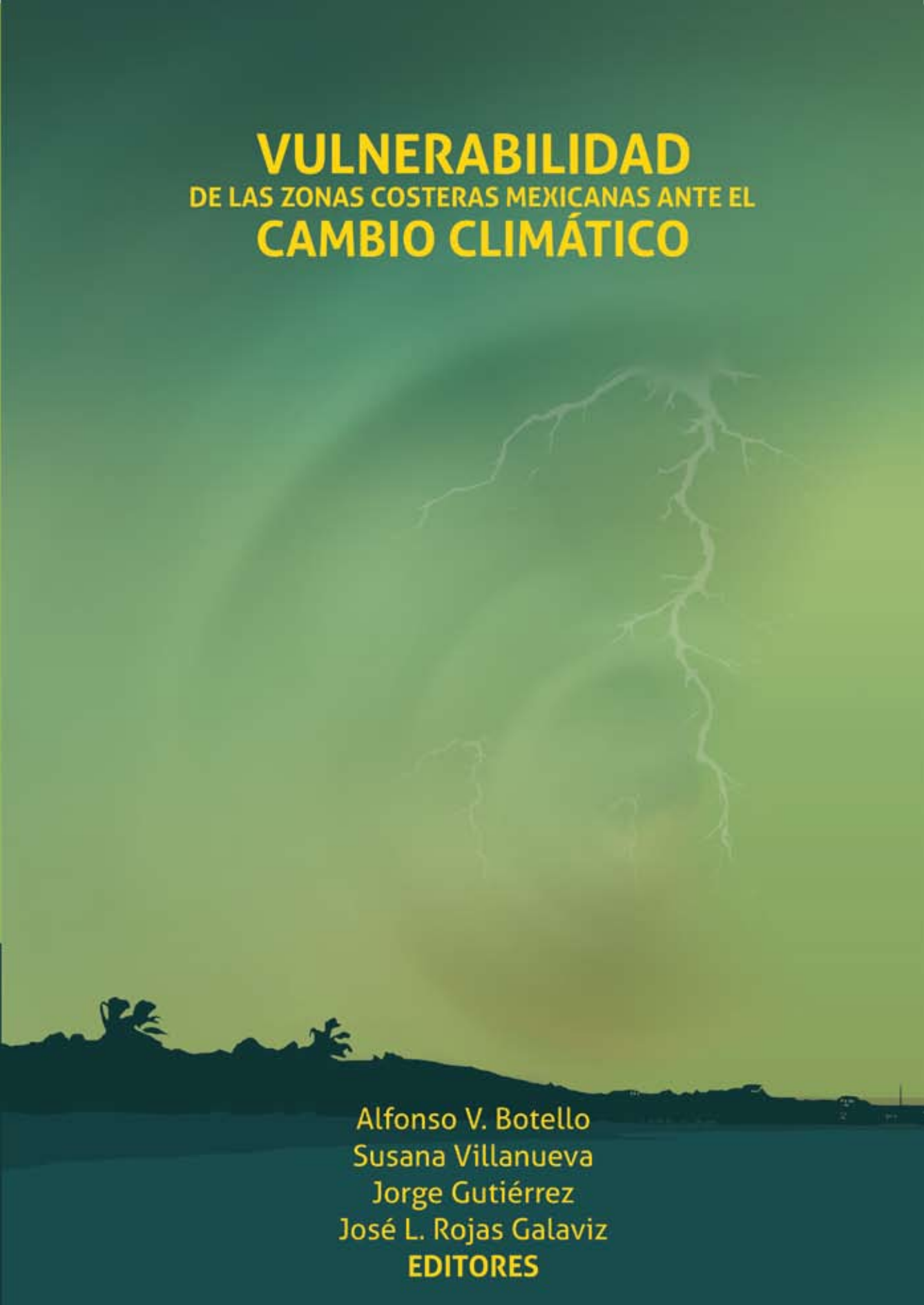




VULNERABILIDAD

DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL

CAMBIO CLIMÁTICO

Alfonso V. Botello
Susana Villanueva
Jorge Gutiérrez
José L. Rojas Galaviz
EDITORES



EN MEMORIA

DR. ROBERT R. LANKFORD

1925- 2010



Nació el 13 de febrero de 1925 en Philadelphia, Pennsylvania, Estados Unidos.

Su carrera profesional siempre estuvo ligada al estudio de las Ciencias de la Tierra y del Mar (Geología, Sedimentología, Paleontología, Estratigrafía, Petrología). Inició sus estudios en Oceanografía en 1954 y se dedicó a la investigación de ambientes sedimentarios modernos, particularmente los procesos que ocurren en la plataforma continental y la zona marginal adyacente (playas, marismas, bahías, estuarios, deltas). Comenzó su carrera de profesor universitario en 1963, primero en los Estados

Unidos de Norteamérica y posteriormente en México, en donde fue contratado como Experto en Ciencias Marinas por la UNESCO. Aquí, además de la enseñanza se dedicó al desarrollo del exitoso Programa de Estudios del Posgrado en Ciencias del Mar de la UNAM.

En 1977, fue designado por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (IOC) como Secretario Regional de la Subcomisión para el Caribe y Regiones Adyacentes, para el fortalecimiento y la expansión del Programa Regional en Oceanografía, y la cual se conformaba por 21 estados Miembros.

A su retiro de la UNESCO-IOC en 1985, fue contratado por la Universidad de Puerto Rico como Administrador Científico de su Programa de apoyo a las Ciencias Marinas (Sea Grant Program).

Profesionalmente, el Dr. Lankford se define primero como un promotor en apoyos a la educación universitaria en Ciencias Marinas y en segundo término como un administrador de la Ciencias del Mar.

Descanse en paz, el inigualable amigo, el excelente colega y el gran profesor.

**VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

*Alfonso V Botello, Susana Villanueva-Fragoso,
Jorge Gutiérrez y José Luis Rojas Galaviz*

editores

2010

Vulnerabilidad de la zonas costeras mexicanas ante el cambio climático

Botello, A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de la zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Gobierno del Estado de Tabasco. Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

© Gobierno del Estado de Tabasco. Secretaría de Gobierno
© Instituto Nacional de Ecología, Semarnat. México
© Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
© Universidad Autónoma de Campeche

ISBN 978-607-7887-11-9 (versión impresa)
ISBN 978-607-7887-12-6 (versión electrónica)

Centro EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche
Av. Austin Melgar s/n. Cd. Universitaria
Col. Lindavista. C.P. 24039
Campeche, Campeche. México
Tel: (981) 8119800 ext 62300
Fax: (981) 8119800 ext 62399
<http://etzna.uacam.mx/epomex/epomex.html>

CONTENIDO

PRESENTACIÓN	I
PRÓLOGO	III
DIRECTORIO DE AUTORES	V
INTRODUCCIÓN <i>A.V. Botello</i>	1
VULNERABILIDAD DE LA ZONA COSTERA. FISICOQUÍMICA <i>G. de la Lanza Espino, J.C. Gómez Rojas y S. Hernández Pulido</i>	15
VULNERABILIDAD DE LA ZONA COSTERA. ECOSISTEMAS COSTEROS <i>S. Villanueva F., G. Ponce V., C. García R., J. Presa</i>	37
VULNERABILIDAD DE SITIOS DE ANIDACIÓN DE TORTUGAS MARINAS POR EFECTOS DE EROSIÓN COSTERA EN EL ESTADO DE CAMPECHE <i>A. Bolongaro Crevenna Recaséns, A. Z. Márquez García, V. Torres Rodríguez y A. García Vicario</i>	73
EL POSIBLE EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS TORTUGAS MARINAS <i>R. Márquez y Ma. del C. Jiménez</i>	97
RETOS PARA EL SECTOR PESQUERO Y ACUÍCOLA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO <i>P. Guzmán-Amaya, P. M. Rojas-Carrillo, G. Z. Morales-García y E. Espino-Barr</i>	113
EL MANGLAR, OTROS HUMEDALES COSTEROS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO <i>F. J. Flores Verdugo, P. Casasola, G. de la Lanza-Espino y C. Agraz Hernández</i>	165

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS PRADERAS DE PASTOS MARINOS	189
<i>M. E. Gallegos Martínez</i>	
EFFECTO DE LOS HURACANES Y CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL CARIBE MEXICANO: ADAPTABILIDAD DE LOS PASTOS MARINOS	211
<i>M. A. Liceaga U Correa, L.U. Arellano Méndez y H. Hernández Núñez</i>	
MITIGACIÓN, ADAPTACIÓN Y COSTOS EN LOS ARRECIFES DE CORAL Y CAMBIO CLIMÁTICO: VULNERABILIDAD DE LA ZONA COSTERA DE QUINTANA ROO	229
<i>P. Blanchon, R. Iglesias Prieto, E. Jordán Dahlgren y S. Richards</i>	
TENDENCIAS DEL NIVEL DEL MAR EN LAS COSTAS MEXICANAS	249
<i>J. Zavala Hidalgo, R. de Buen Kalman, R. Romero Centeno y F. Hernández Maguey</i>	
VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL MAR DURANTE EL PERIODO 1996-2008 EN CUATRO REGIONES MARINAS DE LA ZONA ECONÓMICA EXCLUSIVA DE MÉXICO	269
<i>A. Gallegos García, R. Rodríguez Sobreya y R. Lecuanda</i>	
CAMBIO CLIMÁTICO Y EL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR	283
<i>E. Caetano, V. Innocentini, V. Magaña, S. Martins y B. Méndez</i>	
TASAS DEL AVANCE TRANSGRESIVO Y REGRESIVO EN EL FRENTE DELTÁICO TABASQUEÑO: EN EL PERIODO COMPRENDIDO DEL AÑO 1995 AL 2008	305
<i>M. A. Ortiz-Pérez, J.R. Hernández-Santana, J. M. Figueroa Mah Eng y L. Gama Campillo</i>	
TASA DE EROSIÓN Y VULNERABILIDAD COSTERA EN EL ESTADO DE CAMPECHE DEBIDO A EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	325
<i>V. Torres Rodríguez, A. Márquez García, A. Bolongaro Crevenna, J. Chavarria Hernández, G. Expósito Díaz y E. Márquez García</i>	

CAMBIO EN LA LÍNEA DE COSTA EN LA RIVERA MAYA DEBIDO A FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS. CONSECUENCIA DEL CAMBIO GLOBAL CLIMÁTICO?	345
<i>A. Z. Márquez García, A. Bolongaro Crevenna y V. Torres Rodríguez</i>	
ZONAS COSTERAS BAJAS EN EL GOLFO DE MÉXICO ANTE EL INCREMENTO DEL NIVEL DEL MAR	359
<i>J.A. Carbajal Domínguez</i>	
HIDRODINÁMICA DEL RÍO COATZACOALCOS Y ESTIMACIÓN DE LAS POSIBLES INUNDACIONES ANTE ESCENARIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	381
<i>H. Ramírez León, F. Torres Bejarano, E. Herrera Díaz y C. Rodríguez Cuevas</i>	
METODOLOGÍA PARA EVALUAR VULNERABILIDAD COSTERA POR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	403
<i>H. Ramírez León y F. Torres Bejarano</i>	
VULNERABILIDAD SOCIAL AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COSTAS DEL GOLFO DE MÉXICO: UN ESTUDIO EXPLORATORIO	427
<i>H. Rodríguez Herrero y L. Bozada Robles</i>	
MITIGACIÓN, ADAPTACIÓN Y COSTOS	469
<i>A.V. Botello, S. Villanueva y J. Presa</i>	
VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES DE LOS HUMEDALES DE LA CHONTALPA, TABASCO: UN ENFOQUE EXPLORATORIO A NIVEL LOCAL	493
<i>C. J. Vázquez-Navarrete, E. E. Mata-Zayas y D J. Palma-López</i>	
CONSIDERACIONES FINALES	509

PRESENTACIÓN

El Cambio Climático es un fenómeno mundial que comprende múltiples interacciones de procesos naturales, sociales, políticos y económicos a escala global y cuyos impactos en los ecosistemas, las economías y las sociedades se verán a mediano y largo plazo.

Debido a la importancia de este fenómeno, el Instituto de Ecología/Semarnat y el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM con el apoyo de especialistas de diversas Universidades, Centros de Investigación y Académicos, han conjuntado esta obra en la que se resalta la vulnerabilidad de las costas mexicanas a los impactos del Cambio Climático y a los fenómenos hidrometeorológicos extremos como los ciclones y huracanes.

Así, las condiciones extremas en el clima afectan la vida del planeta. Dependiendo de la intensidad y duración de una anomalía en la lluvia o la temperatura, así como del grado de vulnerabilidad de un ecosistema o de una sociedad, los impactos del clima pueden variar de imperceptibles a catastróficos. Para valorar el grado de los desastres naturales se debe tener en cuenta el factor riesgo, como una combinación de la amenaza y de la vulnerabilidad. Por lo tanto, las amenazas pueden ser las condiciones ecológicas, las sociales y/o económicas extremas asociadas al cambio climático, mientras que la vulnerabilidad estará íntimamente asociada al nivel de desarrollo o subdesarrollo de los países.

Por ello, el gobierno del estado de Tabasco no tiene ninguna duda en respaldar la publicación y difusión del libro Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el Cambio Climático, toda vez que Tabasco y la zona costera del sur del Golfo de México son regiones particularmente amenazadas y vulnerables, pues son altamente susceptibles a los efectos de este fenómeno mundial.

Además, es del todo oportuno presentar este libro en este momento, que es clave dentro del concierto internacional de negociaciones, previo a la XVI Reunión de la Conferencia de las Partes, que se efectuará este año en la Ciudad de Cancún, México.

Seguramente este libro será de especial interés para la sociedad, los académicos, estudiantes, tomadores de decisión y los gobiernos, pues representa, sin duda, un parteaguas científico y motivo de consulta obligada para la implementación de instrumentos de política ambiental y de acciones para afrontar este fenómeno.

Andrés Rafael Granier Melo

Gobernador Constitucional del Estado de Tabasco

PRÓLOGO

Hasta hace unas dos décadas, la información y las presunciones que se hacían sobre el Cambio Climático Global carecían de la fuerza y la importancia que representa para el planeta esta amenaza. Hoy en día, con el avance tecnológico y el desarrollo satelital, ha surgido una gran cantidad de información que revela el aumento de este fenómeno mundial y al cual la humanidad tendrá que enfrentarse en un futuro muy cercano.

Los sucesivos informes técnicos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas, señalan las consecuencias que este fenómeno causaría en vastas regiones del planeta. Según los especialistas, los diversos escenarios indican que como consecuencia de este cambio, regiones enteras del planeta se verán afectadas por la lluvia y las consecuentes inundaciones, en tanto que en otras habrá sequías prolongadas y el consecuente cambio del régimen hidrológico; se modificarán los tiempos de cosechas y los procesos de la agricultura; con el aumento del nivel del mar, se verán inundadas grandes extensiones costeras con efectos de salinización de las tierras adyacentes y pérdida de tierras de cultivo y por ende de la producción de alimentos; se modificarán los patrones de conducta de muchas especies marinas con las consecuencias para los patrones de pesca; el aumento del bióxido de carbono acidificará los mares y propiciará efectos devastadores sobre los corales de arrecife; se incrementará el número y la intensidad de los huracanes y su devastadores efectos sobre las poblaciones y la infraestructura costera con las consecuentes pérdidas económicas y modificaciones sociales; se incrementará la erosión costera afectando amplias zonas del litoral y en otros casos habrá crecimiento de la línea de costa; se afectarán importantes ecosistemas costeros como los humedales, los pastos marinos y los manglares, que son base de la cadena alimenticia para muchas otras especies; y, sobre todo, se afectará el patrón de migración de importantes especies pesqueras.

Ante estos escenarios, surgen interrogantes tales como qué tan preparados estamos para afrontar estos cambios; de qué información disponemos para alertar, informar y concientizar a las poblaciones costeras sobre estos peligros; qué medidas de mitigación y procesos de adaptación son necesarios instrumentar para estos cambios; y en consecuencia, cuáles son los costos económicos y sociales que debemos afrontar.

Convencidos de que la generación de información actualizada y con un amplio rigor científico, nos ayudará a la comprensión de éstos problemas, investigadores de diversos centros de investigación y de universidades nacionales y estatales, han compilado en esta obra, estudios y resultados sobre los efectos del cambio climático y la vulnerabilidad y los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (inundaciones, mareas de tormenta y huracanes) sobre las zonas costeras de México; y la ponen a disposición del público, de investigadores y la academia, de los gobiernos y los tomadores de decisión, convencidos de que solamente con la participación de todos se podrá accionar y reaccionar ante tales amenazas, ya que el problema no solo compete a un o unos cuantos sectores, sino a toda la humanidad, ya que los efectos del cambio climático se resentirán en todos los pobladores del Planeta.

Fernando E. Ortega Bernés

Gobernador Constitucional del Estado de Campeche

DIRECTORIO DE AUTORES

C. Agraz Hernández

Centro EPOMEX, Universidad Autónoma
de Campeche
Av. Agustín Melgar s/n
Col. Lindavista C.P. 24039
Campeche, Campeche. México

L.U. Arellano Méndez

CINVESTAV- IPN, Unidad Mérida
AP. 73 Cordemex, C.P. 97310,
Mérida, Yucatán, México

P. Blanchon

Unidad Académica Puerto Morelos
ICMYL-UNAM
Ap. Postal 1152, CP 77500
Cancún, Q. Roo, México

A. Bolongaro Crevenna Recaséns

Academia Nacional de Investigación
y Desarrollo A.C.
Avenida Palmira No.13
Col. Miguel Hidalgo, C.P. 62040,
Cuernavaca, Morelos, México.

L. Bozada Robles

Universidad Veracruzana-I. Sede Selvas
Universidad Istmo Americana, A.C.
Román Marin 1107. Col. M- Avila Camacho
Coatzacoalcos, Veracruz. México

E. Caetano

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria
Del. Coyoacán, 04510 México D.F

J.A. Carbajal Domínguez

División Académica de Ciencias Básicas,
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco,
1.5 km carr. Cunduacán-Jalpa. C.P.86690
Cunduacán, Tabasco, México,

P. Casasola

Instituto de Ecología A.C.
Km. 2.5 carretera antigua a Coatepec 351,
Congregación El Haya
Xalapa 91070, Veracruz, México.

J. Chavarria Hernández

Academia Nacional de Investigación
y Desarrollo A.C.
Avenida Palmira No.13
Col. Miguel Hidalgo, C.P. 62040,
Cuernavaca, Morelos, México.

R. de Buen Kalman

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria
Del. Coyoacán, 04510 México D.F

G. de la Lanza Espino

Instituto de Biología, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria
Del. Coyoacán, 04510 México D.F

E. Espino-Barr

Instituto Nacional de la Pesca, Sagarpa
Playa Ventanas s/n
Col. México, 28200
Manzanillo, Colima. México

G. Expósito Díaz

Academia Nacional de Investigación
y Desarrollo A.C.
Avenida Palmira No.13
Col. Miguel Hidalgo, C.P. 62040,
Cuernavaca, Morelos, México.

J. M. Figueroa Mah Eng

Instituto de Geografía, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria-
Del. Coyoacán, 04510 México D.F.

F. J. Flores Verdugo

Unidad Académica Mazatlán. ICML-UNAM
Av. Joel Montes Camarena S/N
Apartado Postal 811 C.P. 82040, Mazatlán,
Sin. México

A. Gallegos García

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
UNAM. Circuito Exterior s/n, Ciudad
Universitaria. Del. Coyoacán, 04510
México D.F

M. E. Gallegos Martínez

Departamento de Hidrobiología
UAM-Iztapalapa
Av. San Rafael Atlixco 186,
C.P. 09340, Iztapalapa, México D.F.

L. Ma. Gama Campillo

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División de Ciencias Biológicas
Dirección de Investigación y Posgrado
Km. 0.5 Carretera Villahermosa-Cárdenas,
C.P. 86150. Tabasco

C. García R.

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
UNAM. Circuito Exterior s/n, Ciudad
Universitaria. Del. Coyoacán, 04510
México D.F

A. García Vicario

Academia Nacional de Investigación
y Desarrollo A.C.
Avenida Palmira No.13
C.P. 62040, Cuernavaca, Morelos, México

J.C. Gómez Rojas

Instituto de Biología, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria
Del. Coyoacán, 04510 México D.F

F. Hernández Maguey

Instituto de Geofísica, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria
Del. Coyoacán, 04510 México D.F

H. Hernández Núñez

CINVESTAV- IPN, Unidad Mérida
AP. 73 Cordemex, C.P. 97310,
Mérida, Yucatán, México

S. Hernández Pulido

Instituto de Biología, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria
Del. Coyoacán, 04510 México D.F

J.R. Hernández-Santana

Instituto de Geografía, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria-
Del. Coyoacán, 04510 México D.F.

E. Herrera Díaz

Universidad del Valle de México
México

R. Iglesias Prieto

Unidad Académica Puerto Morelos
ICMYL-UNAM. Ap. Postal 1152,
CP 77500 Cancún, Q. Roo, México

V. Innocentini

Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais, INPE. Av. dos Astronautas, 1756,
São José dos Campos - SP - Brasil

Ma. del C. Jiménez

Instituto Nacional de la Pesca, Sagarpa
Playa Ventanas s/n,
Col. México, 28200 Manzanillo. México

E. Jordán Dahlgren

Unidad Académica Puerto Morelos
ICML-UNAM
Ap. Postal 1152, CP 77500
Cancún, Q. Roo, México

P. Guzmán-Amaya

Instituto Nacional de la Pesca
Pitágoras 1320
Col. Sanata Cruz Atoyac 03310
Benito Juárez. México D.F.

R. Lecuanda

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
UNAM. Circuito Exterior s/n, Ciudad
Universitaria. Del. Coyoacán, 04510
México D.F.

M. A. LiceagaCorrea

CINVESTAV- IPN, Unidad Mérida
AP. 73 Cordemex, C.P. 97310,
Mérida, Yucatán, México

V. Magaña

Centro de Ciencias de La Atmósfera, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria-
Del. Coyoacán, 04510 México D.F.

R. Márquez

CIAC TM-Comité Científico
Av. J. O. Domínguez no. 245, Buenaventura,
Ensenada, BC. 22880. México,

A. Z. Márquez García

Depto. de Hidrobiología, UAM-Iztapalapa
Av. San Rafael Atlixco 186,
Col. Vicentina C.P. 09340, Iztapalapa,
México D.F.

Academia Nacional de Investigación
y Desarrollo A.C.

Avenida Palmira No.13
Col. Miguel Hidalgo, C.P. 62040,
Cuernavaca, Morelos, México.

E. Márquez García

Academia Nacional de Investigación
y Desarrollo A.C.
Avenida Palmira No.13
Col. Miguel Hidalgo, C.P. 62040,
Cuernavaca, Morelos, México.

S. Martins

Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais, INPE
Av. dos Astronautas, 1756,
São José dos Campos - SP - Brasil

E. E. Mata-Zayas

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Villahermosa, Tabasco. México

B. Méndez

Azcapotzalco, Departamento de Energía.
Av. San Pablo 180, Col. Reynosa
Tamaulipas, Azcapotzalco 02200,
D.F., México

G. Z. Morales-García

Instituto Nacional de la Pesca
Pitágoras 1320
Col. Santa Cruz Atoyac 03310
Benito Juárez. México D.F.

M. A. Ortiz-Pérez

Instituto de Geografía, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria-
Del. Coyoacán, 04510 México D.F.

D J. Palma-López

Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco
Tabasco, México

G. Ponce V.

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
UNAM. Circuito Exterior s/n, Ciudad
Universitaria. Del. Coyoacán, 04510
México D.F

J. Presa

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
UNAM. Circuito Exterior s/n, Ciudad
Universitaria. Del. Coyoacán, 04510
México D.F

H. Ramírez León

Instituto Mexicano del Petróleo
Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152, San
Bartolo Atepehuacan, Gustavo A. Madero,
07730, México D.F

S. Richards

Unidad Académica Puerto Morelos
ICMYL-UNAM. Ap. Postal 1152, CP 77500
Cancún, Q. Roo, México

C. Rodríguez Cuevas

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
San Luis Potosí, México

R. Rodríguez Sobreira

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
UNAM. Circuito Exterior s/n, Ciudad
Universitaria. Del. Coyoacán, 04510
México D.F

P. M. Rojas-Carrillo

Instituto Nacional de la Pesca
Pitagoras 1320
C:P: 03310. Benito Juárez. México D.F.

H. Rodríguez Herrero

CIESAS Unidad Golfo
Av. Encanto S/N, Esq. Antonio Nava
Col. El Mirador, C. P. 91170
Xalapa, Veracruz, México

R. Romero Centeno

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria
Del. Coyoacán, 04510 México D.F

F. Torres Bejarano

Instituto Mexicano del Petróleo
Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152, San
Bartolo Atepehuacan, Gustavo A. Madero,
07730, México D.F

V. Torres Rodríguez

Academia Nacional de Investigación
y Desarrollo A.C.
Avenida Palmira No.13
Col. Miguel Hidalgo, C.P. 62040,
Cuernavaca, Morelos, México

A.V. Botello

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
UNAM. Circuito Exterior s/n, Ciudad
Universitaria. Del. Coyoacán, 04510
México D.F

C. J. Vázquez-Navarrete

Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco
Periférico Carlos A. Molina s/n
H. Cárdenas, Tabasco 86500

S. Villanueva F.

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
UNAM. Circuito Exterior s/n, Ciudad
Universitaria. Del. Coyoacán, 04510
México D.F

J. Zavala Hidalgo

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria
Del. Coyoacán, 04510 México D.F

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Introducción

A. V. Botello y S. Villanueva-Fragoso

La zona costera es una zona de transición entre los componentes marino y continental del planeta. Es ampliamente reconocida como uno de los más importantes elementos de la biosfera con una amplia diversidad de ambientes y recursos.

Una intensa interacción de ambientes caracteriza a las zonas costeras del mundo y el balance de estas interacciones origina ecosistemas con características ambientales únicas (clima, geomorfología, hidrología), regidos a su vez por procesos físicos, químicos y biológicos de alta dinámica.

Los procesos y los ambientes costeros están sujetos a cambios que varían ampliamente en escala geográfica, tiempo y duración y que al combinarse crean sistemas biológicamente muy productivos, pero vulnerables a las presiones ambientales de la diversas actividades humanas.

En contraste, los procesos continentales están dominados por regímenes hidrológicos y flujos horizontales que sostienen gradientes de energía y transferencia de materiales (nutrientes, contaminantes, sedimentos) proveyendo una variedad de condiciones para la transformación de materiales y la sustentabilidad biológica.

Palabras clave: vulnerabilidad, adaptación, cambio climático, zonas costeras

Los procesos oceánicos están también dominados por factores hidrológicos y físicos que a su vez controlan el transporte de materiales y los regímenes de energía. El balance resultante entre los procesos terrestres y oceánicos origina heterogeneidad en la estructura física y ecológica y sostiene a su vez la dinámica de la función de los ecosistemas y los ciclos biogeoquímicos en el territorio costero.

La riqueza y diversidad de recursos presentes en las zonas costeras conllevan la correspondiente concentración de actividades y asentamientos humanos a lo largo de los litorales y estuarios en todo el mundo. Se estima que cerca de la mitad de la población humana vive en /o cerca de las costas y a pesar de la que densidad varía ampliamente en las diferentes regiones, hay una tendencia general a moverse de regiones continentales hacia las costas.

La zona costera es también una de las áreas más perturbadas del planeta. La contaminación, la eutrofización, la industrialización, los desarrollos urbanos, la reclamación de tierras, la producción agrícola, la sobrepesca, entre otros factores impactan de manera continua la sustentabilidad de los ambientes costeros. Así, el mayor reto que enfrenta la humanidad hoy en día es como administrar correctamente el uso de esta área de tal manera que las futuras generaciones puedan también disfrutar de sus recursos visuales, culturales, ambientales, energéticos y alimentarios. Una reciente evaluación de los impactos de la contaminación marina y costera desde fuentes terrestres, muestra que estos ambientes están en constante degradación y en muchos sitios se ha intensificado este problema (Gesamp, 2001), el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en el 2001, proyectó un incremento mundial de las concentraciones de CO₂

y elevación en la temperatura de los océanos que afectará de manera significativa a las poblaciones costeras que habitan las zonas bajas (Houghton *et al.*, 2001). La evaluación mundial del Ambiente, de los recursos mundiales (WRI, 2000) de los océanos y áreas costeras y del cambio global (Steffen *et al.*, 2003) describen un amplio mosaico de presiones, impactos y sobre todo de cambios impredecibles en las zonas costeras del planeta.

Así las actividades humanas principalmente la quema de combustibles fósiles y los cambios en la utilización de tierras y en la cubierta vegetal han aumentado la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales alteran los balances radiativos y tienden a calentar la atmósfera, y en algunas regiones, de aerosoles que producen el efecto contrario y tienden a enfriar la atmósfera.

En su conjunto, estos cambios en los GEI y en los aerosoles conducirán, según las proyecciones, a cambios regionales y mundiales de la temperatura, la precipitación y de otras variables climáticas, dando así origen a cambios en la humedad del suelo a escala mundial, a un aumento del nivel medio del mar y valores más extremos de temperatura, de crecidas de ríos y de sequías prolongadas en algunos lugares del planeta. Basándose en las distintas sensibilidades del clima al cambio de las concentraciones de GEI en la atmósfera (IPCC, 1996) y en los posibles cambios en las emisiones de GEI y aerosoles (escenarios IS92a-f), las proyecciones de los modelos climáticos predicen un aumento de la temperatura media anual en la superficie del planeta de 1-3.5° C para el año 2100, un incremento medio mundial del nivel del mar de entre 15 y 95 cm, y un cambio en las pautas espacial y temporal de las precipitaciones (IPCC, 1997).

