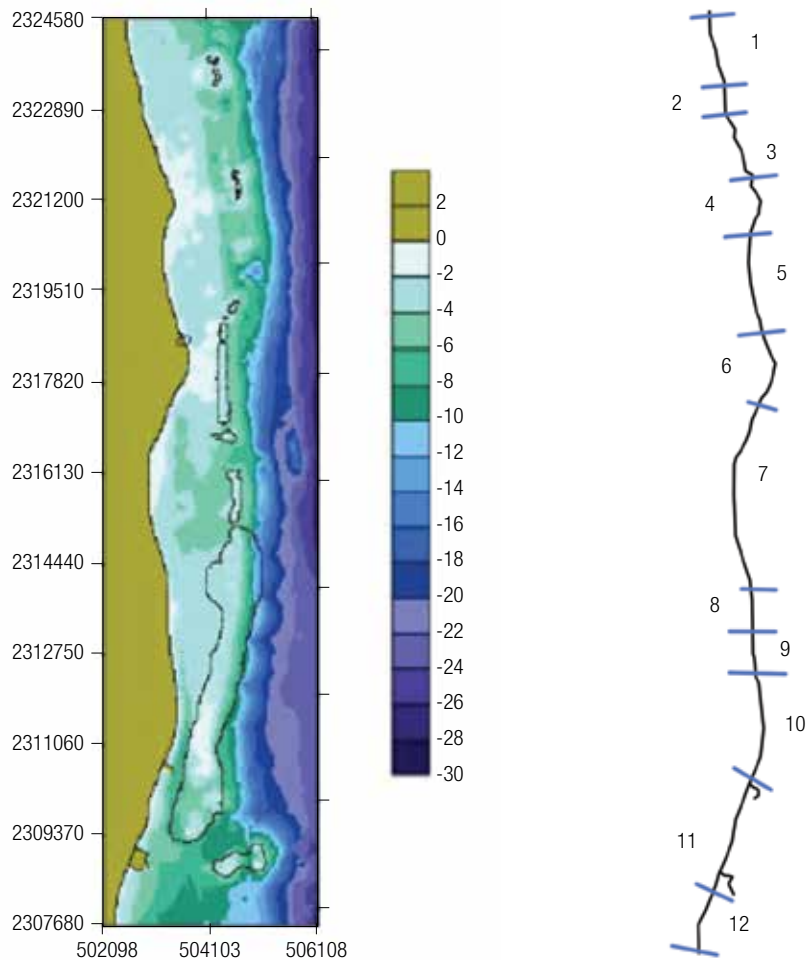


Figura 19. Izquierda, batimetría de detalle de Puerto Morelos; derecha, división por tramos de la línea de costa de Puerto Morelos (tomados de Escudero, 2011).

sección más profunda de la laguna, lo cual permite que el oleaje llegue con mayor fuerza. Por otro lado, los tramos 2, 4, 6, 8 y 9, están protegidos por la barrera arrecifal, y la laguna es somera, lo que aumenta la fricción de fondo, así la energía del oleaje incidente es menor y el sedimento tiende a ser atrapado, formando salientes (Escudero, 2011).

Conclusión

Como hemos visto, el ángulo de incidencia es importante y la cresta puede modificar también este ángulo. Cuando las olas rompen sobre la cresta arrecifal, éstas tienden a orientarse en dirección perpendicular a la costa. Un oleaje con esta dirección tiene una capacidad limitada para el transporte de sedimentos (Goda, 2000; Mariño comunicación personal, 2016), por lo tanto, esto también ayuda a evitar la erosión costera.

El transporte de sedimentos depende de la fuerza y ángulo del oleaje incidente, ambos son modificados por la barrera

arrecifal. Generalmente el oleaje es atenuado y reorientado de forma perpendicular a la costa y disminuye el transporte de sedimentos.

Bibliografía

- Coronado, C., J. Candela, R. Iglesias-Prieto, J. Sheinbaum, M. López y F.J. Ocampo-Torres. 2007. On the Circulation in the Puerto Morelos Fringing Reef Lagoon. *Coral Reefs* 26(1): 149-63. doi:10.1007/s00338-006-0175-9.
- Escudero, M. 2011. Análisis de la hidrodinámica del oleaje en la costa de Puerto Morelos Quintana Roo, México. Tesis de Maestría, Universidad de Cantabria. 171 p.
- Goda, Y. 2000. *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific. Singapore. 462 pp.
- NOAA: Rip and Longshore Currents, en <<http://www.srh.noaa.gov/bro/?n=ripcurrentdefinition>> (consultado el 3 de enero de 2016).
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., I. Mariño-Tapia, C. Enriquez, R. Silva y M. González-Leija. 2013. The Role of Fringing Coral Reefs on Beach Morphodynamics. *Geomorphology* 198. 69-83. doi:10.1016/j.geomorph.2013.05.013.

1.3 La barrera arrecifal podría incrementar la cota de inundación debido al fenómeno de resonancia

La geomorfología es un factor importante para la determinación de riesgos de inundación; debido a fenómenos de interacción, puede exacerbar o disipar el oleaje. El *surf beat* es una oscilación de la superficie del mar dentro de la zona submareal, relacionada con la interacción de los grupos de olas incidentes (Nakaza e Hino, 1990), puede ser afectado por el fenómeno de resonancia y por la energía de ruptura de ola (Roeber y Bricker, 2015; Nakaza e Hino, 1990).

La resonancia, en el caso más general, se puede entender a partir de las ondas estacionarias. Éstas se generan cuando una onda encuentra un obstáculo y al rebotar (reflexión), amplifica la onda original (figura 20). El tsunami de 2009 en Samoa Americana, provee un ejemplo claro del efecto y consecuencias de la resonancia en las áreas aledañas a la zona costera.

En el caso de Samoa, gracias a un modelo numérico validado con mediciones in situ (NEOWAVE), pudieron identificarse ondas estacionarias con períodos de entre 3 y 18 minutos sobre el arrecife de coral, pero también, sobre la pendiente y plataforma insulares (Roeber *et al.*, 2010). Estas ondas estacionarias generaron resonancia a diferentes escalas sobre la batimetría de la zona. Las consecuencias fueron claras: aquellas zonas o ciudades que no fueron afectadas por el fenómeno de resonancia sufrieron un menor grado de inundación aun y cuando por su ubicación se hubiera esperado un efecto más severo, véase figura 21 (Roeber *et al.*, 2010). Cabe destacar que la resonancia se originó no solo sobre el arrecife de coral, sino también sobre la pendiente y plataforma insulares.

Existe otro fenómeno relacionado con el arrecife de coral, en el cual la abrupta ruptura permite que la energía de las olas se transfiera a frecuencias de infragravedad (*surf beat*), provocando también un aumento en el grado de inundación. Un

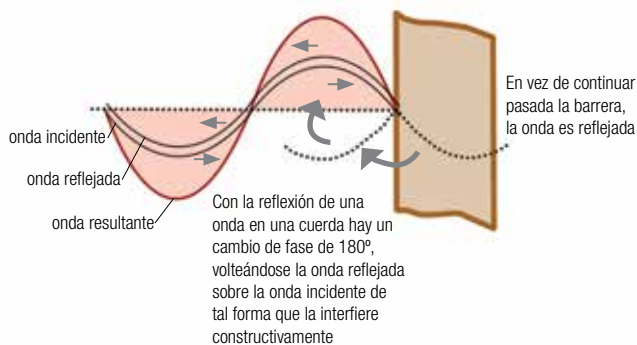


Figura 20. Representación de onda estacionaria: la onda incidente viaja hasta encontrar un obstáculo. La onda reflejada, con las mismas características de la onda incidente, viaja en dirección contraria.

La interacción cuando es constructiva se llama resonancia (tomada de Hyper-Physics, 2015).



Figura 21. Arriba, destrozos en el estacionamiento de Pago Plaza, Samoa Americana. Foto de Gordon Yamasaki (tomada de USGS, 2015). Centro, gente camina por la calle aún inundada en Pago Pago, Samoa Americana, 29 de septiembre, 2009. Abajo, bote sacado del mar por oleaje de tsunami en Fagotogo (tomadas de National Geographic News, 2015).

ejemplo fue lo acontecido durante el tifón Haiyan que golpeó Filipinas el 8 de noviembre de 2013 (Roeber y Bricker, 2015).

En primera instancia, para la comprensión del fenómeno, los investigadores utilizaron un modelo con fases promediadas, es decir, que no toma en cuenta la interacción que pueda originarse por los grupos de olas de diferente período y altura. Este tipo de modelos suele ser utilizado en Estados Unidos para la determinación de riesgos en zona costera (Roeber y Bricker, 2015). El modelo pudo reconstruir, con precisión, el grado de inundación en Tacloban (figura 22), una de las ciudades más afectadas. Los fuertes vientos provocados por el tifón, aunados a la morfología y ubicación de la ciudad, provocaron una inundación mayor a 6 m. Sin embargo, el modelo subestimó la inundación de otra ciudad, Hernani. Por lo que se implementó un modelo BOSZ (Boussinesq-Type phase-resolving wave model) que permite resolver o estimar la interacción entre grupos, las olas individuales y la inclinación del *surf beat*.

El modelo BOSZ permitió reproducir el fenómeno ocurrido en Hernani, además de identificar el fenómeno involucrado. En este caso, la inundación fue provocada por la ruptura abrupta de las olas sobre la barrera arrecifal, lo cual provoca la exacerbación del *surf beat*, produciendo un mayor grado de inundación. De hecho, el peor escenario sería que se dieran a la par los dos fenómenos: la exacerbación debida a la resonancia, y la debida a la ruptura del oleaje sobre el arrecife (Roeber y Bricker, 2015). Análisis más detallados con el modelo BOSZ muestran que el arrecife tiene un efecto protector para tormentas de hasta la mitad del tifón Haiyan (Roeber y Bricker, 2015).

De forma similar, la barrera arrecifal de Puerto Morelos puede aumentar o disminuir los riesgos de inundación en función de la morfología de la laguna y del oleaje incidente (Torres-Freyermuth *et al.*, 2012). La laguna de Puerto Morelos,

hasta cierto punto, tiene una amplia gama de condiciones morfológicas. Los 4 km de arrecife de coral que limitan la laguna varían el ancho de la misma de 1 500 m, en el extremo norte, a 500 m hacia el extremo sur. Además, la profundidad de la barrera arrecifal oscila entre 5.3 y 0 m (Torres-Freyermuth *et al.*, 2012). Tal gama de disposiciones implica que para las mismas condiciones de oleaje, se puedan tener respuestas diferenciales a lo largo de la laguna.

En el caso del fenómeno de resonancia se ha encontrado que es más probable que pueda presentarse en el extremo sur, pues el período de oscilación concuerda con el período de las ondas de infragravedad generadas en la zona (cuadro 2), mientras que el ancho de la zona norte parece evitar dicho fenómeno, al menos para las condiciones de oleaje utilizadas (T entre 6 y 14; Hs entre 2 y 7 m) (Torres-Freyermuth *et al.*, 2012). Sin embargo, el modelo implementado es unidimensional, es decir, que utilizó trayectos perpendiculares a la costa (figura 23), por lo que los mismo autores, recomiendan la implementación de modelos 2 D para enriquecer los resultados (Torres-Freyermuth *et al.*, 2012).

Cuadro 2. Periodos de oscilación calculados mediante Kowalik y Murty, 1993 (tomado de Torres-Freyermuth *et al.* 2012)

Perfiles	To (s)	T1(s)	T2(s)
P0	639	213	128
P1	1122	374	224
P2	1326	442	265
P3	1605	535	321

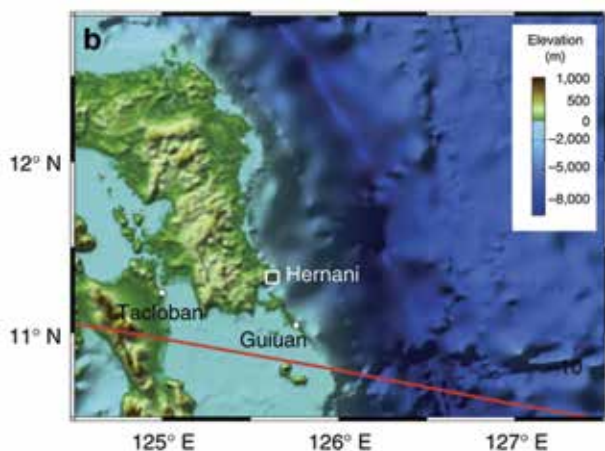


Figura 22. Ubicación de Hernani y Tacloban, la línea roja representa la trayectoria del tifón Haiyan (Yolanda) (tomada de Roeber y Bricker, 2015).

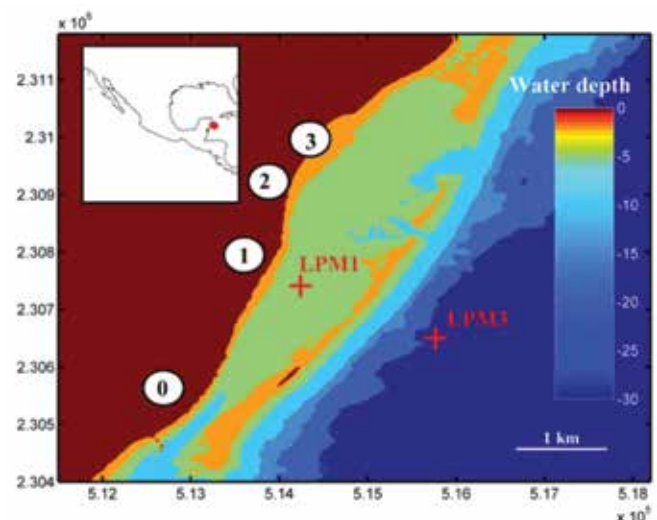


Figura 23. Ubicación de perfiles evaluados en Puerto Morelos (tomada de Torres-Freyermuth *et al.*, 2012).

Contrario a Hernani (Filipinas), Puerto Morelos tiene un arrecife de borde, en el cual las olas de infragravedad pueden incluso romper (Franklin, 2015), por lo que lo ocurrido en Filipinas es improbable. De hecho, en este caso, el arrecife cumpliría una función protectora, disipando la energía de estas olas.

Metodología de Torres-Freyermuth *et al.*, 2012

Se utilizó el modelo de SWASH de código abierto, desarrollado por la universidad de Tecnología Delf. La validación fue hecha a partir del experimento de laboratorio de Demirbilek *et al.*, 2007 y en base a las observaciones de campo en Puerto Morelos de Coronado *et al.*, 2007. La implementación se realizó en cuatro perfiles (unidimensionales) distribuidos a lo largo de la laguna (figura 23), hasta 20 metros de profundidad y utilizando un oleaje sintético de tipo JONSWAP. El rango de condiciones de oleaje fue H_s de 2 a 7 metros y periodos de 6 a 14 s.

Conclusión

Como vemos, el conocimiento de la geomorfología regional es determinante para la evaluación de los riesgos de inundación. La interpretación de dichos riesgos no implica la desvalorización de la barrera arrecifal como protección de la zona costera. Fenómenos como la resonancia pueden ser provocados también por la pendiente y la plataforma insular o continental. Estos ejemplos nos advierten que si estas variables no son tomadas

en cuenta se pueden subestimar los riesgos de inundación. Por ello, es recomendable utilizar modelos que permitan resolver o evaluar la fase del oleaje incidente para no omitir fenómenos como la interacción de la energía de ruptura del oleaje y el *surf beat*. En el caso de Puerto Morelos, se ha visto que pueden presentarse respuestas diferenciales a lo largo laguna debido a la gama de condiciones que provee el arrecife de coral. Así, estudios posteriores deberían involucrar dichas condiciones y preferentemente modelos de dos dimensiones.

Bibliografía

- Coronado, C., J. Candela, R. Iglesias-Prieto, J. Sheinbaum, M. López y F.J. Ocampo-Torres. 2007. On the Circulation in the Puerto Morelos Fringing Reef Lagoon. *Coral Reefs* 26(1): 149-63. doi:10.1007/s00338-006-0175-9.
- Franklin, G.L. 2015. Effects of roughness on wave-dominated coral reef environments. Tesis doctoral. CINVESTAV. 165 pp.
- Hyper Physics, en <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>> (consultada 15 noviembre).
- National Geographic News, en <<http://news.nationalgeographic.com/news/2009/09/>> (consultada 15 de noviembre de 2015).
- Nakaza, E. y M. Hino. 1991. Bore-like Surf Beat in a Reef Zone Caused by Wave Groups of Incident Short Period Waves. *Fluid Dynamics Research* 7(2): 89-100. doi:10.1016/0169-5983(91)90062-N.
- Roeber, V., y J.D. Bricker. 2015. Destructive Tsunami-like Wave Generated by Surf Beat over a Coral Reef during Typhoon Haiyan. *Nature Communications* 6 (7854). doi:10.1038/ncomms8854.
- Roeber, V., Y. Yamazaki y K.F. Cheung. 2010. Resonance and Impact of the 2009 Samoa Tsunami around Tutuila, American Samoa. *Geophysical Research Letters* 37(21): 1-8. doi:10.1029/2010GL044419.
- Torres-Freyermuth, A., I. Mariño-Tapia, C. Coronado, P. Salles, G. Medellín, A. Pedrozo-Acuña, R. Silva, J. Candela y R. Iglesias-Prieto. 2012. Wave-Induced Extreme Water Levels in the Puerto Morelos Fringing Reef Lagoon. *Natural Hazards and Earth System Science* 12(12): 3765-73. doi:10.5194/nhess-12-3765-2012.