El aumento en el nivel del mar como resultado del cambio climático tendrá diferentes efectos físicos, ecológicos, sociales y económicos sobre los sistemas costeros: inundación, daños por inundación y tormentas, pérdida de humedales, erosión, intrusión de agua salada y aumento en los niveles freáticos. Otros efectos del cambio climático, como las temperaturas más elevadas del agua de mar, los cambios en los regímenes de precipitación y los cambios en la trayectoria, la frecuencia y la intensidad de las tormentas, y también se afectarán los sistemas costeros, directamente por el aumento del nivel del mar. Los cambios en los regímenes de precipitación y tormentas alterarán los riesgos de inundación y daños por tormentas. Las tablas 1 y 2 resumen

algunos de los efectos biogeofísicos del cambio climático y la elevación del nivel del mar, y de sus interacciones.

Estos efectos biogeofísicos, tendrán además impactos socioeconómicos directos e indirectos sobre el turismo, los asentamientos humanos, la agricultura, el suministro y la cantidad, así como la calidad de agua dulce, las pesquerías, los servicios financieros y la salud humana en las zonas costeras (McLean *et al.*, 1993; Nicholls, 2002). La población residente en las zonas costeras (a niveles actuales o proyectados) podría ser afectada por un incremento de las inundaciones, o en última instancia, tener la necesidad de mudarse a causa de éstas, de los desbordamientos o la pérdida de tierra por erosión. Habría también cambios en los

Tabla 1. Algunos cambios climáticos y factores relacionados relevantes a las costas y sus efectos biogeofísicos.

Factor climático	Dirección del cambio	Efectos biogeofísicos
Temperatura del agua de mar (de aguas superficiales).	Aumento.	Aumento de la decoloración de corales; migración de especies costeras hacia latitudes más altas; disminución de la incidencia de hielo oceánico a latitudes más altas.
Intensidad de la precipitación/ escurrimiento superficial.	Ciclo hidrológico intensificado, con amplias variaciones regionales.	Cambios en el suministro de sedimentos fluviales; cambios en el riesgo de inundación en zonas costeras bajas; pero también se considera el manejo de cuencas.
Olas debido a cambios en el clima	Poco conocido, pero significativa variabilidad temporal y espacial esperada.	Cambios e incrementos en los patrones de erosión; cambios en los impactos de las tormentas.
Trayectoria, frecuencia e intensidad de tormentas	Poco conocidos, pero significativa variabilidad temporal y espacial esperada	Cambios en la ocurrencia de inundaciones y daños por tormentas.
CO ₂ atmosférico.	Aumento.	Aumento de la productividad en ecosistemas costeros; disminución de los impactos de la saturación de CaCO ₃ en arrecifes coralinos.
Fuente: Nicholls, 2002.		

Tabla 2. Principales efectos biofísicos del aumento relativo del nivel del mar, incluyendo los factores interactivos relevantes.

Efectos biogeofísicos		Otros factores relevantes	
		Climáticos	No Climáticos
Inundación y daños por tormentas.	Oleadas.	Olas y Tormentas climáticas, cambios morfológicos, suministro de sedimentos.	Suministro de sedimentos, manejo de inundaciones, cambios morfológicos, adjudicación de tierras.
	Efecto de arrastre.	Escurrimiento superficial.	Manejo de cuencas y uso de la tierra.
Pérdida de humedales (y cambios) .		Fertilización con CO ₂ Suministro de sedimentos.	Suministro de sedimentos, espacio de migración, destrucción directa.
Erosión.		Suministro de sedimentos, olas y tormentas climáticas.	Suministro de sedimentos.
Intrusión de agua salada.	Aguas superficiales.	Escurrimiento superficial.	Manejo de cuencas y uso de la tierra.
	Aguas subterráneas.	Precipitación.	Uso de la tierra, uso de acuíferos.
Aumento de capa freática / drenaje impedido.		Precipitación.	Uso de la tierra, uso de acuíferos.

bienes y servicios comercializados tales como la tierra, la infraestructura urbana y la productividad agrícola e industrial.

Los efectos del cambio climático se verán reflejados en que tan vulnerables pueden ser los ecosistemas a dicho cambio y por otro lado a su poder de adaptación ante dichos cambios.

Se define la vulnerabilidad como el grado en que un ecosistema natural o social podría resultar afectado por el cambio climático. La vulnerabilidad está en función de la sensibilidad de un sistema a los cambios del clima y de su capacidad para adaptarse a dichos cambios. En este contexto, un sistema muy vulnerable sería aquel que fuera muy sensible a pequeños cambios en el clima, incluyéndose en el concepto de sensibilidad la posibilidad de sufrir efectos muy perjudiciales, o aquel cuya capacidad de adaptación se hallara seriamente limitada.

Las evaluaciones de la vulnerabilidad de recursos costeros a los impactos del cambio climático deben poder distinguir entre *vulnerabilidad natural del sistema* y *vulnerabilidad socioeconómica del sistema*, aunque claramente ambos están relacionados y son interdependientes. Ambos son dependientes en sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación (Smith *et al.*, 2001). Un análisis apropiado de vulnerabilidad socioeconómica a la elevación del nivel del mar, sin embargo, requiere de una comprensión previa de cómo el sistema natural será afectado. Partiendo de esta base, el análisis de vulnerabilidad costera comienza con la respuesta del sistema natural. Además, otras presiones climáticas y no climáticas deben ser reconocidas en un análisis de vulnerabilidad, porque el aumento del nivel del mar no ocurre aisladamente y los sistemas costeros

evolucionarán a causa de otros factores distintos al aumento del nivel del mar.

El nivel del mar a escala global es controlado por el clima, los movimientos en la superficie de la Tierra, la rotación de la Tierra y el efecto de la gravedad (figura 1).

Es probable que el promedio global de la elevación del nivel del mar se acelere considerablemente en las siguientes décadas a causa del calentamiento global antropogénico, y el cambio climático global inducido por el hombre asociado al consecuente aumento del nivel del mar pueden tener consecuencias adversas considerables para los ecosistemas y las sociedades costeras. El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) (Houghton

et al., 2001) proyectó un aumento de la temperatura media global en la superficie de 1,4 a 5,8°C desde 1990 a 2100.

En el capítulo sobre cambios en el nivel del mar, el IPCC (2001) utilizó estas proyecciones y estimó que el promedio global del nivel del mar aumentará entre 9 y 88 cm en el mismo periodo, con un valor central de 48 cm, que es 2,2 a 4,4 veces la tasa observada a lo largo del siglo XX. Aún con reducciones drásticas en emisiones de GEI, el nivel del mar continuará subiendo por siglos, más allá del 2100, a causa del largo tiempo necesario para la respuesta térmica del sistema global del océano, conocido generalmente como “el compromiso al aumento del nivel del mar”.

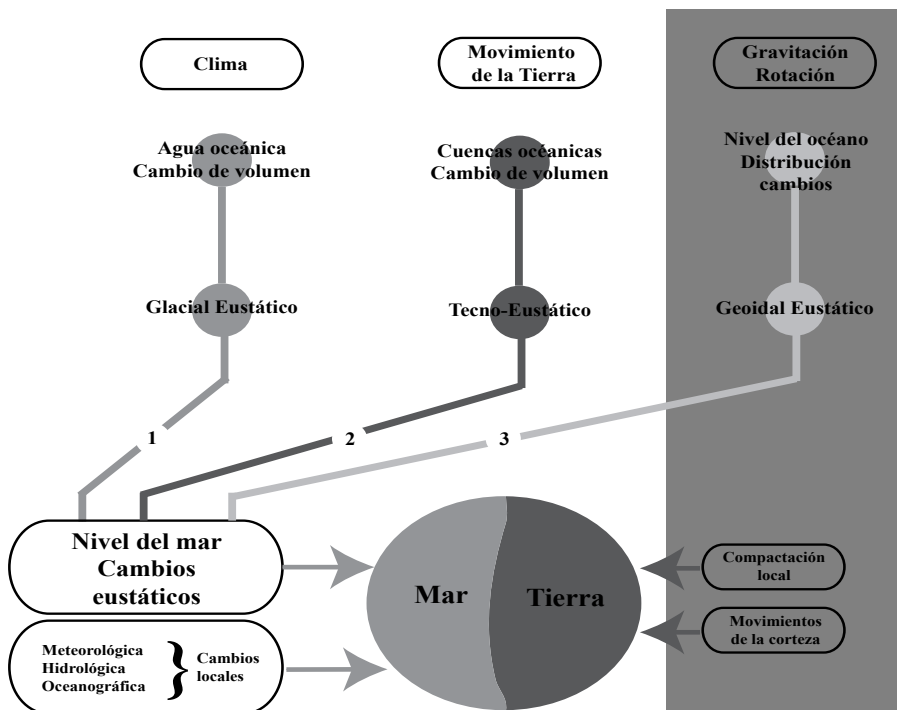


Figura 1. El clima, los movimientos terrestres y los efectos gravitacionales de la rotación de la Tierra controlan el nivel del mar global, pero se combinan con los cambios locales para producir un cambio en el nivel del mar con relación al nivel local de la tierra.

EFFECTOS DEL AUMENTO EN EL NIVEL DEL MAR

El aumento relativo del nivel del mar tiene una gran variedad de efectos sobre los procesos costeros. Además de elevar el nivel del océano, el aumento del nivel del mar también incrementa todos los procesos costeros que operan en torno al nivel promedio del mar (mareas, oleajes). Los efectos inmediatos de un aumento en el nivel del mar, por lo tanto, incluyen la inundación y el aumento en la frecuencia y la profundidad de las inundaciones en tierras costeras. Los efectos a más largo plazo incluyen cambios morfológicos, particularmente erosión de las playas y disminución de las dunas, a medida que la costa se ajusta a las nuevas condiciones ambientales. Para la cantidad de aumento relativo del nivel del mar esperado durante el siglo XXI (≤ 1 m), estos cambios son principalmente efectivos a través de cambios en dos direcciones:

- Cambios en oleajes, mareas y oleadas
- Cambios en la morfología costera

Un aumento relativo del nivel del mar permite que las olas rompan más cerca de la costa, lo que a su vez aumenta la carga y el estrés sobre las estructuras costeras de defensa. Las profundidades crecientes del agua también pueden afectar el progreso de mareas y oleadas. Más directamente, levantará todos los niveles de las aguas asociadas, incluyendo las alturas extremas de oleadas. Por lo tanto, aunque se mantengan constantes la trayectoria, la frecuencia y la intensidad de las tormentas, el aumento relativo del nivel del mar podría reducir el período del retorno de los niveles de agua extremos. El IPCC concluyó que la intensidad de los ciclones tropicales podría aumentar: si esto ocurre, haría que el poder combinado entre el aumento del nivel del mar

y los ciclones sea potencialmente aún más destructivo que los ciclones de hoy.

En cuanto al alcance de las mareas a los ríos, el aumento relativo del nivel del mar subirá el nivel de base para las inundaciones de ríos. Bajo el cambio climático, también podría haber un aumento en el caudal de los ríos, y estos dos factores interactivos podrían sumarse al aumento en el riesgo de inundación.

Los seis efectos biofísicos más importantes desde una perspectiva social son:

- Aumento de las probabilidades de frecuencia de inundación
- Erosión
- Inundación
- Elevación de los niveles freáticos
- Intrusión de agua salada
- Efectos biológicos.

Los efectos socioeconómicos potenciales del aumento del nivel del mar son:

- Pérdida directa de valores económicos, ecológicos, culturales y de subsistencia a causa de la pérdida de tierras, infraestructura y habitats costeros
- Aumento del riesgo de inundación para personas, tierras e infraestructura, y para los valores citados más arriba
- Otros efectos relacionados con cambios en el manejo del agua, la salinidad y la actividad biológica, tales como la pérdida de turismo, la pérdida de habitats costeros y los efectos en la agricultura y acuicultura.

ADAPTACIÓN

Dado el compromiso al aumento del nivel del mar, la necesidad de **adaptación** en áreas costeras continuará por siglos, y este “compromiso a la adaptación costera” necesita ser incorporado a la política del manejo costero

a largo plazo. Los sistemas naturales tienen una capacidad de responder autónomamente a presiones externas como el cambio climático, y esto se puede describir como la habilidad natural del sistema (en este caso, el litoral) a responder. Un humedal sano y sin obstrucciones respondería depositando más sedimento y creciendo verticalmente, llevando el mismo ritmo que el aumento del nivel del mar; esto sería un ejemplo de adaptación autónoma.

En muchos lugares, sin embargo, las actividades humanas han reducido la habilidad natural de un sistema para la adaptación, quizá por el desarrollo o la contaminación de la zona costera. La adaptación planificada al aumento del nivel del mar, por lo tanto, deberá incluir la consideración de opciones para revertir estas tendencias de **“no adaptación”**, así como para aumentar la resiliencia natural de la costa y aumentar la capacidad de adaptación autónoma.

Los sistemas socioeconómicos en zonas costeras también tienen la capacidad de responder autónomamente al cambio climático. Los productores pueden cambiar a cultivos que sean más tolerantes a la sal, y las personas pueden mudarse de las áreas cada vez más susceptibles a las inundaciones. Es probable que esto llegue a ser más importante a medida que aumente el nivel del mar.

Dado que los impactos probablemente sean grandes, aún teniendo en cuenta la adaptación autónoma, existe una necesidad adicional para la adaptación planificada. Ejemplos de iniciativas que abarcan la adaptación planificada al cambio climático son la adopción de regulaciones de control de planificación física y desarrollo fortalecidas y mejoradas, e incluyen aquellas relacionadas con el Manejo Integrado de la Zona Costera (ICZM) y la Plani-

ficación de Manejo del Litoral. Esto también podría incluir la implementación del proceso de evaluación de impacto ambiental y el manejo de desastres para peligros costeros.

La adaptación planificada, y por lo tanto **proactiva**, apunta a la reducción de la vulnerabilidad de un sistema mediante la minimización del riesgo o la maximización de la capacidad de adaptación. Se identifican cinco objetivos genéricos de la adaptación proactiva pertinentes a zonas costeras:

- 1) Aumento de la fuerza de los diseños infraestructurales y las inversiones a largo plazo. La infraestructura sería diseñada para resistir los acontecimientos extremos más intensos y frecuentes.
- 2) Aumento de la flexibilidad de sistemas manejados vulnerables. Los sistemas serían diseñados y operados para enfrentar una gran variedad de condiciones climáticas. La flexibilidad puede incluir el mejoramiento de la resiliencia de un sistema, es decir, su capacidad de recuperarse de acontecimientos extremos.
- 3) Aumento de la adaptabilidad de sistemas naturales vulnerables. Los sistemas naturales se pueden hacer más adaptables mediante la reducción de las presiones que actualmente enfrentan. Por ejemplo ante la degradación del hábitat permitir la adaptación por medios como la eliminación de barreras a la migración (por ejemplo quitando las estructuras costeras duras que pueden bloquear la migración interior de los pantanos).
- 4) Reversión de tendencias no adaptativas. Muchas tendencias actuales presentan la vulnerabilidad al cambio cli-

mático. Por ejemplo, la subvención del desarrollo en llanuras de inundación puede aumentar el número de personas y la cantidad de propiedades en áreas costeras bajas vulnerables al aumento del nivel del mar y de tormentas costeras.

- 5) **Mejoramiento de conocimientos, preparación y previsión sociales.** La educación sobre los riesgos del cambio climático y cómo reducirlos o reaccionar ante ellos puede ayudar a reducir vulnerabilidad.

Para zonas costeras, otra clasificación de tres estrategias básicas de adaptación es a menudo utilizada (IPCC, 1992):

- **Protección:** reducir el riesgo de un acontecimiento mediante la disminución de la probabilidad de su ocurrencia.
- **Acomodación:** aumentar la habilidad de la sociedad para enfrentar los efectos del acontecimiento.
- **Retirada:** reducir el riesgo del acontecimiento mediante la limitación de sus efectos potenciales.

Cada una de estas estrategias esta diseñada para proteger el uso humano de la zona costera y, si son aplicadas apropiadamente, cada una tiene consecuencias diferentes para los ecosistemas costeros. La retirada implica renunciar a la tierra mediante una retirada estratégica o la prevención de futuras obras de desarrollo de gran envergadura en áreas costeras que puedan ser afectadas por el futuro aumento del nivel del mar. El ajuste implica el uso alterado de la tierra, incluyendo respuestas de adaptación tales como la elevación de edificios por encima de los niveles de inundación y la modificación de los sistemas de desagüe. La

retirada y el ajuste ayudan a mantener la naturaleza dinámica del litoral y permiten que los ecosistemas costeros migren libremente hacia el interior, y por lo tanto, que se adapten naturalmente. Por el contrario, la protección llevará a la constricción costera y a la pérdida de hábitat, aunque esto se pueda aminorar mediante enfoques suaves para la defensa, como el mantenimiento de la playa. Esta estrategia implica la defensa de áreas costeras mediante la construcción o el mantenimiento de estructuras defensivas o mediante el mantenimiento artificial de playas y dunas. Generalmente se utiliza para proteger los asentamientos y la tierra agrícola productiva, pero a menudo implica la pérdida de las funciones naturales del litoral.

Las opciones de adaptación a la intrusión de agua salada en el agua subterránea no son cubiertas explícitamente por las tres opciones genéricas de retirada, acomodación y protección. Sin embargo, existen varias opciones:

- Recuperación de tierras frente a la costa para permitir el desarrollo de nuevos espejos de agua dulce.
- Extracción de agua subterránea salina para reducir la afluencia e infiltración.
- Infiltración de agua dulce superficial.
- Inundación de áreas bajas.
- Ensanchamiento de áreas de dunas existentes donde ocurre la recarga natural de agua subterránea.
- Creación de barreras físicas.

MÉTODOS PARA EVALUAR LOS EFECTOS DEL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR

Las incertidumbres en las predicciones del aumento del nivel del mar crean una necesidad

de evaluar una serie de escenarios dentro de la evaluación de vulnerabilidad. Estos escenarios necesitan abarcar la gama de cambios probables.

Los detalles de cualquier evaluación de vulnerabilidad dependerán de su meta, del nivel de comprensión y de los recursos disponibles. Por lo tanto, se recomiendan tres niveles de evaluación cada vez más sofisticados: exploración, vulnerabilidad y planificación de las evaluaciones. Es importante recalcar que los niveles diferentes de evaluación requieren diferentes tipos de datos y niveles del esfuerzo. La tabla 3 describe los tres niveles de evaluación.

El objetivo de las evaluaciones de exploración y de las evaluaciones de vulnerabilidad es enfocar la atención en asuntos críticos con respecto a la zona costera, y no suministrar predicciones precisas. Las evaluaciones de planificación sobre las diferentes respuestas al aumento del nivel del mar dentro del ICZM forman parte del proceso continuo de manejo, que idealmente busca integrar respuestas a todos los problemas existentes y potenciales de la zona costera, incluyendo la minimiza-

ción de la vulnerabilidad a los efectos a largo plazo del cambio climático.

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD

La principal meta de la evaluación de vulnerabilidad es producir las recomendaciones sobre las acciones para reducir vulnerabilidad e incluye la evaluación tanto de los impactos anticipados como de las opciones disponibles de adaptación (por la forma en que se define aquí, esto dirige hacia el análisis de planificación). Una evaluación sencilla de impacto quizá no considere las opciones de adaptación para facilitar un análisis rápido, pero una evaluación de impacto completa debe considerar las opciones de adaptación, porque el potencial de adaptación influirá sobre la magnitud de los impactos verdaderos.

Primero, se puede diferenciar entre la vulnerabilidad natural del sistema y la vulnerabilidad socioeconómica del sistema al cambio climático, aunque claramente ambos están relacionados y son interdependientes. Segundo, el análisis de vulnerabilidad socioeconó-

Tabla 3. Niveles de evaluación del aumento del nivel del mar.

Nivel de evaluación	Escala de tiempo requerida	Precisión	Conocimientos previos	Otros escenarios considerados (además del aumento del nivel del mar)
Evaluación de exploración.	2-3 meses	La más baja	Bajo	Ninguno.
Evaluación de vulnerabilidad.	1-2 años	Media	Medio	Probablemente escenarios socioeconómicos y otros cambios climáticos siempre que sea posible.
Evaluación de planificación.	Continua	La más alta	Alto	Todos los cambios realistas.

Fuentes: Hoozemans y Pennekamp, 1993; WCC'93, 1994.

mica al aumento del nivel del mar requiere una previa comprensión de cómo el sistema natural será afectado. Por lo tanto, el análisis de vulnerabilidad costera siempre empieza con la respuesta natural del sistema. Por último, otras presiones climáticas y no climáticas son reconocidos, indicando que el aumento del nivel del mar no está ocurriendo aisladamente y que el sistema costero evolucionará por otros factores adicionales al aumento del nivel del mar.

Tanto el sistema natural como el sistema socioeconómico son dinámicos y se adaptan al cambio. La adaptación autónoma representa la respuesta de adaptación espontánea al aumento del nivel del mar (por ejemplo, el aumento del crecimiento vertical de los hu-

medales del litoral dentro del sistema natural, o los ajustes del precio del mercado dentro del sistema socioeconómico). La adaptación planificada, que sólo puede surgir del sistema socioeconómico, puede reducir la vulnerabilidad a través de una serie de medidas.

En general, varios instrumentos de evaluación están disponibles para cada paso/pregunta producida por cualquier marco de evaluación, aunque un marco pueda recomendar una herramienta o un enfoque específico. La tabla 4 resume las ventajas y desventajas de cinco diferentes métodos de evaluación de vulnerabilidad para áreas costeras (Secretaría del UNFCCC, 2004):

- IPCC Common Methodology
- US Country Studies Methodology

Tabla 4. Evaluación de los diferentes métodos de evaluaciones de vulnerabilidad.

Métodos	Ventajas	Desventajas
Common Methodology (IPCC, 1992)	Estructura lógica prescrita. Se presta para producir resultados consistentes; útil para un agregado global. Ampliamente utilizada.	Inflexible, evaluación de exposición al estrés y de sensibilidad, pero no evaluación de vulnerabilidad completa. Herramientas de VA no discutidas. Opciones de adaptación insuficientemente desarrolladas.
U.S. Country Studies Methodology (Leatherman y Yohe, 1996).	Algunas herramientas de VA descritas. Enfoque del Manual.	Confunde marcos de VA y herramientas. Dirigido sólo a impactos de pérdida de tierra. Evaluación de exposición a estreses y de sensibilidad, pero no una evaluación de vulnerabilidad completa.
UNEP Handbook Methodology (Klein and Nicholls, 1998, 1999)	Buena base conceptual. Todos los impactos son considerados. Provee pautas sobre posibles herramientas de evaluación.	Aún no ha sido ampliamente probado.
South Pacific Islands Methodology (Yamada <i>et al.</i> , 1995).	Útil en áreas con datos limitados. Conceptualiza la vulnerabilidad en elementos cuantificables.	Los resultados son cualitativos a semicualitativos.
RIKS Decision Support Methodology (Engelen <i>et al.</i> , 1993, 1996; White <i>et al.</i> , 2000; de Kok <i>et al.</i> , 2001)	Considera sistemas costeros completos, y las interacciones pueden ser especificadas como se desee.	El enfoque se puede convertir en una caja negra. Disponibilidad de datos apropiados. Asume una alta capacidad técnica.

- UNEP Handbook Methodology
- South Pacific Islands Methodology
- RIKS Decision Support Methodology

De estos enfoques, el UNEP Handbook Methodology es una evaluación de vulnerabilidad y adaptación ampliamente aplicable que puede ser adaptada al enfoque impulsado por los actores clave. Otorga resultados cuantitativos pero es flexible, y el análisis puede ser realizado al nivel apropiado de sofisticación para los modelos y datos disponibles. Las experiencias relevantes de otros enfoques pueden ser utilizados dentro del UNEP Handbook Methodology, si fuera apropiado (otras posibilidades incluyen las técnicas cualitativas desarrolladas en el South Pacific Islands Methodology, y el enfoque del manual utilizado en el US Country Studies Program).

En el caso de México, las zonas costeras del Pacífico, el Golfo de México y el Caribe, representan sitios vitales para las diversas actividades humanas, turísticas, sociales, económicas e industriales; de cuyos ingresos se benefician amplios sectores del país, además de que representan un gran porcentaje del Producto Interno Bruto nacional (PIB) según Toledo (2005).

Por lo tanto, las nuevas y más intensas presiones a que se verán sometidos los litorales mexicanos, como son las anunciadas exploraciones y perforaciones de pozos petroleros para las costas de Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán, el aumento de la producción de petróleo y del tráfico de buques para su movilización, obliga a que los estados costeros cuenten con eficientes sistemas de información y alertamiento, así como planes de contingencia para la prevención de desastres y desarrollen además infraestructura humana y tecnológica apropiada que diagnostique los

impactos y efectos de los desastres o fenómenos hidrometeorológicos extremos.

La incesante actividad industrial, el intenso incremento de los desarrollos portuario-industriales, los desarrollos turísticos costeros sin control y el incremento de los asentamientos humanos en las zonas costeras del país, aunados a los efectos del cambio climático global, serán un gran factor de presión para los ecosistemas costeros como los humedales y manglares, corales, pastos marinos, islas de barrera, dunas y playas, estuarios, deltas y lagunas costeras; de cuya correcta función dependen una alta productividad y la sobrevivencia de miles de especies de flora y fauna marina.

Su alteración y/o su destrucción, solamente conducirá a la cancelación de múltiples usos y beneficios de la zona costera mexicana y originará problemas ecológicos, sociales y económicos para los habitantes de estas importantes áreas.

De esta manera, debemos preparar estrategias para soportar un nuevo clima a través de la adaptación, reduciendo en la medida de lo posible la vulnerabilidad. Para ello, es necesario caracterizar los peligros y determinar los factores asociados a la vulnerabilidad, creando escenarios de probabilidad de riesgo, a fin de prevenir y alertar a las comunidades, sociedades y estados costeros en peligro.

Por lo tanto, la estrategia integral para responder al cambio climático no es una tarea fácil, es un reto interinstitucional y transdisciplinario, y de la conformación de grupos de trabajo multidisciplinarios, pues el estudio de la vulnerabilidad en las zonas costeras involucra en mayor medida a las ciencias naturales, ciencias marinas, y sociales como la economía, sociología y la antropología.

Finalmente, la estrategia para mitigar los efectos del cambio climático global debe formar parte de los planes de desarrollo de los estados costeros, pues los costos sociales y económicos de un desastre siempre son muy grandes y en ocasiones impagables.

El presente trabajo permitirá analizar los impactos en los asentamientos humanos, ecosistemas costeros y en la infraestructura de comunicaciones y transportes, de energía

y agua, de las zonas costeras y los deltas más vulnerables ante el incremento del nivel del mar. Los resultados presentados contribuirán a la generación de políticas de adaptación al cambio climático, que reduzcan la vulnerabilidad de las zonas costeras y los deltas que se identifiquen como más vulnerables ante el incremento del nivel del mar, y los fenómenos hidrometeorológicos externos (huracanes, tormentas y oleajes).

LITERATURA CITADA

IPCC (1992)

Cambio Climático 1992 — Informe suplementario a la evaluación científica del IPCC. Informe de 1992 del Grupo de trabajo sobre Evaluación Científica del IPCC.

Cambio Climático 1992 — Informe suplementario a la evaluación de los impactos del IPCC. Informe de 1990 del Grupo de trabajo sobre Evaluación de los impactos del IPCC.

Cambio Climático: evaluaciones de 1990 y 1992 del IPCC—Primer informe de evaluación del IPCC — Resumen general y resúmenes para responsables de políticas y suplemento del IPCC de 1992.

El cambio climático global y el creciente desafío del mar. Subgrupo de trabajo sobre gestión de las zonas costeras del Grupo de trabajo sobre Estrategias de Respuesta del IPCC, 1992.

Informe del Cursillo de Estudios Nacionales del IPCC, 1992. Directrices preliminares para evaluar los impactos del cambio climático, 1992.

Informe Especial del IPCC, 1997

Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad. (Incluido en resumen para responsables de políticas).

Informe especial del Grupo de trabajo II del IPCC, 1997. Datos sobre el Nivel del Mar

GLOSS – Global Sea-Level Observing System
http://www.gosic.org/goos/GLOSS_data_access.htm

Engelen G., R. White, y I. Uljee, 1993. Exploratory Modelling of Socio-Economic Impacts of Climatic Change. p. 306-324. *In: Climate Change in the Intra-America's Sea*, G. Maul, (ed.) Edward Arnold, London.

Engelen G., R. White, I. Uljee, y S. Wargnies, 1996. Numerical Modeling of Small Island Socio-Economics to Achieve Sustainable Development. p. 437-463. *In: G.A. Maul (ed.) Small Islands. Marine Science and Sustainable Development*, AGU, Washington DC, Coastal and Estuarine Studies.

Gesamp, 2001. A sea of troubles. Gesamp(IMO/FAO/UNESCO/IOC/WMO/IAEA/UN/UNEP) Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Reports and Studies. FAO, Rome, No. 70 and No. 71.

Hoozemans, F. M. J., M. Marchand, y H. A. Pennekamp, 1993. A Global Vulnerability Analysis: Vulnerability Assessment for Population, Coastal Wetlands and Rice Production and a Global Scale (second, revised edition). Delft: Delft Hydraulics.

- Houghton J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, y D. Xiaosu (eds), 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). New York, Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1992. Global climate change and the rising challenge of the sea. Report of the Coastal Zone Management Subgroup, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, The Hague, The Netherlands.
- Intergovernmental Panel of Climate Change. (IPCC), 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary. Cambridge: WMO/UNEP. Cambridge University Press.
- Klein R.J.T., M.J. Smit, H. Goosen, y C.H. Hulshof, 1998. Resilience and vulnerability: coastal dynamics or Dutch dikes? *Geogr J.*, 164: 259–268.
- Leatherman S.P., y G.W. Yohe, 1996. Coastal impact and adaptation assessment. p. 563-576. In: R. Benioff, S. Guill, J. Lee J (eds.) Vulnerability and adaptation assessments—an international handbook, Version 1.1. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht H.1–H.39

de la Lanza Espino, G., J.C. Gómez Rojas y S. Hernández Pulido, 2010. Vulnerabilidad de la zona costera. Fisicoquímica, p. 15-36. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Vulnerabilidad de la zona costera. Fisicoquímica

G. de la Lanza Espino, J.C. Gómez Rojas y S. Hernández Pulido

RESUMEN

El cambio climático ha conducido a un incremento en el nivel del mar, haciendo a su vez vulnerables a los sistemas costeros hacia cambios en la morfología, hidrología de las cuencas fluviales que descargan en ellas, erosionando con intromisión marina, modificando la fisicoquímica del agua, entre otras cosas. En la fisicoquímica se prevé: la salinización; con alteración en el contenido de gases disueltos como el oxígeno variando desde la sobresaturación hasta la hipoxia o anoxia; eutrofización coadyuvada por las descargas urbanas o industriales; modificando también la bacteriología constituida por las coliformes. En el presente capítulo, se estima el grado de impacto anterior a través del Índice de Bojórquez-Tapia, en cuatro áreas costeras del Golfo de México y Pacífico Mexicano, sensibles por su vulnerabilidad. Asimismo se proponen recomendaciones que deberán ser tomadas en consideración en un futuro próximo.

Palabras clave: Vulnerabilidad, fisicoquímica costera en México.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático global es un fenómeno que afecta al planeta entero de manera aún muy poco conocida, por ello se está abordando desde la perspectiva política como un problema internacional. En 1988, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización Meteorológica Mundial establecieron en conjunto el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) (Hughes, 2000). Los propósitos con los que se creó el IPCC fueron evaluar el estado del conocimiento científico sobre diversos aspectos del cambio climático, evaluar los impactos ambientales y socioeconómicos y analizar estrategias de mitigación (<http://www.grida.no/climate>). El cambio climático supone un importante factor adicional de desgaste de los sistemas ya afectados por una creciente demanda de recursos, por unas prácticas de gestión insostenibles y por la contaminación, que en muchos casos pueden ser de magnitud igual o mayor que con el cambio climático (IPCC, 1997).

El calentamiento global y cambio climático son conceptos estrechamente interrelacionados que en ocasiones son confundidos o utilizados como sinónimos. Son fenómenos provocados total o parcialmente por el aumento en la concentración de gases de invernadero en la atmósfera, principalmente el CO₂ relacionado directa o indirectamente con actividades humanas como el uso de combustibles fósiles y deforestación. Estudios científicos indican que el cambio climático ya está teniendo efectos sobre la biosfera (González *et al.*, 2003).

Los sucesos de grandes magnitudes son: modificación de los patrones climáticos a escala global, debido al aumento de la temperatura de los océanos; cambios en cantidades e intensidades de precipitación; aumento en la frecuencia y severidad de eventos extremos; e incremento en el nivel medio del mar (Hernández Arana, 2007).

Los cambios del clima afectarán a los sistemas costeros debido al aumento del nivel del mar, a un mayor riesgo de mareas de tempestad y a un posible cambio en la frecuencia y/o intensidad de los fenómenos meteorológicos.

Las playas, dunas, estuarios y humedales costeros se adaptarán de manera natural y dinámica a los cambios del viento, así como a los cambios del nivel del mar (IPCC, 1997). Lara (2008) menciona que un calentamiento de entre 1.5 y 5 °C significaría una posible subida del nivel del mar de entre 20 y 165 cm, lo que inundaría por completo zonas densamente pobladas del mundo y muchas ciudades de nuestro país.

La circulación superficial de los océanos es una condición de frontera para los sistemas de corrientes marinas sobre la plataforma continental, que influyen en el equilibrio del agua dulce y agua de mar de los ecosistemas y modifican la ubicación y magnitud de los procesos costeros de sedimentación y erosión (Hendry, 1993). La circulación superficial del océano es también determinante en la distribución de huevos y larvas y en los patrones de migración de especies marinas de importancia comercial; luego entonces es un factor importante en la localización y comportamiento de las áreas de pesca. Es por ello urgente e

indispensable conocer, describir y entender la variabilidad de las condiciones oceanográficas y costeras de los mares mexicanos e investigar sobre sus tendencias a escala climática. La caracterización de la estructura espacio-temporal del clima oceánico es crucial para la oportuna detección de cambios significativos en la circulación del estrato superficial de los mares mexicanos (Gallegos, 2004).

Los cambios del clima pueden afectar a los límites geográficos de los sistemas ecológicos, composición de especies y a su capacidad para sostener toda una diversidad de beneficios que permiten a las sociedades seguir existiendo. Los sistemas ecológicos son intrínsecamente dinámicos, y están constantemente influenciados por la variabilidad del clima. Las zonas costeras se caracterizan por una rica diversidad de ecosistemas y por un gran número de actividades socioeconómicas. Sin embargo en muchos países, la población humana ha crecido dos veces más rápido en las costas que en su conjunto; se estima actualmente que cerca de la mitad de la población mundial habita en zonas costeras, aunque hay grandes variaciones de un país a otro.

El IPCC (1997) menciona que en América latina las costas bajas y estuarios, el aumento del nivel del mar podría reducir la superficie terrestre de las costas y la diversidad biológica (en particular, arrecifes de coral, ecosistemas de manglares, humedales, estuarios, flora y fauna), ocasionar intrusiones de agua salada y dañar las infraestructuras. Si el incremento del nivel del mar bloqueara la escurriencia de los ríos de llanura hacia el océano, podría aumentar el riesgo de crecida de las cuencas y modificar a los ecosistemas.

En México el litoral costero se extiende aproximadamente a lo largo de 11 122 km, el

cual abarca una gran variedad de ambientes que incluyen: ríos, deltas, estuarios, lagunas, bahías, humedales, manglares y arrecifes, los cuales proporcionan una infinidad de hábitats que propician una gran diversidad biológica. En estas zonas se ubican importantes centros urbanos y se desarrollan actividades, como la extracción de petróleo, turismo, agricultura, pesca y acuicultura, entre otras. Existen 447 municipios costeros (224 en el litoral del Pacífico y 223 en el litoral del Golfo de México). Ortiz y Méndez (1999), mencionan que en el Golfo de México y Mar Caribe las zonas más vulnerables, al aumentar el nivel del mar de 1 a 2 m, son: la llanura deltaica del río Bravo, Laguna de Alvarado y curso bajo del río Papaloapan, Veracruz; complejo deltaico Grijalva-Mezcalapan-Usumacinta, Tabasco; los Petenes, Campeche; y bahías de Sian Kaa'in en Chetumal, Quintana Roo. Estos ecosistemas, por su localización en la zona intermareal, se estima que serán los mayormente afectados por el cambio climático global, en particular frente a los efectos del incremento del nivel medio del mar, fuerza de vientos, oleaje y corrientes, y patrón de tormentas (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1998).

Uno de los ecosistemas más vulnerables y que han sufrido una mayor pérdida son los humedales costeros mexicanos, cuyos servicios ambientales no han sido estimados en todo su potencial, al actuar como amortiguadores de zonas contaminadas, además ricos en biodiversidad. Estos sistemas se encuentran amenazados en principio por la alteración del sistema hidrológico, debido al crecimiento de redes carreteras e infraestructura petrolera, urbana, turística y agropecuaria, que alteran la dinámica y procesos ecológicos. Sin embargo, las alteraciones que el cambio climático

podría ocasionar a estos sistemas, aunado a las problemáticas que ya actualmente sufren podría ocasionar la desaparición de un inmenso número de especies de la mayoría de las cuales probablemente no se conocen, por lo que se hace necesario inventariar, establecer indicadores de monitoreo (parámetros físico-químicos o de calidad del agua), seleccionar especies indicadoras e implementar medidas de mitigación (Gama *et al.*, 2009), así como cambios en el grado de trofismo (nutrientes, materia orgánica, especies no deseables, entre otros). Dado que los sistemas costeros están estrechamente vinculados con las cuencas hidrológicas, es importante determinar la vulnerabilidad de éstas ante el cambio climático, las cuales pueden tener un efecto dramático en el régimen y magnitud de la escorrentía, en la humedad del suelo y en la evaporación (Lara 2008), afectando de manera directa o indirecta los ecosistemas costeros, en los que se incluyen los ciclos biogeoquímicos.

Los incrementos en el nivel del mar debido al cambio climático, han provocando un aumento en las inundaciones, erosión y sedimentación; así como aumento de la intrusión salina, algunos autores como Schallenberg *et al.* (2003), Sánchez-Arcilla *et al.* (2008) y Webster (2007) *consideran un incremento en la intrusión de la cuña salina y salinización de suelos, el incremento del nivel freático posiblemente debido a la elevación de éste por diferencias de densidad en el caso del incremento del nivel del mar, o por el aumento de las descargas fluviales en el caso de mayores lluvias en el área continental*. Los cambios hidrológicos alteran también los presupuestos de nutrientes y de sedimento (Voice *et al.*, 2006).

En relación con los cambios en la fisicoquímica o calidad del agua de los ecosistemas, los

estudios han sido escasos a nivel mundial y particularmente en México y esto puede ser debido al fuerte impacto de las actividades antropogénicas en esa zona de gran variabilidad local, en donde se puede dar por un lado el incremento del nivel del mar desplazando el frente fluvial tierra adentro o incrementar el aporte fluvial influenciando mar adentro, por el otro. Dubravko *et al.* (2005) mencionan que los cambios en la temperatura global pueden modificar el ciclo hidrológico, debido a los cambios en la magnitud y patrones estacionales de la precipitación; afectando a los escurrimientos en los ambientes costeros, concentración de nutrientes y contaminantes e influir en la productividad costera; también las características físicas del ambiente pueden cambiar y con ello afectar la susceptibilidad de estos sistemas a la eutrofización. Kennedy *et al.* (2002), mencionan que en varias regiones del mundo los sistemas costeros están sujetos a periodos de baja concentración de oxígeno por estratificación y carga de nutrientes; en consecuencia en condiciones de incremento de la precipitación y descargas se pueden exacerbar los problemas de eutrofización e hipoxia por la ruptura de la estratificación. En condiciones de baja descarga se puede reducir la hipoxia por la disminución y frecuencia de la estratificación. Justic *et al.* (1997) en un periodo de siete años, refieren que frente a las costas del Mississippi, la descarga de agua del río (con aportes de nutrientes particularmente de nitrógeno) hacia la zona costera, pudiera incrementar un 20 % si la concentración CO₂ atmosférico se duplicara con un incremento en la productividad neta anual en la columna de agua de aproximadamente el doble, lo cual se traduciría en una condición hipóxica en el fondo debido a la respiración de los produc-

tos de la columna de agua superior y a aquellos sedimentados en el fondo. Localmente se ha observado que la vegetación bentónica que atrapa sedimentos y asimila nutrientes en condiciones normales, con el cambio de clima la tendencia ha sido a la desaparición con el consecuente incremento de sólidos suspendidos (disminución de la transparencia), eutrofización por nutrientes y fitoplancton, así como la hipoxia o anoxia según la temporada, afectando también a las comunidades biológicas (Lloret *et al.*, 2008). En las afectaciones anteriores ya sean regionales o locales, es importante mencionar que el cambio climático global puede afectar el ciclo estacional de los nutrientes, con cambios en las tasas de la desnitrificación (Struyf *et al.*, 2004); estos mismos autores recomiendan reducir los aportes y prácticas agrícolas, así como la restauración de humedales y considerar a la vegetación riparia como reductora de los aportes de nutrientes a aguas superficiales.

En el futuro se espera que las anomalías del clima, experimentadas en el último siglo o las que ocurrirán en las próximas décadas podrían incluir alteraciones en la variación interanual e interdecadal del clima, propiciando eventos del El Niño y La Niña más frecuentes e intensos, huracanes de mayor magnitud, así como la modificación de los patrones de lluvia (Lara, 2008). Estos cambios globales pueden afectar el funcionamiento de los ambientes costeros, los cuales son resultado de una interacción entre factores geológicos, físicos, químicos, climáticos y biológicos, lo que se traduce localmente en que cada ambiente sea único, por lo cual los cambios antropogénicos y climáticos, afectarán directa o indirectamente a variables como la temperatura, niveles de oxígeno, nutrientes y salinidad, entre otros; que en conjunto alterarán el hábitat, modificarán los ciclos biogeoquímicos, calidad del agua, composición y distribución de especies animales y vegetales.

OBJETIVOS

Con base en lo anterior el presente capítulo tiene como objetivo estimar la vulnerabilidad de la fisicoquímica o calidad del agua, en áreas de mayor susceptibilidad en la zona costera de México, tomando como base los parámetros: salinidad, oxígeno, nitrógeno, fósforo, clorofila y bacteriología representada por coliformes totales o fecales; indicadores de la variación ambiental natural, antropogénica o por el cambio climático.

Para tal efecto los ambientes costeros elegidos por su vulnerabilidad e importancia ecológica fueron: **Nayarit** (Estero Teacapán,

Laguna Grande, Laguna Pericos, Laguna Agua Brava, Laguna el Valle, Estero El Gavilán, Laguna Pescadero); **Río Coatzacoalcos**; **Tabasco** (Laguna de Mecoacán, Pantanos de Centla, Laguna La Machona, Laguna del Carmen y Machona); **Campeche** (Laguna de Términos, Boca de Puerto Real, Boca del Carmen y Sistema Palizada); **Yucatán** (Dzilam, Progreso, Sisal, Celestun y Chelem) y **Quintana Roo** (Riviera Maya, Puerto Morelos, Ría Lagartos, Chacmchuc, Bojórquez, Nichupté y Laguna Ascensión)

DESCRIPCIÓN AMBIENTAL REGIONAL DE LAS ÁREAS ELEGIDAS

Región sur de Sinaloa norte de Nayarit

Comprende los siguientes sistemas costeros, por su importancia y dimensiones:

- Estero Tecapán
- Laguna Grande
- Laguna Pericos
- Laguna Agua Brava
- Laguna del Valle
- Estero El Gavilán
- Laguna Pescadero

Dado que estos sistemas costeros se ubican en el Pacífico están sujetos a un clima extremo: de escasas o nulas lluvias en la época de sequía y una época de lluvias torrenciales. Estos ambientes costeros son importantes por diversos puntos de vista: por su mayor superficie, por su evolución geológica, porque son puertos, hay turismo, existen recursos pesqueros, hay una importante acuicultura (camarón), así como por haber sido nombrados Sitios Ramsar (Marismas Nacionales). Con el cambio de clima y el consecuente aumento del nivel del mar, la modificación del frente hidráulico no les permitiría descargar las aguas fluviales y de origen antropogénico al mar y esto traducirse en un posible incremento de materiales (salinidad, sales inorgánica-orgánicas del nitrógeno y de fósforo, así como de materia orgánica y la disminución del grado de aireación) con tendencia a la eutrofización de los cuerpos costeros con las consecuencias de la disminución de los recursos.

Específicamente las variaciones salinas de las lagunas en esta región del sur de Sinaloa y

norte de Nayarit, han mostrado un significativo incremento en la época de sequías llegando a la hipersalinidad, dada la disminución de los aportes fluviales y pluviales, aunado al cierre de las comunicaciones marinas por su evolución geológica natural y ahora acelerada por las actividades humanas. En estos cuerpos de agua costeros la época de lluvias diluye la salinidad llegando a mesohalino, aunque la apertura de bocas marinas, como la de Cuautla (Marismas Nacionales) han experimentado una salinización inapropiada para las comunidades de flora y fauna. Con la expansión agrícola y acuícola, se han fragmentado y azolvado estos ambientes con la consecuente formación de marismas y por lo tanto mayor salinización.

Se registraba normalmente desde hipoxia hasta la sobresaturación de oxígeno (< 2.0 a >6.0 ml/L O_2), pero actualmente con el incremento de esas actividades humanas la hipoxia es más frecuente con tendencia a la anoxia.

Cabe destacar que en estos Estados la camaronicultura se desarrolla activamente con altas producciones, por lo que las fertilizaciones y adiciones de alimento son significativas e incrementan las concentraciones de nutrientes y materia orgánica en las aguas de recambio, que toman del los ríos y llegan a los cuerpos receptores (lagunas, estuarios, marismas, alcanzando incluso el ambiente marino). Páez-Osuna *et al.* (2007) han estimado en un balance de masas una entrada de nitrógeno en el agua de ingreso a los estanques (17.8%) y un incremento a la de salida (36.7%) debida a las fertilizaciones y adiciones de alimento; en el caso del fósforo de 13.4% y 30.3%, respectivamente. Estos excesos de nutrientes en el agua de recambio y descargados a las propias lagunas pueden ser amortiguados según

la capacidad de carga, pero como esta actividad acuícola puede ser semi-intensiva o intensiva con dos ciclos de cosecha al año, las descargas pueden sobrepasar dicha capacidad de asimilar los excesos de nutrientes y en consecuencia condicionarse un ambiente eutrófico, aún cuando el agua de recambio llegara al mar. Dichos autores han calculado descargas de nitrógeno y fósforo a los sistemas costeros predominando en orden de importancia, el atmosférico, agrícola, ganadero, suelos, acuícola y municipal (Páez-Osuna, 2007)

Región centro-sureste del Golfo de México

- Estuario Coatzacoalcos
- Laguna del Carmen
- Laguna Pajonal-Machona
- Laguna Mecoacán
- Pantanos de Centla

Estos ambientes costeros se caracterizan por un aporte fluvial y pluvial regularmente anual y a la exposición de eventos meteorológicos extremos (tormentas tropicales, ciclones y huracanes) que incrementan los gastos de los ríos (que incluso cuencas arriba tienen asentamientos humanos) y el nivel del agua en las lagunas incrementa también. En las lagunas Carmen y Mecoacán la variación de la salinidad es estacional oscilando desde lo oligohalino a lo polihalino (< 5 ups a > 30 ups) (Rosales-Hoz *et al.*, 2003); con condiciones cercanas a la hipoxia hasta la sobresaturación (< 3.0 a > 6.0 ml/ LO_2).

La llanura aluvial en la zona costera de Tabasco recibe influencia de las regiones hidrológicas del Grijalva–Usumacinta, las cuales representan 75% de la superficie estatal. En las cuencas bajas de ambos ríos se localiza la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla.

No obstante la elevada descarga de este sistema hídrico, la política de control de la curva del gasto fluvial iniciada en la década de los cincuenta aplicada para desarrollar un modelo agroproductivo, afectó el régimen hidrológico del río Grijalva y redujo la extensión de los humedales al modificar los ciclos naturales de inundación y aportación de materiales hacia la zona costera. La reducción de los humedales ha provocado la interrupción del rejuvenecimiento de suelos y la salinización de los mismos.

La Reserva de los Pantanos de Centla es una zona de humedales prioritaria para México (NOMECOL) y para la Convención Ramsar, en donde convergen principalmente actividades económicas primarias más relevantes como la pesca y la agricultura.

En Pantanos de Centla, la temporada de mínima inundación es de marzo a mayo y la máxima de agosto a diciembre con dos temporadas de transición, en las cuales el nivel del agua disminuye de enero a febrero y aumenta de junio a agosto.

En el estado de Tabasco se han registrado aproximadamente 457 ecosistemas lénticos permanentes de los cuales 110 se localizan específicamente en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla. Las condiciones estuarias en Pantanos de Centla están restringidas debido al elevado volumen de descarga de los ríos Grijalva y Usumacinta durante todo el año. La variabilidad de la fisicoquímica o la calidad del agua en Pantanos de Centla está principalmente determinada por el efecto de los ciclos de inundación. Los elementos que están afectando con mayor frecuencia la resiliencia (capacidad de un ecosistema a estar sometido a una perturbación y mantener sus funciones y controles) de los ecosistemas

acuáticos en la Reserva son los sólidos suspendidos totales, la carga orgánica y su asimilación, la contaminación fecal y los hidrocarburos alifáticos (Sánchez *et al.*, 2007)

La laguna de Términos, Campeche, es un cuerpo costero que por su morfología es la más grande del país. Tiene tres aportes fluviales importantes: ríos Candelaria, Chumpan y Palizada que durante un buen número de años han aportado nutrientes a la laguna. Presenta un aporte fluvial y pluvial mayor entre junio y octubre, así como aportes pluviales en época de nortes y huracanes (Yañez Arancibia *et al.*, 1988). Aparte de los flujos de nutrientes vía fluvial, están los procedentes de la vegetación (hojarasca) del manglar que se encuentra densamente en la periferia de Términos y Pom-Atasta. Atrás de esta vegetación se encuentran áreas agrícolas que durante la época de lluvias y eventos meteorológicos pueden aportar vía escurrimientos nutrientes procedentes de la fertilización. En esta laguna se han asentado en la boca del Carmen desarrollos humanos así como las actividades pesqueras y petroleras registradas en las márgenes de la laguna. Esta situación puede inducir a una eutrofización particularmente en la laguna si se presentara un frente hidráulico mayor con el incremento del nivel del mar. Dicho incremento aumentaría la entrada de agua marina en la boca de Puerto Real, favoreciendo el enriquecimiento de nutrientes, dado el impedimento de la salida por la boca del Carmen.

En relación con la laguna Pom-Atasta, ésta tiene comunicación con la laguna de Términos; sin embargo es oligohalina a mesohalina (0.1-9.41 ups), según la época del año. Se encuentra alimentada por el río San Pedro-San Pablo al este (Vazquez *et al.*, 1996).

Región Yucatán

- Laguna Celestun
- Laguna Chelem
- Laguna Dzilam
- Laguna Sisal
- Puerto Progreso
- Ría Lagartos

En esta región se han registrado altas salinidades, contenido de oxígeno entre anoxia y sobre saturación (Medina-Gómez y Herrera-Silveira, 2003), altas concentraciones de amonio (Herrera-Silveira, 2006) y bacterias coliformes (Semarnat, 2008. www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/politica_ambiental/certificaciondeplayas/Pages/playas_limpias.aspx). Particularmente Ría Lagartos es un ambiente costero localizado al noreste de la península de Yucatán. Se caracteriza por su hipersalinidad debido a escasos aportes fluviales y alta evaporación y una conexión pequeña con el Golfo de México. Presenta un aporte de agua dulce de aguas subterráneas y fluviales. Su salinidad promedio es de > 50.0 ups. Tiene tres épocas al año: secas (mayo-junio), lluvias (julio-octubre) y de Nortes (noviembre-febrero). Debido a los vientos de los Nortes el agua de mar entra a la laguna reduciendo la salinidad y favoreciendo la disolución de oxígeno (< 2.0 a > 4.5 ml/L). Está rodeada por manglares y una barrera de arena. Parte de la barra ha sido modificada por la extracción de sal (industria importante en la región) (Vega-Cendejas y Hernández de Santillana, 2004).

Región Quintana Roo

- Laguna Chacmochuc
- Laguna Bojórquez
- Laguna Nichupté

- Puerto Morelos
- Riviera Maya
- Laguna Ascensión

La península de Yucatán tiene un suelo altamente permeable que permite al agua de lluvia se infiltre rápidamente hacia el acuífero; en la Península se han registrado varios cientos de cenotes, consecuencia de la roca calcárea que permite dentro de dicha infiltración de agua la disolución de la roca y la difusión de nutrientes que pueden ser transportados a las lagunas costeras e incluso mar abierto.

Existen dentro de esta región sistemas costeros pertenecientes a Quintana Roo que son: Celestun, Chelem, Dzilam, Holbox, Chacmochuc, Nichupté, Bojórquez y Ascensión todos ellos con eutrofización, pérdida de la vegetación y contaminación por descarga de aguas residuales; todo lo anterior resultado de: pesca, ecoturismo, desarrollo urbano e industria salinera (Herrera-Silveira, 2006) y que bajo un incremento en el nivel del mar

el frente hidráulico pudiera evitar la salida de dichas aguas al ambiente marino. Las lagunas anteriores van de hiperhalinas, estuarinas, euhalinas y oligohalinas, según su localización y la variabilidad estacional (Herrera-Silveira, 2006). En el caso de la localidad de Puerto Morelos (Secretaría de Marina, 2002) ha determinado altos contenidos de nitratos y fosfatos; así como niveles por arriba de la norma de enterococos (Semarnat, 2008).

La zona costera de la Riviera Maya está influenciada por elementos naturales (ciclones, huracanes, escurrimientos del área terrestre circundante, el aporte subterráneo de los cenotes) y por actividades antropogénicas (urbanismo e industria turística). Especialmente algunos cenotes cercanos a la costa afloran al mar, razón por la cual se evidencian incrementos de nutrientes y bacterias; situación que pueda verse incrementada en el área costera con el aumento del nivel del mar, con la posible salinización de los cenotes.

METODOLOGÍA

El grado de vulnerabilidad se estimó tomando como base los parámetros fisicoquímicos recomendados internacionalmente (UNESCO, 2003) de nutrientes y oxígeno disuelto. En el caso de los sistemas costeros mexicanos, se contó sólo con la información de nutrientes como nitratos, nitritos, amonio (definidos como nitrógeno total inorgánico), ortofosfatos, oxígeno, salinidad y como adicionales clorofila "a" y bacterias coliformes (que son constituidas por *E. coli* y *Enterococos*). La clorofila como las bacterias fueron incluidas por considerarse en el proceso de eutrofización generada por asentamientos humanos.

La información de los parámetros anteriores fue obtenida de referencias bibliográficas de diferentes autores y años, por lo que la estimación del grado de vulnerabilidad costera de las áreas elegidas, sólo se refiere a evaluaciones en espacio y tiempo irregulares en consecuencia, tiene un grado de incertidumbre tanto por basarse en registros anteriores sin el monitoreo continuo y necesario para tal fin, así como por la heterogeneidad metodológica empleada; por lo que se requeriría determinar la vulnerabilidad con registros de los parámetros aquí elegidos y actualizados para una mayor veracidad del grado de la vulnerabilidad.

Para la determinar la vulnerabilidad se basó en los parámetros anteriores y utilizando los índices propuestos tanto por Saffran *et al.* (2001) como por Bojórquez-Tapia *et al.* (1998) que aportaron resultados semejantes,

por lo que se decidió basarse en estos últimos autores. Los cálculos se estimaron para un incremento máximo de 100 cm del nivel del mar (tabla 1).

Tabla 1. Escala utilizada en los diferentes criterios (Bojórquez-Tapia *et al.*, 1998).

Concepto	Magnitud del impacto (M)	Extensión del Impacto (E)	Duración de la acción (D)
1	Mínima. Cuando la afectación cubre la menor proporción del total de los recursos existentes en el área de estudio (< 15%) o cuando los valores de la afectación son menores a un 30% respecto al límite permisible.	Puntual. Ocurre y se extiende dentro del área de estudio.	Definida por la extensión en el tiempo de la acción y la repercusión del impacto ambiental.
2	Moderada. Cuando la afectación cubre una proporción intermedia del total de los recursos (< 30%) o si los valores de la afectación se ubican entre 31 y < 75 % respecto al límite permisible.	Local. Ocurre y/o se extiende en un radio no mayor o igual a 1000 m.	Mediana. Cuando la acción dura entre 1 mes y dos años.
3	Alta. Cuando la afectación cubre la mayor proporción del total de los recursos existentes o si los valores de la afectación rebasan el 75% de los límites permisibles.	Regional. Si ocurre y su extensión excede a los 1000 m a cada lado o 1000 m de radio del área de proyecto.	Larga. Cuando la acción dura más de dos años.

Fórmula aplicada

$$MED_{ij} = \frac{1}{9} (M_{ij} + E_{ij} + D_{ij})$$

Donde:

M_{ij} : Magnitud
 E_{ij} : Extensión
 D_{ij} : Duración

Calificación 1= impacto alto, 0.77= medio, 0.5= bajo.