1.4 La barrera arrecifal propicia un diferencial en la altura de la columna de agua, entre el nivel interno y externo de la laguna arrecifal, provocando corrientes dentro y fuera de ella (mar abierto), lo cual mantiene el flujo de nutrientes y contaminantes

La circulación dentro de un sistema de laguna arrecifal se encuentra dominada por el oleaje incidente (Lowe *et al.*, 2010; Taskjelle *et al.*, 2014). Éste genera una sobreelevación del nivel medio del mar, llamada en inglés *setup*, que provoca el flujo a través del arrecife hacia la costa, debido a la diferencia de altura que se da entre la zona de ruptura y la laguna (η_L), véanse figuras 24 y 25 (Lowe *et al.*, 2010). En la vista de plano (figura 24, derecha) se puede apreciar la circulación por los canales de la laguna arrecifal. Es el proceso de balance del nivel de agua de la laguna con el mar. Es un sistema complejo dentro del cual se pueden considerar varios aspectos:

1. Morfología del arrecife: pendiente frontal, ancho de la planicie arrecifal, altura de la cresta, rugosidad del arrecife y su ubicación respecto a la línea de costa.
2. Morfología de la laguna: profundidad y ancho de los canales.
3. Condiciones de oleaje y marea (Taskjelle *et al.*, 2014; Enriquez *et al.*, 2014).

Estas variables son interdependientes, es decir, por ejemplo, la importancia de la morfología del arrecife en la circulación lagunar dependerá de la morfología de la laguna. De hecho, para poder excluir su efecto de la circulación, la laguna debería tener una profundidad de al menos 10% de la longitud de la planicie arrecifal, mientras que para excluir el efecto de los canales, éstos deberían tener el ancho de la barrera arrecifal. Estas condiciones no suelen cumplirse en los arrecifes de borde (Lowe *et al.*, 2010).

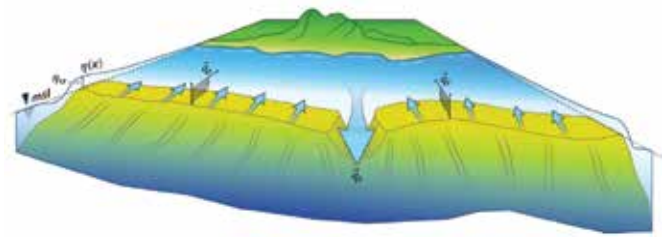


Figura 25. Vista frontal de un sistema lagunar delimitado por la barrera arrecifal. Como en la figura 24, el oleaje genera un flujo (q_r) hacia el interior de la laguna y una sobreelevación del agua (η) respecto al nivel medio del mar (mean sea level, msl); simplificando la cantidad de agua que entra a la laguna por los flujos q_r , debe ser compensada por la cantidad de agua saliente por el flujo de la boca (q_c) (tomada de Lowe y Falter, 2015).

En el caso de Puerto Morelos, la laguna tiene anchos de entre 500 y 1500 m, con una profundidad promedio de ~4 m (Coronado *et al.*, 2007) que equivale a menos de 1% del ancho de la plataforma arrecifal, por lo que el papel de la laguna en la circulación no puede ser excluido. Respecto a la barrera arrecifal, se ha visto que su influencia es mayor cuando se encuentra más cerca de la línea de costa, y disminuye conforme la laguna alcanza su mayor ancho (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013).

En cuanto a la hidrodinámica, se ha observado que la circulación se encuentra dominada por el oleaje incidente (Coronado *et al.*, 2012; Enriquez *et al.*, 2012). La zona es micro-mareal, con un rango de marea que oscila de 7 a 32 cm, por lo que su papel en la circulación es menor. Puede llegar a generar corrientes residuales menores a 0.008 m/s dirección suroeste. En el caso del viento, si tiene dirección noreste-este puede incrementar el setup y cuando proviene del sureste llega a generar corrientes hacia el norte (Enriquez *et al.*, 2012).

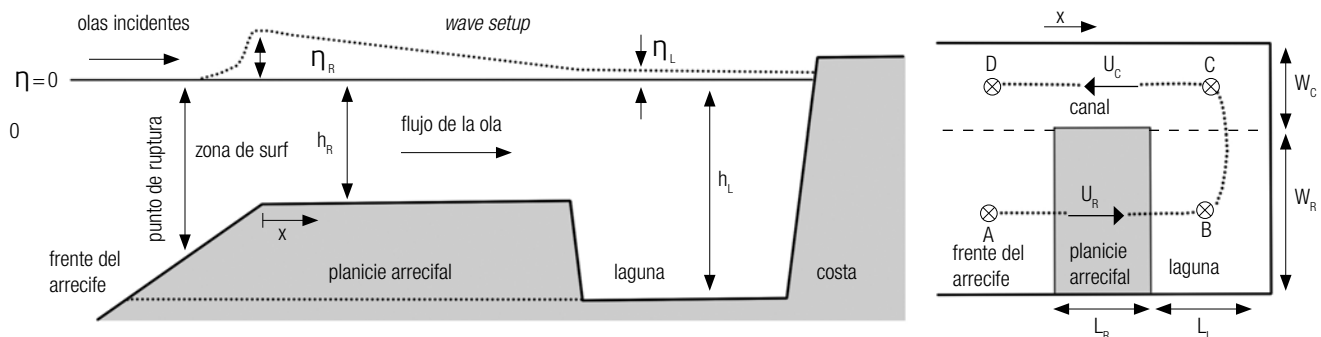


Figura 24. Circulación lagunar: izquierda, sección transversal; derecha, vista superficial (vista de plano) (tomada de Lowe *et al.*, 2010).

Es interesante que para esta laguna hay una variable más a considerar: la corriente de Yucatán, la cual modula la circulación indirectamente porque afecta el nivel del agua en la zona. Cuando la corriente de Yucatán se intensifica, el nivel del agua enfrente de la laguna disminuye. Este fenómeno merma la energía del oleaje incidente, porque la zona de ruptura es desplazada mar adentro e incrementa la distancia que tienen que atravesar las olas sobre el arrecife, lo cual aumenta el efecto fricción y, por lo tanto, la disipación del oleaje. Además, la fricción producida por el fondo marino y el arrecife se intensifican debido a la disminución del nivel medio del mar (Coronado *et al.*, 2007).

Particularmente, en Puerto Morelos se ha estudiado el efecto de la rugosidad sobre la elevación producida, o setup, mediante modelación numérica (Franklin *et al.*, 2013). Se encontró que el setup disminuye conforme merma la rugosidad del arrecife. Como vimos, éste es una parte importante del mecanismo de circulación lagunar, su disminución podría verse reflejada en un aletargamiento de la circulación y en tiempos de residencia mayores. El tiempo de residencia en una laguna arrecifal aumenta tanto la exposición a los contaminantes, como las posibilidades de alcanzar temperaturas locales más altas por la radiación solar (Franklin *et al.*, 2013). Sin embargo, faltan estudios que permitan corroborar dichos resultados.

Conclusión

El factor dominante de la circulación lagunar en Puerto Morelos es el oleaje. Su influencia es modificada por las características morfológicas de la barrera arrecifal y de la laguna. Existe tam-

bién modulación indirecta por parte de la corriente de Yucatán. Y se ha encontrado que la pérdida de rugosidad podría estar jugando un importante papel, generando tiempos de residencia mayores. Sin embargo, faltan estudios multifactoriales que permitan identificar el peso de cada uno de los factores involucrados.

Bibliografía

- Coronado, C., J. Candela, R. Iglesias-Prieto, J. Sheinbaum, M. López y F.J. Ocampo-Torres. 2007. On the Circulation in the Puerto Morelos Fringing Reef Lagoon. *Coral Reefs* 26 (1): 149-63. doi:10.1007/s00338-006-0175-9.
- Enriquez, C., I. Mariño-Tapia, A. Valle-Levinson, A. Torres-Freyermuth, R. Silva. 2012. (Poster). Mechanisms driving the circulation in a fringing reef lagoon: a numerical study.
- Franklin, G., I. Mariño-Tapia y A. Torres-Freyermuth. 2013. Effects of Reef Roughness on Wave Setup and Surf Zone Currents. *Journal of Coastal Research* 65:2005-10. doi:10.2112/SI65-339.1.
- Lowe, R.J., C. Hart y C.B. Pattiaratchi. 2010. Morphological Constraints to Wave-Driven Circulation in Coastal Reef-Lagoon Systems: A Numerical Study. *Journal of Geophysical Research* 115 (C9): C09021. doi:10.1029/2009JC005753.
- Lowe, R.J. y J.L. Falter. 2015. Oceanic Forcing of Coral Reefs. *Annual Review of Marine Science* 7(1):43-66. doi:10.1146/annurev-marine-010814-015834.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., I. Mariño-Tapia, C. Enriquez, R. Silva y M. González-Leija. 2013. The Role of Fringing Coral Reefs on Beach Morphodynamics. *Geomorphology* 198:69-83. doi:10.1016/j.geomorph.2013.05.013.
- Taskjelle, T., K. Barthel, K.C. Christensen, N. Furaca, T. Gammelsrød, A.M. Hogue y B. Nharreluga. 2014. Modelling Alongshore Flow in a Semi-Enclosed Lagoon Strongly Forced by Tides and Waves. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 149:294-301. doi:10.1016/j.ecss.2014.09.008.

1.5 La continua presión antropogénica conduce a la degradación del coral y a la disminución de su tasa de crecimiento, comprometiendo la estructura arrecifal

Los arrecifes del Caribe han perdido su complejidad y estructura

La complejidad arrecifal en todo el Caribe ha disminuido drásticamente desde la década de 1960. Para 2009, 75% de las comunidades coralinas presentaban índices muy bajos de rugosidad (menores a 1.5) y prácticamente todas las comunidades coralinas con alta rugosidad han desaparecido (índices mayores a 2), figuras 26 y 27 (Álvarez-Filip *et al.*, 2009).

La estructura física y la complejidad del sistema arrecifal son necesarias para mantener la hidrodinámica lagunar y reducir la energía del oleaje. Por lo tanto, la pérdida de rugosidad cambia la hidrodinámica de la laguna, aumenta el transporte de sedimentos y disminuye el servicio de protección costera (Álvarez-Filip *et al.*, 2009; Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013; Álvarez-Filip *et al.*, 2015).

La pérdida de rugosidad conlleva la pérdida de complejidad; la complejidad es necesaria para mantener la alta biodiversidad propia de los ecosistemas coralino, ya que provee refugio a peces e invertebrados frente a depredadores y antiestresores ambientales. La pérdida de complejidad incide negativamente en los ciclos de vida de los peces e invertebrados, disminuye la riqueza, abundancia y biomasa de especies y la viabilidad de las pesquerías (Álvarez-Filip *et al.*, 2009; Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013; Álvarez-Filip *et al.*, 2015).

Los fenómenos determinantes de la degradación arrecifal sufrida en el Caribe son (Kennedy *et al.*, 2013):

- Los peces arrecifales fueron sobreexplotados en los años 60 y 70 del siglo pasado. Sin depredadores, los erizos de mar se expandieron rápidamente. Esta sobrepoblación dañó los arrecifes al ocasionar la bioerosión de los corales, con excepción de los sitios donde existía una alta abundancia de algas coralinas (coberturas mayores a 55%), en cuyo caso el crecimiento de algas fue controlado por los erizos.
- Fuertes brotes de la enfermedad de la banda blanca ocurrieron en los 70 y 80, los cuales provocaron una drástica reducción de *Acropora palmata* y *Acropora cervicornis*, especies importantes en la formación del arrecife (Álvarez-Filip *et al.*, 2009; Kennedy *et al.*, 2013).
- Entre 1983-1984 ocurrió una reducción masiva de erizos de mar, *Diadema antillarum*, relacionada probablemente con una enfermedad infecciosa. Las algas, ya sin sus depredadores naturales (peces arrecifales y erizos de mar), empezaron a incrementar su presencia y a ganar espacio al coral (Blanchon *et al.*, 2010).

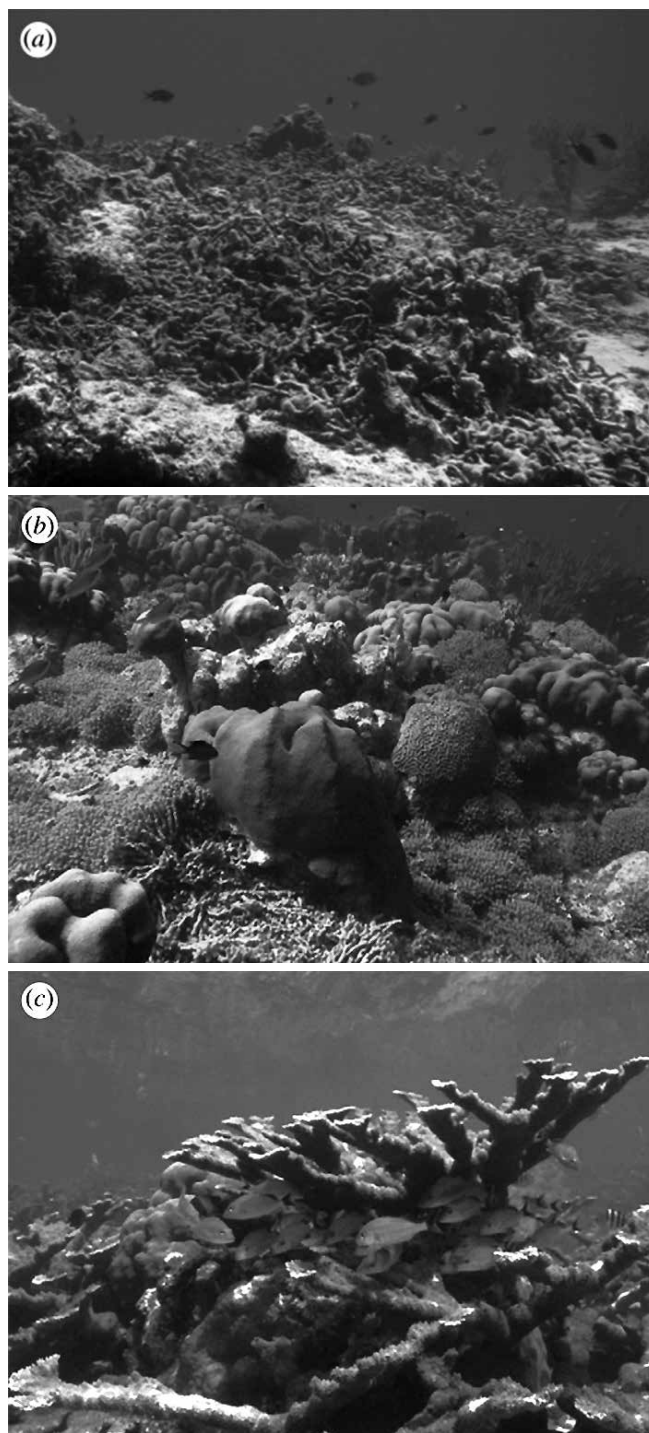


Figura 26. Ejemplo de tres valores del índice de rugosidad en arrecifes del Caribe: a] 1.2, b] 1.5 y c] 2.5. Este índice de rugosidad es uno de los métodos más ampliamente utilizados para expresar la complejidad estructural del coral; se obtiene de la relación entre el largo total de una cadena y el largo de ésta cuando se extiende sobre la superficie de interés (Risk, 1972). Los valores van desde 1 para una superficie completamente plana, hasta 3 para un coral con gran complejidad estructural. Aunque pueden existir valores más altos, no suelen ser comunes (Álvarez-Filip *et al.*, 2009). Fotos de L. Álvarez-Filip, M. Uyarra y M. Henry (Tomado de Álvarez-Filip *et al.*, 2009).

- Dos severos eventos de blanqueamiento causaron gran mortalidad en los corales en 1998 y 2005. Desde 1998 los blanqueamientos han sido cada vez más frecuentes (Álvarez-Filip *et al.*, 2009) debido al prevalente aumento de la temperatura superficial del mar.
- Particularmente en Puerto Morelos, el huracán Gilberto (1988) ocasionó una reducción de las especies de corales pétreos de 16% a 12%, y de la cobertura de coral de 8.4% a 3.1% (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010).

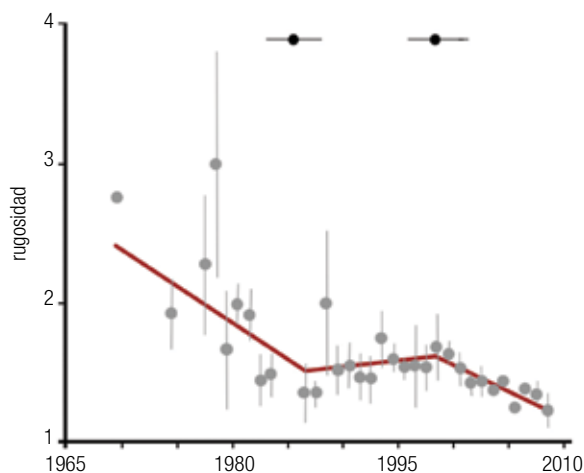


Figura 27. Cambios de la rugosidad de arrecifes en el Caribe entre 1969 y 2008. Línea roja: modelo ajustado (media $\pm$ intervalos de confianza). Las pendientes de 1969 a 1984, de 1985 a 1997 y de 1998 a 2008 son -0.054, 0.008 y -0.038, respectivamente. Los puntos negros en la parte superior del gráfico indican los puntos de inflexión significativos, 1985 y 1998 (tomada de Álvarez-Filip *et al.*, 2009)

El proceso de calcificación es esencial para mantener la complejidad y la estructura del arrecife

La calcificación es un proceso fisiológico que forma parte del crecimiento del coral y que determina el tamaño y complejidad de las comunidades coralinas. El balance de la calcificación nos indica si un coral está en acreción estructural o en etapa de desintegración. La calcificación requiere energía, por lo que las condiciones ambientales deben ser adecuadas para que los corales puedan usar su energía en crear esqueleto y no en combatir enfermedades o competir con algas, entre otros. Las variables que determinan la tasa de calcificación son: luminosidad, saturación de carbonato en el agua, turbidez, exposición al oleaje, la tasa de reproducción de corales y la temperatura del agua (Adame *et al.*, 2012).

Para asegurar que se mantenga la estructura y complejidad del arrecife es necesario que la tasa de calcificación sea mayor que la tasa de erosión (Kennedy *et al.*, 2013). Si el co-

ral no tiene la capacidad de construir su esqueleto (acreación), no podrá recuperarse de los daños ambientales y mecánicos que sufra (erosión). Aquellos procesos que limitan la tasa de calcificación de los corales y los eventos que resulten en la disminución de la cobertura coralina, pueden comprometer seriamente la estructura del arrecife (Blanchon *et al.*, 2010). Como se indicó, el huracán Gilberto ocasionó la reducción de especies de corales pétreos y la cobertura de coral en los arrecifes de Puerto Morelos (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010), de cuyo impacto no se ha recuperado. El monitoreo realizado durante 12 años en Puerto Morelos (1993-2005, Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010) muestra que hasta 2010, la recuperación de las comunidades coralinas ha sido precaria, indicando poca resiliencia a dichos fenómenos. “La comunidad coralina parece estar estancada en una etapa inicial de desarrollo. La cobertura de coral es muy baja (3%) y tiene una densidad relativamente alta de colonias menores a 10 cm (75%), lo cual indica que existe un alto reclutamiento pero con bajas tasas de supervivencia y poca probabilidad de alcanzar tallas mayores” (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010). Por el contrario, las comunidades de los pastos marinos, gorgonias (corales blandos) y algas, muestran mayor resiliencia, en particular estas últimas han ganado superficie al coral duro (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010).

Algunos autores sugieren que las comunidades coralinas no colapsarán, sino que habrá un recambio por especies más resilientes (Hughes *et al.*, 2012) debido a que no todas reaccionan igual ante los cambios climáticos. Por ejemplo, *Porites astreoides* es ahora una de las especies más ampliamente distribuida en el Caribe y ha incrementado su cobertura relativa (cobertura total de coral/cobertura *P. astreoides*) de 20% a 50% entre 1970 y 2003. Sin embargo, *P. astreoides* ha mantenido su cobertura histórica debido a su resistencia a condiciones adversas, mientras que otras especies han disminuido o desaparecido (Green *et al.*, 2008).

Álvarez-Filip *et al.* (2013) demostraron que las especies de coral que pueden sobrevivir a las nuevas condiciones con mayor temperatura y acidez, no serán capaces de mantener ni la estructura ni la complejidad del arrecife aun cuando mantengan la cobertura. Las especies con altas tasas de reproducción son también las más resistentes a los cambios ambientales, sin embargo, suelen generar pequeñas colonias que contribuyen poco a la acreción del arrecife. Mientras tanto, las colonias masivas de corales formadores del arrecife suelen ser susceptibles a las variables ambientales (Álvarez-Filip *et al.*, 2013). La modelación de Álvarez-Filip *et al.* (2013) demuestra que el recambio de especies de coral resultará en una rápida pérdida de la tasa de calcificación y de la rugosidad arrecifal a pesar de que la abundancia total de coral vivo no cambie (figura 28). Álvarez-Filip modeló los cambios en complejidad arrecifal con cuatro especies formadoras de arrecife: *Acropora* (*A. palma-*

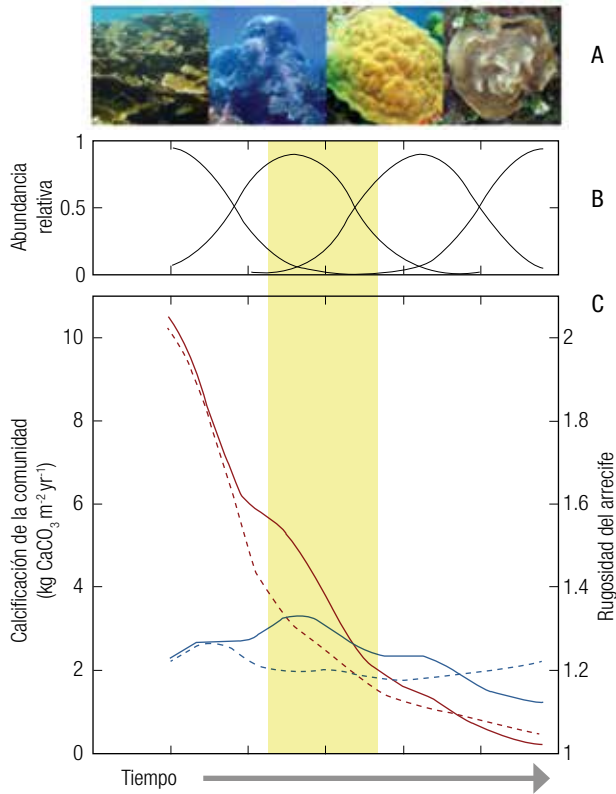


Figura 28. El recambio en los ensamblajes de coral tiene como resultado la rápida pérdida de la comunidad coralina y la rugosidad del arrecife. A) Imágenes de colonias: de derecha a izquierda: *Acropora*, *Orbicella*, *Porites*, *Agaricia*. B) Abundancia relativa vs tiempo, las curvas representan una sucesión de especies: mientras la abundancia de una especie disminuye, la siguiente aumenta, manteniendo una abundancia relativa constante. C) Tasa de calcificación (líneas continuas) y rugosidad arrecifal (líneas punteadas). Para considerar la incertidumbre del estado inicial del coral se proponen dos posibles escenarios: i) cobertura de coral decreciente de 45% a 10% (líneas rojas) y ii) recuperación de cobertura de 10% a 45% (líneas azules); la banda amarilla representa el estado actual de los arrecifes del Caribe (tomado de Álvarez-Filip *et al.*, 2013).

Metodología de Álvarez-Filip 2013

Se implementó un modelo para estimar el efecto del recambio de especies. Se utilizaron especies formadoras de arrecifes, *Acropora* (*A. palmata* + *A. cervicornis*) y *Orbicella* (*O. annularis* + *O. faveolata*) y especies competitivas con colonias pequeñas y menos complejas, *Porites astreoides* y *Agaricia agaricites*. Se utilizaron curvas de Gauss para simular la abundancia de cada especie y se traslaparon para que la abundancia relativa fuera siempre igual, cuando la abundancia de una especie empezaba a declinar la siguiente empezaba a predominar (figura 28 A). La sucesión de especies fue establecida de acuerdo a la tasa de calcificación (cuadro 3), la cual fue calculada en Puerto Morelos, México. En cada punto se evaluó la tasa de calcificación y rugosidad.

ta + *A. cervicornis*) y *Orbicella* (*O. annularis* + *O. faveolata*) y dos especies competitivas con colonias pequeñas y menos complejas, *Porites astreoides* y *Agaricia agaricites* (cuadro 3). La pérdida de *Acropora* es tan importante que aun y cuando se consideró una recuperación rápida de las otras especies, no fue posible recuperar ni la tasa de calcificación ni la rugosidad. El estudio fue hecho con tasas de calcificación medidas en Puerto Morelos.

Los factores que han influido en la disminución de la tasa de acreción pueden ser tanto globales como el incremento de la temperatura y la acidificación del mar, así como locales, tales como la contaminación por nutrientes y pesca de herbívoros (Kennedy *et al.*, 2013).

Cuadro 3. Extensión media, densidad media, estimación de la tasa de calcificación y rugosidad media por colonia. Entre paréntesis número de muestras (tomado de Álvarez-Filip *et al.*, 2013)

Genero	Tasa de extensión (cm/año)	Densidad (g/cm ³)	Tasa de calcificación (kg/m ² año)	Índice de rugosidad
<i>Acropora</i>	8.84 +/- 4.33	1.88 +/- 0.26	22.30	3.33 +/- 1.31 (n=13)
<i>Orbicella</i>	0.85 +/- 0.32	1.59 +/- 0.25	13.80	1.87 +/- 0.44 (n=46)
<i>Porites</i>	0.41 +/- 0.13	1.48 +/- 0.16	6.12	1.49 +/- 0.40 (n=51)
<i>Agaricia</i>	0.25 +/- 0.04	1.92 +/- 0.05	2.43	1.52 +/- 0.43 (n=73)

1.5.1 El incremento de la temperatura media del mar disminuye la tasa de calcificación de los corales, aumenta la frecuencia y severidad tanto del blanqueamiento de corales, como de enfermedades y huracanes

El incremento de la temperatura del mar afecta seriamente la estructura arrecifal al tener impactos negativos y severos sobre los corales, tales como el aumento de la frecuencia y severidad del blanqueamiento de coral (Blanchon *et al.*, 2010), de las enfermedades coralinas (Bruno *et al.*, 2003), de los huracanes (Webster *et al.*, 2005) así como de la disminución de la tasa de calcificación del coral (Kleypas *et al.*, 2005; Carricart-Ganivet *et al.*, 2012). Además del efecto sinérgico, mientras haya factores con un efecto directo (huracanes y blanqueamientos), otros pueden afectar la resiliencia del coral (enfermedades y la merma de la tasa de calcificación).

Disminución de la tasa de calcificación

La temperatura óptima para alcanzar la máxima tasa de calcificación está entre 26 y 28° C (Norzagaray-López *et al.*, 2014). Aun y cuando existen variaciones regionales, se espera que ocurra una disminución de la tasa de calcificación de los corales sometidos a temperaturas fuera de este rango (Kleypas *et al.*, 2005; Carricart-Ganivet *et al.*, 2012). De hecho, se estima que la calcificación cesará a 30° C para *Porites* spp. y a 35° C para *Montastraea* spp. (Carricart-Ganivet *et al.*, 2012).

Otro aspecto importante son las estrategias de adaptación de distintas especies de corales. Cuando *Porite* spp. está en estrés, invierte su energía en crecer rápido y reduce su tasa de calcificación provocando una pérdida de extensión superficial. Por el contrario, *Montastraea* spp. mantiene su tasa de acreción, pero reduce la densidad de su esqueleto. Por lo tanto, *Porite* spp. pierde cobertura y *Montastraea* spp. se vuelve más susceptible a disturbios físico y biológicos (Carricart-Ganivet *et al.*, 2012).

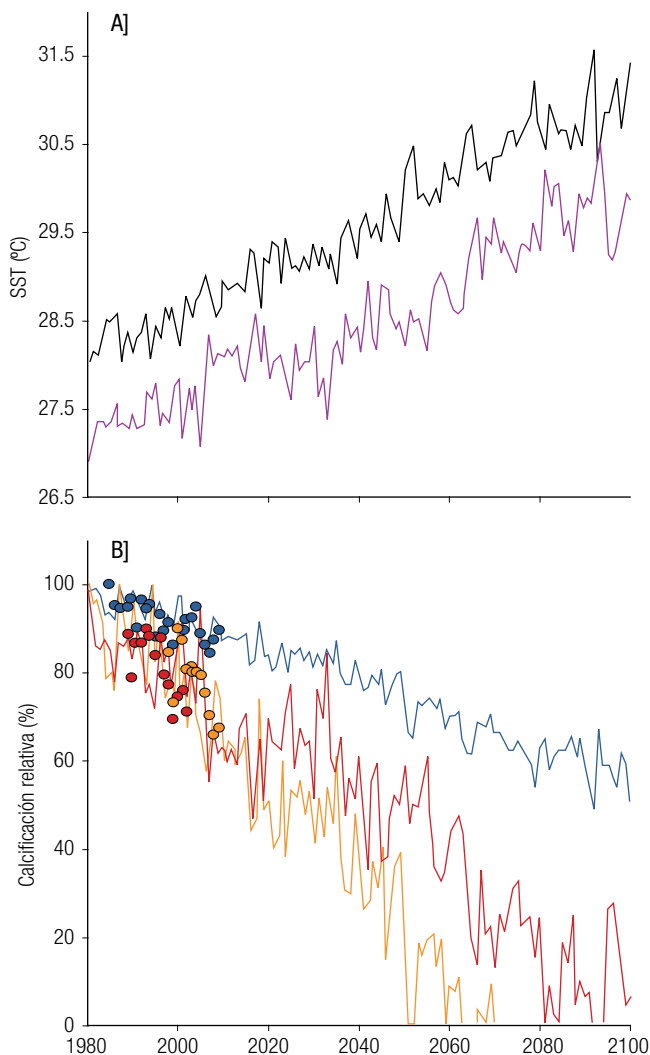


Figura 29. Modelación de la temperatura superficial del mar (SST) y la tasa de calcificación para *Porites* spp. y *Montastraea* spp. de 1980 a 2100. A) SST para la Gran Barrera Arrecifal (línea púrpura) y el Caribe (línea negra). B) Tasa anual relativa de calcificación para *Porites* spp. (línea roja) en la Gran Barrera Arrecifal y para *P. astreoides* (línea naranja) y *Montastraea* spp. (línea azul) en el Sistema Arrecifal Mesoamericano (tomadas de Carricart-Ganivet *et al.*, 2012).

Metodología de Carricart -Ganivet *et al.*, 2012

Las muestras fueron tomadas de la Gran Barrera Arrecifal (Australia), del arrecife de Mahahual (México) y de Banco Chinchorro (México). Estos últimos forman parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano. La tasa de calcificación se obtuvo del producto del crecimiento anual y la densidad del esqueleto. La SST se obtuvo de la base de datos del Hadley Centre Sea Ice and SST, la cual es producida por la oficina de meteorología de Reino Unido. El estado de saturación de aragonita se calculó mediante The National Acidification Product Suit ($v = .5$, NOAA). Para la estimación entre 1980 y 2100 se utilizó la modelación de Hoegh-Guldberg (1999) y en el caso de la calcificación se utilizó una regresión lineal.

Frecuencia y severidad de eventos de blanqueamiento de corales

Desde el punto de vista biológico, el blanqueamiento de coral es la ruptura de la relación simbiótica entre dinoflagelados (zooxantela) y sus hospederos (corales). El blanqueamiento puede ser iniciado por la exposición a condiciones ambientales extremas de temperatura, salinidad y radiación solar (Blanchon *et al.*, 2010). Al igual que la temperatura, el rango de resistencia al blanqueamiento puede variar localmente (Zhang *et al.*, 2013; Norzagaray-López *et al.*, 2014). De hecho, un coral que haya sobrevivido a un evento de altas temperaturas tendrá mayor resiliencia (Zhang *et al.*, 2013). Se ha determinado que se requiere un aumento de 1.5° C durante un periodo continuo de 3 a 4 semanas por encima de la media de verano (regional) para provocar un blanqueamiento de coral (Blanchon *et al.*, 2010; Hoegh-Guldberg, 1999).

Los mayores episodios de blanqueamiento de coral están relacionados con el fenómeno de el Niño, debido a que provoca un aumento en la temperatura superficial del mar, figura 30 (Hoegh-Guldberg, 1999). A partir de 1982 ha habido un incremento en la severidad, frecuencia y alcance geográfico en los eventos de blanqueamiento (figura 30). En 1998, se reportaron eventos masivos de blanqueamiento de coral en todo el mundo, coincidiendo con el Niño más severo registrado. Hasta 2015-2016, se estima que se perdió 16% de la cobertura total de corales en el mundo (Hoegh-Gulberg, 1999).

En Puerto Morelos el primer caso de blanqueamiento registrado fue en 1995 y desde entonces se han presentado blanqueamientos cada vez que la temperatura sobrepasa los 30° C. Los casos más severos fueron en 1995 y 2005, cuando más de 50% de las colonias presentaron blanqueamiento con diferentes grados de severidad. En 1998 el blanqueamiento en

la región no fue tan intenso como en otras partes del Caribe, sin embargo, las observaciones podrían estar sesgadas debido a la temporada en que se realizó el muestreo (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2011).

Incremento en la severidad de enfermedades

Rodríguez-Martínez *et al.* (2010) atribuyen el aumento de las enfermedades en Puerto Morelos al incremento de la temperatura. El mecanismo involucrado es complejo, sin embargo, se ha postulado que el aumento de la temperatura reduce la capacidad del coral para enfrentar las enfermedades. Simultáneamente, favorece los microorganismos involucrados en el desarrollo de poblaciones, su distribución y expansión, el cambio de la interacción mutualista a una de patogénesis y a la producción de metabolitos patógenos (en algunos *Vibrios*) (Blanchon *et al.*, 2010).

Ocurrencia de huracanes

Los estudios de huracanes indican que desde los 70 ha habido un aumento en la intensidad y en la frecuencia de huracanes (Webster *et al.*, 2005). El impacto en las comunidades coralinas es severo, pues la recuperación de los daños de un huracán puede llevar décadas o provocar daño irreparable, como en el caso de Gilberto (1988) en Puerto Morelos, donde la cobertura de coral vivo cayó a 3% sin mostrar ninguna recuperación (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010).

Conclusión

El aumento de la temperatura superficial del mar afecta seriamente la estructura arrecifal. Además del efecto independiente de cada factor, existe un efecto sinérgico que exagera el daño producido a los corales, acelera la degradación de los arrecifes y la pérdida de la estructura y la complejidad. Los huracanes y el blanqueamiento les pueden provocar graves daños en semanas, días e incluso horas. Mientras tanto, las enfermedades y la disminución de la tasa de calcificación no les permiten recuperarse de estos fenómenos, ocasionando daños irreversibles.

1.5.2 La acidificación del mar ha disminuido la tasa de calcificación de los corales en el Caribe mexicano

Como resultado de las actividades humanas, la concentración atmosférica de CO₂ en el 2008 excedió las 380 ppm, lo cual representa 80 ppm por arriba de los registros de al menos 74 000 años atrás. Durante el siglo xx, el incremento del CO₂ atmosférico ha provocado un aumento de 0.74° C en la temperatura de

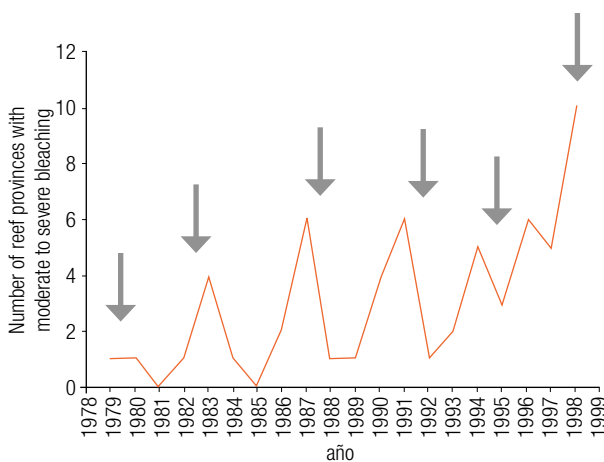


Figura 30. Número de provincias con blanqueamiento desde 1979. Las flechas indican los años en los que el fenómeno de el Niño fue más severo (tomado de Hoegh-Guldberg *et al.*, 1999).

la atmósfera, 17 cm del nivel medio del mar y 0.1 unidades del pH global de mar, además de una disminución en la concentración de carbonato de calcio en el océano de ~30 micromoles Kg^{-1} (Hoegh-Gulberg *et al.*, 2008). Debido a que la calcificación de los corales requiere de la presencia de carbonato en el agua de mar, Hoegh-Gulberg *et al.* (2008) estiman que los corales reducirán su crecimiento 40% cuando se alcancen 560 ppm (el doble de la concentración de la época preindustrial).