RESULTADOS

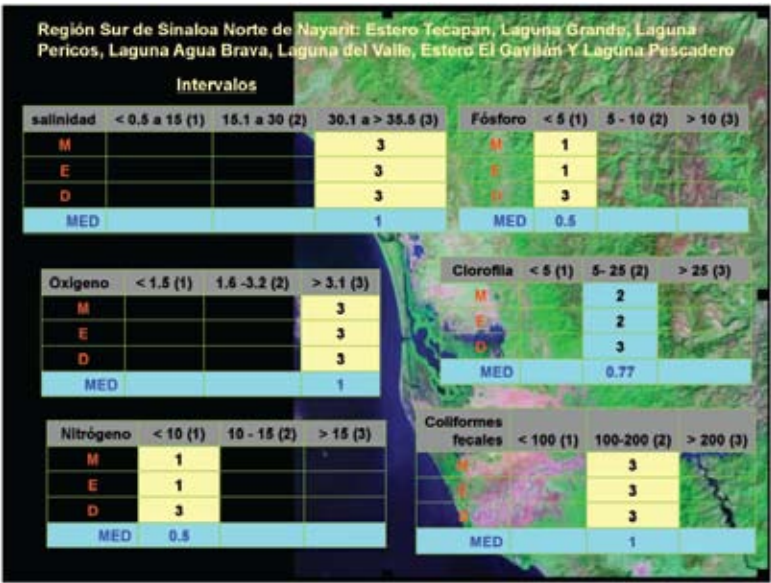
Con base en la literatura consultada se obtuvieron los siguientes resultados de los parámetros físicoquímicos y con ellos se calculó el índice de vulnerabilidad.

NORTE DE NAYARIT

Para la región de Nayarit se calculó un impacto alto por salinidad, oxígeno y coliformes; un impacto medio en la clorofila; así como bajo por nitrógeno y fósforo.

	Salinidad ups	Oxígeno ml/L	Nitratos μM	Nitritos μM	Amonio μM	Fosfatos μM	Clorofila mg/m ³	Enterococos NMP/100 ml
Estero Tecapán		4.4				1.0	0.3	109
Laguna Grande	25.6	3.7			0.8	1.7	0.1	109
Laguna Pericos	25.4	3.1	0.4	0.2	2.3	0.7	0.2	
Laguna Agua Brava	27.3	4.0	2.0	2.0		0.7	0.5	
Laguna el Valle	27.8	3.7	0.7	0.1	0.4	0.3	0.3	
Estero El Gavilán	24.0	2.4	0.3	0.9	2.4	0.9	1.7	
Laguna Pescadero	23.7	3.9	0.3	1.6	2.1	3.0	1.0	

μM= Micromoles por litro

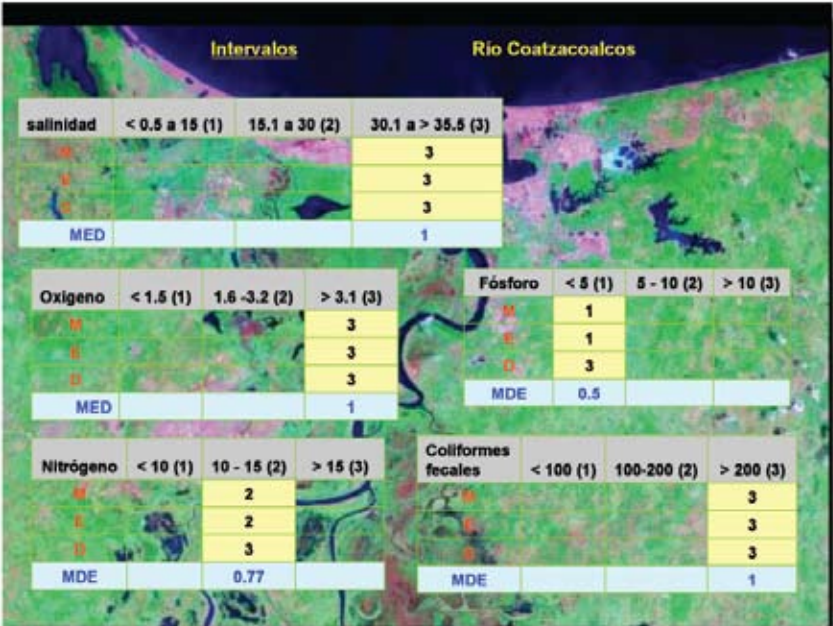


Río COATZACOALCOS

En el caso del estuario del Río Coatzacoalcos se calculó un impacto alto por salinidad, oxígeno y coliformes; así como medio por nitrógeno y bajo por fósforo.

	Salinidad ups	Oxígeno ml/L	Nitratos μM	Nitritos μM	Amonio μM	Fosfatos μM	Clorofila mg/m ³	Enterococos NMP/ 100 ml
Junio	1.9	6.2	3.2	0.2	1.3	9.2		2400
Abril	8.3	7.4	1.0	0.1	2.7	2.4		
Agosto	1.0	3.8	2.2	0.2	4.6	0.4		

μM= Micromoles por litro



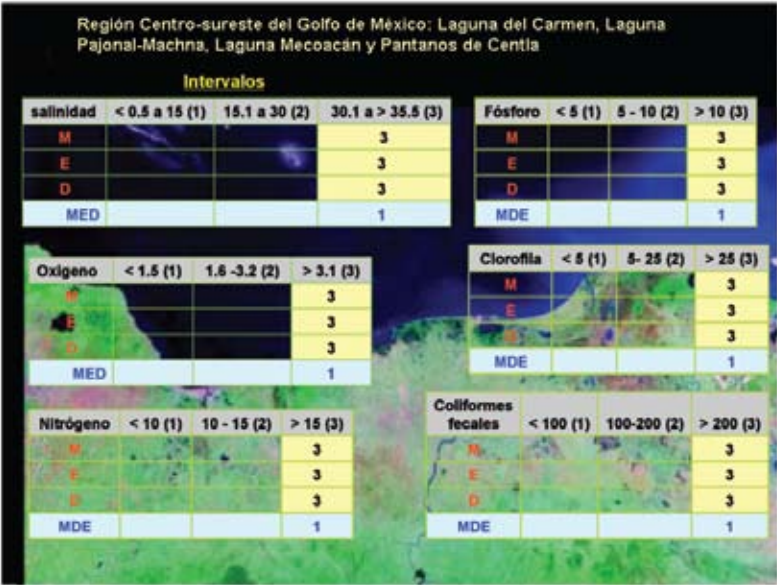
TABASCO

Para la región de Tabasco de determinó un nivel alto por salinidad, oxígeno, nitrógeno, fósforo, clorofila y coliformes.

	Salinidad ups	Oxígeno ml/L	Nitratos μM	Nitritos μM	Amonio μM	Fosfatos μM	Clorofila mg/m ³	Enterococos NMP/100 ml
Laguna del Carmen	14 - 19	< 2 - 5	5.9	0.8		3.5	73.8	350
Laguna La Machona	14 - 19	9.5	94.1	2.6	5.7	10.8	57.5	2400
Mecoacán	< 5 a 34	5.0	0.2		0.5	5.5	28.6	980
Pantanos de Centla			14 -15	58.7		13.5		940

μM= Micromoles por litro

Laguna El Yucateco				
Estación	Día	Nivel	Salinidad ups	Oxígeno ml/L
1-S	12-VI-96	S	24.4	6.4
2-S	12-VI-96	S	25.4	6.7
3-S	12-VI-96	S	25.5	6.8
4-S	12-VI-96	S	26.0	6.9

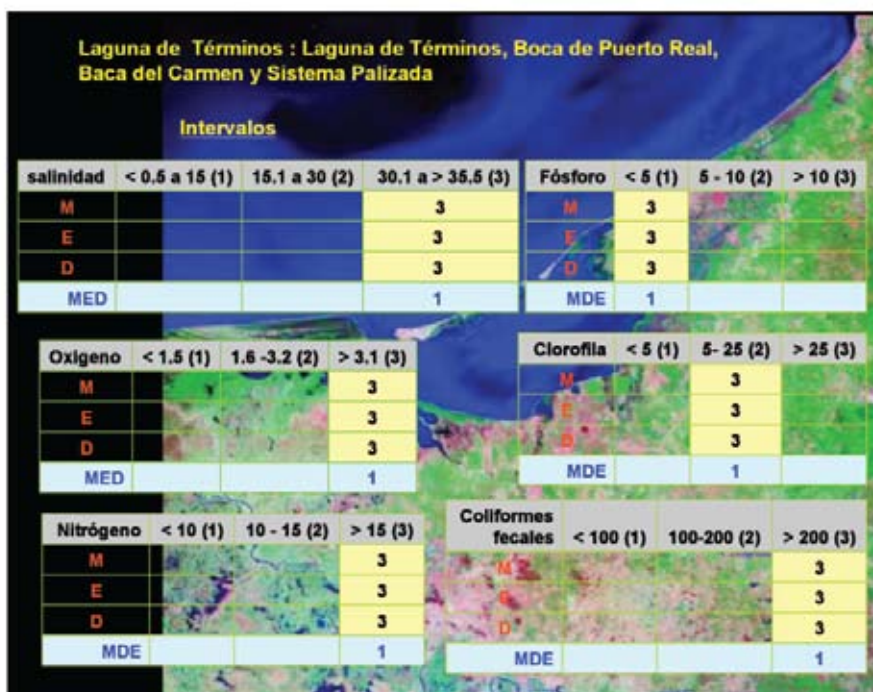


LAGUNA DE TÉRMINOS

Dentro de la región de Tabasco, la laguna de Términos mostró un índice alto por salinidad, oxígeno disuelto, clorofila a, nitrógeno, fósforo y coliformes fecales.

	Salinidad ups	Oxígeno ml/L	Nitratos μM	Nitritos μM	Amonio μM	Fosfatos μM	Clorofila mg/m ³	Enterococos NMP/ 100 ml
Laguna de Términos	20.0	6.0	30.6	0.6	23.5	7.5	8.2	
Boca de puerto Real	30.0	4.5	15.4	0.9	41.3	0.2	8.8	148
Boca del Carmen	25.0	4.9	13.0	0.9	28.5	0.8	16.7	2014
Sistema Palizada	19.0		0.002	0.024	0.114	0.001		

μM= Micromoles por litro

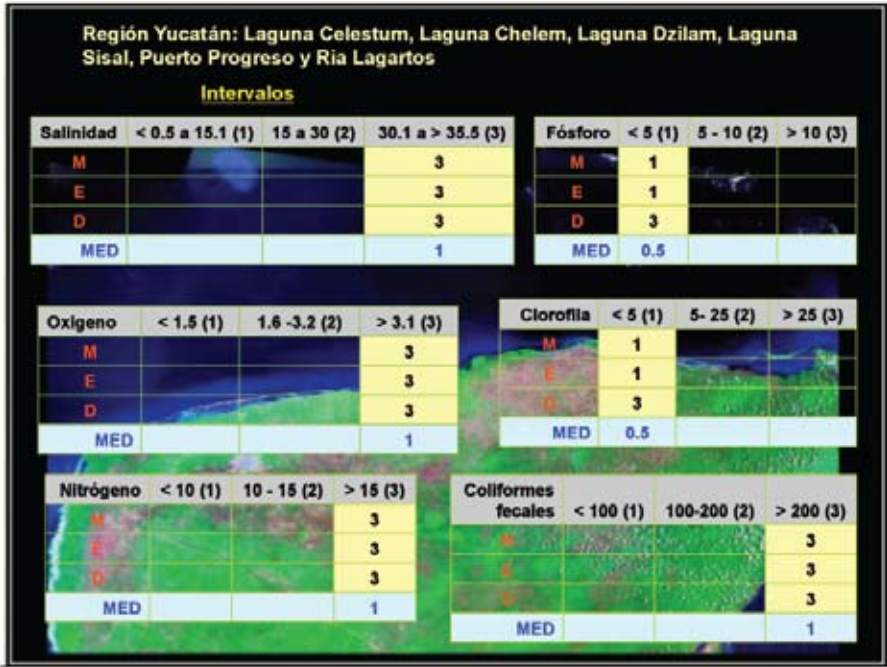


YUCATÁN

En la región de Yucatán la fórmula señaló un impacto alto por salinidad, oxígeno, nitrógeno y coliformes fecales, así como bajo por fósforo y clorofila.

	Salinidad ups	Oxígeno ml/L	Nitratos μM	Nitritos μM	Amonio μM	Fosfatos μM	Clorofila mg/m³	Enterococos NMP/ 100 ml
Celestum	25.8		0.9	3.2	8.7	0.7	2.5	148
Chelem	39.0		9.5	2.4	13.5	0.2	4.1	31
Dzilam	35.7	< 1.0 - 4.5	9.4	0.9	6.0	0.9	1.4	933
Sisal			7.0	1.5	7.7	0.8	3.2	186
Progreso		6.4	2.0	1.0	6.0	0.7	1.7	576
Ria Lagartos	50.0	6.4	2.0	0.4	4.0	0.2	2.5	156

μM= Micromoles por litro

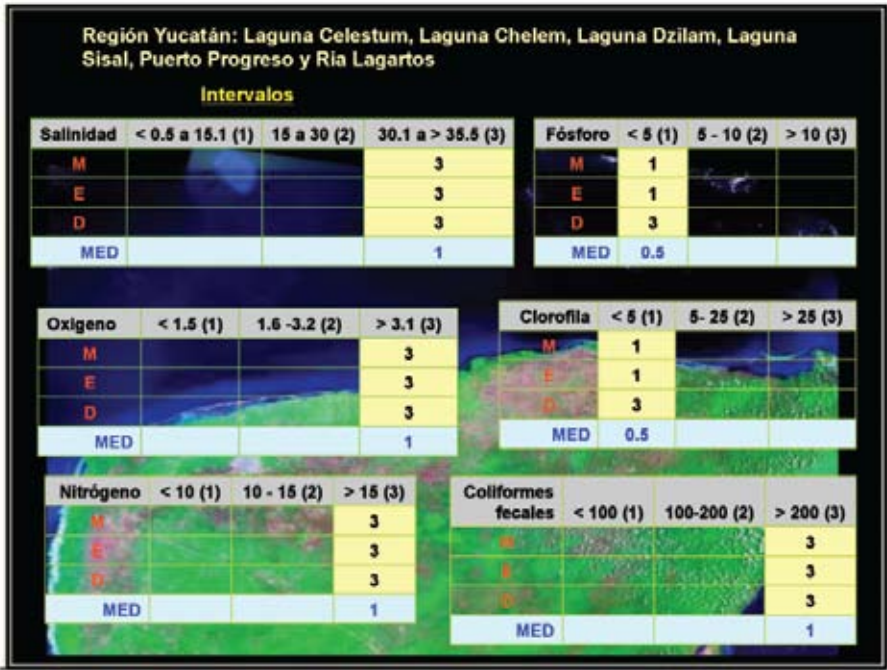


QUINTANA ROO

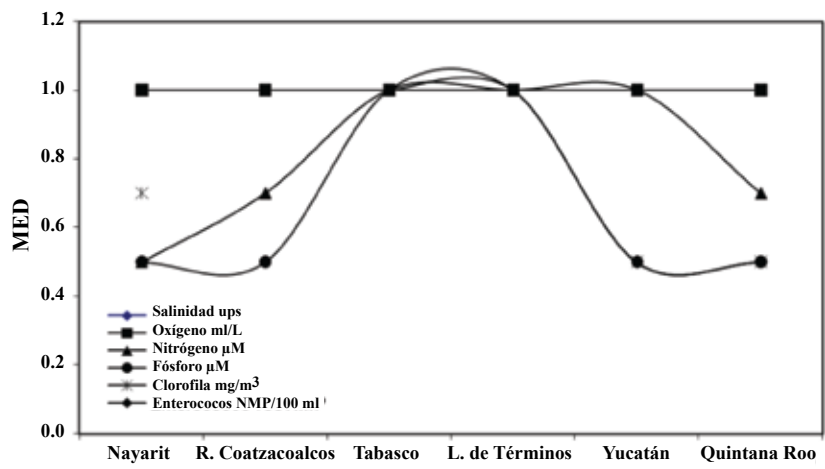
Para la región de Quintana Roo, se calculó un impacto alto por salinidad, oxígeno y coliformes, así como medio por nitrógeno y bajo por fósforo y clorofila.

	Salinidad ups	Oxígeno ml/L	Nitratos μM	Nitritos μM	Amonio μM	Fosfatos μM	Clorofila mg/m ³	Enterococos NMP/ 100 ml
Chachochuc			1.0	0.5	5.5	0.1	2.5	
Bojórquez	30.0		8.0	0.8	10.0	0.5	1.0	
Nichupté	28.0	3.0	6.0	1.3	8.0	29.0	0.6	7701
Puerto Morelos	36.0	4.3	41.6	0.2	1.19	8.0		362
Riviera Maya	37.0	8.5	5.7		9.3	4.6		464
Laguna Ascensión	28.0		4.0	0.5	4.0	0.1	0.5	

μM= Micromoles por litro



En la siguiente figura se grafican integralmente los ambientes costeros elegidos para estimar la vulnerabilidad fisicoquímica y biológica, en la que se destaca el mayor impacto por salinidad y coliformes fecales, en menor por fósforo.



Indices de Vulnerabilidad						
Localidad	Salinidad	Oxígeno	Nitrógeno	Fósforo	Clorofila	Enterococos
Nayarit	1.0	1.0	0.5	0.5	0.7	1.0
R. Coatzacoalcos	1.0	1.0	0.7	0.5		1.0
Tabasco	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
L. de Términos	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Yucatán	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	1.0
Quintana Roo	1.0	1.0	0.7	0.5	0.5	1.0

CONCLUSIONES

De la tabla anterior se destaca un impacto alto por salinidad, oxígeno y enterococos para todas las localidades, así como por nitrógeno, fósforo y clorofila “a”. Un impacto medio por nitrógeno para Coatzacoalcos y Quintana Roo, asimismo por clorofila en Nayarit, y bajo por fósforo para Nayarit, Coatzacoalcos, Yucatán y Quintana Roo.

Se destaca que las condiciones de hipoxia-anoxia y niveles bacteriológicos serán una vulnerabilidad generalizada alta en las regiones estudiadas como resultado del cambio climático. En segundo lugar la salinización aunque en menor grado. Además de una eutrofización particularmente por nitrógeno.

RECOMENDACIONES Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN

- Dado el escaso de los registros sobre la fisicoquímica del agua (salinidad, oxígeno disuelto, nitrógeno total, fósforo total, clorofila “a”, coliformes o específicamente enterococos), así como de su continuo monitoreo en las lagunas costeras y estuarios de las costas de México, se requiere que las instancias gubernamentales realicen monitoreos por lo menos en las diferentes épocas del año (secas, lluvias y la de Nortes, huracanes o tormentas tropicales). Se propone como parámetro adicional sólidos suspendidos o sedimentos. En virtud de que en la presente sección se eligieron aquellas regiones del Pacífico y del Golfo de México-Mar Caribe como las más vulnerables por los cambios hidrológicos, geomorfológicos y sociales que han experimentado, se recomienda se aboquen a efectuar los monitoreos necesarios para alimentar una base de datos suficiente y corroborar los índices de vulnerabilidad. Los resultados aquí obtenidos podrían ser la base metodológica para aplicarse a otras áreas costeras de México, también vulnerables, siempre y cuando se tenga una base de datos fisicoquímicos aceptables del agua aquí empleados.
- Es necesario que los asentamientos humanos y sus diversas actividades (industriales y recreativas) asentadas tanto en las márgenes de los cuerpos costeros como en vías fluviales asociadas o partes altas de sus cuencas, no descarguen a la zona costera las aguas residuales; lo que requiere de construir plantas de tratamiento de alta eficiencia y proyectadas a largo plazo, antes de ser descargadas, incluso utilizar el agua tratada para servicios secundarios.
- Se sugiere contar también con registros o base de datos hidrológicos (escurrimientos mensuales o por temporada) de las cuencas fluviales costeras para calcular cuando se presentarían los mayores aportes de nutrientes, mezcla y alcance de la cuña salina (balance de materiales), así como para determinar el tiempo de residencia.
- Especialmente las áreas agrícolas adyacentes a los sistemas costeros, en afluentes fluviales o aguas cuencas arriba, deben evitar los excesos de fertilizantes o emplear orgánicos de fácil degradación; se deben efficientar los cultivos agrícolas incluso utilizar la técnica de rotación o cambiar el tipo de cultivo; evitar la desecación de los suelos para no ser transportados como sedimentos a los ambientes acuáticos costeros y no azolvarlos, lo cual conduciría una mayor transgresión marina como sucede en los Pantanos de Centla, aunque puede suceder lo contrario que al no haber sedimentos la erosión sea mayor y por lo tanto también transgredir el mar; no incrementar áreas de cultivo y en su caso desaparecer tierras de cultivo ociosas o abandonadas que también han provocado azolvamientos en los ambientes costeros por transporte eólico e incluso han desaparecido humedales, en cuyo caso se sugeriría reforestar para evitar la erosión hídrica que incrementaría el transporte de sedimentos.

LITERATURA CITADA

- Bojórquez-Tapia L.A., E. Escurra y O. García, 1998. Appraisal of environmental impacts and mitigation measures through mathematical matrices. *Journal of Environmental Management*, 53: 91-99
- Castañeda O. y F. Contreras, 1994. Serie Bibliográfica Comentada Sobre Ecosistemas Costeros Mexicanos. Volúmenes III-IV.
- De la Lanza G., M. Rodríguez Medina y L. Soto, 1991. Análisis ecológico de los productores primarios en la Laguna de Términos, Campeche, México. *Universidad y Ciencia*, 8(15): 15-25.
- De la Lanza G. y S. Gómez Aguirre, 1999. Físico-química del agua y cosecha de fitoplancton en una laguna costera tropical. *Ciencia ERGOSUM*, 6(2): 147-153.
- De la Lanza G., y S. Hernandez Pulido, 2007. Calidad del Agua en la Laguna El Yucateco. Informe Monitoreo Ambiental. En: A. V. Botello. (coord.). Monitoreo Ambiental Integral de los Impactos de la Actividad Petrolera en la Laguna El Yucateco, Tabasco; México, UNAM.
- Dubravko J.T., N. Rabalais y R. Turner, 2005. Coupling between climate variability and coastal eutrophication: Evidence and outlook for the northern Gulf of Mexico. *Journal of Sea Research*, 54. 25-35.
- Gallegos G.A., 2004. Clima oceánico: los mares mexicanos ante el cambio climático. p. 41 En: J. Martínez y A. Fernández (coord.). Cambio climático una visión desde México. Semarnat-INE. México D.F.
- Gama L., A. Galindo-Alcántara, E. Cortés, C. Zequeira, A. Morales, C. Rullán, E. Moguel y Ma. E. Macías, 2009. El cambio climático global y su monitoreo sobre los posibles cambios en los servicios ambientales de cuencas de Tabasco. CA Ordenamiento Ecológico y Desarrollo Sostenible Universidad Juárez Autónoma de Tabasco Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura 86000, Villahermosa Tabasco, México. (http://www.ine.gob.mx/dgioece/cuencas/descargas/cong_nal_06/tema_05/15_lilly_gama.pdf).
- González M., E. Jurado, S. González, O. Aguirre, J. Jiménez, y J. Navar, 2003. Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia UANL*, 6(3): 377-385.
- Hendry M., 1993. Sea-level movement and shoreline change. En: G.A Maul (ed.). Climate change in the Intra-America Sea, London: Edward Arnold Publishers.
- Herrera-Silveria J. A., 2006. Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): Investigación, diagnóstico y manejo. *ECOTROPICOS*, 19 (2): 94-108.
- Hernández-Arana H. A., 2007. Calentamiento global y zona costeras: Peligrosa combinación. *ECOFRONTERAS*, 31: 10-13.
- Hughes L., 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends Ecol. Evol.*, 15(2):56-61.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (<http://www.grida.no/climate>)
- Justic D., N. Rabalais, y E. Turner, 1997. Impacts of climate change on the net productivity of coastal waters: implications for carbon budgets and hypoxia. *Climate Research*, 8:225-237
- Kennedy V.S., R. Twilley, J.A. Kleypas, J. H. Cowan, Jr., y S. R. Hare, 2002. Coastal and marine ecosystems Potential Effects on Resources & Global climate change. Prepared for the Pew Center on Global Climate Change.
- Lara L.R., 2008. Los cambios ambientales globales y la vulnerabilidad de los sectores de México. p. 13-25. En: I A Azuz Adeath (ed.). Infraestructura y Desarrollo Sustentable. Gobierno del Estado de B.C. CETYS Universidad.
- López A.E., 2003. Aplicación de un índice de calidad para cuerpos de agua del estado de Tabasco. Tesis Lic. Universidad Autónoma de Tabasco.

- Lloret J, A. Marin, y L. Marin-Guirao, 2008. Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change? *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 78: 403-412
- Medina-Gomez I., y J.A. Herrera-Silveira, 2003. Spatial characterization of water quality in a karstic coastal lagoon without anthropogenic disturbance: a multivariate approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58: 455-465
- Ortiz P. M. A. y A. P. Méndez L., 1999. Repercusiones por ascenso del nivel del mar en el litoral del golfo de México. p. 73-85. En: G.C. Gay (comp.). México: una visión hacia el siglo XXI. El Cambio Climático en México. Centro de Ciencias de la Atmosfera.
- Páez-Osuna, F., G. Ramírez-Reséndiz, A.C. Ruíz-Fernández, y M.F. Soto-Jiménez, 2007. La Contaminación por Nitrógeno y Fósforo en Sinaloa: Flujos, Fuentes, Efectos y Opciones de Manejo. UNAM-ICMYL, Colegio de Sinaloa, Semarnat, Conacyt.
- Rosales-Hoz L., A. Carranza-Edwards, P. Carvajal-Romero, C. Mendez-Jaime, y M. E. Ruiz-Santoyo, 2003. Physico-chemical seasonal variability of a tropical estuary: major and minor elements in water and air. *Environmental Geology*, 44: 790-798.
- Sánchez A.J., M.A Salcedo, R. Florido, A. Armenta, C. Rodríguez-Leal, A. Galindo, y E. Moguel, 2007. Pantanos de Centla, un humedal costero tropical. p. 399-422. En: G. de la Lanza Espino y S. Hernández-Pulido (comp.) Las Aguas Interiores de México, Conceptos y Casos. AGT Editor, S.A. México.
- Saffran K. K. Cash, y K. Hallard, 2001. Canadian water quality, guideline for the protection of aquatic life. Canadian Council of Minister of Enviroment. CCME Water Quality Index 1.0 User's Manual: 1-5.
- Sánchez-Arcilla A., J.A. Guimenez, H. I. Valdemono, y V. Gracia, 2008. Implications of climatic change on Spanish Mediterranean low-lying cots: the Ebro delta case. *Journal of Coastal Reseach*, 24 (2): 306 316.
- Secretaria de Marina, 2002. Atlas de Contaminación Marina en el Mar Territorial y Zonas Costeras de la República Mexicana. Secretaria de Marina, Armada de México 176 p.
- Semarnat, 2008. http://www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/politica_ambiental/certificaciondeplayas/Pages/playas_limpias.aspx
- Schallenberg M., J. Hall Catherine, y W. B. Carolyn, 2003. Consequences of climate-induced salinity increases on zooplankton abundance and diversity in coastal lakes. *Marine Ecology Progress Series*, 251: 181-189.
- Struyf E., S., Van Damme, y P. Meire, 2004. Possible effects of climate change on estuarine nutrient fluxes: a case study in the highly nitrified Schelde estuary (Belgium, The Netherlands) *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60: 649-661.
- UNESCO, 2003. The Integrated Strategic Design Plan for the ocean observations module of the Global Ocean Observing System. GOOS Report N° 125. IOC Information Documents Series No. 1183. pp. 56,57, 58,59.
- Vega-Cendejas, M.A., y M. Hernández de Santillana, 2004. Fish community structure and dynamics in a coastal hypersaline lagoon: Ría Lagartos, Yucatán, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60: 285-299.
- Vázquez, G.F., D.M. Elias, J.E.C. Aguayo, y B. Alejandro, 1996. Trace metal species in aquatic samples of the Tabasco Lagoons, Mexico. *Environment International*, 22(3): 377-382.
- Voice M., N. Harvey, y K. Walsh (eds.), 2006. Vulnerability to Climate Change of Australia's Coastal Zone: Analysis of gaps in methods, data and system thresholds. Report to the Australian Greenhouse Office, Canberra, Australia. June 2006.
- Webster M., 2007. Saltwater Invasion Climate change is causing the oceans to flow further inland, putting pressure on coastal areas to adapt. Scienceline. (http://scienceline.org/2007/06/22/env_webster_salt-water-global-warming/).

- Yáñez-Arancibia A., A.L. Lara-Domínguez, P. Chavance, y D. Flores-Hernández, 1988. Comportamiento ambiental de la Laguna de Términos. p. 27-40. En: A. Yáñez-Arancibia y J. W. Day Jr (eds.). Ecología de los Ecosistemas Costeros en el Sur del Golfo de México: La Región de la Laguna de Términos. Universidad Nacional Autónoma de México-Organización de los Estados Americanos, .
- Yáñez-Arancibia A, R R. Twilley, y A. L. Lara-Domínguez, 1998. Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. *Madera y Bosques*, 4(2):3-19 3.