Se estima que aproximadamente 25% del CO_2 emitido a la atmósfera, es capturado por el océano donde reacciona con el agua formando ácido carbónico e hidrógeno; este último puede reaccionar con el carbonato disuelto limitando su disponibilidad para los sistemas biológicos (figura 31). La aragonita es una de las formas más solubles del carbonato de calcio y es ampliamente utilizada por los corales. El coral requiere pH básico y muy alta saturación de aragonita (niveles mayores a 3Ω)³ para su calcificación (Norzagaray-López *et al.*, 2014). Los niveles de saturación de aragonita inferiores a 3Ω producen estrés a los corales y los niveles inferiores a 1Ω provocan que las estructuras de coral comiencen a disolverse (NOAA, 2016).

En el Caribe mexicano (Carricart-Ganivet *et al.*, 2012) no se han detectado cambios de calcificación en los corales por cambios en la saturación de aragonita, sin embargo, los autores reconocen que su base de datos está limitada temporalmente (2003-2010) y no se han incluido todas las especies, además,

el proceso de calcificación es complejo por lo que el efecto de la aragonita podría estar enmascarado por otros factores.

Crook *et al.* (2012) estudiaron en Puerto Morelos el efecto de las descargas de agua subterránea (ojos de agua) que suelen tener pH ácido y baja saturación de carbonatos. Mediante observaciones encontraron que hay especies que pueden sobrevivir en estas condiciones, pero son limitadas respecto a las que se pueden encontrar en los alrededores. Las condiciones extremas encontradas en Puerto Morelos demuestran que hay especies que pueden tolerar e incluso mantener su calcificación en estas condiciones de acidez. Estos corales han estado continuamente sujetos a estrés, lo cual pudo haberlos obligado a adaptarse. La energía necesaria para la calcificación puede provenir de la reducción de otras actividades metabólicas, lo que podría estar provocando una tasa de crecimiento menor o mayor susceptibilidad a agentes físicos y biológicos (Crook *et al.*, 2012; Carricart-Ganivet *et al.*, 2012).

Finalmente, los autores sugieren que: “Bajo el grado de saturación de carbonatos actuales (2.5Ω), las especies que dominan la construcción de arrecife en el Arrecife Mesoamericano como *Acropora* y *Montastraea*, podrían ser remplazadas por pequeños parches arrecifales con pocas especies” (Crook *et al.*, 2012).

Conclusión

La saturación de aragonita en el Caribe pone en riesgo la estabilidad estructural de los arrecifes. No se puede exentar a México de este riesgo aun y cuando no se hayan presentado pruebas contundentes. Se sugiere que el estrés provocado por la disminución de aragonita podría comprometer otras funciones metabólicas haciendo al coral más susceptible a enfermedades y frágil a daño mecánico.

1.5.3 La contaminación del agua proviene de las actividades antropogénicas y afecta los arrecifes al propiciar o exacerbar enfermedades en los corales

La contaminación del agua de origen antropogénico puede afectar seriamente los sistemas coralinos. Las aguas residuales pueden reducir los niveles de calcificación, fotosíntesis, reclutamiento y reproducción de los corales, aumentar su susceptibilidad a enfermedades e incluso promover una mayor abundancia de sus competidores, como las algas (Fabricius, 2005; Baker, 2013).

El primer paso es determinar si los nutrientes que afectan a los corales son de origen antropogénico y no de fuentes naturales. El caso de la Península de Yucatán es más complejo debido al suelo cárstico y al sistema de circulación subterránea donde existen diversas interconexiones.

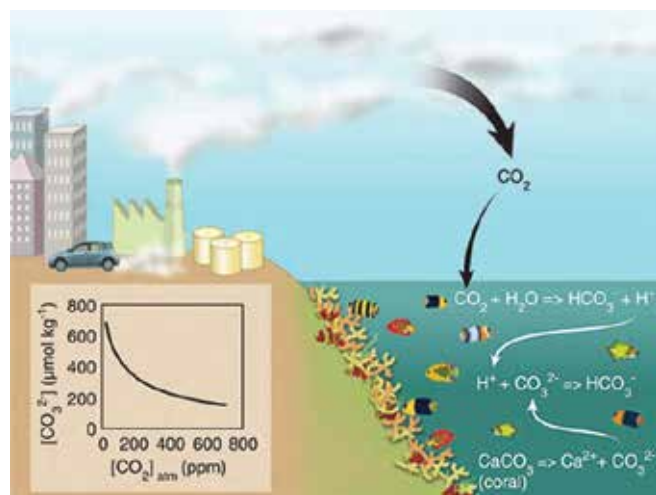


Figura 31. Interacción entre el incremento del CO_2 atmosférico y CO_3^{2-} disuelto. Aproximadamente 25% del CO_2 atmosférico es absorbido por el océano. Éste se disocia al entrar en contacto con el agua formando ácido carbónico e hidrógeno. El hidrógeno es capaz de reaccionar con el carbonato disuelto, limitando su disponibilidad para la formación de estructuras coralinas (tomada de Hoegh-Gulberg *et al.*, 2008).

³ El estado de saturación de aragonita se define como el producto de las concentraciones de los iones calcio (Ca^{2+}) y carbonatos (CO_3^{2-}) disueltos en el mar, divididos entre la solubilidad de aragonita en el agua de mar (CaCO_3) (SOEST 2016).

$$([\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}]) / [\text{CaCO}_3] = \Omega$$

Metodología de Crook *et al.* 2012

Las áreas de influencia de las descargas de agua subterránea fueron determinadas por medición directa de temperatura, salinidad y pH. Para las filtraciones circulares las muestras de agua fueron colectadas en intervalos de 25 cm, intersectando el ojo de agua y abarcando hasta 4 m hacia fuera de

este (figura 32). En el caso de las fracturas, las muestras se recolectaron a lo largo de trayectos de hasta 10 m siguiendo la fractura y en cinco o más trayectos perpendiculares a la misma. El agua se recolectó en jeringas. Se utilizaron cuadrantes de 0.25 X 0.25 m a lo largo de los trayectos para

seleccionar las áreas donde se midió la talla y posición de los corales. El carbono inorgánico disuelto y la alcalinidad fueron medidas por técnicas analíticas (culombimetría y potenciometría, respectivamente). También se cuantificó la presencia de nitratos, nitritos, amonio y fosfatos.

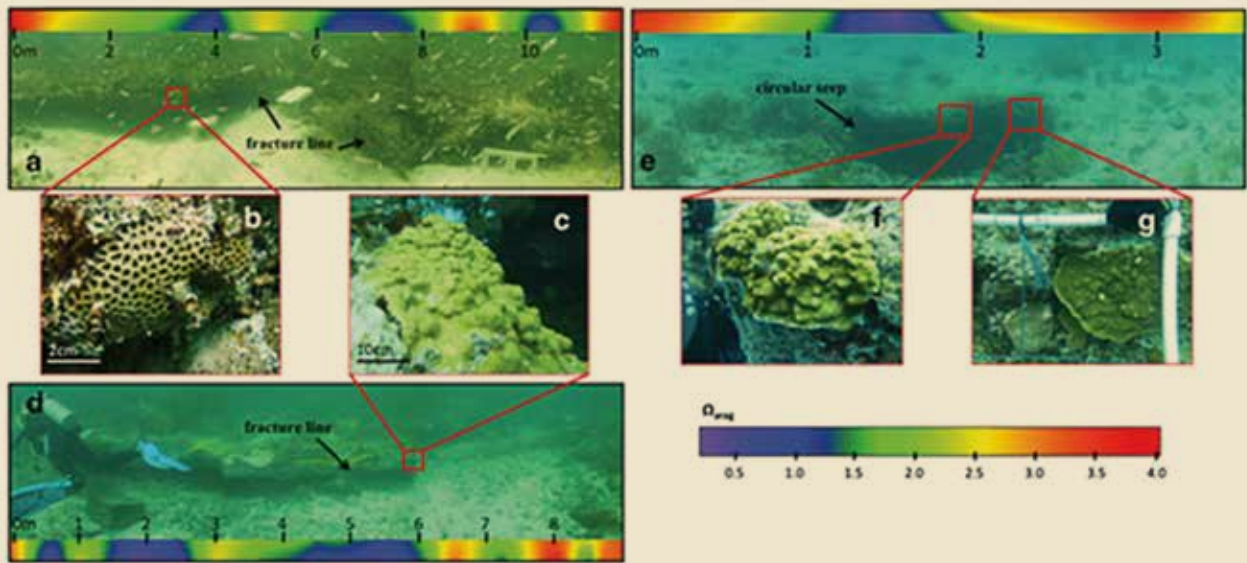


Figura 32. Distribución de la saturación de aragonita en la zona de influencia de los ojos de agua. La saturación se muestra en colores: de baja saturación (0.5Ω) en azul; la súper saturación (4.0Ω) en rojo. Dos ejemplos de fracturas: a) y d), un ojo de agua e) y las colonias de coral encontradas cerca de los ojos b) *Siderastrea radians* c y f) *Porites astreoides* g) *Agaricia* (tomada de Crook *et al.*, 2012).

El acuífero costero puede dividirse en 3 zonas: 1] lente de agua que tiene entre 10 y 100 m de espesor y constituye la franja superior; 2] la zona de agua salada constituida por una franja inferior y que puede introducirse hasta 100 km tierra adentro (intrusión salina) y la zona de mezcla (figuras 33 y 36) (Null *et al.*, 2014). La legislación permite usar la zona de agua salada para el depósito de aguas residuales porque se cree que el agua quedará confinada por años o décadas y su influencia en las comunidades marinas será limitada (Beddows *et al.*, 2007). Sin embargo, investigaciones en la Península de Yucatán (Baker *et al.*, 2007; Baker *et al.*, 2010; Baker *et al.*, 2013; Beddows *et al.*, 2010 y Hernández-Terrones, 2011) indican que la buena conectividad y la alta tasa de mezcla del acuífero hacen que la descarga de aguas residuales contamine el agua fresca y lleguen al mar.

Beddows *et al.* (2003) señalan que el agua sigue un sistema de cuevas y grietas conectándose con pozos, cenotes,

humedales y las costas, donde el agua es descargada mediante manantiales submarinos (ojos de agua), ubicados cerca de la laguna arrecifal. Por lo tanto, el acuífero de agua fresca

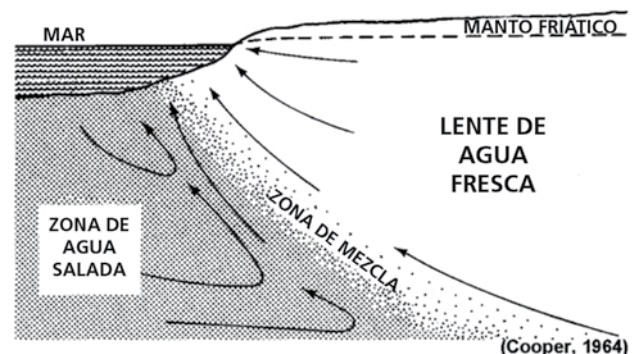


Figura 33. Esquema del acuífero (tomado de Beddows *et al.*, 2007).

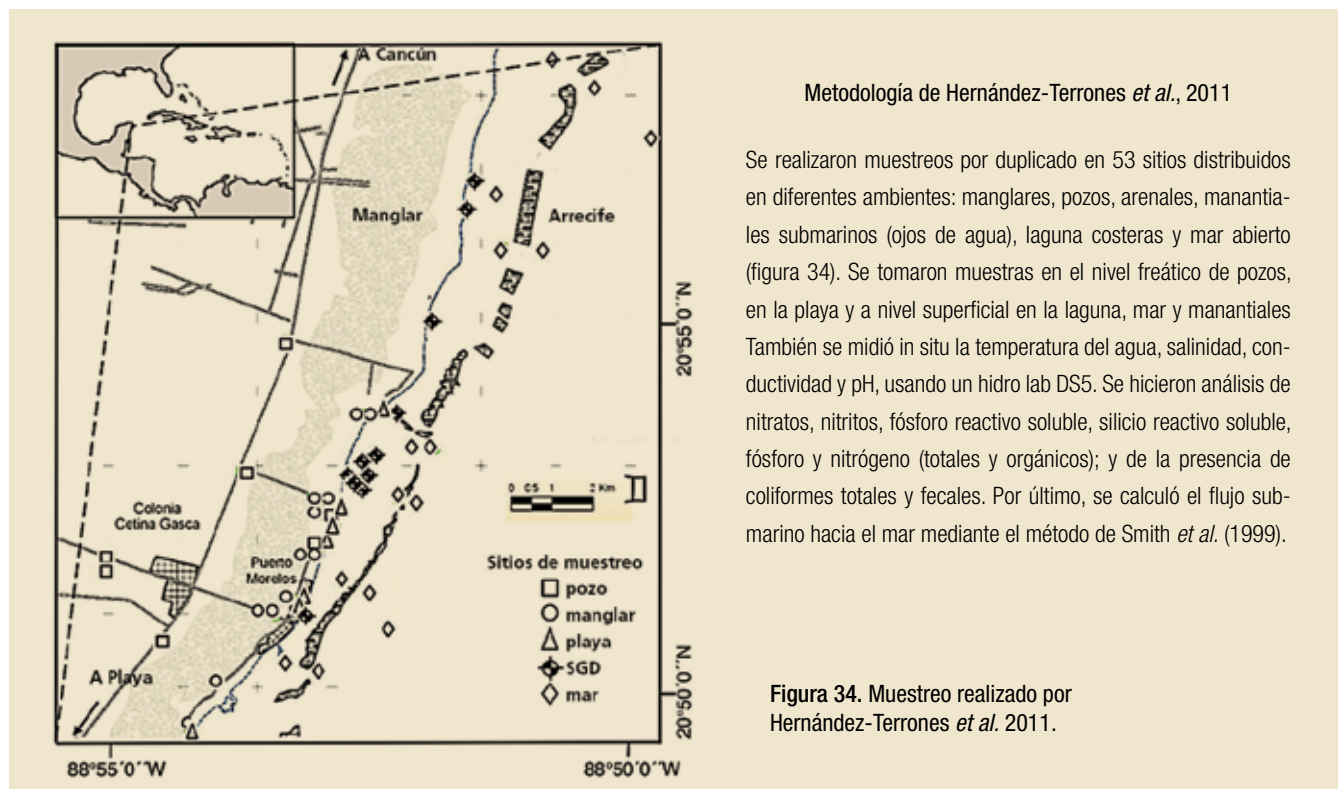
interactúa de forma activa con los ambientes costeros. Hernández-Terrones *et al.* (2011) analizaron la temperatura, los nutrientes, salinidad, la concentración de silicio activo y los coliformes (totales y fecales) de varios ambientes costeros y terrestres (playas, manglares, cenotes, manantiales submarinos, laguna arrecifal y mar abierto), para determinar esta relación. El sitio de estudio fue la costa, la laguna y alrededores de Puerto Morelos (figura 34).

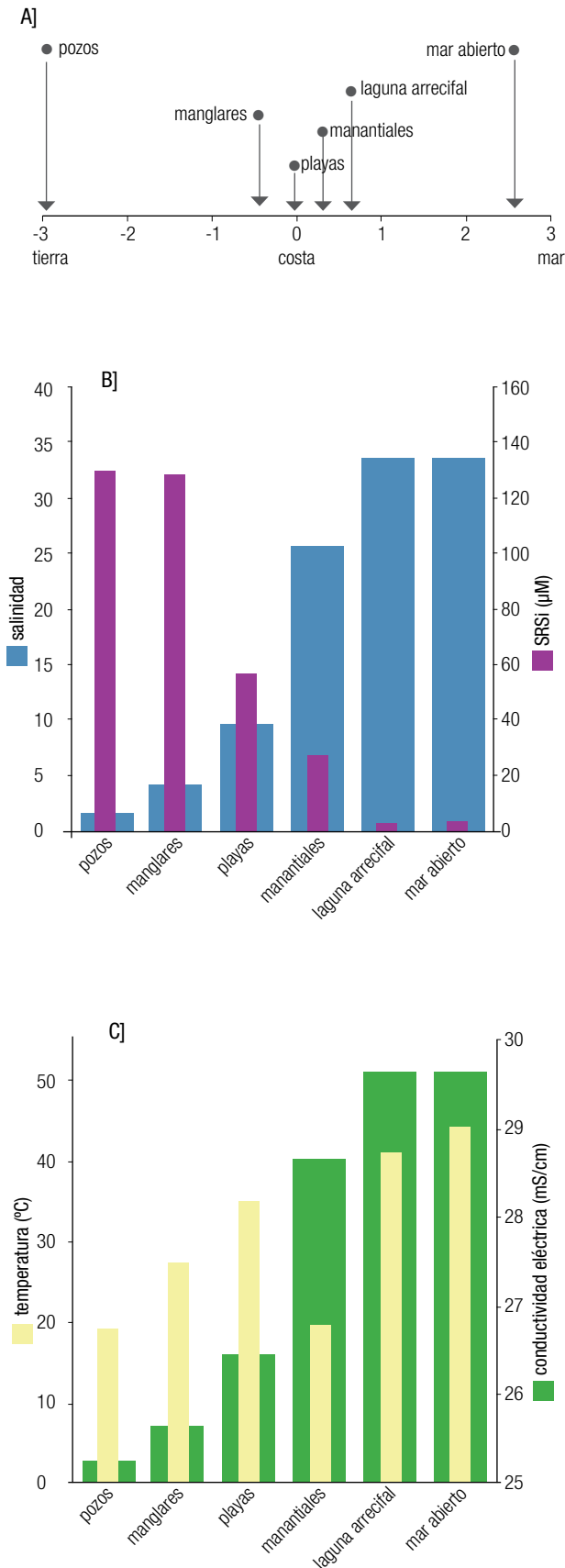
Los resultados indican la interconexión estrecha entre los sistemas costeros y la mezcla activa entre el agua dulce y la marina: 1] Los gradientes crecientes de salinidad y decrecientes de silicio-disuelto de los pozos en dirección al mar (figura 35) demuestran que las dos masas de agua intercambian compuestos en dirección opuesta (Hernández-Terrones *et al.*, 2011). El agua de mar (mayor salinidad) va hacia la tierra y el agua fresca (mayor concentración de silicio disuelto) va hacia el mar. 2] Los valores de temperatura destacan la conectividad entre los pozos y los manantiales submarinos. La temperatura del agua en los pozos ($\sim 26^{\circ}\text{C}$) aumenta conforme queda más expuesta a la radiación solar en los manglares, playas, laguna arrecifal y mar abierto (hasta $\sim 29^{\circ}\text{C}$). Sin embargo, los manantiales submarinos (ojos de agua) presentes en la laguna arrecifal mantienen una temperatura similar a la de los pozos (Hernández-Terrones *et al.*, 2011), indicando un flujo directo del acuífero interior hacia el mar. Otro resultado que sugiere la conexión directa entre el acuífero interior y los ojos de agua en el mar, es

que se ha comprobado que las fluctuaciones del nivel de algunos cenotes corresponden a variaciones de marea a distancias de hasta 20 km en la línea de costa (Gastelú-Bárcena, 2015; Rebolledo-Vieyra, comunicación personal febrero, 2016).

El tiempo de retención de las descargas de aguas residuales en la zona de agua salada podría ser muy limitado, debido a que existe una mezcla dinámica entre agua fresca y salada hasta una distancia de 4 km tierra adentro de la línea de costa (pudiendo alcanzar hasta 10 km), afectando pozos y cenotes (Beddows *et al.*, 2007). El modelo convencional de circulación subterránea prevé un flujo lento de las aguas superficiales, sin embargo, la temperatura de la zona de agua salada decrece tierra adentro, indicando que hay una mezcla y un flujo rápido de agua fresca en dirección al mar (Beddows *et al.*, 2007). En el modelo convencional este fenómeno ocasionaría una salinización gradual del agua dulce en su camino hacia el mar. Sin embargo, en la Península de Yucatán se encontró que los primeros 4 km tienen una alta tasa de mezcla. Probablemente la mezcla se deba al movimiento inducido por la marea y a la turbulencia causada por el choque con los obstáculos encontrados en los conductos. Conforme la distancia a la costa se incrementa más allá de los 4 km, la mezcla disminuye y la lente de agua fresca puede llegar a aislarse (Beddows *et al.*, 2007).

Por todo lo anterior, se espera que las descargas de aguas residuales o contaminantes en las zona de agua salada contaminen el lente de agua dulce y los ambientes costeros





(Hernández-Terrones *et al.*, 2011; Redding *et al.*, 2013; Beddows *et al.*, 2007). En consecuencia, el flujo y destino de la descarga de aguas residuales podría determinarse por la presencia de patógenos y nutrientes (nitrógeno, fósforo, etc.) en dichos ambientes. Hernández-Terrones *et al.* (2011) determinaron que el límite de nitrógeno permitido para el consumo humano está excedido en 80% de los pozos. De igual forma, encontraron una gran cantidad de coliformes fecales en manglares (125.4 unidades formadoras de colonias UFC/100mL) y en las descargas de agua subterráneas (679.9 UFC/100mL). Estos niveles indican probablemente la percolación de las aguas residuales hacia el lente de agua dulce y hacia el mar (Hernández-Terrones *et al.*, 2011).

Los valores de nutrientes y coliformes fueron muy variables, lo cual evidencia una influencia local más que regional. Los manglares cercanos a hoteles mostraron mayor concentración de coliformes que otros sitios (Hernández-Terrones *et al.*, 2011).

Debido a que el nitrógeno también es producido por medios naturales, es necesario distinguir entre las fuentes naturales y las antropogénicas. La isotopía ha mostrado ser efectiva para el rastreo de aguas residuales (Baker *et al.*, 2013), y podría determinar el origen del nitrógeno. El nitrógeno recién fijado (medios naturales) contiene un cantidad de $\delta^{15}N$ de -3 a 0‰ (partes por millar), mientras que el NID (nitrógeno inorgánico disuelto), proveniente de aguas residuales, contiene entre 6 y 22‰. Por lo que las aguas residuales enriquecidas con $\delta^{15}N$ indican la presencia de nitrógeno inorgánico disuelto, derivado de la volatilización de amoníaco, la desnitrificación y la nitrificación de amonio (Rico, 2014).

La isotopía de nitrógeno fue utilizada exitosamente por Baker *et al.* (2013) para relacionar el grado de desarrollo con la cantidad de nitrógeno a la cual estuvieron expuestos los corales. La comparación se realizó entre muestras de coral tomadas frente a dos poblados con diferente grados de desarrollo y ocupación turística: Mahahual y Akumal, pero con una cantidad similar de habitantes (920 y 1362 respectivamente). Akumal tiene mayor desarrollo hotelero y, entre 2005 y 2009, hospedó a 29% de turismo hotelero del estado. Mahahual tiene menor desarrollo y tan solo hospedó a 5% en el mismo período (Baker *et al.*,

Figura 35. Resultados del muestreo a través de los diferentes ambiente: pozos, manglares, playas, manantiales, laguna arrecifal y mar abierto. A) distancia media entre los ambientes, tomando como punto de referencia la línea de costa (0). Los histogramas representan la media y las barras de error la desviación estándar; B) silicio reactivo disuelto (SRSi, micromolar) y salinidad (S); C) temperatura (°C) y conductividad eléctrica (EC, mS cm⁻¹). El incremento o decremento paulatino de las variables indica la conectividad y el flujo de agua entre los ambientes, mientras que la concordancia entre la temperatura de pozos y manantiales destaca la estrecha conexión entre estos últimos (tomado de Hernández *et al.*, 2011).

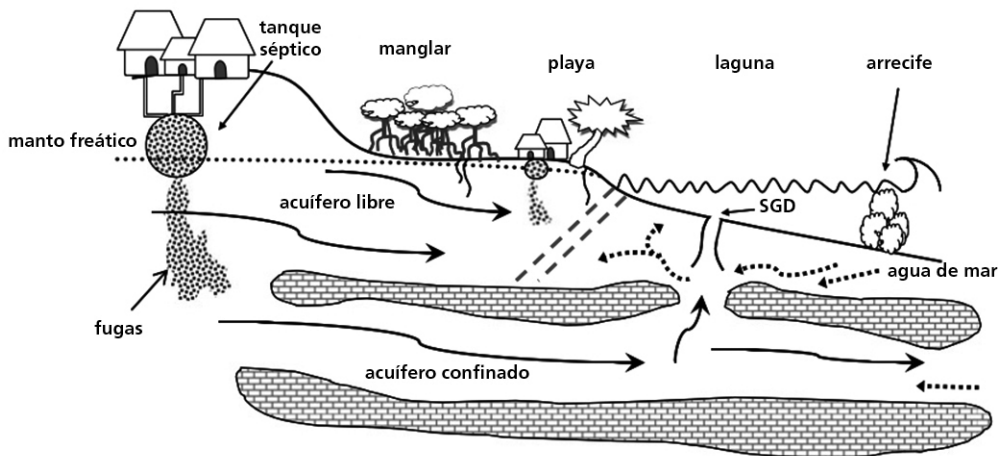


Figura 36. Esquema del acuífero e interpretación de Hernández-Terrones *et al.* (2011) de la interacciones del sistema. El agua residual y las filtraciones provenientes de la ciudad y del desarrollo turístico llegan al acuífero donde son transportadas hacia el mar, en su camino se mezclan con el agua salada, y al llegar a la laguna arrecifal pueden regresar a la superficie por medio de los ojos de agua.

2013). Además, Mahahual cuenta con tratamiento municipal de 100% de las aguas residuales provenientes del desarrollo turístico, mientras que Akumal no tiene sistema de tratamiento y las aguas residuales se vierten directamente en pozos. Los resultados muestran que el coral frente a Akumal tiene 1.2‰ más de isótopos ($\delta^{15}\text{N}$) que las muestras extraídas frente a Mahahual (figura 37) indicando su origen antropogénico.

Un resultado claro e importante del estudio fue la relación entre la cantidad de isótopos en los corales y la cantidad de turistas en la localidad. Esta relación tiene un desfase anual, es decir, que la cantidad de turistas se ve reflejada un año después en la composición del arrecife. Entre 2006 y 2009 hubo una

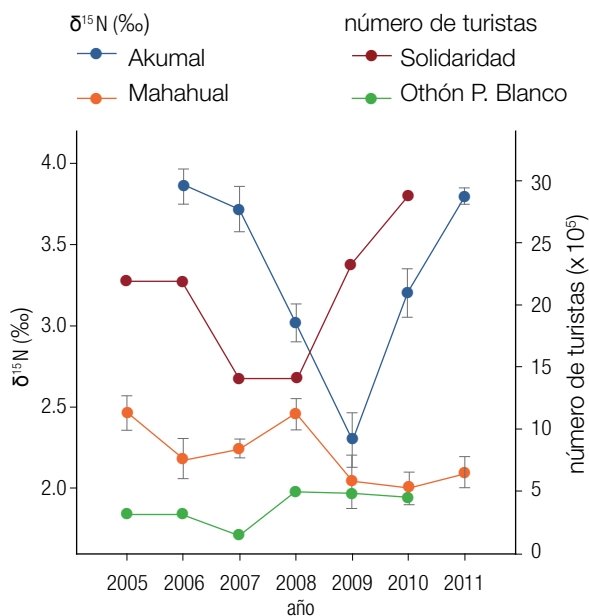


Figura 37. Cantidad de nitrógeno (isótopo 15) en parte por millar ($n=5$) y número de turistas entre 2005 y 2011 en Akumal y Mahahual. Las barras representan los errores estándar (tomado de Baker *et al.*, 2013).

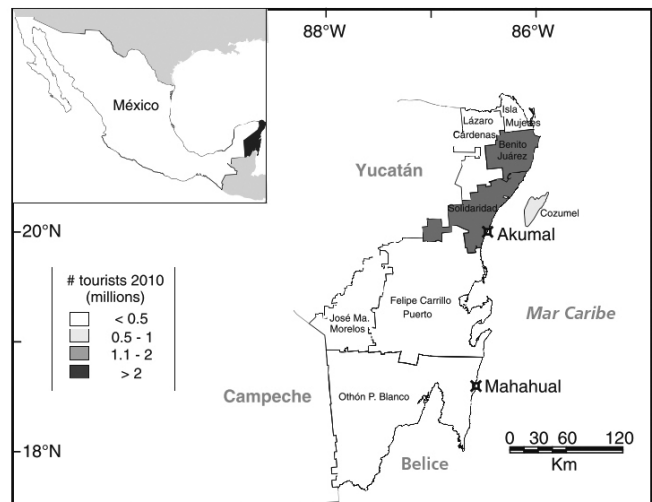


Figura 38. Ubicación y demanda turística en 2010 en Mahahual y Akumal (tomado de Baker *et al.*, 2013).

disminución de 37% en la cantidad de turistas en Akumal, lo que generó una reducción de 1.6‰ en la cantidad del isótopo $\delta^{15}\text{N}$. Cuando se recuperaron los niveles de turismo en 2009, se encontró en un incremento de $\delta^{15}\text{N}$ un año después.

En el caso de Puerto Morelos se sabe que existe un déficit en el tratamiento de las aguas residuales, por ejemplo, en 2010, de los 2 297 000 litros suministrados diariamente, se trataron tan solo 1 209 600 litros, por lo que 47.3% se vertieron directamente al acuífero. De hecho, en el estudio de Rico (2014) se encontró una relación positiva entre el incremento de la población de Puerto Morelos y la cantidad de $\delta^{15}\text{N}$ entre 1970 y 2010 (figura 39). El estudio utilizó núcleos de coral (figura 40) y determinaron la fecha por esclerocronología.⁴ Además, exis-

⁴ El crecimiento del coral puede ser determinado por la extensión y la tasa de calcificación. Durante los meses de mayor temperatura (julio-agosto) se

Cuadro 4. Ocupación promedio y población flotante en Puerto Morelos (2008-2012)

Año	Número de cuartos	Ocupación promedio	Población flotante
2008	2585	61.6	2389
2009	5036	53.8	4064
2010	5072	73.2	5569
2011	5072	74.3	5653
2012	5072	72.5	5516

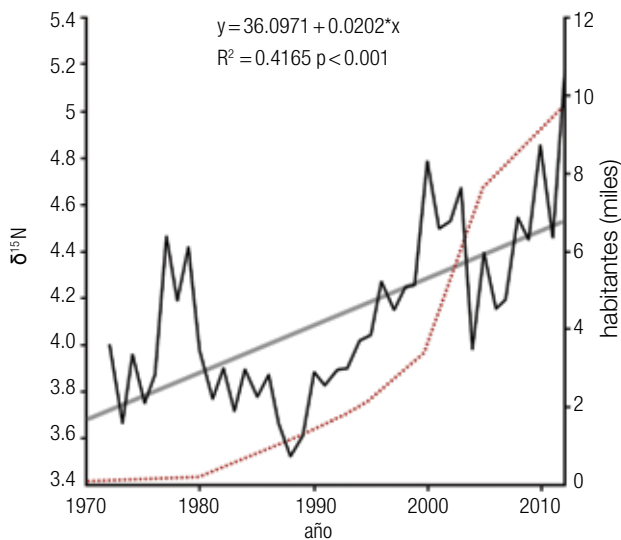
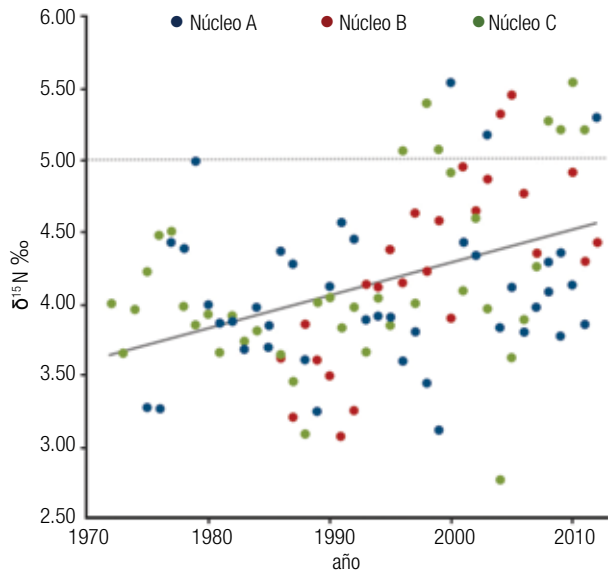


Figura 39. Arriba, evolución temporal de $\delta^{15}\text{N}$ en la matriz orgánica de los 3 núcleos extraídos de *O. faveolata*; la línea punteada indica los valores superiores de 5‰; abajo, correlación entre el promedio anual de los valores de $\delta^{15}\text{N}$ (línea continua) y los datos de crecimiento poblacional en Puerto Morelos, de 1970 a 2010 (línea punteada) (tomado de Rico, 2014).

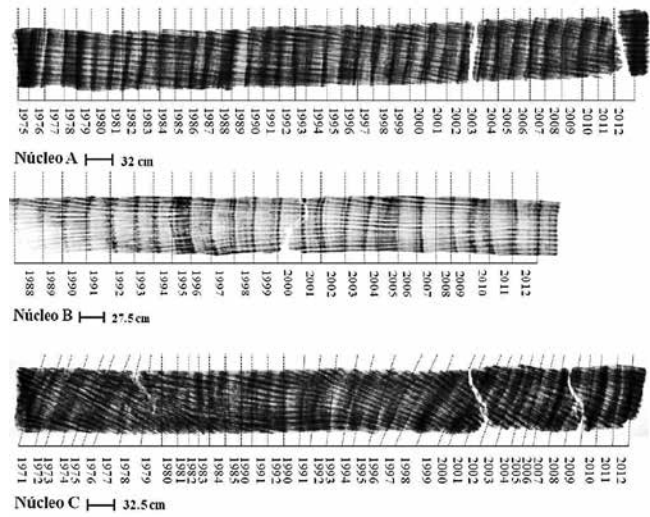


Figura 40. Positivo de las placas RX y fechado anual por bandas de alta densidad, del trabajo de Rico, 2014.

te la presión de la población flotante derivada del turismo. En 2012 en Puerto Morelos se registró una ocupación promedio de 72.5%, equivalente a 5516 turistas, lo que representa un incremento de 40% respecto a la población fija (cuadro 4).

Conclusión

Los estudios en Puerto Morelos demuestran que las aguas residuales pueden contaminar la lente de agua fresca y los ambientes costeros (playas, cenotes, manglares, etc.). Esta aseveración se respalda con la mayor concentración de nitrógeno de origen antropogénico y con la presencia de coliformes en dichos ambientes (Hernández-Terrones *et al.*, 2011). Además, se encontró una correlación entre la cantidad de turistas y la cantidad de nutrientes presentes en el arrecife. Por lo tanto puede concluirse que los corales son afectados por los nutrientes producidos por las actividades humana, lo cual tiene consecuencias en su salud, como veremos a continuación.

suele producir un banda de alta densidad debido a una mayor tasa de crecimiento, por lo tanto, la presencia de las bandas puede utilizarse para estimar la edad del fragmento. En este caso se utilizó la matriz orgánica de los corales que está formada por proteínas estables que pueden permanecer intactas por cientos de años. Además, incluye proteínas sintetizadas durante el proceso de biomineralización, aportes de materia de algas endolíticas, bacterias e incorporación de material particulado presente en la columna de agua.

1.5.4 Existe una correlación entre la concentración de nutrientes y la presencia de enfermedades en los corales

¿Cuáles son las consecuencias de esta descarga de nutrientes en la salud de los corales y en el arrecife? En un estudio realizado en Saint Croix (Islas Vírgenes, EUA) se compararon dos sitios equiparables ecológica y geológicamente, pero con diferente exposición a aguas residuales. El estudio muestra que en el sitio expuesto a las aguas residuales hay una prevalencia de enfermedades de 13.6% en 7 de las 10 especies estudiadas, lo cual es significativamente mayor a la prevalencia de 3.7% en el sitio libre de aguas residuales (Kaczmarek, Druad y Williams, 2005). También en la Isla de Guam se encontró una relación significativa entre la severidad de la enfermedad de la banda amarilla y los niveles de $\delta^{15}N$ (Redding *et al.*, 2013). En general se conoce que los arrecifes de Yucatán tienen altos niveles de enfermedades, los cuales probablemente van a cambiar la riqueza y la rugosidad. La pérdida de especies podría incluso alcanzar niveles tróficos mayores (Ward *et al.*, 2006).