Villanueva-Fragoso, S., G. Ponce-Vélez, C. García, y J. Presa, 2010. Vulnerabilidad de la zona costera. Ecosistemas costeros, p. 37-72. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Vulnerabilidad de la zona costera. Ecosistemas costeros

S. Villanueva-Fragoso, G. Ponce-Vélez, C. García y J. Presa

RESUMEN

Se estimó el grado de vulnerabilidad de los ecosistemas costeros, a través de las metodologías propuestas por el IPPCen 1991 y 1992; así como la guía para estudios vulnerables y adaptación de la US Country Studies Program (1994). Para los criterios ecosistémicos, se consideraron los manglares, arrecifes de coral y pastos marinos, incluyéndose los criterios ecológicos generales como son las Áreas Naturales Protegidas (ANP), Sitios Ramsar y productos pesqueros de importancia comercial de las regiones litorales seleccionadas: Tabasco, Quintana Roo y Sinaloa. Asimismo, se estimó el grado de impacto ambiental mediante el método de Bojórquez-Tapia *et al.* (1998). De forma global, Tabasco presenta un grado de vulnerabilidad e impacto ambiental alto, Sinaloa registra una alteración media y Quintana Roo fue el litoral con el menor grado de afectación ante los cambios climáticos y los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Palabras clave: Manglares, arrecifes de coral, pastos marinos, recursos pesqueros, criterios ecosistémicos, ANP, Sitios Ramsar.

INTRODUCCIÓN

ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD

Los ecosistemas costeros están sujetos a muchas presiones, como son los cambios en los depósitos de nutrientes y el ingreso de contaminantes a las lagunas, ríos y estuarios, además de la introducción de especies exóticas y la variabilidad natural del clima. El cambio climático constituye una presión adicional que puede alterar o poner en peligro esos sistemas naturales. El impacto del cambio climático en estos ambientes estará influenciado por la adaptación de ellos a las interacciones con otras presiones.

Las poblaciones de muchas especies ya están amenazadas y corren un mayor riesgo a causa de la sinergia entre las coerciones del cambio climático, que hacen inhabitable su hábitat actual, y de los cambios en el uso de la tierra que fragmentan los hábitats (<http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>).

Sin adaptación, algunas especies actualmente calificadas de “críticamente en peligro de extinción” se extinguirán y la mayoría de las consideradas “en peligro de extinción o vulnerables” serán mucho más raras en el siglo XXI. Esto puede tener su mayor impacto en las sociedades humanas de ingresos más bajos, que dependen de la vida silvestre para su subsistencia. Además, es muy probable que la pérdida o reducción de especies tendrá efectos sobre los servicios que presta la biota mediante la función que cumple dentro de un ecosistema (*e.g.* polinización, eliminación natural de las plagas), la recreación (*e.g.* la caza deportiva, la observación de la vida silvestre).

Los posibles métodos de adaptación para reducir los riesgos de las especies podrían incluir el establecimiento de refugios, parques y reservas con corredores biológicos para permitir la migración de especies, así como el empleo de la reproducción en cautiverio y la reubicación. No obstante, estas opciones pueden tener limitaciones de costo.

Se cuenta ya con un gran número de estudios de observación y experimentales que demuestran la vinculación entre el cambio en el clima regional y los procesos biológicos o físicos en los ecosistemas. Éstos incluyen un alargamiento de la estación de crecimiento vegetativo en 1-2 a 3-6 días por decenio en las latitudes septentrionales altas (este factor da lugar a cambios en la composición de la comunidad); el calentamiento de lagos y ríos como resultado del acortamiento de la duración de la cobertura de hielo; un desplazamiento hacia latitudes altas de los prados con hierbas alpinas; y una mayor mortalidad y contracción de las praderas silvestres como resultado del estrés térmico. Otros incluyen cambios en los tamaños de las poblaciones, el tamaño corporal y las épocas de migración.

El cambio climático mundial resultará en aumento de la temperatura de la superficie del mar (TSM) y del incremento del nivel del mar; de la disminución de la cobertura de hielo marino, así como los cambios en la salinidad, las ondas climáticas y la circulación de los océanos; algunos de estos cambios ya se están produciendo. Se prevé que los cambios en los océanos presentarán efectos importantes de retroalimentación sobre el clima mundial y particularmente el de la zona costera inme-

diata. Tendrán también profundos impactos en la producción biológica de los océanos, incluida la pesquera. Por ejemplo, los cambios en la circulación mundial y la mezcla vertical de las aguas afectarán a la distribución de los elementos biogénicos y la eficiencia de la captación de CO_2 de los océanos; los cambios en las tasas de afloramiento tendrán impactos importantes en la producción de peces costeros y en el clima costero.

Si los sucesos de calentamiento asociados con el fenómeno de El Niño aumentan en frecuencia, las biomasas de plancton y la abundancia de larvas de peces declinarán y tendrán efectos adversos sobre los peces, los mamíferos marinos, las aves marinas y la diversidad biológica de los océanos. Además de la variabilidad de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), desde el segundo informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (SIE), se ha reconocido la persistencia de los regímenes océanos-clima plurianuales y los cambios de un régimen a otro. Los cambios en las pautas de reclutamiento de poblaciones de peces se han vinculado a esos cambios. Las fluctuaciones en la abundancia de peces se consideran cada vez más como una respuesta biológica a las fluctuaciones climáticas a mediano plazo, además de una consecuencia de la pesca excesiva y otros factores antropogénicos.

La adaptación por expansión de la acuicultura marina puede compensar en parte las posibles reducciones en la captura de peces oceánicos.

La producción por acuicultura marina se ha duplicado desde 1990, y en 1997 representó aproximadamente el 30% de la producción comercial total de pescados y mariscos para

consumo humano. Sin embargo, la productividad futura de la acuicultura puede verse limitada por las poblaciones de arenques, anchoas y otras especies que se utilizan para proporcionar harina y aceites de pescados con el fin de alimentar a especies cultivadas, que pueden sufrir efectos adversos del cambio climático. (<http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>).

Los ecosistemas costeros como los arrecifes de coral, marismas de agua salada, manglares y la vegetación acuática sumergida sufrirán los impactos del incremento del nivel del mar, el aumento de la TSM y cualquier cambio en la frecuencia e intensidad de las tormentas. Los impactos de este aumento en el nivel medio de mar sobre manglares y marismas de agua salada dependerán de la tasa del incremento en relación con la acreción vertical y el espacio para la migración horizontal, que pueden estar limitadas por el desarrollo humano y el turismo en zonas costeras. Los arrecifes de coral saludables probablemente puedan hacer frente a este aumento, pero está en duda para los arrecifes degradados por blanqueamiento, radiación UV-B, contaminación u otro tipo de estrés. Los episodios de blanqueamiento de los corales durante los últimos 20 años se han atribuido a varias causas, incluyendo el aumento de las temperaturas de los océanos. El futuro calentamiento de las aguas superficiales aumentaría el estrés sobre los arrecifes de coral y resultaría en una mayor frecuencia de enfermedades marinas (confianza alta). Los cambios en la química de los océanos, resultantes en mayores niveles de CO_2 pueden tener impactos negativos sobre el desarrollo y la salud de los arrecifes de coral, lo cual a

su vez tendría efectos perjudiciales sobre las pesquerías costeras y sobre los usos sociales y económicos de los recursos arrecifales.

Las evaluaciones integradas de las zonas costeras y los ecosistemas marinos, y una mejor comprensión de su interacción con el desarrollo humano y la variabilidad climática pueden facilitar las mejoras en la gestión y el desarrollo sostenibles. Las opciones de adaptación para la gestión marina y costera son más eficaces cuando están incorporadas a políticas relativas a otras esferas, como los planes de mitigación de los efectos de los desastres y los planes para el uso de la tierra.

A pesar de su importancia existe un rezago en el conocimiento sobre el aprovechamiento y manejo adecuado de estos ecosistemas que tienen cambios acelerados, la mayoría de las veces irreversibles. La importancia ecológica de la zona costera se hace patente al existir en el país, 56 Áreas Naturales Protegidas marinas o costeras, de un total de 154 Áreas Naturales Protegidas federales, bajo diferentes estatus.

En consecuencia, un análisis correcto de vulnerabilidad, es determinar el grado por el cual un sistema es susceptible o incapaz de enfrentarse a efectos adversos del cambio climá-

tico, incluidas la variabilidad y los extremos del clima. La vulnerabilidad esta en función del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático y de la variación a la que un sistema está expuesto, de su sensibilidad y de su capacidad de adaptación (<http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>).

La adaptación ante el cambio climático se define como la capacidad de los sistemas humanos y naturales para ajustarse, espontánea u ordenadamente, a los impactos climáticos adversos, así como para aprovechar las oportunidades que deriven de los cambios que se presenten. Las capacidades de adaptación, en la medida en que se desarrollen apropiadamente, reducirán efectivamente la vulnerabilidad. Para ser efectivas, tanto las estrategias de mitigación como las de adaptación que exigen modificaciones de gran alcance en los procesos de desarrollo, en los patrones dominantes de uso intensivo de los recursos de la Tierra —aguas, suelos, recursos biológicos, fuentes de energía, servicios ambientales de los ecosistemas—, las prácticas de producción y los hábitos de consumo tienen que ser más reguladas.

OBJETIVO

Estimar el grado de vulnerabilidad de los ecosistemas costeros críticos, como son los manglares, los arrecifes de coral y los pastos

marinos ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y a los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

METODOLOGÍA

Para la estimación del grado de vulnerabilidad de los ecosistemas costeros, se tomó en cuenta la metodología común preparada por el IPCC (1991), incluyendo una versión revisada (IPCC, 1992) y la guía para estudios de vulnerabilidad y adaptación (US Country Studies Program, 1994) para asegurar una adecuada correspondencia con estudios similares en otros países de la región y del mundo.

La vulnerabilidad biológica ha sido definida como el conjunto de factores relacionados con la historia de vida de una determinada unidad taxonómica o taxón que lo hacen frágil o vulnerable y ésta se divide en tres categorías (alta 3, media 2 y baja 1). El impacto que pueden tener las actividades humanas sobre los organismos también ha sido categorizado en alto (4), medio (3) y bajo (2) (INE, 2008). La vulnerabilidad ecológica puede conceptualizarse al incluir aspectos integrales de los ecosistemas, como son la diversidad biológica, la abundancia de los recursos naturales, las tramas ecológicas complejas que les confieren características únicas para el desarrollo y reproducción de especies clave, por lo que la valoración de este tipo de vulnerabilidad puede hacerse en dos niveles: 1) tomando en cuenta ecosistemas relevantes y 2) incluyendo categorías ecológicas generales que albergan o integran a los anteriores.

Para la estimación del grado de vulnerabilidad ecológica frente a las amenazas del incremento del nivel mar y los eventos hidrometeorológicos extremos, se establecieron los criterios siguientes:

CRITERIOS ECOSISTÉMICOS

Se consideraron tres tipos de ecosistemas importantes para las regiones costeras; estos son los manglares, los arrecifes de coral y los pastos marinos. Cada uno de ellos representa un ambiente natural con características definidas, propias y simultáneamente se interrelacionan para darle a la zona costera la relevancia ecológica que posee.

CRITERIOS

ECOLÓGICOS GENERALES

Fueron seleccionados tres aspectos de este nivel integral, las Áreas Naturales Protegidas, los sitios Ramsar y los productos pesqueros. Los dos primeros están íntimamente relacionados uno de carácter nacional y el otro internacional, conformados bajo criterios homogéneos; el rubro pesquero tiene significancia desde el punto de vista de proveer información valiosa acerca de la abundancia y la diversidad biológica de aquellas especies con importancia ecológica y económica que son capturadas tanto en el medio natural como cultivadas.

La clasificación preliminar que se estableció se muestra en la tabla 1 con su código de color correspondiente, de acuerdo al esquema observado en la gradación de la vulnerabilidad biológica y el impacto de la actividad humana mencionado anteriormente.

Por otro lado, para poder evaluar el grado de vulnerabilidad ecológica se siguió la estrategia de estimar el posible impacto ambiental sobre

Tabla 1. Clasificación preliminar.

Grado de vulnerabilidad	Categoría numérica	Código de color
Baja	1	
Media	2	
Alta	3	

los tres grandes ecosistemas considerados. Se adoptó la metodología propuesta por Bojórquez-Tapia *et al.* (1998) la cual consiste en un procedimiento matricial para valorar dicho impacto, considerando parámetros ecológicos divididos en básicos y complementarios; se incluyen los básicos para poder realizar las estimaciones respectivas de las interacciones entre el recurso biológico importante y el factor ambiental limitante derivado de una o varias amenazas como el incremento del nivel del mar o la presencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos como los huracanes de mayor magnitud y extemporáneos.

La definición y escala de cada uno de estos criterios han sido establecidas con precisión por Bojórquez-Tapia (1989) y Bojórquez-Tapia *et al.* (1998) (tabla 2).

Se utilizó el índice básico de impacto ambiental MED_{ij} donde los criterios de magnitud (M), extensión (E) y duración (D), se integran en la siguiente fórmula aplicada:

$$MED_{ij} = 1/9 (M_{ij} + E_{ij} + D_{ij})$$

donde MED_{ij} puede tener valores desde 0.33 (impacto bajo) hasta 1 (impacto alto).

Tabla 2. Criterios para determinar el grado de vulnerabilidad ecológica.

Escala	Magnitud del impacto (M)	Extensión del Impacto (E)	Duración de la acción (D)
Concepto	Intensidad de la afectación en el área de estudio definida por la superficie impactada.	Área de afectación con respecto al área disponible en la zona de estudio.	Definida por la extensión en el tiempo de la acción y la repercusión del impacto ambiental.
1	Mínima. Cuando la afectación cubre la menor proporción del total de los recursos existentes en el área de estudio (< 15%) o cuando los valores de la afectación son menores a un 30% respecto al límite permisible.	Puntual. Ocurre y se extiende dentro del área de estudio.	Corta. Cuando la acción dura menos de 30 días.
2	Moderada. Cuando la afectación cubre una proporción intermedia del total de los recursos (< 30%) o si los valores de la afectación se ubican entre 31 y < 75 % respecto al límite permisible.	Local. Ocurre y/o se extiende en un radio no mayor o igual a 1000 m.	Mediana. Cuando la acción dura entre 1 mes y dos años.
3	Alta. Cuando la afectación cubre la mayor proporción del total de los recursos existentes o si los valores de la afectación rebasan el 75% de los límites permisibles.	Regional. Si ocurre y su extensión excede a los 1000 m a cada lado o 1000 m de radio del área de proyecto.	Larga. Cuando la acción dura más de dos años.

Tomado de Bojórquez-Tapia *et al.* (1998)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan y se discuten por ecosistema, en primer lugar estimando el grado de vulnerabilidad según los criterios de:

- Diversidad ecosistémica y de
- Criterios ecológicos generales

En segundo lugar, aplicando la metodología propuesta por Bojórquez-Tapia *et al.* (1998) para cada uno de los tres estados analizados (Tabasco, Quintana Roo y Sinaloa).

MANGLAR

Quintana Roo

En este Estado, existen cuatro especies de mangle, *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Conocarpus erectus* conocido como botoncillo. La superficie de cobertura de manglar reportada para este Estado es de 64 755 ha.

Tabasco

Al igual que para el Estado anterior, en esta entidad del Golfo de México, se presentan las cuatro especies de mangle ya mencionadas, con una superficie de manglar de 35 191 ha.

Sinaloa

En esta región del Pacífico subtropical mexicano coexisten las cuatro especies de mangle encontradas en los otros litorales; tiene una superficie de manglar estimada de 71 225 ha.

Del total de la superficie de manglar existente en México, 43% es superficie que se encuentra decretada como Área Natural Protegida (ANP) y 64% de la superficie total de

cobertura de manglar en nuestro país, está inscrito en la Convención Internacional Ramsar, para la protección de los humedales.

Para calcular el grado vulnerabilidad del manglar por estado, se consideró tanto el número de especies como la cobertura del manglar en hectáreas de las tres zonas y el tipo de manglar que domina; por ejemplo, en Tabasco domina el de tipo ribereño/borde con una influencia muy grande de las condiciones estuarinas lo que permite longitudes arbóreas mayores respecto al manglar de Quintana Roo, que es predominantemente de borde con una zona de playa o dunas hacia el mar, con alturas de los árboles menores y una mayor exposición a la dinámica costera imperante. El manglar del sur de Sinaloa y norte de Nayarit es de los más extensos del mundo, con un grado de alteración bajo, por lo que su resiliencia es mayor así como su cobertura lo que le brinda un menor grado de vulnerabilidad ante eventos naturales extremos (tabla 3).

Se consideró que la región que cuenta con la mayor extensión (cobertura) de manglar, es la de mayor resiliencia y por lo tanto de menor vulnerabilidad, tal es el caso de Sinaloa.

El estado de Tabasco, es un claro ejemplo de cómo las actividades humanas pueden provocar alteraciones ambientales de gran envergadura; las actividades petroleras en bosques de manglar ocasionaron una serie de impactos ambientales negativos, incluyendo la interrupción del flujo de agua dulce hacia estos ecosistemas, la alteración del flujo del agua de las mareas hacia los manglares y dentro de ellos, lo que modifica el patrón del drenaje, la vegetación, el suelo y la inestabilidad general

Tabla 3. Grado de vulnerabilidad: manglar.

Ecosistema/Grado de vulnerabilidad	Parámetro	Tabasco	Quintana Roo	Sinaloa
Manglar	No. de especies	4	4	4
	Extensión (ha)	35 191	64 755	71 225
Grado de vulnerabilidad		3	2	1

del área. En las distintas etapas de la actividad petrolera, se registra deforestación para la construcción de instalaciones, incluyendo las plataformas de perforación, campamentos, pozos, apertura de carreteras de acceso, entre otras. La perforación se hace por dragado, lo que ocasiona una destrucción total del área. El dragado implica hacer más profundos y más anchos los canales existentes, o abrir nuevos canales. El tamaño y la profundidad del canal estarán determinados por el tamaño de la gabarra de perforación utilizada y del nivel del agua durante la perforación, entre más grande sea el canal, mayor será el daño que se haga al ecosistema. La construcción de estos canales altera la hidrología natural del manglar y lo hace más vulnerable a la erosión ya que la pendiente natural del manglar puede colapsar. La compactación de los residuos a causa de otras excavaciones puede causar perjuicios posteriores a la zona; se eliminan las cepas de los árboles mediante una draga hasta una profundidad de 1-2 metros, y los residuos se depositan en la orilla para formar muros de contención o se depositan en el mar, lo que obstruye el flujo natural de las corrientes, destruye los arrecifes aledaños y otros ecosistemas vulnerables. Los bancos de residuos pueden extenderse hasta 30 metros más allá del borde del canal, lo que puede producir la propagación del líquido de los residuos y una migración vertical de los residuos de dragado a las tierras cercanas. Los depósitos de resi-

duos pueden destruir los manglares mediante relleno directo (por asfixia de los pneumatóforos) o por formación de una barrera al flujo y reflujo de las aguas. La alteración del suelo puede producir cambios en el pH del mismo y del agua que podrían causar un deterioro crítico de la calidad de los manglares. El acceso a las zonas de perforación con los equipos respectivos, puede provocar los siguientes impactos: tala para las vías de vuelo, clareo del bosque para la construcción de plataformas de aterrizaje, de zonas de andamiaje y para el almacenamiento y transferencia de combustible (Oilwatch, 2005).

Un ejemplo alarmante es lo ocurrido en la zona de amortiguamiento de la reserva de la biósfera “Pantanos de Centla”, Pemex Exploración y Producción (PEP) empezó a exterminar vastas colonias de mangle blanco, rojo y negro para colocar oleoductos y extraer hidrocarburos de los pozos Tizón y Cráter, ubicados en la costa del municipio de Centla, Tabasco (www.tabascohoy.com.mx/nota.php?id_notas=156792).

En función del posible impacto ambiental que pueda provocarse debido a la presión ambiental, ejercida por uno de los parámetros ambientales de mayor relación con estas especies vegetales como es la salinidad, se estimó el valor del MED_{ij} para cada estado del litoral evaluado. La tabla 4 presenta los valores estimados para el caribe mexicano para cada una de las especies principales que conforman el

Tabla 4. Estimación del índice básico de impacto ambiental (MED_{ij}) para las especies dominantes de mangle en el estado de Quintana Roo. Factor ambiental limitante: salinidad.

	Condición adecuada (salinidad en ups)	Salinidad reportada (ups)	M	E	D	MED_{ij}
<i>Rhizophora mangle</i> (rojo)	10 -100	43.86	1	3	3	0.78
<i>Laguncularia racemosa</i> (blanco)	15-20	43.86	2	3	3	0.89
<i>Avicennia germinans</i> (negro)	40	43.86	1	3	3	0.78
Promedio						0.82
Desviación estándar						0.06

manglar, así como el promedio resultante de estos datos.

La salinidad reportada es un valor promedio estimado de diversos ambientes costeros de esta región incluyendo lagunas costeras, zonas arrecifales y mar abierto (De la Lanza *et al.*, 2006). El MED_{ij} promedio para el manglar de la región del caribe mexicano fue de 0.82 ± 0.06 y el criterio básico de magnitud es el que está determinando la dimensión de este índice de impacto ambiental. La categorización de este parámetro se establece derivada del intervalo de salinidad, en el cual cada una de las especies de mangle se desarrolla adecuadamente, para el mangle rojo y el negro, que poseen una mayor tolerancia a la variabilidad de sales, los valores de este índice básico fue de 0.78, mientras que para el mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) aumentó a 0.89. Significa que esta especie puede ser más susceptible de ser afectada por una intrusión salina severa ya que se ha reportado que vive bajo una condición de salinidad más restringida, entre 15 y 20 ups, de tal forma que cuando se presentan fenómenos meteorológicos como los huracanes y la progresión del agua marina sobre el manglar de Quintana Roo ocurre, este hecho ejerce una presión ambiental mayor sobre esta especie que se ubica regularmente en la porción o franja intermedia del manglar.

Para Tabasco, donde existe una cobertura de manglar de aproximadamente 35 000 ha, el cálculo del MED_{ij} mostró el comportamiento que se observa en la tabla 5; debido a la gran cantidad de caudales de agua dulce en esta entidad, el valor promedio reportado de la salinidad es de 13 ups, lo que permite que se tenga el mismo valor de este índice para las tres especies de mangle, y por tanto el promedio para el manglar tabasqueño sea igual a 0.78.

En términos generales, en este estado la dinámica costera muestra una influencia de la descarga de aguas continentales sobre el océano, aportando principalmente materia orgánica a la región marina, por lo que el efecto inverso del agua salada sobre los humedales es menor o nulo en la mayoría de los casos y el impacto que puede generarse por este patrón hidrodinámico y la salinidad incrementada subsiguiente también es bajo.

En el Pacífico subtropical mexicano, el manglar más importante es el que abarca el sur de Sinaloa y la región norte de Nayarit con una extensión de alrededor de 70 000 ha (Marismas Nacionales); en la tabla 6 se presenta el comportamiento del MED_{ij} para las especies de mangle que conforman una de las regiones de manglar del Pacífico mexicano más importantes a nivel mundial.

Tabla 5. Estimación del índice básico de impacto ambiental (MED_{ij}) para las especies dominantes de mangle en el estado de Tabasco. Factor ambiental limitante: salinidad.

	Condición adecuada (salinidad en ups)	Salinidad reportada (ups)	M	E	D	MED_{ij}
<i>Rhizophora mangle</i> (rojo)	10 -100	13	1	3	3	0.78
<i>Laguncularia racemosa</i> (blanco)	15-20	13	1	3	3	0.78
<i>Avicennia germinans</i> (negro)	40	13	1	3	3	0.78
Promedio						0.78
Desviación estándar						1..36E-16

Tabla 6. Estimación del índice básico de impacto ambiental (MED_{ij}) para las especies dominantes de mangle en el estado de Sinaloa-Nayarit. Factor ambiental limitante: salinidad.

	Condición adecuada (salinidad en ups)	Salinidad reportada (ups)	M	E	D	MED_{ij}
<i>Rhizophora mangle</i> (rojo)	10 -100	25.6	1	3	3	0.78
<i>Laguncularia racemosa</i> (blanco)	15-20	25.6	2	3	3	0.89
<i>Avicennia germinans</i> (negro)	40	25.6	1	3	3	0.78
Promedio						0.82
Desviación estándar						0.06

El patrón mostrado es similar al de Quintana Roo, debido básicamente al efecto de la salinidad sobre *L. racemosa*, ya que la salinidad promedio reportado fue de 25.6 ups y esta especie se desarrolla mejor hasta 20 ups; el MED_{ij} promedio para este ecosistema costero del Pacífico subtropical mexicano fue de 0.82 ± 0.06 denotando una fragilidad similar a la presentada para el Caribe mexicano.

Existen un gran número de trabajos que versan sobre el manglar en nuestro país, desde revisiones documentales hasta investigaciones específicas sobre aspectos puntuales de este ecosistema. Derivado de este gran acervo científico, puede decirse que debido a que la costa del Golfo de México es más húmeda que la del Pacífico, los manglares del Golfo pueden encontrarse en zonas protegidas como estua-

rios y lagunas costeras que tienen una mayor influencia de agua dulce y una mayor riqueza específica. En este litoral, el sur de Veracruz, Tabasco y Campeche son zonas con alta precipitación y con temperaturas nunca menores a 14°C (López-Portillo y Ezcurra, 2002).

La fisonomía del manglar de Quintana Roo es distinta a la del Golfo y del Pacífico, debido posiblemente a la menor tasa de recambio del sistema hídrico como una consecuencia de las características cársticas de la península y por tanto a la gran influencia del agua saturada en calcio y baja en nutrientes de estas costas caribeñas (López-Portillo y Ezcurra, 2002).

El sustrato es un rasgo ambiental importante en el asentamiento, mantenimiento y sobrevivencia del manglar; Thom (1967 y 1982) reportó una fuerte dependencia entre

las características del sustrato y la geomorfología del sitio estudiado en las planicies costeras de Tabasco y concluyó que la variabilidad en dicha morfología contribuye a explicar las condiciones locales del sustrato y por ende la composición y estructura del manglar. También se ha reportado el posible efecto de diversas interacciones abióticas como los parámetros ambientales y las geoformas sobre este ecosistema, donde la diversidad de los manglares disminuyó significativamente con el incremento en la salinidad y en los sitios menos salinos se presentaron bosques mixtos, los lugares más salinos están habitados por manglares monoespecíficos de *Avicennia*, mientras que *Rhizophora* y *Laguncularia* aumentan su cobertura, la cual es una medida de éxito ecológico, conforme la salinidad disminuye lo que manifiesta la cercanía entre el óptimo ecológico y el fisiológico; la variabilidad en composición y zonación de los manglares puede estar relacionada con la salinidad y el ambiente geomorfológico (López-Portillo y Ezcurra, 2002). Los cambios en la línea de costa pueden tener efectos de orden espacial en extensión global, regional y local (Duke *et al.*, 1998) y el manglar se ha tomado como indicador de estos cambios (Pannier, 1992); por lo que, los efectos del cambio climático serán de diferente magnitud y escala, propiciando condiciones físicas y químicas distintas a las cuales los manglares tendrán que responder diferencialmente a lo largo de la zona costera (Ortiz-Pérez y Méndez-Linares, 2004).

Las presiones humanas sobre este tipo de ecosistema han provocado una disminución de la cobertura natural; las mediciones realizadas a través de la herramienta satelital han permitido estimar que de 1970 a 1993 se perdió aproximadamente 23% del manglar

de Nayarit (Ramírez *et al.*, 1998) y un valor similar fue estimado para Sinaloa (Ruiz y Berlanga, 1999); además, la variabilidad en los datos reportados sobre deforestación de manglar es tal que no permite uniformizar los criterios para atender en orden de prioridad aquellas localidades que realmente estén siendo afectadas por las actividades antropogénicas, principalmente la tala de este recurso forestal, a pesar de existir en la actualidad normatividad nacional vinculada con este rubro ambiental. Todo este panorama hace que este ecosistema sea particularmente vulnerable. La creación de infraestructura de comunicaciones terrestres, petrolera, turística, urbana, eléctrica, así como insumos domésticos de carbón y leña, artefactos para pesquerías como tapos, galeras para secado de tabaco, aprovechamiento de taninos, son ejemplos de la amplia diversidad en la que el manglar se ha utilizado desde hace muchas décadas, creando hábitos y mitos difíciles de modificar con la subsecuente alteración del manglar que aunado a los fenómenos naturales, magnifica el grado de impacto recibido.

ARRECIFE CORALINO

Quintana Roo

El segundo ecosistema seleccionado fue el arrecife de coral localizado en el mar Caribe y el cual forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), este comprende desde Isla Contoy al norte de la península de Yucatán hasta las islas Bahía en Honduras por lo que se considera el segundo arrecife más largo del mundo. El SAM contribuye a la estabilización y protección de los paisajes costeros y sirve como hábitat para la alimentación y



Comunidad de manglar

<http://www.dgukenviis.nic.in/A%20mangrove%20ecosystem.JPG>

crianza de mamíferos marinos, reptiles, peces e invertebrados, muchos de ellos de importancia comercial y relevancia socioeconómica al proporcionar empleo y ser fuente de ingresos para las personas que viven en las áreas costeras cercanas (INE-SAM, 1997); también brinda protección contra el oleaje, ante las tormentas y huracanes que son frecuentes en este litoral (De la Lanza, 2006).