Un estudio controlado llevado a cabo en Puerto Morelos mostró que un moderado incremento de nutrientes puede aumentar sustancialmente la severidad de las enfermedades (figuras 41 y 42) (Bruno *et al.*, 2003). Los autores señalan que los patógenos involucrados en el experimento (*A. Sydowii* y *Vibro* spp.) utilizan los nutrientes adicionales para incrementar su adecuación y virulencia. En base a esto, Baker *et al.*, 2010 sugieren que el hecho de que la incidencia de la enfermedad de la mancha amarilla sea casi el doble en Akumal respecto a Mahahual, podría deberse a la mayor contaminación por aguas residuales.

El monitoreo de 12 años (1993-2005) llevado a cabo por Rodríguez-Martínez *et al.* (2010), muestra un incremento en la cantidad de enfermedades presentes en Puerto Morelos (cuadro 5). Los autores atribuyen esto al incremento de la temperatura, sin embargo, bien podría ser un efecto sinérgico con los contaminantes. La temperatura reduce la resistencia del coral

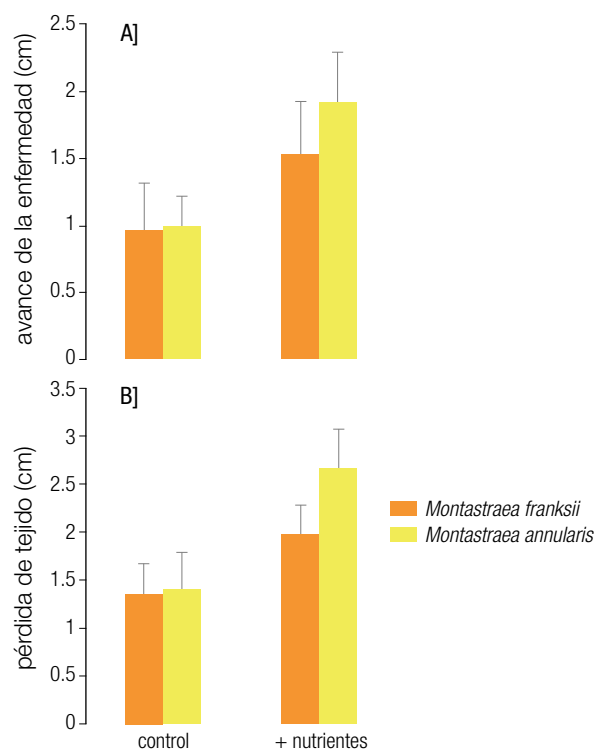


Figura 42. Resultados del experimento (*in situ*) de enriquecimiento de nutrientes con A) la enfermedad de la banda amarilla (yellow band disease) y B) pérdida de tejido de coral *Montastraea franksii* y *Montastraea annularis* durante 90 días. Las barras representan la media $\pm$ DE (n = 10), (tomado de Bruno *et al.*, 2003).

y la contaminación aumenta la virulencia de las enfermedades (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010; Bruno *et al.*, 2003). La continua incidencia de estas enfermedades puede resultar en una pérdida total del coral (Redding *et al.*, 2013).

Los corales formadores de arrecife son excelentes competidores en ambientes de bajos nutrientes, pueden reciclar nutrientes entre hospedero y zooxantela y son eficientes en la fotosíntesis (Fabricius, 2005). Sin embargo, como ya vimos,

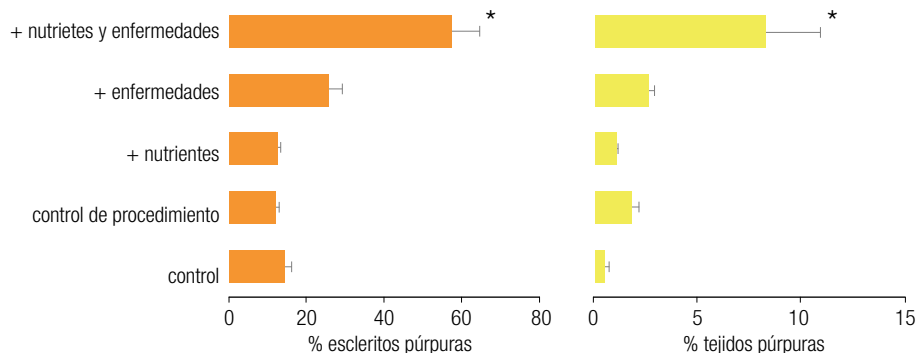


Figura 41. Efecto de los cinco tratamientos en el porcentaje de escleritos y tejido púrpura (dos formas de medir la severidad de la aspergilosis). Las barras representan la media $\pm$ DE (n = 10); los asteriscos representan diferencias significantes ($p < 0.05$, prueba Tukey-Kramer) respecto a los otros tratamientos (tomado de Bruno *et al.*, 2003).

Cuadro 5. Parámetros socio-demográficos y eventos de mayor efecto en Puerto Morelos entre 1993 y 2005. Enfermedad de la banda negra (BB); enfermedad del punto negro (DS); enfermedad de la banda blanca; Serriatosis de Acróporas (WPx) y la enfermedad de la banda amarilla (tomado de Rodríguez-Martínez *et al.* 2010)

Año	Población	Número de cuartos	Huracanas	Blanqueamientos	Enfermedades
1993	-	-	-	0	nd
1994	-	-		0	nd
1995	2224	401	Roxane (3)	Svero	nd
1996	-	-		0	nd
1997	-	-		Bajo	
1998	-	-		Moderado	WB, WPx
1999	-	-		0	nd
2000	3438	401		0	DS, WB, WP, WPx, YB
2001	-	-		0	BB, DS, WB, WP, WPx, YB
2002	-	-		Bajo	nd
2003	-	-	Ivan (5)	Moderado	BB, DS, WB, WP, WPx, YB
2004	-	-	Emily (2)	Moderado	BB, DS, WB, WP, WPx, YB
2005	7726	1455	wilma (5)	Severo	BB, DS, WB, WP, WPx, YB

Metodología Bruno *et al.* 2003

Los experimentos fueron llevados acabo *in situ* a una profundidad de 8 a 10 m durante 90 días, empezando el 19 de junio.

Experimento de Aspergilosis. Se utilizaron cinco tratamientos: i] control sin manipular, ii] control de manipulación, iii] infección experimental, iv] enriquecimiento de nutrientes y v] infección experimental + enriquecimiento de nutrientes. Colonias saludables de abanicos fueron inoculadas con insertos de colonias vecinas enfermas. Se midió la severidad de la enfermedad a través del porcentaje de escleritos y de tejido infectado.

Experimento de la banda amarilla. Se utilizaron dos especies *Montastraea annularis* y *M. franksii*. Todas las colonias mostraban signos de la enfermedad. Se evaluaron dos factores: tratamiento (efecto y control) y especie (*M. annularis* y *M. franksii*). El efecto de la enfermedad se midió a través del avance de la enfermedad. Los nutrientes fueron manipulados por medio de bolsas de nylon difusoras.

estas condiciones están cambiando rápidamente debido a la actividad humana en la zona costera. Las nuevas condiciones pueden favorecer a sus competidores, principalmente a las macroalgas (Jackson *et al.*, 2014), debido a la mayor presencia de nitrógeno. Se ha visto que un incremento de nutrientes de 50% puede provocar una pérdida de cobertura de coral de 50% (Loya, 2004). La forma de competencia es relativamente pasiva. Las macroalgas ocupan el espacio del coral después de su muerte, lo que impide tanto el establecimiento de nuevas colonias de coral (Fabricius, 2005), como su recuperación. Por ejemplo, en Puerto Morelos el huracán Gilberto provocó una gran pérdida de coral (más de 50% de cobertura) en el arrecife, el cual no se ha recuperado y hasta 2005 únicamente se tenía una cobertura coralina de 2%. Sin embargo, la cobertura de macroalgas fue de 41.5%, demostrando una mejor adaptación a las nuevas condiciones (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010).

Conclusión

Estudios realizados en el Caribe y en Puerto Morelos han confirmado que existe una correlación entre la mayor concentración de nutrientes y la mayor presencia de enfermedades en los corales. Las enfermedades provocan mortalidad y disminuyen la capacidad de recuperación de los corales. El espacio es ocupado por las macroalgas que aumentan su crecimiento debido a la presencia de nutrientes. Estas condiciones provocan la degradación de los arrecifes y la pérdida de la estructura y complejidad arrecifal.

Bibliografía

- Adame, M.F., R. Reef, J.A. Herrera-Silveira y C.E. Lovelock. 2012. Sensitivity of dissolved organic carbon exchange and sediment bacteria to water quality in mangrove forests. *Hydrobiologia* 691(1):239-253. doi:10.1007/s10750-012-1071-7
- Álvarez-Filip, L., N.K. Dulvy, N.K. Dulvy, J.A. Gill, I.M. Côté y A. R. Watkinson. 2009. Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society* 276(1669):3019-25. doi:10.1098/rspb.2009.0339.
- Álvarez-Filip, L., J.P. Carricart-Ganivet, G. Horta-Puga y R. Iglesias-Prieto. 2013. Shifts in coral-assemblage composition do not ensure persistence of reef functionality. *Scientific reports* 3:3486. doi:10.1038/srep03486.
- Álvarez-Filip, L., M.J. Paddock, B. Collen, D.R. Robertson y I.M. Côté. 2015. Simplification of Caribbean reef-fish assemblages over decades of coral reef degradation. *PLoS ONE* 10(4): 1-14. doi:10.1371/journal.pone.0126004
- Baker, D.M., R.E. Rodríguez-Martínez y M. L. Fogel. 2013. Tourism's nitrogen footprint on a Mesoamerican coral reef. *Coral Reefs* 32(3):691-99. doi:10.1007/s00338-013-1040-2.
- Beddows, P.A., P.L. Smart, F.F. Whitaker y S.L. Smith. 2007. Decoupled fresh-saline groundwater circulation of a coastal carbonate aquifer: Spatial patterns of temperature and specific electrical conductivity. *Journal of Hydrology* 346(1-2): 18-32. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.08.013.
- Blanchon, P., Roberto Iglesias-Prieto, E. Jordán-Dahlgren y S. Richards. 2010. Arrecifes de coral y cambio climático: vulnerabilidad de la zona costera del estado de Quintana Roo. En *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*, 229-48.
- Bruno, J. F., L.E. Petes, C.D. Harvell y A. Hettinger. 2003. Nutrient enrichment can increase the severity of coral diseases. *Ecology Letters* 6 (12): 1056-61. doi:10.1046/j.1461-0248.2003.00544.x.
- Carricart-Ganivet, J.P., N. Cabanillas-Terán, I. Cruz-Ortega y P. Blanchon. 2012. Sensitivity of calcification to thermal stress varies among genera of massive reef building corals. *PLoS ONE* 53(1):65-76. doi:10.1371/journal.pone.0032859.
- Crook, E.D., D. Potts, M. Rebolledo-Vieyra, L. Hernández y A. Paytan. 2012. Calcifying coral abundance near low-pH springs: Implications for future ocean acidification. *Coral Reefs* 31(1):239-45. doi:10.1007/s00338-011-0839-y.
- Fabricius, K.E. 2005. Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: Review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin* 50(2):25-46. doi:10.1016/j.marpolbul.2004.11.028
- Gastelú-Bárcena M.F. 2015. Estimación de la difusión hidráulica en la Ruta de los Cenotes, Puerto Morelos, Quintana Roo. Tesis de licenciatura. UNAM. 107pp.
- Green, D.H., P.J. Edmunds y R.C. Carpenter. 2008. Increasing relative abundance of *Porites astreoides* on Caribbean reefs mediated by an overall decline in coral cover. *Marine Ecology Progress Series* 359:1-10. doi:10.3354/meps07454.
- Hernández-Terrones, L., M. Rebolledo-Vieyra, M. Merino-Ibarra, M. Soto, A. Le-Cossec y E. Monroy-Ríos. 2011. Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution* 218 (1-4):517-28. doi:10.1007/s11270-010-0664-x.
- Hoegh-Guldberg, O. 1999. Climate change coral beaching and the future of world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research* 50: 839-66. doi:10.1071/MF00030.
- Hughes, T.P., A.H. Baird, E.A. Dinsdale, N.A. Moltschanowskyj, M.S. Pratchett, J.E. Tanner y B.L. Willis. 2012. Assembly rules of reef corals are flexible along a steep climatic gradient. *Current Biology*, 22(8): 736-741. doi:10.1016/j.cub.2012.02.068
- Jackson, J.B.C., M.K. Donovan, K.L. Cramer y V.V. Lam (eds.). 2014. *Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970-2012*. Global Coral Reef Monitoring Network, IUCN, Gland, Suiza.

- Kaczmarzsky, L.T., M. Druad y E.H. Williams. 2005. Is there a relationship between Proximity to Sewage Effluent and the Prevalence of Coral Disease? *Caribbean Journal of science* 41(1):124-37.
- Kennedy, E.V., C.T. Perry, P.R. Halloran, R. Iglesias-Prieto, C. Schöenberg, M. Wisshak y A U. Form. 2013. Avoiding coral reef functional collapse requires local and global action. *Current Biology* 23(10): 912-18. doi:10.1016/j.cub.2013.04.020.
- Kleypas, J.A., R.W. Buddemeier, C.M. Eakin, J.P. Gattuso, J. Guinotte, O. Hoegh-Guldberg y R. Iglesias-Prieto. 2005. Comment on Coral reef calcification and climate change: The effect of ocean warming. *Geophysical Research Letters* 32(8):1-3. doi:10.1029/2004GL022329.
- Navarro-Espinoza E. 2015. Prevalencia de enfermedades de *Acropora palmata* en el Parque Nacional de Puerto Morelos y su relación con las fuentes de aporte de nutrientes y el desarrollo costero. Tesis de licenciatura, BUAP. 79pp.
- NOAA: Ocean Acidification, en <<http://sos.noaa.gov/Datasets/>> (consultado el 1 marzo de 2016).
- Norzagaray-López, C.O., L.E. Calderón-Aguilera, J.M. Hernández-Ayón, H. Reyes-Bonilla, J.P. Carricart-Ganivet, R.A. Cabral-Tena y E. F. Bart. 2014. Low calcification rates and calcium carbonate production in *Porites panamensis* at its northernmost geographic distribution. *Marine Ecology* 36(4): 1244-1255. doi: 10.1111/maec.12227.
- Null, K.A., K. Knee, E.C. Crook, N. Sieyes, M. Rebolledo-Vieyra, L. Hernández-Terrones y A. Paytan. 2014. Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula. *Continental Shelf Research* 77:38-50. doi:10.1016/j.csr.2014.01.011.
- Redding, J.E., R.L. Myers-Miller, D.M. Baker, M. Fogel, L. Raymundo y K. Kim. 2013. Link between sewage-derived nitrogen pollution and coral disease severity in Guam. *Marine Pollution Bulletin* 73(1):57-63. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.06.002.
- Rico, E.S.D. 2014. Valores de 15N en la matriz orgánica del coral hermatípico *Obivella faveolata* como indicadores del impacto del desarrollo turístico en el Parque Nacional de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Tesis de maestría, UNAM. 41 pp.
- Rodríguez-Martínez, R.E., A.G. Jordán-Garza, M.A. Maldonado y P. Blanchon. 2011. Controls on Coral-Ground development along the Northern Mesoamerican reef tract. *PLoS ONE* 6(12):e28461. doi:10.1371/journal.pone.0028461.
- Rodríguez-Martínez, R.E., F. Ruiz-Rentería, B. Van Tussenbroek, G. Barba-Santos, E. Escalante-Mancera, G. Jordán-Garza y E. Jordán-Dahlgren. 2010. Environmental state and tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP site, Mexico. *Revista de Biología Tropical* 58 (SUPPL. 3): 23-43.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., I. Mariño-Tapia, C. Enriquez, R. Silva y M. González-Leija. 2013. The Role of Fringing Coral Reefs on Beach Morphodynamics. *Geomorphology* 198:69-83. doi:10.1016/j.geomorph.2013.05.013.
- SOEST: School of Ocean and Earth Science and Technology. Aragonite Saturation State of Seawater, en <<http://www.soest.hawaii.edu/SeawaterSaturationState.pdf>> (consultado el 4 de abril de 2016).
- Ward, J.R., K.L. Rypien, J.F. Bruno, C.D. Harvell, E. Jordán-Dahlgren, K.M. Mullen, R.E. Rodríguez-Martínez, J. Sánchez y G. Smith. 2006. Coral diversity and disease in Mexico. *Diseases of Aquatic Organisms* 69(1): 23-31. doi:10.3354/dao069023.
- Webster, P.J., G.J. Holland, J.A. Curry y H. Chang. 2005. Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science* 309, 1844(2005). doi:10.1126/science.1116448.
- Zhang, Z., J. Falter, R. Lowe, G. Ivey y M. McCulloch. 2013. Atmospheric forcing intensifies the effects of regional ocean warming on reef-scale temperature anomalies during a coral bleaching event. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118:4600-4616. doi:10.1002/jgrc.20338.



Costa Maya 2014. Foto: Fernando Secaira/TNC.

2. LAS DUNAS PROTEGEN LAS PLAYAS Y LAS ZONAS COSTERAS

El sistema costero se encuentra sujeto a un continuo estrés; cerca de 41% de la población mundial vive dentro de la franja de 60 km de la línea de costa (Martínez *et al.*, 2007), y se espera que para 2020 se convierta en 60% (Lithgow *et al.*, 2013). Además, hoy en día, 21 de las 33 megaciudades (más de 20 millones de habitantes) se encuentran en la franja de 100 km (Martínez *et al.*, 2007). Así, las actividades humanas han transformado cerca de 30% de la superficie dentro de dicha franja (Martínez *et al.*, 2007). Estas actividades pueden clasificarse en: i] habitacional y recreacional; ii] industria y comercio; iii] desecho de aguas negras; iv] agricultura; v] minería y vi] actividades militares (Lithgow *et al.*, 2007). Las actividades humanas en conjunto con el cambio climático, seguirán aumentando la presión sobre la zona costera, por lo que es evidente que los riesgos para la infraestructura serán mayores al aumentar la erosión y el nivel medio del mar (Feagin *et al.*, 2015).

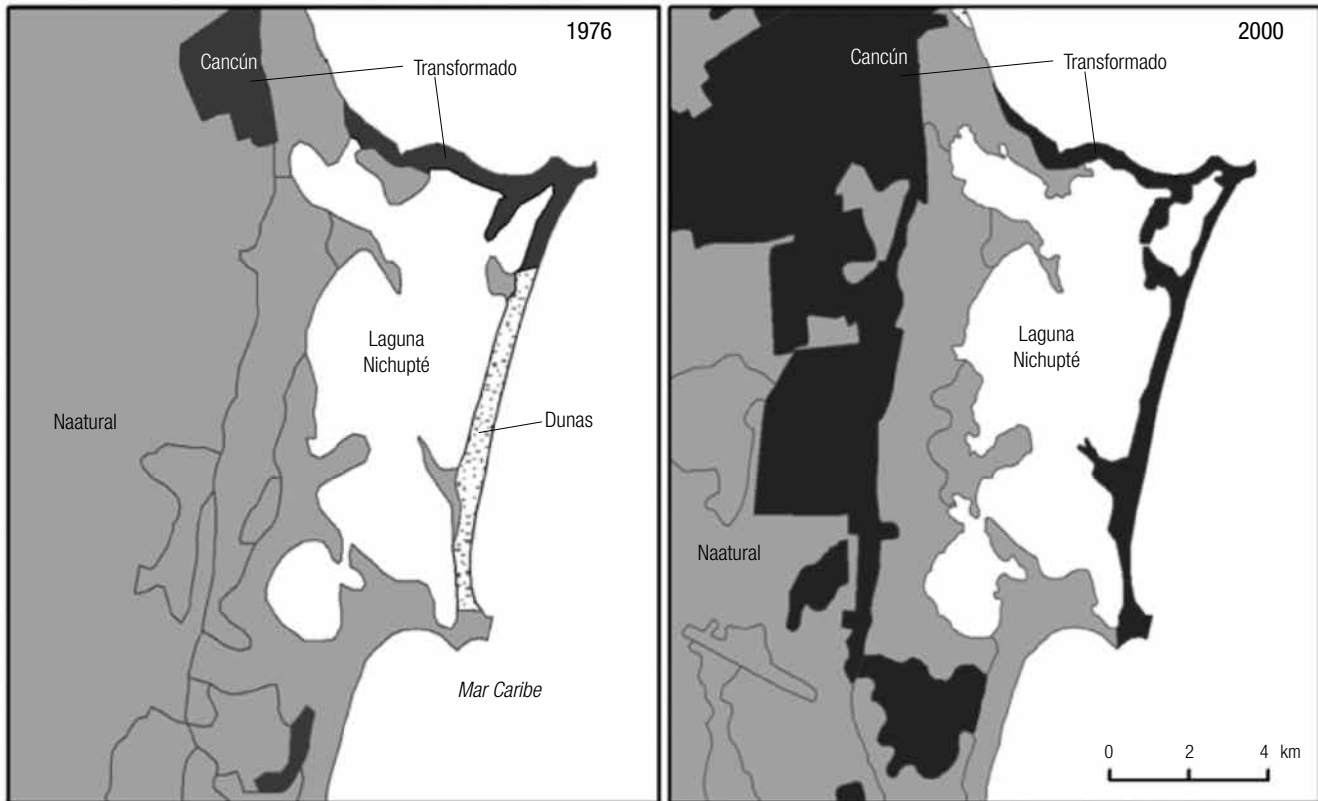


Figura 43. Pérdida de vegetación de dunas costeras por desarrollos turísticos en Cancún, Quintana Roo (tomado de Seingier *et al.* 2009).

México contaba con 800,000 ha de dunas costeras, las cuales se distribuían en 80% del litoral. Cerca de 50% de las dunas han sido transformadas para uso agropecuario o urbanizadas (Jiménez-Orocio *et al.*, 2014). Entre 1970 y 2000 se perdió 9.3% de la vegetación natural en los municipios costero y 14% de dunas. Existen casos alarmantes como Cabo Falso, al extremo sur de la península de Baja California, donde 45% de la cobertura vegetal del sistema se ha perdido debido a las actividades de vehículos todoterreno. La pérdida de vegetación ha cambiado los patrones de circulación eólica y de erosión, incrementado la inestabilidad sedimentaria del sistema (Camacho-Valdéz *et al.*, 2008). El Caribe es la región con mayor pérdida de vegetación de dunas. La superficie de áreas naturales transformadas en municipios costeros del Caribe pasó de 4,119 km² en 1976 a 11,198 km² en 2000 (incremento de 172%), representando el mayor porcentaje transformado del país (Seingier *et al.*, 2009).

A pesar de la gran inversión y el aprovechamiento económico derivados de la zona costera, existe un rezago informativo y de investigación sobre las dunas, principalmente en la valorización de los servicios ambientales, de la protección y estabilización de playas. Tan solo 1% de la literatura de dunas desarrollada en el país se ocupa de la valoración de estos ecosistemas, además, los estudios de Quintana Roo son muy escasos (figura 44) (Jiménez-Orocio *et al.*, 2014).

2.1 La vegetación de duna costera consolida el suelo por medio de sus raíces; atrapa y retiene la arena a través de sus hojas y ramas, por lo tanto, el retiro y deterioro de la vegetación expone el sedimento y facilita su remoción por viento y oleaje

La vegetación es necesaria tanto para la formación de la duna, como para su consolidación. Hay cinco factores que determinan su formación: el aporte de sedimentos, la velocidad del viento, el tamaño de grano, la cohesión entre partículas y la presencia de obstáculos (Martínez *et al.*, 2014). La vegetación consolida las dunas debido a que:

- Constituye un obstáculo para el viento, lo cual reduce su velocidad y facilita la deposición de granos.
- Reduce la erosión al proteger el sustrato superficial con sus troncos, hojas y raíces.
- Aumenta la cohesión de las partículas al aportar materia orgánica y mantener la humedad.

Cuando el viento tiene una velocidad mayor a ~4.5 m/s, los granos de arena son movidos en forma de brinco cerca de la superficie de la playa y avanzan en un fenómeno conocido



Figura 44. Distribución geográfica de la investigación sobre las dunas costeras de México (tomado de Jiménez-Orocio, 2014).

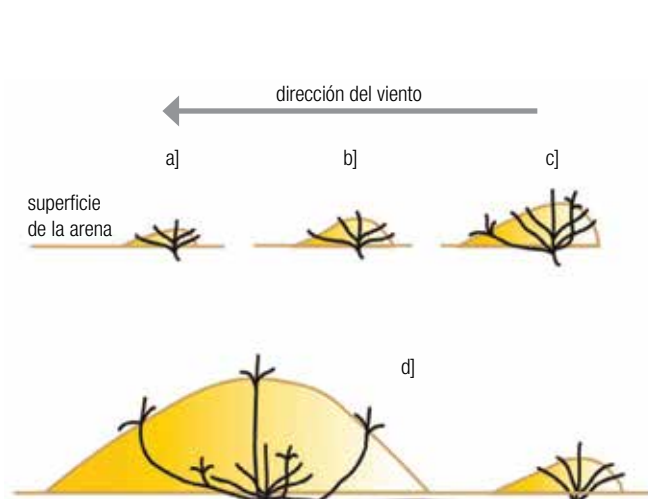


Figura 45. Formación de dunas. Empieza con una pequeña estructura generada por la acumulación de arena alrededor de la vegetación u otro obstáculo [a y b]. La vegetación puede seguir creciendo conforme el montículo aumenta su tamaño, lo que le da estabilidad [c y d] (tomado de Martínez *et al.*, 2014).

como saltación. Al caer, rebotan interactuando con los granos en la superficie, lo que hace que éstos también entren en movimiento. Cuando se presenta un obstáculo, ya sea vegetación o troncos, el viento es frenado y obligado a rodear el objeto haciendo que los granos caigan y formen montículos. Estos montículos paulatinamente envolverán el obstáculo haciéndolo cada vez más grande, lo que a su vez obstruye al viento (figura 45) (Martínez *et al.*, 2014; Pye K y Tsoar H., 2009).

La vegetación consolida las dunas mediante sus raíces, tallos y hojas, protegiendo del viento a la superficie. La forma de la vegetación y su fisiología son importantes, por ejemplo, los pastizales suelen ser buenos acumuladores de sedimento, ya que su flexibilidad hace que, durante una tormenta, sus tallos puedan pegarse a la superficie formando una alfombra, y los nodos de sus tallos pueden desarrollar raíces si éstos llegan a ser cubiertos por arena. Conforme la topografía va ganando altura, las interacciones entre plantas se hacen cada vez más complejas dando lugar a un mayor número de comunidades. Sin la vegetación, las únicas fuerzas que mantienen el perfil de las dunas son la gravedad y la fricción intragranular (Feagin *et al.*, 2015).

La vegetación aumenta la cohesión de partículas del sustrato y aporta materia a la composición del sedimento (figura 46), además evita la desecación del sedimento; mientras el suelo permanece húmedo su cohesión intermolecular es mayor (Feagin *et al.*, 2015).

Los efectos de una tormenta sobre la duna dependerán del tipo de impacto que tenga (figura 47). A partir de Sallen-ger Jr., (2000) se pueden distinguir cuatro niveles de impacto: i) rebalaje o *swash*: cuando el nivel del agua se limita a la parte frontal de la playa, sin llegar a la duna; en este caso, la playa es

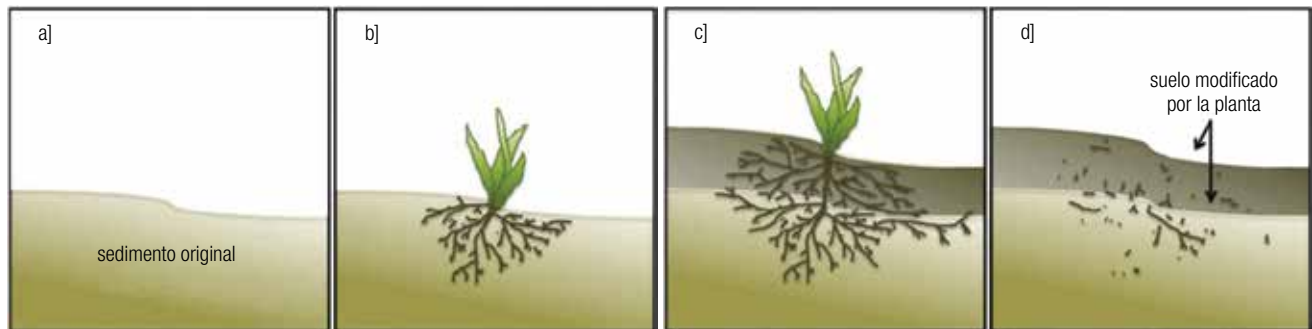


Figura 46. La vegetación altera la estructura física del sedimento mediante sus raíces y modifica las propiedades mismas del sedimento. a) En el caso del sedimento, las únicas fuerzas que lo mantienen estable son la gravedad y la fricción intragranular; b) cuando la vegetación crece estabiliza el sedimento mediante sus raíces; c) en una etapa posterior, la vegetación modifica la composición del sedimento aumentando su estabilidad; d) aun y cuando la vegetación desaparezca, hay una estabilidad residual debido a la modificación de la composición hecha por la vegetación (tomado de Feagin *et al.*, 2015).

Metodología de Silva *et al.*, 2016

El experimento fue llevado a cabo en el canal de olas (ancho: 0.8, alto: 1.2, largo: 37 m) del Instituto de Ingeniería de la UNAM (figura 48), el cual está equipado con un generador de olas por pistón y sistema de absorción dinámico. El canal se dividió en dos con una pared de acrílico de 1 cm en los últimos 8 m de longitud (del 21 al 29.1 m), para así poder

evaluar dos perfiles a la vez. El perfil A, tomado como referencia, es similar al utilizado en un estudio previo de Kobayashi *et al.*, 2009, que representa una duna angosta con berma. El perfil B, es un modelo a escala del perfil típico encontrado en las costas del Golfo de México, de donde también fueron tomados las plantas y la arena. Se utilizaron 11 senso-

res para las olas y 6 perfiladores ultrasónicos de velocidad distribuidos en ambos perfiles como muestra la figura 48. En el experimento se probaron en total 24 condiciones, que incluyen 2 perfiles con y sin berma, 3 condiciones de tormenta y 4 densidades de vegetación (sin vegetación y con densidad baja, media y alta) (R. Silva *et al.*, 2016).

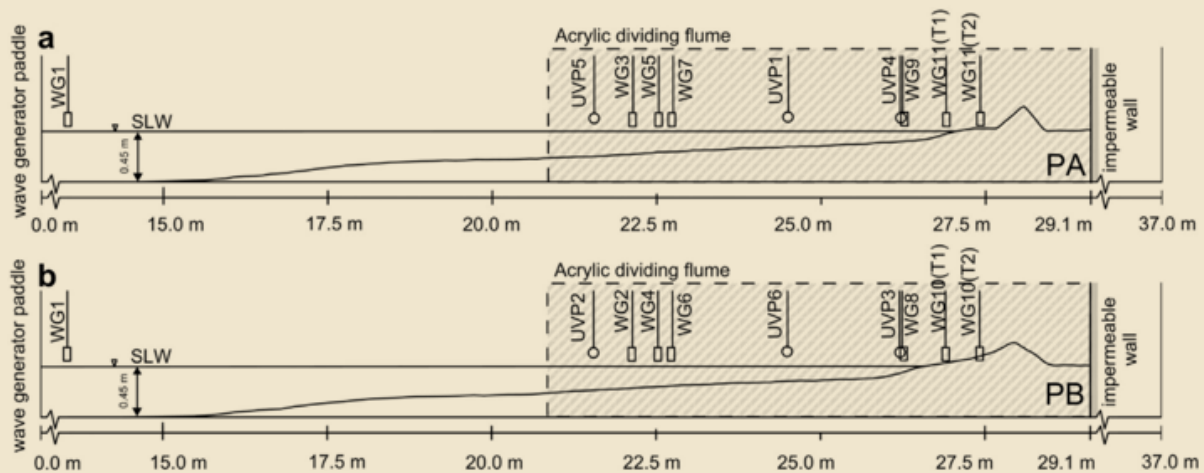


Figura 48. Perfiles utilizados en el experimento de Silva *et al.* 2016. UVP= perfiladores de velocidad supersónicos, WG= sensores para medir las olas. Perfil A, similar al utilizado en el estudio de Kobayashi *et al.* 2009; perfil B, modelo a escala del perfil típico encontrado en las costas de del Golfo de México (tomado de Silva *et al.* 2016).

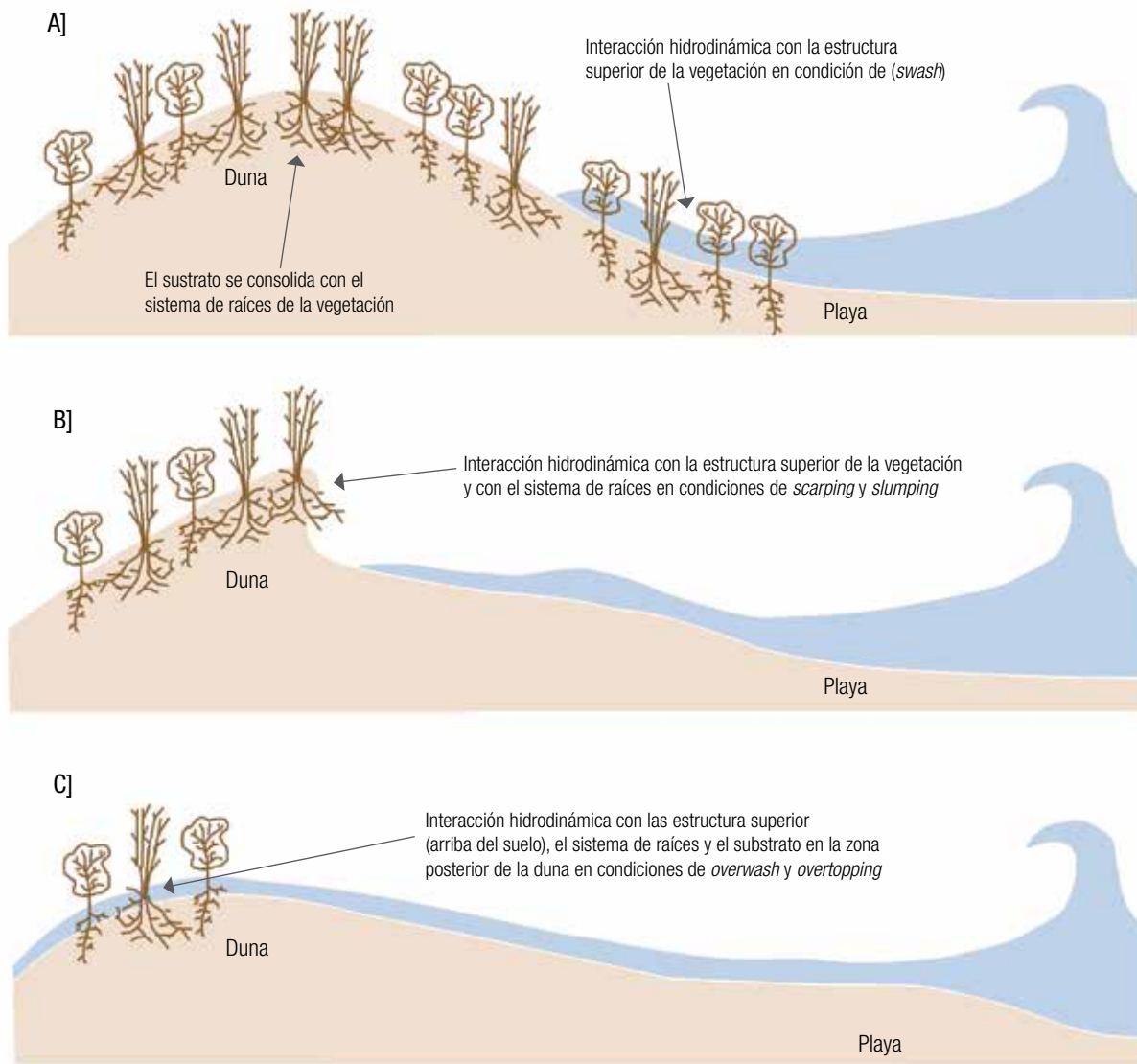


Figura 47. Interacción superficial e interna de plantas, sustrato y olas. A) Primer nivel de impacto rebalaje o *swash*. B) Escarpe de dunas durante el régimen de colisión. C) Deslave e inundación de duna. Durante A y B el flujo es bidireccional, mientras que para C es unidireccional (tomado del Feagin *et al.*, 2015).

erosionada, pero se recupera sin producir una pérdida neta de sedimento; ii] colisión: cuando el nivel de agua llega a la parte frontal de la duna, arrastrando sedimento hacia el mar y en la corriente paralela a la costa; iii] deslave: cuando el nivel de la marea alcanza la altura de la duna; iv] inundación: cuando la duna entera es sumergida (Sallenger, 2000; Silva *et al.*, 2016).