La temperatura es uno de los factores ambientales determinantes para el buen funcionamiento de los corales que constituyen y construyen el arrecife, se ha documentado en la literatura que un aumento entre 1 y 2°C por arriba del límite térmico en el cual la mayoría de las especies de coral se desarrollan adecuadamente, es suficiente para provocar el fenómeno de blanqueamiento durante el cual el sistema fotosintético de las algas zooxantelas

asociadas se reduce o anula siendo incapaces de proveer alimento al coral. Esto trae como consecuencia la disminución del crecimiento y la mortalidad del mismo, dando como resultado que la reproducción de aquellos organismos que han sufrido blanqueamiento y han podido recuperarse, tienen una reproducción más lenta respecto a los sanos. También se ha podido establecer una relación entre la morfología del coral, la especie y el grado de resistencia o de susceptibilidad a sufrir blanqueamiento, observándose una mayor fragilidad hacia esta presión ambiental por parte del grupo de los corales ramificados de las familias *Acroporidae* y *Pocilloporidae* (tabla 7) (Marshall y Schuttenberg, 2006). Recientemente, Nesa y Hidaka (2009) encontraron que las zooxantelas producen sustancias peligrosas, del tipo reactivas del oxígeno y por lo tanto daño a las

Tabla 7. Susceptibilidad de los corales al blanqueamiento por el aumento de temperatura de los océanos.

Resistencia ↓		Forma de crecimiento	Familia	Ejemplo
	Bajo	Ramificada finamente	Pocilloporidae	<i>Serlatopora</i> <i>Stylophora</i> <i>Pocillopora</i>
		Ramificado, tabular, incrustado	Acroporidae	<i>Acropora</i> <i>Montipora</i>
	Medio	Sólido, cerebro	Favidae	<i>Favia</i> <i>Favities</i> <i>Leptoria</i> <i>Goniastrea</i> <i>Platygyra</i>
		Sólido, pedrusco	Poritidae	<i>Porites</i> <i>Goniopora</i>
	Alto	Varios	Varios	<i>Turbinaria</i> <i>Cyphastrea</i>

Tomado de Marshall y Schuttenberg, 2006

células coralinas cuando existen condiciones de temperaturas altas (31°C), por lo que se pone de manifiesto la complejidad fisiológica del fenómeno de blanqueamiento en este tipo de ecosistema.

En la tabla 8, se presenta el valor del MED_{ij} estimado al considerar como factor limitante la temperatura del agua. Se hizo la valoración estacional ya que se tuvo acceso a datos térmicos recientes de las tres estaciones climáticas que se presentan en la región del caribe mexicano (De la Lanza *et al.*, 2006) y puede observarse que existe un impacto estacional por la fluctuación de la temperatura del agua en especies sensibles a estos cambios aparentemente mínimos, esto es; en la época de nortes, el valor del MED_{ij} fue el menor (0.78) seguido por el de secas (0.82) y el máximo alcanzable (1) se estimó para lluvias durante agosto. De manera global, el promedio de este índice básico de impacto ambiental por estrés térmi-

co para el ecosistema coralino fue de 0.87 ± 0.12 superior al obtenido para el manglar, lo cual pone de manifiesto la fragilidad de este ecosistema ante el calentamiento de las aguas costeras derivado del cambio climático global y acelerado por las actividades humanas.

Para poder diagnosticar el estado de conservación de los arrecifes se utilizan diversos indicadores y uno de los más importantes son las algas. Se ha demostrado en diversas investigaciones que las adaptaciones morfológicas, fisiológicas y ecológicas que presentan las microalgas y constituyen grupos funcionales que pueden relacionarse con el grado de perturbación ambiental que exista así como con las diferentes etapas en el desarrollo del ecosistema (Littler y Littler, 1984). Esta información científica ha llevado al establecimiento de una categorización por grupos funcionales derivados de la morfología de las algas, por ejemplo, existen filamentosas, ramificadas, calcificadas,

Tabla 8. Estimación del índice básico de impacto ambiental (MED_{ij}) para las especies dominantes de corales en el estado de Quintana Roo. Factor ambiental limitante: temperatura.

	Condición adecuada (temperatura °C)	temperatura reportada (°C)	M	E	D	MED_{ij}
Corales (mayoría de las especies arrecifales)	20-28	26-29 (nortes)	1	3	3	0.78
Corales (mayoría de las especies arrecifales)	20-28	25.3-27.8 (secas)	2	3	3	0.82
Corales (mayoría de las especies arrecifales)	20-28	29.5-30.7 (lluvias)	3	3	3	1
Promedio						0.87
Desviación estándar						0.12

costrosas, entre otras y representan diversas respuestas ante la presión física y fisiológica como son la herbivoría y la competencia. Es así, que la presencia de foliáceas y filamentosas manifiesta ambientes inestables ya que poseen características típicas de especies pioneras, oportunistas, selectivamente favorecidas por los cambios ambientales (Littler, 1980). Las formas ramificadas es el grupo que se encarga de incrementar la heterogeneidad espacial de la comunidad, mientras que las coriáceas dan mayor estabilidad y las calcificadas y costrosas indican ambientes más estables y etapas más avanzadas de la sucesión (Littler y Littler, 1984).

Díaz-Larrea (2006) ha reportado para la comunidad arrecifal del caribe mexicano la presencia de grupos morfofuncionales de macroalgas de tipo filamentosas y foliáceas los cuales indican perturbaciones ambientales entre ellas la herbivoría que es de carácter natural.

En el territorio mexicano existen cerca de 30 formaciones arrecifales que se desarrollan en un intervalo entre 2 y 40m de profundidad sobre la plataforma continental y generalmente se orientan noroeste-sureste lo que

sugiere una fuerte influencia de las corrientes costeras y de los vientos prevalecientes sobre su morfología (Toledo, 2005).

Para el arrecife coralino del Caribe se han reportado como las especies más abundantes de corales gorgonáceos a *Plexaura flexuosa*, *Eunicea mamosa* y *Gorgonia flabellum*. Los factores ambientales que influyen en gran medida su distribución y abundancia, así como su diversidad son principalmente la sedimentación, el oleaje y la gama de sustratos disponibles. Los lugares de alta energía como las zonas de rompiente arrecifal están dominados por abanicos de mar (*Gorgonia ventalina* como la de mayor abundancia). Las formaciones arrecifales se ven afectadas por fenómenos meteorológicos como los huracanes que anualmente azotan este litoral con magnitudes diversas tanto en vientos como en oleaje de tormenta lo cual rige directamente la envergadura del daño del ecosistema arrecifal el cual principalmente es de tipo estructural, provocando una alteración o impacto ambiental a la comunidad en su conjunto (Padilla-Souza, 2006).

Las especies de corales duros, rígidos o escleractíneos forman colonias de diversa distri-

bución en el arrecife, tal es el caso de Quintana Roo ya que posee una heterogeneidad de este tipo de formaciones, en la zona norte del litoral se encuentran con poca estructura, en el área central la cobertura coralina es baja y los gorgonáceos son abundantes y en el sur son más continuos (Molina-Ramírez, 2006). La forma de crecimiento de tipo ramificado es una de las más afectadas por los huracanes y de las que requiere más tiempo para su recuperación, debido al daño mecánico que reciben la mayoría de las colonias aunado al estrés provocado por el blanqueamiento debido al aumento de la temperatura que ocurre frecuentemente con antelación a estos eventos climáticos (Lugo *et al.*, 2000).

El desarrollo costero del Caribe mexicano ha incrementado los procesos de sedimentación así como los niveles de contaminación, condiciones que afectan directamente los arrecifes coralinos, lo cual se suma a las alteraciones fisiológicas y estructurales derivadas de eventos naturales y magnificados por el cambio climático global como el blanqueamiento, así como diversas enfermedades y en menor grado de calcificación de los corales duros (Bruke y Maidens, 2004).

De esta forma se pone de manifiesto que los arrecifes de coral brindan una serie de servicios ecológicos dentro de este mismo ecosistema como para los adyacentes, ya que por ejemplo, la barrera arrecifal es un mecanismo físico de protección para evitar o minimizar la erosión de las playas y por lo tanto amortigua o evita el daño provocado por los fuertes vientos y el intenso oleaje cuando ocurren huracanes, sobre las praderas de pastos marinos y el manglar; en este sentido de protección entre los diversos ecosistemas costeros interrelacionados. Debe hacerse notar, que la

vulnerabilidad que un determinado tipo de sistema ambiental presente puede repercutir en los ambientes aledaños, conectados entre sí, haciendo una sinergia y magnificación del impacto sobre los recursos naturales existentes.

Los beneficios que provee un arrecife de coral saludable son:

- Hábitat: Hogar de mas de 1 millón de especies acuáticas incluidas cientos de especies de peces.
- Ingresos: Miles de millones de dólares y una gran cantidad de trabajos en más de 100 países alrededor del mundo
- Alimento: Para la gente que vive cerca de los arrecifes de coral especialmente en zonas insulares.
- Protección: Es una barrera natural de protección a ciudades costeras, comunidades y playas.

Se han hecho diversos intentos para estimar el valor de los arrecifes de coral en términos monetarios. Los beneficios de los arrecifes de coral se pueden categorizar en dos tipos:

- Valor de uso directo: pesquerías e industria turística.
- Valor de uso indirecto: beneficios de protección de zona costera.

De acuerdo con estimaciones de la Organización de Naciones Unidas (ONU), el valor económico total de arrecifes de coral va desde 100 000 a 600 000 dólares americanos en $\text{km}^2\cdot\text{año}^{-1}$ (UNEP-WCMC, 2006).

Para el Caribe mexicano, se calcula que el SAM es visitado diariamente por un promedio de 2 500 personas a un costo de \$60 dólares americanos, lo cual representa un ingreso diario de \$ 150 000.00 dls ó \$4 500 000.00 mensuales, es decir esta cantidad representa los servicios ambientales que ofrece este eco-



Comunidad de coral del caribe mexicano

<http://www.cancuncd.com/m-dive-coral-reef-pictures/riviera-maya-dive-15.jpg>

sistema a las comunidades ribereñas de dicha zona.

PASTOS MARINOS

Estas fanerógamas marinas se desarrollan en suelos suaves como limos y arenas constituyendo grandes extensiones conocidas como praderas o ceibadales, con una alta productividad primaria de 500 a 4 000 g C/m²/año. Tienen tres funciones básicas, son una fuente primordial de alimentación para diversas especies, específicamente una gran cantidad de vertebrados, por lo que influyen en la biomasa de estos organismos y contribuyen significativamente a la estabilidad sedimentaria, por lo que se consideran “retenedores de suelo” (Gutiérrez-Aguirre *et al.*, 2000).

La composición y distribución específica de este ecosistema costero depende de la tem-

peratura, penetración de luz, salinidad, turbidez, concentración de sales y minerales, del oxígeno disuelto, niveles de contaminantes e hidrodinámica, por lo que se restringe a la plataforma continental donde prevalecen estas condiciones adecuadas para su desarrollo óptimo. Se ha observado que la influencia de los pastos se extiende hacia otros ecosistemas mediante interacciones físicas, al producir y atrapar sedimentos, estas praderas exportan materia orgánica disuelta y particulada transfiriendo energía.

La mayor parte de la variabilidad en los límites de profundidad para los pastos marinos puede explicarse en términos de las diferencias en la atenuación luminosa en los ambientes que estas especies ocupan; sin embargo se han observado discrepancias en los intervalos de profundidad donde estas plantas habitan y esta zonación puede derivarse de la diversidad

en las estrategias de crecimiento y en la arquitectura. Los pastos marinos frecuentemente colonizan en profundidades cercanas a los 20 m, mayor que las registradas para especies de agua dulce y estas diferencias se pueden atribuir a que profundidades mayores a 10m corresponden, en la mayoría de los lagos, al hipolimnion donde la temperatura baja del agua detiene el desarrollo de las angiospermas en intensidades luminosas bajas, mientras que la termoclina marina, particularmente en mares tropicales, tiende a ser más profunda (Duarte, 1991).

En Quintana Roo se cuenta con 8 especies, las más comunes (en orden de importancia) son la hierba tortuga, *Thalassia testudinum* Koning (1805), la hierba manatí, *Syringodium filiforme* y *Halodule wrightii*. En estudios recientes, se ha encontrado que dos agentes estructurales mayores de esta comunidad, *T. testudinum* y el alga calcárea *Halimeda spp.* son bastante resistentes a ser enterradas por sedimento y remoción, mientras que otros pastos y macroalgas desaparecen casi completamente. Esto implica que después de huracanes mayores, algunas plantas sobreviven (resistencia), otras se recuperan rápidamente (resiliencia), mientras que otras requieren mucho tiempo (años) para volver a colonizar. Por lo tanto, la comunidad puede cambiar drásticamente después de una perturbación dependiendo de la resistencia y resiliencia de las especies que la componen.

Los factores ambientales limitantes, para los pastos marinos son la cantidad de irradiación en un área determinada, el nivel de turbidez como una medida indirecta del parámetro luminoso que estará afectado por las condiciones naturales propias de la zona como tipo de sedimento, oleaje, circulación

costera así como por aquellas de tipo antropogénico como descargas de desechos urbanos e industriales lo que aumenta el contenido de sólidos suspendidos y obstaculiza el paso de la luz solar, además de los eventos meteorológicos extremos como huracanes de categoría alta que contribuyen a la remoción del fondo marino. Desafortunadamente, no se cuentan con datos confiables y consistentes del grado de turbidez o transparencia del agua, factor que ayudaría a estimar el índice de impacto ambiental (MED_{ij}); sin embargo se puede inferir que donde existan estos ecosistemas de relevancia ecológica y sean sometidos a condiciones de baja transparencia por periodo prolongados o frecuentes, tendrán índices de impacto ambiental mayores con una disminución de la productividad y del desarrollo de las fanerógamas marinas, de su capacidad de colonización y sobrevivencia por lo que la vulnerabilidad se incrementará, dando como consecuencia el decremento en la calidad y tipo de servicios ecológicos que brindan este tipo de ambientes costeros y marinos.

PESQUERÍAS

Los planes de desarrollo nacional han impuesto condiciones críticas al equilibrio ecológico existente en las zonas costeras y ribereñas. Las obras portuarias, industriales y turísticas, aunadas a la creciente explotación de recursos pesqueros, ocasionan alteraciones ambientales de diferente magnitud y persistencia, lo cual afecta de manera directa a la pesca ribereña artesanal. Por sus implicaciones socioeconómicas, la pesca ribereña artesanal ha sido considerada reiteradamente, por organismos nacionales e internacionales, como un elemento esencial en los planes integrales de



Pasto marino *Thalassia testudinum* y tortuga de carey *Eretmochelys imbricata* en la Bahía de Akumal, Q. Roo. <http://ceakumal.org/images/turteating.jpg>

ordenamiento de la zona costera.

En la actualidad, la declinación en la producción de las especies acuáticas en general se ha asociado a la pérdida de diversos tipos de hábitats estuarinos y ribereños, como la vegetación acuática sumergida, vegetación marginal halófila, substratos someros lodosos, arrecifes ostrícolas y restos de vegetación arbórea. Sin embargo, es pertinente señalar que la declinación en el tamaño de las poblaciones es causada por una serie de procesos biológicos, geológicos, físicos y químicos, tales como la alteración física de los hábitats, la modificación de los influjos de agua dulce y la contaminación crónica o accidental.

Los recursos pesqueros son los bienes más abundantes y valiosos que la franja costera ofrece para satisfacer las necesidades de una creciente población. Sin embargo, estos recursos, no se utilizan ni con la intensidad ni

con el cuidado que debe de ser, reflejándose en quienes se dedican a dicha actividad. La pesca en el litoral de Sinaloa, Tabasco y Quintana Roo es una actividad socioeconómica de primer orden.

Quintana Roo

La región costera de Quintana Roo es una estrecha franja arenosa de unos 800 km y es la frontera marítima con el Mar Caribe. En ella se desarrollan actividades de pesca comercial, turismo, científica y de protección (Dachary y Arnaiz, 1989). La producción pesquera litoral en Quintana Roo es muy baja, el volumen total es de 2 054 toneladas al año; está representada por mero, langosta, tiburón y cazón, peto, caracol, camarón y mojarra. El mero y la langosta representan más del 50% de la captura total del estado, 32.6 y 20% respectivamen-

te; los organismos restantes se capturan por debajo de las 400 toneladas anuales. La acuicultura en el Estado es nula o no representa un valor significativo.

Tabasco

En el estado de Tabasco se encuentra una gran riqueza hídrica íntimamente asociada a una gran diversidad de especies animales y vegetales: en promedio el 23 % de la biodiversidad nacional de vertebrados y 53 % de los humedales de agua dulce de la nación. Es probable que estos datos sean aún más altos y que exista un subregistro asociado a la falta de resultados publicados en revistas accesibles. Otro factor que debe considerarse es la degradación de las cuencas con la fragmentación de hábitats, cuyo efecto sobre la diversidad faunística no ha sido valorado.

En la reserva de la biosfera Pantanos de Centla, las poblaciones del pasto cintilla *Vallisneria americana* han disminuido dramáticamente, lo cual tendrá repercusiones en el valor del hábitat para especies de peces y macroinvertebrados, tanto de importancia ecológica como económica, que lo utilizan para su protección, crecimiento y alimentación, por lo que es necesario evaluar las condiciones de los cuerpos de agua y establecer programas para la restauración de estos hábitats.

El volumen de la producción total pesquera es de 30 451 toneladas anuales y la producción acuícola es de 19 255 toneladas por año. En este Estado el dominio de los productos pesqueros litorales lo tiene el ostión con una captura anual de 16 391 toneladas anuales, lo que representa el 54%, así como para la producción acuícola con 15 488 toneladas (80% de la captura total). En Tabasco con 24 granjas con 330 ha. Los grupos biológicos que se

pescan son básicamente ostión, mojarra, robalo, bandera, peto y jaiba, y los que se cultivan son ostión, mojarra, camarón, langostino y carpa.

Sinaloa

Sinaloa cuenta con el mayor número de unidades comerciales de producción de cultivo de camarón en el país, de acuerdo con la Carta Nacional Pesquera (Sargarpa-INP, 2006), se registraron 488 granjas con una superficie de 41 557 ha en 2003; Conapesca para 2006 reporta 592. En Nayarit se registraron 60 granjas con una superficie de 3 252 ha (Sargarpa-INP, 2006), de ahí la importancia que tenga este Estado sobre la pesquería a nivel nacional.

El volumen total de organismos capturados en la zona litoral de Sinaloa es de 224 639 toneladas año⁻¹. Los túnidos representan 39.5% de la pesca litoral con un volumen de 88 661 toneladas por año; mientras que el tiburón y el cazón representan 2.3%. Los grupos biológicos son túnidos, sardinas, camarones, jaibas, mojarras, tiburones y cazones; el volumen de producción acuícola es de 31 061 toneladas año⁻¹. El camarón es el producto que representa la mayor parte con 81% de la captura total (25 159 toneladas año⁻¹); el ostión es el recurso con menor captura (< 1%), 27 toneladas anuales.

Tomando en cuenta estos valores de captura tanto pesquera como acuícola, se estimó el grado de vulnerabilidad de los recursos pesqueros para las tres entidades litorales analizadas (tabla 9), obteniendo la siguiente categorización de fragilidad debido a las amenazas del incremento del nivel del mar y de los eventos hidrometeorológicos extremos Sinaloa > Tabasco > Q. Roo.

ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS (ANP)

Para complementar este análisis, se consideraron otros criterios ecosistémicos de jerarquía más alta que engloban una mayor biodiversidad, también contemplan el aprovechamiento sustentable de la misma por núcleos de población humana específicos, se trata de las áreas naturales protegidas (ANP) a nivel nacional y de los sitios Ramsar en escala internacional.

Desde hace varias décadas los estudiosos del ambiente, su conservación y aprovechamiento razonado, propusieron la creación de áreas naturales protegidas como uno de los mecanismos para conservar la naturaleza, perfectible, con el objetivo fundamental de preservar los recursos para las generaciones venideras. En el contexto del desarrollo regional sustentable, las ANP permiten la vinculación entre las actividades socioeconómicas y la conservación mediante los procesos de ordenamiento ecológico de México.

Las áreas protegidas fueron definidas como porciones terrestres o acuáticas del territorio nacional representativas de los diversos ecosistemas, en donde el ambiente original no ha sido esencialmente alterado y que producen beneficios ecológicos cada vez más reconocidos y valorados; se crean mediante un decreto presidencial y las actividades que pueden llevarse a cabo en ellas se establecen de acuerdo

con la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA). Se clasifican en seis categorías: reservas de la biosfera, parques nacionales, monumentos naturales, áreas de protección de recursos naturales, áreas de protección de flora y fauna, santuarios (Conanp, 2009).

RESERVAS DE LA BIOSFERA (RB)

Son áreas representativas de uno o más ecosistemas no alterados por la acción del ser humano o que requieran ser preservados y restaurados, en los cuales habitan especies representativas de la biodiversidad nacional, incluyendo a las consideradas endémicas, amenazadas o en peligro de extinción. Existen reservas de la biosfera en Quintana Roo y Tabasco, cuyos datos se enlistan en la tabla 10.

ÁREAS DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA (APFYF)

Son áreas establecidas de conformidad con las disposiciones generales de la LGEEPA y otras leyes aplicables en lugares que contienen los hábitats de cuya preservación dependen la existencia, transformación y desarrollo de especies de flora y fauna silvestres. Los tres estados litorales evaluados cuentan con áreas de protección de flora y fauna, (tabla 11).

Tabla 9. Categorización de fragilidad pesquera debido a las amenazas del incremento del nivel del mar y de los eventos hidrometeorológicos extremos.

Región costera	Volumen de producción pesquera (pesca y acuicultura) (toneladas)	Grado de vulnerabilidad
Sinaloa	255 770	3
Tabasco	49 706	2
Quintana Roo	2 054	1

Tabla 10. Reservas de la biosfera.

Área natural protegida	Decreto de creación	Superficie en ha.	Ubicación	Municipios	Ecosistemas
Arrecifes de Sian Ka'an	02-feb-98	34 927	Quintana Roo	Frente a la costa de los Municipios de Solidaridad y Felipe Carrillo Puerto.	Arrecife coralino
Banco Chinchorro	19-jul-96	144 360	Quintana Roo	Othon P. Blanco.	Arrecife coralino
Sian Ka'an	20-ene-86	528 148	Quintana Roo	Cozumel y Felipe Carrillo Puerto.	Selva mediana y baja subperennifolia, selva baja caducifolia, manglar, tinal, marismas, petenes, vegetación de dunas costeras y arrecifes.
Tiburón Ballena	05-jun-09	145 988	Quintana Roo	Lázaro Cardenas e Isla Mujeres	Ecosistema, dulceacuícolas, estuarinas, marinos y arrecifales
Pantanos de Centla	06-ago-92	302,707	Tabasco	Centla, Jonuta y Macuspana.	Pantanos y marismas, selva mediana y baja subperennifolia y manglar.

SANTUARIOS (S)

Áreas establecidas en zonas caracterizadas por su considerable riqueza de flora o fauna o por la presencia de especies, subespecies o hábitat de distribución restringida. Incluye cañadas, vegas, relictos, grutas, cavernas, cenotes, caletas u otras unidades topográficas o geográficas que requieran ser preservadas o protegidas. Este tipo de áreas protegidas se presentan en Quintana Roo y Sinaloa (tabla 12).

PARQUES NACIONALES (PN)

Áreas con uno o más ecosistemas que se signifiquen por su belleza escénica, su valor científico, educativo de recreo, su valor histórico, por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo, o por otras razones de interés general. En la tabla 13 se presentan los parques nacionales de Quintana Roo.

Para propósitos de la evaluación de la vulnerabilidad ecológica costera, se estimó el número de áreas naturales protegidas existentes hasta la fecha en cada una de las tres entidades litorales que se seleccionaron. Asimismo, se consideró la superficie total oficial de estas áreas para poder calcular el grado de vulnerabilidad que pueden poseer. En la tabla 14 se presenta esta información y puede observarse que Quintana Roo cuenta con la cantidad mayor de ANP, en total posee 16 áreas protegidas de diversa índoles, desde reservas de la biosfera, santuarios, parques nacionales hasta áreas de protección de flora y fauna silvestre con aproximadamente 1×10^6 ha; en segundo lugar está Sinaloa con 4 áreas protegidas, dos santuarios y dos para proteger la flora y la fauna silvestres con aproximadamente 100 000 ha; y en tercer lugar está Tabasco el cual contaba con solamente la reserva de la biosfera de los Pantanos de Centla y recientemente fue

Tabla 11. Áreas de protección de flora y fauna.

Área natural protegida	Decreto de creación	Superficie en ha.	Ubicación	Municipios	Ecosistemas
Otoch Ma'ax	Aviso para establecimiento de Area 01/06/2000 Decreto de creación 05/06/2002	5 367	Yucatán y Q.Roo	Yuc: Valladolid Q.Roo: Solidaridad	Selva mediana subperenifolia Selva baja inundable sabana, yetel
Uaymil	Decreto de Creación: 17-11-1994. Fe de erratas: 22/ 11/ 1994 Aviso sinap: 07/ 06/ 2000	89 118	Quintana Roo	Felipe Carrillo Puerto y Othon P. Blanco.	Selva baja inundable, selva mediana, manglar.
Yum Balam	Decreto de Creación: 06-jun-94 . Aviso SINAP: 07/ 06/ 2000	154 052	Quintana Roo	Lázaro Cárdenas e Isla Mujeres.	Selva tropical mediana-baja y bajas inundable; bosque de manglar chaparro o mangle rojo.
Bala'an Ka'ax	03-mayo-05	128 390	Quintana Roo	-	-
Manglares de Nichupte	26-feb-2008	4 257	Quintana Roo	-	-
Cañón de Usumacinta	22 de septiembre de 2008	46 128	Tabasco	Tenosique	Selva alta perennifolia
Meseta de Cacaxtla	Aviso para el establecimiento de dicha área: 04/ 08/ 2000. Decreto de Creación: 27/ 11/ 2000	50 862	Sinaloa	San Ignacio y Mazatlán	Bosque tropical deciduo; selva baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia, así como matorral xerófilo, esteros y las lagunas
Islas del Golfo de California	Decreto de Creación: 02-ago-Acuerto de Recategorización: 07/ 06/ 2000. Programa de manejo:17/ 04/ 2001. Decreto que expropia el Ejido Alfredo V. Bonfil en favor del APFF:16/ 01/ 2003	321 631	B. C., B. C. Sur, Sonora y Sinaloa		Matorral xerófilo sarcocaul y sarcocrasicaule, selva baja caducifolia espinosa.

Tabla 12. Santuarios de Quintana Roo y Sinaloa.

Área Natural Protegida	Publicaciones	Superficie en ha	Ubicación
Playa de la Isla Contoy	Decreto de Creación: 29/ 10/ 1986 . Acuerdo de Recategorización: 16/ 07/ 2002	0	Quintana Roo
Playa Ceuta	Decreto de Creación: 29/ 10/ 1986. Acuerdo de Recategorización: 16/ 07/ 2002	77	Sinaloa
Playa el Verde Camacho	Decreto de Creación: 29/ 10/ 1986 Acuerdo de Recategorización: 16/ 07/ 2002	63	Sinaloa

Tabla 13. Parques Nacionales de Quintana Roo.

Área natural protegida	Decreto de creación	Superficie en ha.	Ubicación	Municipios	Ecosistemas
Arrecifes de Cozumel	19-jul-96	11 988	Quintana Roo	Cozumel.	Arrecife coralino.
Arrecife de Puerto Morelos	02-feb-98	9 067	Quintana Roo	Benito Juárez.	Arrecife coralino
Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc	19-jul-96	8 673	Quintana Roo	Isla Mujeres y Benito Juárez.	Arrecife coralino
Isla Contoy	02-feb-98	5 126	Quintana Roo	Isla Mujeres.	Manglar, selva baja caducifolia, cocotal, zona costera y halófitas
Tulum	23-abr-81	664	Quintana Roo	Felipe Carrillo Puerto.	Selva mediana, manglar y vegetación de dunas costeras.
Arrecifes de Xcalak	27-nov-00	17,949	Quintana Roo	Othon P. Blanco	Arrecifes de coral

Tabla 14. Grado de vulnerabilidad ecológica de los estados litorales evaluados.
Criterio ecológico: Áreas Naturales Protegidas (ANP).

Estado	No. de ANP	Tipos y no. de ANP	Superficie de ANP (ha)	Grado de vulnerabilidad
Tabasco	2	1 RB, 1APFyFS	348 835	2
Quintana Roo	16	4RB, 1S, 6 PN, 5 APFyFS	1 004 075	1
Sinaloa	4	2S, 2APFyFS	106 002	3

RB: Reserva de la Biosfera; APFyF: Área de Protección de Flora y Fauna; S: Santuario; PN: Parque nacional.

decretada la región del cañón del Usumacinta (22 de septiembre de 2008) como un área de protección de flora y fauna silvestre (DOF, 2008), haciendo un total de casi 350 000 ha.

De forma lineal, al hacer el cálculo del grado de vulnerabilidad que tienen estas entidades litorales, Sinaloa obtendría el valor más alto (3) influenciado directamente por la dimensión de la superficie protegida reportada, Tabasco estaría en una categoría intermedia de fragilidad y Quintana Roo sería la de mayor resiliencia. Sin embargo, como se ha discutido a lo largo de este capítulo, el Caribe mexicano cuenta con el ecosistema de arrecife de coral que puede proporcionar un gran número de beneficios internos y externos al ambiente arrecifal, pero que está sujeto a presiones ambientales tan puntuales como el aumento de 1-2°C y ocurrir blanqueamiento, tan graves como ser destruido por huracanes categoría 4-5, y tan frecuentes como recibir los aportes de desechos urbanos no tratados encaminándolos a situaciones de eutrofización y por tanto de colocarlos en riesgo de disminuir su diversidad específica con las alteraciones ecológicas que implica. Esta dinámica de los ecosistemas en un todo y en un continuo, vuelve difícil y complejo establecer una categorización precisa del grado de vulnerabilidad que una región pueda tener sobre otra, ya que cada una de estas localidades cuenta con ecosistemas valiosos, con potencialidad de aprovechamiento razonado, por lo que son susceptibles de ser alteradas una vez que la naturaleza o el hombre mismo provoca la ruptura del delicado equilibrio responsable del buen funcionamiento de estos ambientes.