Cada uno de los niveles de impacto interactuará de forma diferente con la duna. En los tres niveles más fuertes, los tallos, las hojas (componente superficial) y las raíces (componente subsuperficial) reducen la energía del oleaje. Lo cual ha sido comprobado mediante mediciones de laboratorio en el canal de olas del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Silva *et al.*, 2016). Los componentes superficiales de la vegetación crean fricción

y mitigan al oleaje e, incluso, reducen el nivel de inundación. Las raíces fijan y estabilizan el sedimento, aumentando su capacidad de resistencia, y restan energía al oleaje al aumentar el esfuerzo necesario para mover el sedimento. En el estudio de Silva *et al.* (2016) se encontró, además, que la forma del perfil tiene gran influencia y debe ser considerado en el análisis. Sin embargo, aún faltan estudios que permitan distinguir entre la energía disipada superficial y la energía disipada internamente por parte de la vegetación (Silva *et al.*, 2016).

En México existen casos exitosos en los cuales la replantación de vegetación ha permitido la recuperación y estabilización de la duna costera. Por ejemplo, la ampliación del Puerto de Veracruz en 1996 removió la vegetación completamente y

aplanó la duna. Se dejó una duna modificada e inestable de 2 km de largo y de 10 a 20 m de alto, paralela a la línea de costa. Esta duna resultó tener gran movilidad y durante la temporada de “nortes” fue desplazada tierra adentro hacia los vecindarios cercanos (Moreno-Casasola *et al.*, 2008). Fue necesario restablecer la estabilidad de la duna mediante la restauración de vegetación. Se utilizaron tres comunidades vegetales cuyos especímenes pudieran conseguirse en cantidad suficiente. Las comunidades fueron: 1] una cactácea nativa de dunas, *Opuntia stricta* var; 2] pastos altos, *Panicum maximum*, y 3] pasto corto, *Panicum lividum* y *Paspalum langei*. Los tres tipos de comunidades lograron la estabilización de la duna y restablecieron el servicio ambiental de protección, al menos, durante los cinco años que duró el experimento. Se espera que la comunidad conformada por cactáceas recupere paulatinamente la vegetación original, pues deja mayor superficie disponible y facilita el desarrollo de otras especies. Por el contrario las comunidades con pastos tienden a colonizar casi por completo la duna y no permiten la colonización de las especies nativas. Por lo tanto, es importante tener claro el objetivo final de la recolonización (vegetación nativa o mono-cultivo) para seleccionar apropiadamente las especies (Moreno-Casasola *et al.*, 2008).

Conclusión

La vegetación es importante tanto para formación de la duna como para su estabilidad. El aporte de la vegetación es multifactorial pues brinda los servicios de: i] estabilizar la duna a corto plazo por sus raíces; ii] estabilizar la duna a largo plazo, cambiando la composición y propiedades del sedimento, y iii] mitigar el efecto de marea de tormenta e inundación por fricción y turbulencia. Es posible restaurar la estabilidad de una duna mediante la plantación de vegetación y recuperar su función de protección costera para lo cual hay casos exitosos en México (Veracruz).

2.2 La duna funciona como reserva de arena que permite compensar la erosión de la playa en fenómenos de tormenta

La forma en que responde la duna dependerá del tamaño de la tormenta. En el caso de colisión, el sedimento en grandes cantidades es levantado de la duna y redistribuido en el perfil de la playa como sucedió en Puerto Morelos durante el huracán Wilma en 2005 (figura 49), donde la playa seca incrementó 30 metros, en contraste con Cancún donde la playa fue erosionada completamente. Según los análisis (Mariño-Tapia *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2014) tres factores ocasionaron dicho incremento: i] la función protectora del arrecife de coral; ii] el acarreo de sedimento desde las playas de Cancún hacia Puerto Morelos, y iii] la distribución del sedimento de la duna erosionada sobre la



Figura 49. Efectos del huracán Wilma en Puerto Morelos. Izquierda, antes y, derecha, después del huracán. La playa tuvo una acreción de casi 30 m en toda la línea de costa y se perdió una gran franja de vegetación. Una de las explicaciones, además del sedimento proveniente de Cancún, es que la duna, anteriormente cubierta por vegetación, fue erosionada y su sedimento fue redistribuido sobre el perfil de playa (Mariño *et al.*, 2014) (tomada de Silva *et al.*, 2014).

playa. Asimismo cabe destacar que playa Delfines, una sección pública que conserva su duna, fue la que presentó menor erosión de Cancún (Silva *et al.*, 2006).

Lo más interesante es el nivel de resiliencia. Después de seis meses la línea de costa y la playa de Puerto Morelos regresaron a su condición original, mientras que en Cancún las autoridades tuvieron que realizar un relleno de playas (Silva *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2006). Es decir, Puerto Morelos en su estado relativamente natural conserva su capacidad de recuperarse, mientras que Cancún en sus condiciones actuales carece de resiliencia (Silva *et al.*, 2014; Díez *et al.*, 2009).

2.3 La duna representa una protección natural ante las marejadas de tormenta, reduciendo la inundación en las zonas interiores a la duna

La altura de las dunas es proporcional a la altura y energía del oleaje dominante. Las dunas antiguas de Cancún tenían un altura de hasta 12 metros de alto (Silva *et al.*, 2006) y las dunas de Puerto Morelos entre 3 y 4 metros (Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013). Como se explicó, la estructura y la vegetación de las du-

nas amortiguan la energía del oleaje, funcionando como diques de contención natural que evitan el paso de las marejadas de tormenta a la zona interior de la costa. Aun cuando la altura de la marejada y sus olas superasen la cresta de la duna, el nivel de inundación interior será mucho menor debido a la reducción de la energía del oleaje y al menor volumen de agua que logra sobrepasar la cresta de la duna. Por lo tanto, actualmente se ha incrementado el interés en la implementación de soluciones naturales para el manejo costero, como la utilización de bioescudos.

Conclusión

La duna conservada puede fungir como una protección natural ante eventos de tormenta. La duna por sí sola cumple esta función, sin embargo, se ha visto que la vegetación juega un papel importante, pudiendo ser utilizada como un escudo natural. Hacen falta investigaciones que ayuden a precisar la manera correcta de implementar estos mecanismos naturales de defensa, buscando un ahorro económico, mayor flexibilidad y adaptabilidad ante el dinamismo de la zona costera.

2.4 Las bocas de tormenta permiten el desfogue de los humedales interiores hacia el mar y viceversa, permitiendo una liberación de energía, evitando así un mayor daño a la duna y a la infraestructura presente

La marea de tormenta aumenta su altura y presión cuando no puede liberar su energía a través de las bocas de tormenta, provocando erosión a lo largo de la isla de barrera. Los experimentos numéricos realizados por Silva *et al.* (2012), sugieren que la abertura de bocas sobre la barrera arrecifal pudo ser un proceso muy importante durante los eventos de tormenta. Antes del desarrollo turístico, estos eventos podían abrir las bocas, concentrando en ellas el efecto de la marea de tormenta. Dicha concentración disminuye la presión en el resto de la isla de barrera, lo que reduce el efecto erosivo. Hoy en día la infraestructura turística construida sobre la duna costera ha cerrado dichas bocas, haciendo más rígido al sistema.

2.4.1 El recambio natural del agua de la laguna

Otra función derivada de la abertura de bocas es el recambio de agua de todo el sistema lagunar. Este sistema ha presentado varios casos de eutrofización desde que su conexión con el mar fue limitada por la modificaciones hechas para la infraestructura hotelera (Guido Aldana *et al.*, 2009). La modelación de Silva *et al.* (2012) muestra que todo el sistema lagunar interactúa entre sí (laguna de Buenaventura, laguna de Nichupté y laguna Bojórquez) y con el mar durante mareas de tormenta. Esta interacción permite el recambio del agua del sistema y evita la eutrofización (Silva *et al.*, 2012).

Conclusión

La abertura natural de bocas durante eventos de tormenta es un mecanismo que ayuda a liberar y focalizar la energía en ciertas partes de la playa (en este caso de la isla de barrera), lo cual atenúa la erosión en las otras zonas. Además, ayuda al recambio natural del agua en el sistema lagunar, reduciendo los eventos de eutrofización.



Figura 50. a) Punta Cancún en los años 70, antes del desarrollo turístico. Se pueden apreciar las bocas de tormenta naturales expuestas durante eventos de tormenta. b) La actual infraestructura turística ha modificado y bloqueado las bocas de tormenta (tomado de Silva *et al.*, 2012).

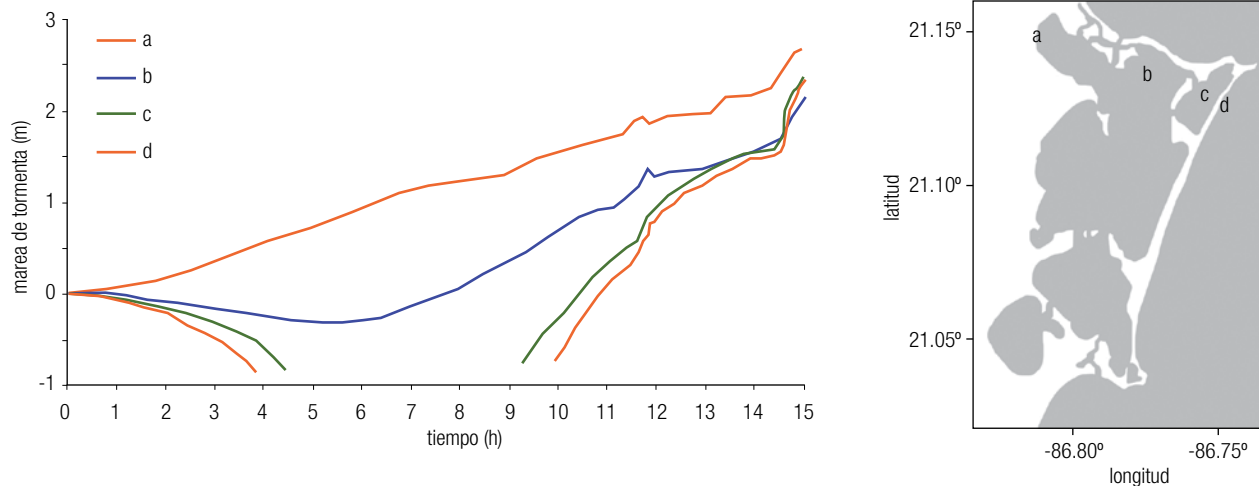


Figura 51. Modelación de la marea de tormenta durante el huracán Wilma. a) laguna de Buenaventura; b) laguna de Nichupté; c) laguna Bojorquez; d) área de la playa. Durante la tormenta los cuerpos de agua se vacían y llenan completamente, de hecho, hay un punto cerca de las 14 horas donde prácticamente todos los cuerpos son unidos por la marea de tormenta, generando un recambio de agua (tomado de Silva *et al.*, 2012).

Metodología Bruno *et al.* 2003

El análisis consintió en la implementación de un modelo retrospectivo de oleaje y viento entre los años 1948 y 2007 utilizando el modelo híbrido WAM-HURAC, compuesto, a su vez, por el modelo paramétrico HURAC y el generador de oleaje de tercera generación WAM. La herramienta hace posible un registro continuo de oleaje y de los eventos de mayor escala (huracanes y tormentas). Permite la evaluación del oleaje típico de la zona (dirección y Hs) y la comparación de magnitud de los eventos de gran escala. El modelo fue probado y validado con registros de 7 boyas instaladas en el Golfo de México y en el Caribe. Después, se utilizaron los programas MATO y WAPO para reproducir la marea de tormenta y el oleaje desarrollados en el área de Cancún durante el huracán Wilma. Se contó, además, con mediciones *in situ* de un correntómetro acústico Doppler (AWAC) durante el huracán. Finalmente, se utilizaron videos y fotografías aéreas y satelitales de la zona recolectadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM durante varios años.

Bibliografía

- Camacho-Valdéz, V., J.M. Murillo-Jiménez, E.H. Nava-Sánchez y C. Turrent-Thompson. 2008. Dune and beach morphodynamics at Cabo Falso, Baja California Sur, Mexico: Response to natural, hurricane Juliette (2001) and anthropogenic influence. *Journal of Coastal Research* 24, 553-560.
- Diez, J. J., M Esteban y R.M. Paz. 2009. Cancun-Nizuc Coastal Barrier. *Journal of Coastal Research* 251: 57-68. doi:10.2112/06-0822.1.
- Feagin, R.A., J. Figlus, J.C. Zinnert, J. Sigren, M.L. Martínez, R. Silva, W.K. Smith, D. Cox, D.R. Young y G. Carter. 2015. Going with the flow or against the grain? The promise of vegetation for protecting beaches, dunes, and barrier islands from erosion. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13 (4):203-10. doi:10.1890/140218.
- Guido, P., A.C. Ramírez, L.O. Godínez, S.L. Cruz y A.L. Juárez. 2009. Estudio de la erosión costera en Cancún y la Riviera Maya, México. *Avances en Recursos Hidráulicos* 20 (junio a octubre): 41-56.
- Jiménez-Orocio, O., I. Espejel y M.L. Martínez. 2014. La investigación científica sobre dunas costeras de México: origen, evolución y retos. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 86: 486-507.
- Lithgow, D., M.L. Martínez, J.B. Gallego-Fernández, P.A. Hesp, P. Flores, S. Gachuz, N. Rodríguez-Revelo, O. Jiménez-Orocio, G. Mendoza-González y L.L. Álvarez-Molina. 2013. Linking restoration ecology with coastal dune restoration. *Geomorphology* 199 (junio 2015): 214-24. doi:10.1016/j.geomorph.2013.05.007.
- Mariño-Tapia, I., C. Enriquez, E. Mendoza Baldwin, E. Escalante Mancera. 2014. Comparative Morphodynamics between Exposed and Reef Protected Beaches under Hurricane Conditions. *Coastal Engineering* 1-9.
- Martínez, M.L., A. Intralawan, G. Vázquez, O. Pérez-Maqueo, P. Sutton, y R. Landgrave. 2007. The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics* 63(2-3):254-72. doi:10.1016/j.ecolecon.2006.10.022.
- Martínez, M.L., P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata, R.N. Rodríguez, J.C. Cruz G. (eds.). 2014. Diagnóstico de las dunas costeras de México. Conafor-Semarnat. México. 363 pp.

- Moreno-Casasola, Patricia, M.L. Martínez y G. Castillo-Campos. 2008. Designing ecosystems in degraded tropical coastal dunes. *Ecoscience* 15(1): 44-52. doi:10.2980/1195-6860(2008).
- Pedroza, D., A. Cid, O. García, R. Silva, M. Villatoro, M.A. Delgadillo, E. Mendoza, I. Espejel, P. Moreno-Casasola, M.L. Martínez, D. Infante-Mata. 2013. *Manejo de ecosistemas de dunas costeras: criterios ecológicos y estrategias*. Semarnat, México. 99 pp.
- Pye, K. y H. Tsoar. 2009. *Aeolian and sand dunes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin 475 pp.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., I. Mariño-Tapia, C. Enriquez, R. Silva y M. González-Leija. 2013. The Role of Fringing Coral Reefs on Beach Morphodynamics. *Geomorphology* 198. Elsevier B.V. 69-83. doi:10.1016/j.geomorph.2013.05.013.
- Sallenger, A.H. 2000. Storm Impact Scale for Barrier Islands. *Journal of Coastal Research* 16(3): 890-895. doi:10.2307/4300099.
- Seingier, G., I. Espejel y J.L. Fermán-Almada. 2009. Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. *Investigación Ambiental* 1: 54-69.
- Silva, R., I. Mariño-Tapia, C. Enriquez-Ortiz, E. Mendoza Baldwin, E. Escalante Mancera y F. Ruiz-Rentería. 2006. Monitoring shoreline changes at Cancun beach, Mexico: Effects of Hurricane Wilma. *Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 3491-3503.
- Silva, R., M.L. Martínez, P.A. Hesp, P. Catalán, A. Osorio, R. Martell, M. Fosati. 2014. Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research* 71: 1-16. doi:10.2112/SI71-001.1.
- Silva, R., M.L. Martínez, I. Odériz, E. Mendoza-Baldwin y R.A. Feagin. 2016. Response of vegetated dune-beach systems to storm conditions. *Coastal Engineering* 109:53-62. doi:10.1016/j.coastaleng.2015.12.007.
- Silva, R., G. Ruiz-Martinez, I. Mariño-Tapia, G. Posada Vanegas, E. Mendoza Baldwin y E. Escalante Mancera. 2012. Manmade Vulnerability of the Cancun Beach System: The Case of Hurricane Wilma. *CLEAN - Soil, Air, Water* 40(9):911-19. doi:10.1002/clen.201100677.



Conservando la naturaleza.
Protegiendo la vida.