El caso de Sinaloa, es importante señalarlo ya que en la región sur de este Estado del Pacífico subtropical mexicano y en la zona

norte del vecino estado de Nayarit se localiza uno de los ecosistemas más importantes del mundo, los humedales conocidos como Marismas Nacionales, donde el manglar es un área fundamental, lo que le ha valido ser designado como un sitio Ramsar, las amenazas actuales y futuras derivadas de las actividades humanas y de los eventos naturales acelerados por las mismas, entre ellos los propiciados por el cambio climático global, tendrán un impacto en estos ecosistemas costeros y el grado de conservación que tengan será una característica que los haga resistir y sobrevivir adecuadamente a estas presiones; en la actualidad, esta región natural tan importante no tiene estatus de Área Natural Protegida, se esperaría que en poco tiempo se logre la designación de ANP y con ello la procuración de recursos y esfuerzos para su conservación y aprovechamiento sostenible a largo plazo. Tabasco recientemente ha sido beneficiado con el decreto de una nueva área protegida, la región del Usumacinta, vasta en flora y fauna silvestre, por lo que este reconocimiento oficial era necesario para promover con mayor énfasis la conservación de estos recursos naturales y evitar su degradación ya que el proceso de deterioro favorece la fragilidad y aumenta la vulnerabilidad ecológica, ante eventos naturales o antropogénicos. En esta entidad es frecuente que las condiciones meteorológicas extremas sucedan y provoquen grandes inundaciones, rebasando la capacidad natural de los ambientes para funcionar adecuadamente en volúmenes tan grandes de agua, por lo que el riesgo de grandes impactos hacia los recursos naturales es una realidad hoy en día para este litoral.

La vulnerabilidad ecológica de una región, un estado o un país, debe evaluarse de forma

integral ya que si se considera sólo un aspecto de la ecología, posiblemente se incurra en una valoración limitada de este problema.

Es necesario incluir el criterio de las Áreas Naturales Protegidas (ANP), ya que en esta conceptualización operativa están contemplados aspectos de biodiversidad, de utilización planificada de los recursos, de educación ambiental, entre otros, por lo que es de carácter integral y permite promover la designación de nuevas áreas protegidas, proporcionando un territorio nacional ordenado con miras a la conservación de los recursos naturales y por tanto, a fortalecer su capacidad de resistencia a las amenazas que se presenten.

SITIOS RAMSAR

La convención relativa a los humedales de importancia internacional, especialmente como hábitat de aves acuáticas (Convención de Ramsar), fue firmada en la ciudad del mismo nombre, en Irán, el 2 de febrero de 1971, pero entró en vigor hasta 1975.

El objetivo de este convenio internacional es *“la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales, regionales y nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo”*. En el 2008, 158 países se habían integrado a la Convención, con lo que se protegieron 1 401 humedales con una superficie de 146 mil cuatro millones de hectáreas, que se incluyeron en la lista de Humedales de Importancia Internacional de Ramsar. Cada tres años los países miembros se reúnen para evaluar los progresos y compartir conocimientos y experiencias, por lo que el 2 de Febrero es considerado Día Mundial de los Humedales. En el 2008 México incorporó 45

nuevos sitios a esa convención.

México es el segundo país del mundo y el primero en el continente Americano por la superficie de humedales reconocidos por la Convención Ramsar, con ocho millones de hectáreas de ese ecosistema. A continuación se presentan los Sitios Ramsar de Quintana Roo, Sinaloa y Tabasco.

Quintana Roo

- Yum Balam, Área de Protección de Flora y Fauna. 02/02/04; Quintana Roo; 154,052 ha; 21°28'N 087°19'W.
- Bala'an K'aax. Reserva Estatal. 02/02/04; Quintana Roo; 131,610 ha; 19°19'N 089°03'W
- Laguna de Chichankanab. 02/02/04; Quintana Roo; 1,999 ha; 19°52'N, 088°46'W
- Manglares de Nichupté. 02/02/08; Quintana Roo; 4,257 ha; 21°04'N 086°48'W
- Parque Nacional Arrecifes de Cozumel. Parque Nacional. 02/02/05; Quintana Roo; 11,987 ha; 20°16'N 087°02'W
- Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. Parque Nacional. 02/02/04; Quintana Roo; 9,066 ha; 20°55'N 86°50'W.
- Parque Nacional Arrecifes de Xcalak. Parque Nacional. 27/11/03; Quintana Roo; 17,949 ha; 18°20'N 087°48'W.
- Parque Nacional Isla Contoy. Parque Nacional. 27/11/03; Quintana Roo; 5,126 ha; 21°29'N 086°47'W.
- Playa Tortuguera X'cachel-X'cachelito. Santuario. 02/02/04; Quintana Roo; 362 ha; 20°20'N 87°21'W.
- Reserva de la Biosfera Banco Chichorro. Reserva de la Biosfera. 02/02/04;

Quintana Roo; 144,360 ha; 18°35'N 87°20'W

- Sian Ka'an. Reserva de la Biosfera. 27/11/03; Quintana Roo; 652,193 ha; 19°30'N 087°37'W. Patrimonio Cultural de la Humanidad, UNESCO.
- Otoch Ma'ax Yetel Kooch

Tabasco

- Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla. Reserva de la Biosfera. 22/06/95; Tabasco; 302,706 ha; 18°18'N 092°27'W.

Sinaloa

- Ensenada de Pabellones. Área Natural Protegida. 02/02/08; Sinaloa; 40,639 ha; 24°26'N 107°34'W.
- Laguna Huizache-Caimanero. 02/02/07; Sinaloa; 48,283 ha; 22°50'N 105°55'W.
- Laguna Playa Colorada-Santa María La Reforma. 02/02/04; Sinaloa; 53,140 ha; 25°02'N 108°09'W.
- Marismas Nacionales. 22/06/95; Sinaloa, Nayarit; 200,000 ha; 22°08'N 105°32'W

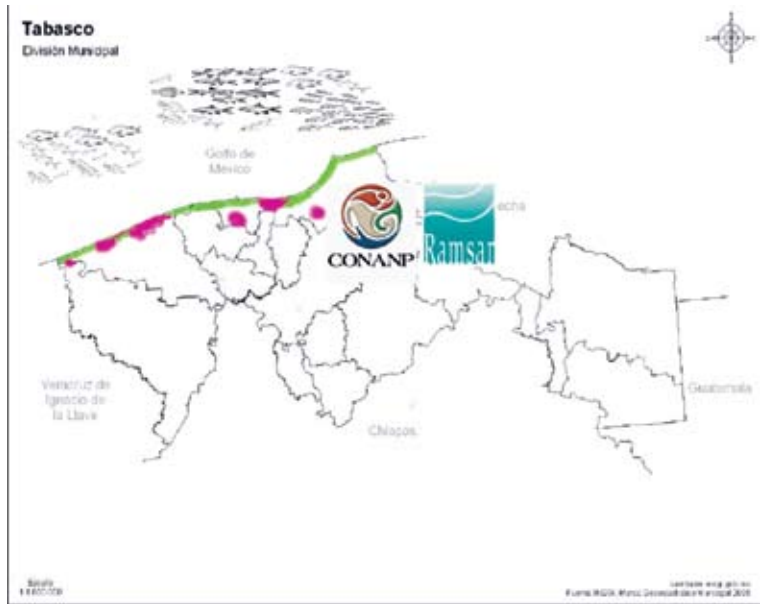
- Playa Tortuguera El Verde Camacho. Santuario. 02/02/04; Sinaloa; 6,454 ha; 23°24'N 106°32'W.
- Sistema Lagunar Ceuta. Santuario. 02/02/08; Sinaloa; 1,497 ha; 24°02'N 107°04'W.
- Sistema Lagunar San Ignacio-Navachiste-Macapule. 02/02/08; Sinaloa; 79,873 ha.; 25°26'N 108°49'W.

De acuerdo a los datos anteriores se obtuvo el siguiente grado de vulnerabilidad (tabla 15) Tabasco > Sinaloa > Q. Roo, reforzando el patrón mostrado al considerar las ANP y respaldando el caso de Marismas Nacionales para ser un Área Natural Protegida.

A continuación se presentan los tres estados de estudio donde se esquematizan los parámetros analizados.

Tabla 15. Grado de vulnerabilidad ecológica de los estados litorales evaluados. Criterio ecológico: Sitios Ramsar.			
Estado	No. de sitios Ramsar	Superficie (ha)	Grado de vulnerabilidad
Tabasco	2	302 706	3
Quintana Roo	12	1 138 330	1
Sinaloa	7	428 461	2





CONCLUSIÓN

Las costas mexicanas enfrentan graves efectos negativos, no sólo por las actividades que ahí se desarrollan sino por las alteraciones que tienen lugar en el continente, y que llegan al mar, así como aquéllas derivadas de un alto riesgo ambiental que están comprometiendo seriamente su integridad ecológica. El impacto de los fenómenos climáticos (fenómenos hidrometeorológicos extremos como son las

tormentas, huracanes, ciclones e inundaciones) es uno de los principales eventos que influyen en el estado de salud de una zona costera. Para el criterio ecosistémico de manglar, el comportamiento decreciente del grado de vulnerabilidad fue el siguiente:

Tabasco > Quintana Roo > Sinaloa

Tabla 16. Grado de vulnerabilidad ecológica de los estados litorales evaluados. Criterios ecológicos e índice de impacto ambiental.								
Entidad	Cobertura manglar	Arrecife de coral	ANP	Ramsar	Recursos pesqueros	MED _{ij} (manglar)	MED _{ij} (arrecife)	Grado de vulnerabilidad e impacto ambiental
Tabasco	3	NR	2	3	2	0.778	NR	ALTO
Q. Roo	2	3	1	1	1	0.82	0.9	BAJO
Sinaloa	1	NR	3	2	3	0.82	NR	MEDIO
NR. no reportado								

Al considerar los arrecifes de coral localizado solamente en la región de Quintana Roo se estimó un grado de vulnerabilidad y de impacto ambiental altos (categoría 3). Al evaluar la vulnerabilidad costera derivada de los recursos pesqueros, el patrón fue:

Sinaloa > Tabasco > Quintana Roo

En función de las áreas protegidas nacionales, el comportamiento de la vulnerabilidad costera fue:

Sinaloa > Tabasco > Quintana Roo

Mientras que al tomar en cuenta los sitios Ramsar, se invirtió el patrón entre Sinaloa y Tabasco ya que para el Caribe mexicano fue similar:

Tabasco > Sinaloa > Quintana Roo

Por lo que, el manglar y los sitios Ramsar del estado de Tabasco, los arrecifes de coral de Quintana Roo, las pesquerías y las ANP de Sinaloa, son las más vulnerables a los cambios climáticos y a los fenómenos hidrometeorológicos extremos; estos fenómenos podrían aumentar el índice de pérdida de la diversidad biológica.

Conjuntando los resultados obtenidos del grado de vulnerabilidad ecosistémica, de los criterios ecológicos generales y del índice básico de impacto ambiental MED_{ij} , en la tabla 16 se presenta la integración del comportamiento mostrado de forma individual por los estados litorales evaluados en función de los diversos criterios y parámetros considerados. Tabasco, es la entidad litoral mexicana en esta aproximación que resulta con el mayor grado de vulnerabilidad y de impacto ambiental, seguido por Sinaloa y por Quintana Roo.

El grado de conservación o deterioro del manglar, la presencia de áreas protegidas y la abundancia y diversidad de recursos pesqueros, determinan el grado de la vulnerabilidad en una región y con ello las consecuencias que puedan derivarse de eventos naturales o antropogénicos extraordinarios; una evaluación previa de los posibles escenarios, debe reducir en contar con medidas de prevención, o en su caso de restauración de ecosistemas alterados para aumentar su resiliencia y con ello su permanencia ante las amenazas que puedan presentarse.

No obstante a las relativas limitaciones de la información científica y técnica disponible, México debe iniciar urgentemente la formulación de políticas y la concertación de esfuerzos para desarrollar capacidades de respuesta, nacionales y locales, ante los impactos previsibles del cambio climático. Se trata de un problema de seguridad estratégica nacional que tiene que ver con la seguridad de las personas y de sus bienes materiales y culturales, con la integridad de los ecosistemas y sus servicios ambientales, así como las infraestructuras de generación y distribución de energía, de comunicación, de servicios urbanos e industriales y, en general, con la seguridad de los asentamientos humanos, muchos de los cuales se encuentran en zonas ya expuestas a riesgos de desastres naturales.

Por lo que, es necesario establecer sistemas de monitoreo e indicadores que ayuden a predecir la adaptación de los ecosistemas al cambio climático. Son necesarios nuevos instrumentos para el monitoreo de los efectos del cambio climático, especialmente los que sirvan para una “alerta temprana” de los primeros efectos o consecuencias.

También es necesario establecer medidas para que sectores particularmente amenazados por el cambio climático (turismo, pesca, agropecuaria, recursos hídricos, entre otros)

comiencen a orientar sus planes de mediano plazo incorporando esta variable. Es clave la forma de actuar frente a grupos empobrecidos o marginados por su mayor vulnerabilidad.

RECOMENDACIONES Y OPCIONES DE ADAPTACIÓN

Los arrecifes coralinos, los manglares y en menor grado los pastos marinos sirven de barrera y protegen en gran medida a la zona costera. No obstante, muchos de ellos también son sensibles al acelerado ascenso del nivel del mar. Por ejemplo, los manglares protegen contra los ciclones, las tormentas y las mareas. Desgraciadamente, muchos manglares ya sufren la presión de la explotación excesiva, lo que reduce la resistencia al ascenso previsto del nivel del mar. Por lo tanto, las estrategias de adaptación deben centrarse en la reducción de estas presiones externas.

Para las áreas donde existan actividades relacionadas con la industria petrolera, se recomienda:

- Utilización mínima del bosque de manglar en todas las fases
- Interrupción mínima del flujo de agua dulce hacia los manglares
- Alteración mínima del flujo del agua de las mareas hacia los manglares y dentro de ellos
- Alteración mínima de la vegetación
- Alteración mínima del suelo
- Mantenimiento (cuando sea posible) de franjas amortiguadoras a lo largo de la costa, los ríos, los arroyos y las corrientes
- Control de la contaminación del ambiente

Dada la frágil naturaleza de los ecosistemas de manglar, las actividades petroleras deberán reducir el posible efecto de sus operaciones sobre el manglar, a través de:

- una planificación minuciosa de los levantamientos sísmicos, de las perforaciones exploratorias y de la provisión de servicios contingentes
- una selección de aquellas técnicas y equipos que minimicen la necesidad de una infraestructura de apoyo dentro del manglar
- un cuidadoso control de las actividades para identificar los efectos inesperados en una primera fase.

La industria petrolera considera que en cada etapa del desarrollo de petróleo y gas hay procedimientos que deben ser puestos en práctica, para prevenir posibles daños al manglar y minimizar efectos inevitables.

Levantamientos exploratorios

- Los vuelos a baja altura deberán ser programados de tal manera que minimice las alteraciones de las crías, migraciones o patrón de crecimiento de las especies sensibles.
- Deberá minimizarse la extensión de las actividades sísmicas en los manglares. Se debe prestar atención a no alterar el patrón de drenaje.

- La introducción de vehículos pesados es inadecuada ya que requieren una vía de acceso de 4 metros de ancho y una base sólida para que los sostenga.
- Las técnicas de agua, como cañones de aire y de agua, requieren profundidades de más de 2-3 metros y gran cantidad de equipos auxiliares así como el uso de gabarras de rastreo poco profundas. Estas técnicas no son una opción viable en sistemas costeros y poco profundos como los manglares.
- Cuando se utilizan técnicas de explosivos, los agujeros deben ser tapados para evitar la erosión, mantener la hidrología de la superficie y disminuir el peligro para el hombre y para la fauna
- Las líneas sísmicas deben ser máximo de 1.5 a 2 metros de ancho, debe evitarse la destrucción de grandes extensiones de manglar y reducir los impactos hidrológicos.

Arrecifes de coral (Wilkinson y Souter, 2008)

Expertos de todo el mundo han elaborado las siguientes recomendaciones de alta prioridad para conservar los arrecifes, otras más se encuentran dentro del reporte global:

- **Combatir urgentemente el cambio climático global** - a menos de que se produzcan dramáticas reducciones en las tasas de emisión de gases efecto invernadero, se verán amenazados a largo término los arrecifes de coral.

Los científicos estiman que el mundo tiene de 8 a 10 años antes de que el cambio climático comience a devastar los arrecifes coralinos.

- **Minimizar las presiones humanas sobre los arrecifes** - daños por sobrepesca y pesca destructiva, aumento de la sedimentación, drenaje de nutrientes y otros contaminantes y pérdida de hábitat por desarrollo insostenible. Controlando estas amenazas se mejorará la capacidad de los arrecifes para resistir mejor las pérdidas por cambio climático. Países en desarrollo, requieren de asistencia para mejorar los métodos de captura pesquera, manejo costero basado en la comunidad y desarrollo de nuevas alternativas de trabajo que disminuyan la presión sobre los arrecifes de coral.
- **Incluir más áreas de arrecifes coralinos dentro de Áreas Naturales Protegidas (ANP)** - las cuales deberán contener amplias zonas de pesquerías y estar conectadas a la red de ANP regionales con manejo efectivo y apoyo gubernamental.
- **Proteger los arrecifes remotos** - en el futuro, las más grandes reservas de biodiversidad estarán en los arrecifes alejados de las grandes masas continentales y de poblaciones humanas. Si éstos están protegidos, podrán servir como semilleros de larvas y juveniles de organismos para arrecifes que se encuentren deteriorados. Los países desarrollados tienen la mejor gobernabilidad y capacidad para proteger los arrecifes en sus aguas jurisdiccionales.
- **Mejorar la capacidad de la aplicación de las regulaciones de las ANP** - Sistemas efectivos y garantizables de gobernabilidad son esenciales para regular

el acceso y explotación en ecosistemas bajo manejo. Países en desarrollo necesitan asistencia para establecer sistemas efectivos de aplicación que sean compatibles con los valores culturales y prácticas locales.

- **Ayudar a mejorar la toma de decisiones con un adecuado monitoreo ecológico y socioeconómico** - El incremento en el monitoreo es necesario para proveer de la mejor información a los manejadores de recursos naturales y tomadores de decisiones, sobre los impactos inminentes de los efectos del cambio climático para reducir las amenazas a los arrecifes coralinos y comunidades costeras.

La opinión de 372 expertos en arrecifes coralinos y manejadores de 96 países y estados :

- Desde 1950, el mundo ha perdido efectivamente 19% del área original ocupada por arrecifes coralinos;
- 15% de los arrecifes se encuentran en estado “Crítico” con pérdida posible dentro de los próximos 10 a 20 años;
- 20% están seriamente “Amenazados” con pérdida predecible en 20 a 40 años; y
- 46% de los arrecifes del mundo están considerados como saludables y bajo ningún tipo de amenaza inmediata o destrucción, excepto por las amenazas actualmente predecibles del cambio climático.

La pérdida efectiva se refiere a que estos arrecifes coralinos no están en capacidad de desarrollar su función ecológica, debido a que existen pocos corales vivos y los que quedan están deteriorados, enfermos o cubiertos por sedimentos; las poblaciones de peces se en-

cuentran seriamente sobre-explotadas, con pocos grandes depredadores y pastoreo de algas por parte de los peces; existe una clara evidencia de contaminación de las aguas que ha causado que los arrecifes estén siendo cubiertos por un crecimiento de macroalgas, esponjas y otros organismos. Esto también significa que 500 millones de personas que dependen de los arrecifes coralinos puedan ser privadas de los beneficios y servicios en cuanto a alimentación, protección costera e ingresos por turismo en un futuro cercano.

Las predicciones sobre “estado crítico” y “amenazado” están basadas sobre un escenario “básico de eventos” asumiendo que la presión humana continuará incrementándose y ningún mejoramiento dramático ocurrirá en el manejo de los arrecifes de coral. Sin embargo, estas predicciones no constituyen un factor dentro de las amenazas del cambio climático, las cuales son inevitables y sin un tiempo de acción claro.

Las amenazas del cambio climático global sobre el calentamiento del océano, la acidificación oceánica y el incremento en la intensidad de las tormentas tropicales son ahora consideradas como las mas grandes amenazas para todos los arrecifes del mundo, y a menos que acciones urgentes sean tomadas para revertir la tasa de emisiones de los gases de efecto invernadero, estaremos enfrentados a pérdidas mundiales masivas de los arrecifes coralinos.

Esto significará extinción de especies, disminución de suplementos alimenticios, pérdida de potenciales turísticos y reducción de la protección costera por la erosión de los arrecifes coralinos cercanos. Desde el último reporte de la Red Global de Arrecifes Coralinos (GCRMN por sus siglas en inglés) en 2004, sobre todos los arrecifes coralinos del mundo,

existe un “tiempo marcado” debido al balance tan cercano entre la recuperación y la degradación.

Los arrecifes del Caribe han sido menos afortunados, debido a los efectos del blanqueamiento del año 2005.

El asunto crítico emergente del reporte de 2008 es que cerca de 500 millones de personas tienen alguna dependencia sobre los arrecifes coralinos, como su recurso alimenticio e ingresos suplementarios por pesca, protección costera, materiales de construcción y turismo. De estas personas cerca de 30 millones son casi totalmente dependientes de los arrecifes de coral, incluyendo a los que viven en islas oceánicas.

Evaluaciones socioeconómicas están siendo utilizadas para mejorar las decisiones de manejo de los arrecifes coralinos. A través de la GCRMN, una serie de manuales de evaluación socioeconómica y directrices han sido producidos en muchas partes del mundo y traducidos a diferentes dialectos. Las comunidades locales están incrementando su conciencia hacia la protección de sus arrecifes coralinos a través del manejo basado en las comunidades.

Los problemas para los administradores de arrecifes se incrementarán proporcionalmente en razón a que el 50% de la población mundial vivirá a lo largo de las costas, hacia el 2015, colocando presiones insostenibles

sobre los recursos costeros. Los arrecifes administrados, parecerán ser menos atractivos sin corales duros. El aumento en los precios del combustible y de los alimentos está produciendo sobre-pesca y una disminución preocupante de los stocks de peces en muchos países pobres.

“Corales saludables para personas saludables” es una frase útil para unir la economía nacional, el turismo, las alternativas de vida, la seguridad alimenticia y bienestar espiritual y cultural dentro del manejo de los arrecifes coralinos, especialmente en las áreas de usos múltiples de las ANP unidas a redes y administradas por todas las partes interesadas.

Pastos Marinos

Se recomienda incluir en las investigaciones sobre pastos marinos, estudios de otras variables como la turbidez, corrientes, ciclos de reproducción y reclutamiento de las especies, análisis de contaminantes en el sedimento y en la planta misma, entre otros, con el fin de obtener mayor información del estado fisiológico y ambiental de los pastos marinos. La información obtenida constituye la base fundamental del reconocimiento de indicadores de estado ambiental para este ecosistema, siendo posible a futuro identificar áreas específicas para implementación de planes de monitoreo, con fines de conservación y sustentabilidad.

LITERATURA CITADA

Bojórquez-Tapia, L. A., E. Ezcurra, y O. García, 1998. Appraisal of environmental impacts and mitigation measures through mathematical matrices. *Journal of Environmental Management*, 53: 91–99

Bojórquez-Tapia, L.A., 1989. Methodology for prediction of ecological impacts under real conditions in Mexico. *Environmental Management*, 13(5):545–551

- Bruke, L., y J. Maidens, 2004. Reefs at risk in the Caribbean World Resources Institute. Washington DC. USA. 80p.
- Conanp, 2009. http://www.conanp.gob.mx/q_anp.html
- De la Lanza, G., P. S. Hernández Penie, y J.C. Gómez., 2006. Calidad del agua de las playas del municipio de solidaridad. *Revista de Medio Ambiente, Turismo y Sustentabilidad*, 2(1): 25-43.
- Dachary, A.C., y S.M. Arnaiz, 1989. Sian Ka'an. El Hombre y su Economía. Centro de Investigación de Quintana Roo. 140 p.
- Díaz-Larrea, J., 2006. Diagnóstico ecológico de los arrecifes coralinos del Municipio Solidaridad, Quintana Roo, México basados en las microalgas arrecifales. *Revista de Medio Ambiente, Turismo y Sustentabilidad*, 2(1): 89-105.
- Duarte, C.M., 1991. Seagrass depth limits. *Aquatic Botany*, 40: 363-377.
- Duke, N.C., M.C. Ball, y J.C. Ellison, 1998. Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangrove. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 7: 27-47
- Instituto Nacional de Ecología -Sistema arrecifal Mesoamericano (INE-SAM), 1997. Sistema arrecifal del Caribe Mesoamericano. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y de Pesca. México: 10 p.
- Instituto Nacional de Ecología (INE), 2008. Cambio Climático en México. Disponible en: http://cambio_climatico.ine.gob.mx
- IPCC, 1991. Assessment of the vulnerability of coastal areas to sea level rise - A common Methodology. <http://www.netcoast.nl>
- IPCC, 1992. Preliminary Guidelines for Assessing Impacts of Climate Change. <http://www1.ipcc.ch/ipccreports/assessments/reports.htm>
- IPCC, 2001 Tercer Informe de Evaluación: Cambio climático 2001. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Parte de la contribución del Grupo de trabajo II al Tercer Informe de Evaluación Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático. <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>
- Gutiérrez-Aguirre., M.A., M.A. De la Fuente-Betancourt, y A. Cervantes-Martínez, 2000. Biomasa y densidad de dos especies de pastos marinos en el sur de Quintana Roo, México. *Revista de Biología Tropical*, 3p.
- Littler, M.M., 1980. Morphological form and photosynthetic performances of marine macroalgae: test of a functional/form hypothesis. *Bot. Mar.*, 22:161-165.
- Littler, M.M., y D.S. Littler, 1980. The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: field and laboratory test of a functional form model. *Am. Nat.*, 116:25-44.
- Littler, M.M., y D.S. Littler, 1984. Relationships between macroalgal functional form groups and substrata stability in a subtropical rocky-intertidal system. *J. Exp. Mar. Bipñ- Ecpñ.*, 74:13-34.
- López Portillo, J., y E. Ezcurra, 2002. Los Manglares de México: una revisión. *Madera y Bosques*, 27-51.
- Lugo, A.E., C.S. Rogers, y S.W. Nixon, 2000. Hurricanes, coral reefs and rainforest: resistance, ruin and recovery in the Caribbean. *Ambio*, 29:106-114.
- Marshall, P., y H. Schuttenberg, 2006. The Impacts of Climate Change on the Coral Reefs of the Caribbean. In: Reef Managers guide to coral bleaching. http://www.coris.noaa.gov/activities/reef_managers_guide/pdfs/reef_managers_guide.pdf
- Molina-Ramírez, A., 2006. Caracterización de las comunidades de corales escleractineos del municipio de solidaridad, Quintana Roo, México. *Revista de Medio Ambiente, Turismo y Sustentabilidad*, 2(1):115-124.

- Nesa, B. y M. Hidaka, 2009. High zooxanthella density shortens the survival time of coral cell aggregates under thermal stress. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 368:81-87.
- Ortiz P., M.A., y A.P. Méndez, 2004. Vulnerabilidad del litoral al ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las costas bajas del Golfo de México y Mar Caribe. In: E. Rivera Arriaga, G. J. Villalobos, I. Azuz Adeath, y F. Rosado May (eds.), El Manejo Costero en México. Universidad Autónoma de Campeche, Semarnat, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. 654 p.
- Oilwatch, 2005. http://www.oilwatch.org/index.php?option=com_content&task=view&id=112&Itemid=43&lang=
- Padilla-Souza, C., 2006. Metodología utilizada en el estudio de la comunidad arrecifal de las playas del Municipio Solidaridad: Generalidades. *Revista de Medio Ambiente, Turismo y Sustentabilidad*, 2(1): 69-78.
- Pannier, F., 1992. El ecosistema de manglar como indicador de cambios globales en la zona costera tropical. *Ciencia*, 43:11-113.
- Ramírez G.P., B.J. López, y D. Ocaña, 1998. Mangrove vegetation assessment in the Santiago River Mouth, Mexico, by means of supervised classification using Landsat TM imagery. *Forest Ecology and Management*, 105 (1-3):217-229.
- Ruiz, L.A., Berlanga, R.C.A., 1999. Modifications in coverage patterns and land use around the Huizache-Caimanero lagoon system, Sinaloa, Mexico: A multi-temporal analysis using LANDSAT images. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 49(1):37-44.
- Ruiz, R. 2008. Devasta Pemex manglares de Centla. Tabasco Hoy.com http://www.tabascohoy.com.mx/nota.php?id_notas=156792
- Sagarpa-INP. 2006. Carta Nacional Pesquera. DOF. 25 agosto.
- Semarnat, 2005. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente LGEP. Última Reforma DOF 07-12-2005.
- Toledo Ocampo, A., 2005. Marco Conceptual: caracterización ambiental del Golfo de México, p.25-52. In: A.V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. 2da. Edición. Univ. Autón. De Campeche, Univ. Nal. Autón. De México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- Thom, B.G., 1967. Mangrove ecology and deltaic geomorphology, Tabasco, Mexico. *Journal of Ecology*, 55:301-347.
- Thom, B.G., 1982. Mangrove ecology – a geomorphological perspective. p. 3-17. In: B.F. Clough, (ed.). Mangrove Ecosystems in Australia, Australian National University Press, Canberra.
- United Nations Environment Programme UNEP, 2006. Word Conservation Monitoring Centre. Economic case for conservation of corals and mangroves made in New UN Environment Report. http://www.unep-wcmc.org/resources/publications/UNEP_WCMC_bio_series/24/release.cfm
- Wilkinson C., y D. Souter, 2008. Status of Caribbean Coral Reefs after Bleaching and Hurricanes in 2005. Status of Coral reefs of the World: 2008. http://www.invemar.org.co/redcosteral/invemar/docs/6571plegable_estadoarrecifescoralinos.pdf

Sitios Internet

- http://www.conanp.gob.mx/q_anp.html
- <http://www.unep-wcmc.org/marine/seagrassatlases/>
- NOVA Southeastern University. National Coral Reef Institute. <http://www.nova.edu/ncri/>

Bolongaro Crevenna Recaséns, A., A. Z. Márquez García, V. Torres Rodríguez y A. García Vicario, 2010. Vulnerabilidad de sitios de anidación de tortugas marinas por efectos de erosión costera en el estado de Campeche, p. 73-96. En: A.V. Bote-llo, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Vulnerabilidad de sitios de anidación de tortugas marinas por efectos de erosión costera en el estado de Campeche

*A. Bolongaro Crevenna Recaséns, A. Z. Márquez García,
V. Torres Rodríguez y A. García Vicario*

RESUMEN

En este estudio se evaluó el impacto de la erosión de las playas y el aumento en el nivel del mar en las costas de Campeche, México, sobre la anidación de las tortugas marinas *Eretmochelys imbricata* y *Chelonia mydas*, así como la selección de sitios para anidar. El área de estudio comprendió las playas de los campamentos de Isla Aguada y Chenkan con una longitud de 30 y 20 km, respectivamente, en donde se tienen implementados proyectos para monitorear, proteger y dar seguimiento a las poblaciones de tortugas marinas que llegan a desovar. Para evaluar el proceso de erosión y su cuantificación se realizó una comparación de la línea de costa con imágenes de satélite y una caracterización morfológica y sedimentológica durante tres temporadas del año: lluvias, nortes y secas. Se modelaron escenarios de pérdida de playa por aumento del nivel del mar. Se realizó un análisis histórico comparativo del número de anidaciones en las playas estudiadas para verificar si existe un desplazamiento de los sitios de anidación de las tortugas. Los resultados obtenidos muestran tasas de erosión de 6.8 m/año. Los índices reproductivos tienden a ser mayores en arenas gruesas y medias para ambas especies. En un escenario de cambio climático se acelera el proceso de erosión por el aumento de fenómenos hidrometeorológicos extremos y por el aumento del nivel del mar, por lo que es importante considerar los fenómenos de erosión y cambio climático para diseñar medidas de mitigación en los programas de conservación de la tortuga marina.

Palabras clave: cambio climático, tortugas marinas, anidación, erosión de playas, Campeche, México.

INTRODUCCIÓN

El litoral mexicano integra una diversidad de bienes generados por la interacción de procesos geológicos y climáticos, aunados a la acción de depositación y erosión costera ocasionada por algunos agentes fluviales y oceanográficos. Sobre este marco físico, se desarrollan los sistemas naturales más productivos y con una alta biodiversidad del mundo como son las lagunas costeras, los arrecifes coralinos y los manglares. Estos hábitat son aptos para la reproducción, refugio y crianzas de muchas especies marinas, entre ellas, las tortugas marinas. En este sentido, el estado de Campeche, es uno de los de mayor importancia para estos organismos debido a su ubicación geográfica dentro de la franja tropical, así como por la complejidad de sus ecosistemas estuario-lagunares y marinos (INE, 1997).

Las tortugas marinas forman parte de la compleja trama trófica que contribuye a la salud y diversidad del planeta en el que vivimos y son un grupo de animales sumamente adaptados al ambiente marino considerándoseles como organismos indicadores de la calidad y estado del mar y de los ecosistemas costeros al evaluar el tamaño y dinámica de sus poblaciones (UICN, 2001).

De las ocho especies de tortugas marinas que existen en el mundo, siete llegan a desovar en las playas mexicanas y de éstas, tres arriban a las playas de Campeche. Basados en el número de nidos registrados por temporada la tortuga Carey (*Eretmochelys imbricata*) es la más abundante en Campeche, siguiéndole en orden de importancia la tortuga blanca (*Chelonia mydas*) y en tercer lugar la lora (*Lepidochelys kempi*), de las que se registran

anidaciones esporádicas. Las costas del estado de Campeche son consideradas como uno de los lugares preferidos para las anidaciones de las tres especies antes mencionadas. Estas especies están catalogadas en peligro de extinción tanto por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2001), así como por la legislación mexicana en la NOM-059-Semarnat-2001.

El impacto antropogénico, los cambios morfológicos y la erosión de las playas impactan de forma significativa los complejos y delicados ecosistemas costeros y marinos, lo que contribuye significativamente a la disminución del hábitat para anidar y de las poblaciones de estos organismos, debido a que en su ciclo de vida, las hembras regresan a sus playas natales para anidar. Durante las diferentes etapas de su desarrollo las tortugas están expuestas a innumerables peligros como la contaminación de los mares y la destrucción de su hábitat tanto marino como terrestre. Los sitios de anidación son altamente vulnerables ya que pueden ser dañados por causas antropogénicas (*e.g.* turismo, pesca, urbanización, entre otros) y por causas naturales (*e.g.* erosión, aumento del nivel del mar, oleaje alto, huracanes, entre otros).

La selección de sitios de anidación depende de características como pendiente topográfica, amplitud y tipo de sedimento. La extensión de la playa parece no ser importante observándose altas densidades de anidación en playas de corta longitud (Zurita *et al.*, 1993).

Otros factores importantes para la selección del sitio de desove son la humedad, la calidad de la arena y la temperatura, para lo

cual las tortugas se valen principalmente de su olfato. Condiciones también necesarias para completar el proceso de reproducción son las condiciones de preservación del nido, de la eclosión y de la salida de crías.

La erosión determina el retroceso y la modificación de la línea de costa y es la principal causa de la destrucción de playas del litoral. En Campeche, el litoral ha alcanzado tasas de erosión promedio de 7 m/año (Ortiz-Pérez, 1992), ocasionando la pérdida de superficies históricas importantes para la anidación de las tortugas marinas.

La pérdida de playas como consecuencia de la erosión y las modificaciones en el nivel del mar por el calentamiento global y el cambio climático puede producir eventos catastróficos, naturales o inducidos por el hombre ocasionando cambios severos en los diferentes tipos de ecosistemas. En este sentido, es preocupante la pérdida del hábitat de anidación y el impacto generado sobre las poblaciones de las tortugas marinas, que se encuentran en peligro de extinción.

Las playas en proceso de erosión se caracterizan porque sufren cambios en su amplitud y pendiente. Al aumentar el desnivel y disminuir la amplitud de playa se presentan diversas configuraciones, como: escalones, áreas cóncavas, canales de marea e incluso taludes en la zona de mesoplaya. Por el contrario, las playas en proceso de acreción o acumulación, son aquellas en las que se observa un aumento en la amplitud de playa, montículos en forma de dunas, mientras la pendiente tiende a ser uniforme en toda la playa. Las playas estables, son aquellas que conservan la misma pendiente, forma y amplitud de playa. En esta última, puede existir una disminución o aumento en su longitud al realizarse el levantamiento to-

pográfico, pero esta no es determinada por la erosión acumulación ya que las playas conservan la misma pendiente y forma. En este caso se considera que el aumento o la disminución es debido a los efectos de las mareas baja y alta (Salazar, 1998; Márquez *et al.*, 2007).

En algunas playas sujetas a erosión se forman cantiles y terrazas verticales que constituyen serias barreras físicas y las tortugas a menudo están obligadas a recorrer grandes trechos paralelos a la costa y/o finalmente a regresar al mar y anidar en otros tramos más alejados (Márquez, 1996). A las barreras naturales se suman otras creadas por el hombre como son los espigones, tetrápodos, muelles, escolleras, desarrollos turísticos y urbanos (Salazar, 1998). Es reconocido que el incremento de las amenazas por causas antropogénicas es el que ha puesto en peligro de extinción a muchas especies en nuestro planeta, no escapando a esto todas las especies de tortugas marinas (UICN/CSE, 1995).

En este sentido, el conocimiento de la dinámica litoral y de los patrones de anidación de las tortugas marinas son elementos importantes a estudiar, ya que pueden aportar información valiosa para realizar programas de protección, manejo y conservación de los ecosistemas costeros y de estas especies.

El cambio climático constituye una gran amenaza para la humanidad y es uno de los mayores problemas ecológicos, sociales y económicos del planeta. El sustento e incluso la supervivencia de comunidades enteras estarán en peligro en muchas partes del mundo. La multiplicación de las sequías, inundaciones, huracanes, el deshielo y la elevación del nivel del mar, marcan escenarios muy graves donde se hace evidente la vulnerabilidad de los sistemas ecológicos y sociales. Ante estos

escenarios se hace urgente la necesidad de diseñar medidas de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático.

El cambio climático acelera los procesos de erosión al presentarse un aumento en el nivel medio del mar y una mayor frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos, modificando drásticamente la línea de costa. Si a esto se le suman los impactos generados por la erosión debida a causas antropogénicas como son la modificación de la línea de costa con infraestructura y la modificación del equilibrio continente-océano por la modificación de los volúmenes de descarga en el aporte de sedimentos fluviales, situación que incrementa el efecto erosivo de las corrientes marinas y litoral, se tiene que nos enfrentamos a un es-

cenario de fuerte erosión costera y pérdida de grandes extensiones de playa.

La erosión costera es una de las principales causas asociadas a la disminución de las tortugas marinas, al ocasionar graves impactos a su hábitat de anidación. En la zona, se tiene una tasa de erosión de entre 1.8 a 6.8 m/año ocasionando la pérdida de superficies históricas importantes para la anidación de las tortugas marinas. En este sentido, el conocimiento de la dinámica litoral y del impacto sobre las tortugas marinas son temas de gran interés que hay que abordar para tener más elementos en el diseño de las estrategias de protección, manejo y conservación de los ecosistemas costeros y de las especies de tortugas marinas.

OBJETIVOS

El propósito de la presente investigación fue evaluar el impacto de los procesos de erosión costera en la anidación de las tortugas

marinas (*Eretmochelys imbricata* y *Chelonia mydas*) que arriban en la costa norte del estado de Campeche.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en la zona norte del estado de Campeche y el sur del Golfo de México (figura 1), y comprende las playas de Isla Aguada y Chenkan. Dichas playas se encuentran al sureste de la Sonda de Campeche y al noreste de la laguna de Términos.

La playa de Isla Aguada está ubicada geográficamente entre las coordenadas 18°47'17.7" Latitud Norte (LN) y 91°29'54.8" Longitud Oeste (LO), y la playa de Chenkan entre los 19°06'32.8" LN y 91°00'39.6" LO. En estas playas se registran la mayoría de las anida-

ciones de las tortugas marinas *Eretmochelys imbricata* (tortuga Carey) y *Chelonia mydas* (tortuga blanca). La extensión total de playas reportadas con anidaciones es de 214 km, de las que se protegen aproximadamente 170 km, de los cuales 50 km de ellos quedan comprendidos en el área de Isla Aguada y de Chenkan (Guzmán, 2005). Los sitios de anidación están formados por una serie de playas de pequeñas longitudes y formas variables, limitadas por arroyos y zonas inundables de manglar.

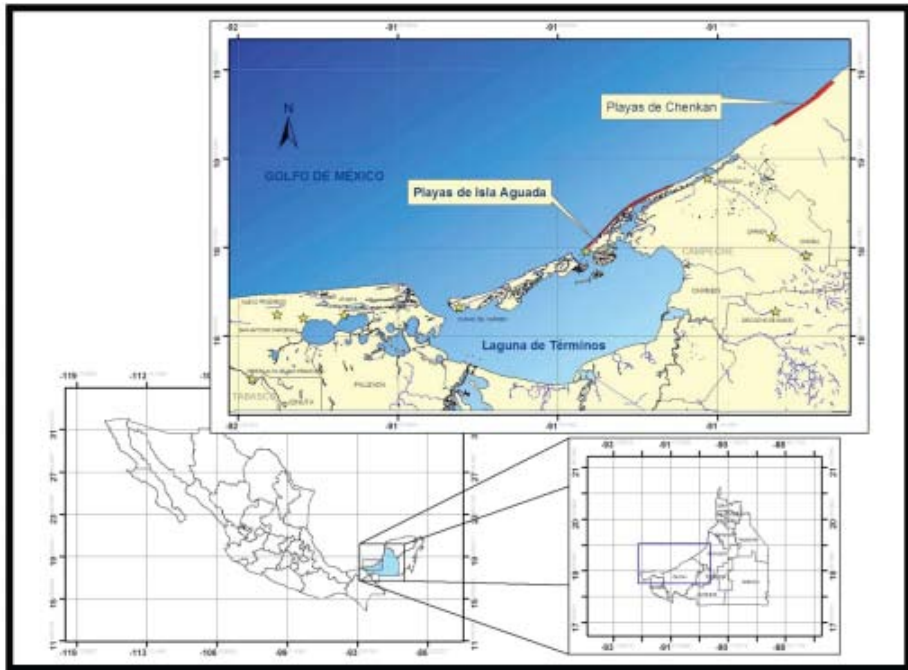


Figura 1. Ubicación de las playas Isla Aguada y Chenkan.

Entre la vegetación predominante están las especies de mangle *Laguncularia racemosa* (mangle blanco), *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Conocarpus erecta* (mangle botoncillo) y *Avicennia germinans* (mangle negro). Los manglares juegan un papel importante al proteger el litoral del impacto del oleaje y tienen

una importancia notable en la conservación de la línea de costa. Además, propician las condiciones favorables para los sitios de anidación de las tortugas marinas manteniendo la aeración de los sedimentos y evitando la compactación de éstos, cuyos nidos están comúnmente asociados a la vegetación.

METODOLOGÍA

Para realizar este estudio se llevaron a cabo estancias en los campamentos tortugueros, trabajo de laboratorio para el análisis sedimentológico y trabajo de gabinete para el análisis y procesamiento de los datos obtenidos.

ESTANCIA EN CAMPAMENTOS TORTUGUEROS

En la temporada de anidación se realizó una estancia en los campamentos tortugueros de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) en Isla Aguada y Chenkan

durante los meses de julio a septiembre del 2006. Se realizaron recorridos diarios a lo largo de la playa en cada campamento. Durante el recorrido se detectaron los nidos de tortuga, mediante la observación de las mismas, así como de las marcas del arrastre (huellas) sobre la arena; a partir de las huellas fue posible conocer la ubicación del nido y determinar la especie de tortuga que había anidado.

LOCALIZACIÓN DEL NIDO Y REGISTRO DE HUEVOS

Los nidos encontrados se georreferenciaron con un GPS (Global Position System), en coordenadas UTM, proyección WGS 84 marca ASTEC, modelo Promark 2. En cada nido se registró la ubicación en coordenadas y con respecto al perfil de la playa. Se tomó una muestra de arena de cada anidación y la información se registró en una ficha de campo.

Una vez ubicado el nido, se procedió a extraer los huevos ovopositados y a colocarlos temporalmente en una bolsa de plástico para trasladarlos en el menor tiempo posible hasta el corral de incubación donde fueron sembrados en los nidos cavados especialmente para simular la forma típica de cada especie. La cámara de incubación de los nidos presentan típicamente una profundidad promedio de 65 cm para la especie *Chelonia mydas* (tortuga blanca) y de 45 cm para la especie *Eretmochelys imbricata* (tortuga carey). Cada nido se identificó con un número consecutivo de registro. En la bitácora de campo se registraron los datos correspondientes a cada nido, como son, el número de huevos, hora de colecta y tipo de manejo o uso del nido.

Al término de la eclosión y cuando las crías emergieron, los nidos fueron revisados y lim-

piados inmediatamente, obteniendo información del número de crías muertas, huevos en diferentes estadios que no eclosionaron y huevos sin ningún desarrollo embrionario aparente. Esta información se registró en la ficha de campo. La liberación de las tortuguitas recién nacidas se realizó en las noches aprovechando el recorrido para la localización de nidos.

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LAS PLAYAS

Para conocer si las playas se encuentran en procesos de erosión o acreción se realizaron perfiles de playa (Wolf, 1997) en cada una de las épocas climáticas (lluvias, nortes y secas) del año 2006, con el fin de determinar el estado en que se encuentra cada playa en la temporada de anidación, se registraron las posibles interacciones entre las condiciones morfológicas con respecto a las tasas de sobrevivencia y de esta manera conocer el efecto de la dinámica costera en la anidación de las especies estudiadas.

Se analizó el efecto de la presencia de elementos antropogénicos como espigones y rompeolas. Se evaluó la preferencia de anidar en alguna de las zonas del perfil de playa (infraplaya, mesoplaya y supraplaya) y el tipo de arena para anidar por especie y playa en estudio.

Para los perfiles de playa se identificaron tres zonas de playa, la infraplaya que es la zona de la playa comprendida entre el límite de la marea baja hasta la profundidad donde empieza el efecto del oleaje; la mesoplaya que es la zona comprendida entre el límite de la marea alta y el límite de la marea baja, generalmente con pendiente en dirección hacia el mar, y la

supraplaya que es la zona comprendida entre el límite de la marea alta y el límite donde se tiene ya algún proceso continental (malecón, duna, vegetación, etc) y que en condiciones normales está seca (figura 2).

CARACTERIZACIÓN SEDIMENTOLÓGICA DE LAS PLAYAS

Se realizó una caracterización sedimentológica de las playas de estudio para conocer el tipo de sedimento asociado a los nidos. De esta forma se colectó una muestra de sedimento en cada nido y se analizó el análisis granulométrico, la composición mineralógica (Folk, 1966; Rothwell, 1989) y se determinó el porcentaje de humedad relativa (McGehee, 1979).

El análisis de tamaños o textura de sedimentos se realizó de acuerdo con la escala de tamaños de Wentworth (1922) utilizando los criterios propuestos por Folk (1966). El análisis de los sedimentos se realizó por el mé-

todo de tamizado a cada $\frac{1}{4}$ de phi para calcular los parámetros granulométricos (tamaño gráfico promedio, desviación estándar gráfica inclusiva, grado de asimetría gráfica inclusiva y curtosis).

El análisis mineralógico de los sedimentos se realizó por el método de “frotis” y observación al microscopio estereoscópico. El porcentaje de los minerales se realizó de manera visual (Rothwell, 1989). Para los sedimentos arenosos por ser de origen calcáreos o carbonatados, se utilizó el triángulo de Lewis (1984) para su clasificación.

La humedad se determinó siguiendo el método de McGehee (1979); se tomaron muestras de 50 gramos de cada sitio donde se reubicaron los nidos, se registró el peso total de la muestra en una balanza digital y se secaron en un horno a 60°C para determinar el peso seco. Posteriormente, se volvieron a pesar para determinar la cantidad de humedad perdida. La humedad se expresó como porcentaje de humedad.

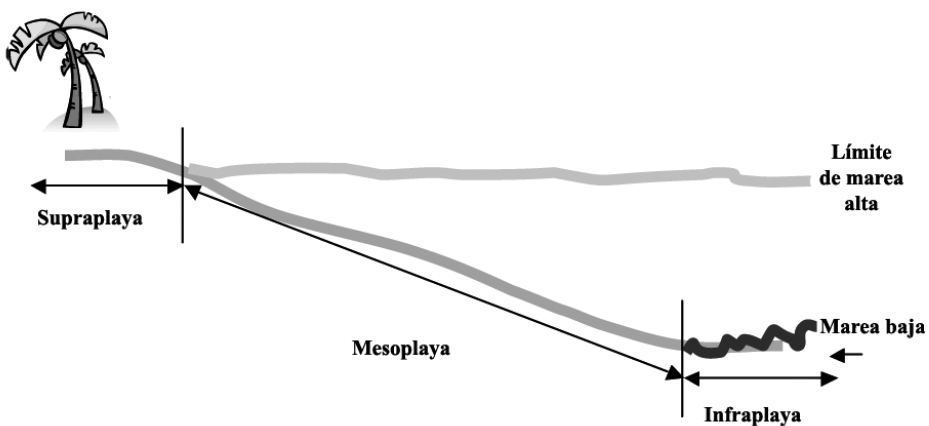


Figura 2. Esquema del perfil de playa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA PLAYA ISLA AGUADA

De acuerdo con los resultados de los levantamientos de los perfiles de playa (figura 3) ésta es considerada como una playa relativamente estable, lo cual coadyuva en la conservación del hábitat de anidación de estas especies de tortugas marinas. En esta playa se observó que existe también un proceso de erosión-depósito, existiendo una recuperación de la playa en los sitios de anidación después de haberse erosionado, manteniendo las pendientes y formas de la playa estables (figuras 4 y 5). Esta playa por sus características morfológicas es la de mayor preferencia para ambas especies de tortugas marinas *Eretmochelys imbricata* y *Chelonia mydas*.

Los estudios de mediano plazo realizados con imágenes satelitales de un periodo de 31 años (Torres *et al.*, 2009), mostraron un avance de la línea de costa hacia el continente de 5.7 m, valor que resultó ser el valor más pequeño de erosión para el estado de Campeche, pudiéndose concluir en este sentido que

la Isla Aguada se encuentra en un incipiente estado de erosión, y que de acuerdo con los regímenes climáticos se observan fluctuaciones normales de erosión y depósito tales como las que se observaron con las mediciones de perfiles de playa del periodo 2005-2007, que mostraron episodios de estabilidad costera.

Factores antropogénicos

El incremento de actividades antropogénicas en las zonas costeras es una de las principales causas que impacta a las poblaciones de tortugas marinas. Es importante resaltar que en algunos sitios de las playas de Isla Aguada están presentes estructuras rocosas llamadas espigones (rompeolas) perpendiculares a la línea de la costa (figura 6). Estas áreas con espigones son importantes sitios de anidación y existen registros de los campamentos tortugueros de la Conanp que indican una tendencia a disminuir el número de anidaciones de los años 2004-2005 respecto al resto de las playas (Guzmán, 2005). Seguramente el impacto de estas estructuras sobre el comportamiento de anidación de las tortugas marinas es serio

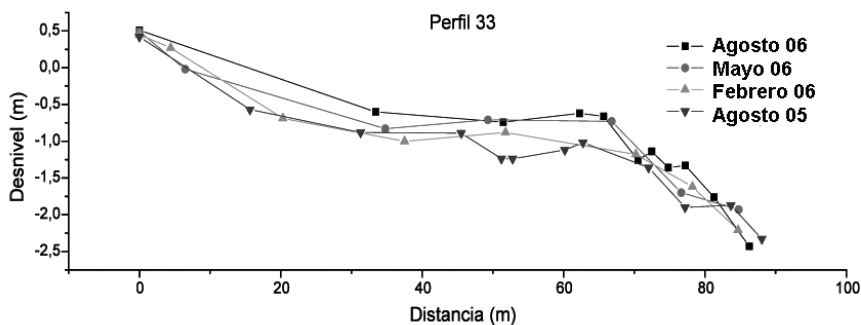


Figura 3. Perfil de playa Isla Aguada en época de lluvias 2005, lluvias, nortes y secas del año 2006.



Figura 4. Playas del campamento Isla Aguada, Campeche.

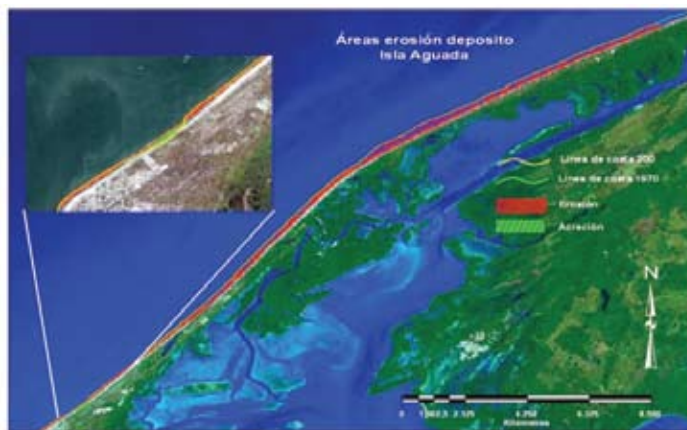


Figura 5. Análisis del cambio de la línea de costa con imágenes de satélite.

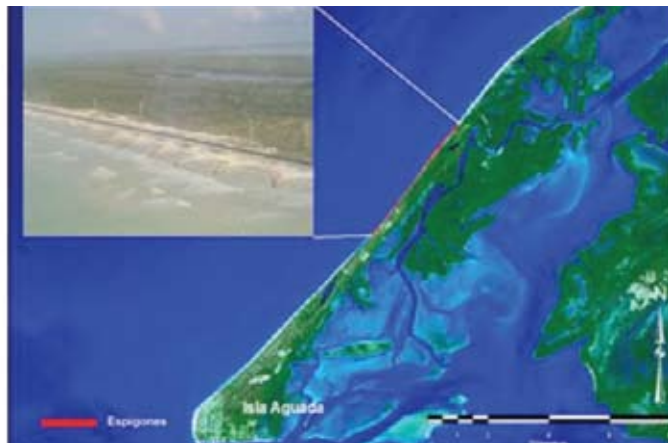


Figura 6. Localización de los espigones en las playas de Isla Aguada, Campeche.

y provoca una reducción en los intentos por anidar.

Anidaciones por zona de playa en Isla Aguada

Al analizar el sitio de anidación en esta playa, se encontró que el mayor número de anidaciones para ambas especies ocurrió en la zona de supraplaya: *Eretmochelys imbricata* (tortuga carey) con 68% y *Chelonia mydas* (tortuga blanca) con 71%, mientras que para la zona de mesoplaya los porcentajes fueron para tortuga de carey del 32 % y para las tortugas blancas 25%. En la zona de infraplaya no se registraron anidaciones para la tortuga carey, solamente para la tortuga blanca fue 4 % (figura 7). Estos resultados se explican ya que la zona de supraplaya es aquella a nivel de la vegetación con menos vulnerabilidad y donde las tortugas tienen más posibilidades de incrementar la sobrevivencia de la nidada. El estado de la playa es estable con la pendiente poco pronunciada, esto permite a las tortugas desplazarse a la zona de supraplaya sin ninguna dificultad para que de esa manera seleccionen

el sitio adecuado para anidar y se minimice el riesgo de ser afectadas por los ascensos de la marea de tormenta, ya que la línea de vegetación suele ser el límite del ascenso del mar en los casos extremos de afectaciones procedentes de fenómenos meteorológicos.

Eclosión y sobrevivencia de tortugas marinas en Isla Aguada

En la playa de Isla Aguada durante el trabajo de campo que abarcó la temporada de anidación 2006 se protegieron un total de 30 nidos (tabla 1), siendo 29 de la especie *Chelonia mydas* con un total de 3 033 huevos y 1 de la especie *Eretmochelys imbricata* con 159 huevos. Todos los nidos fueron reubicados en el corral de incubación.

Distribución de anidaciones por tipo de arena y porcentaje de humedad

En estas playa se observó una mayor frecuencia de anidaciones de *Chelonia mydas* (tortuga blanca), los nidos estuvieron distribuidos hacia el noreste de la playa, asociados a sedimen-

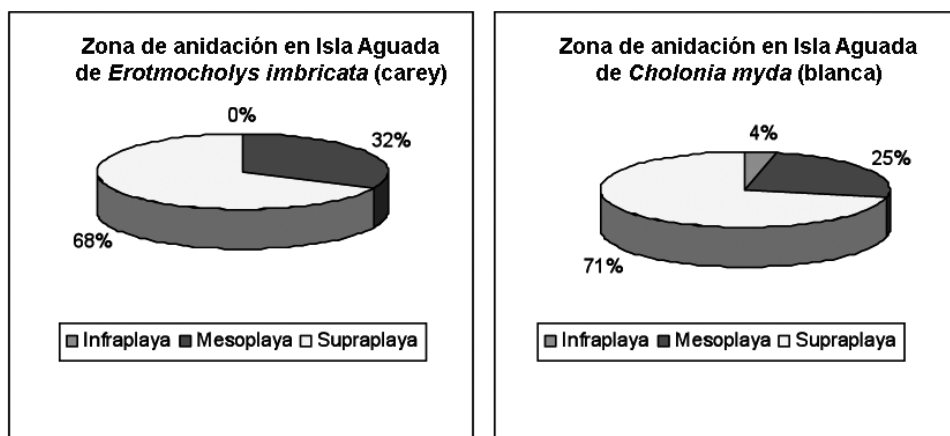


Figura 7. Zona de anidación (infraplaya, mesoplaya y supraplaya) en Isla Aguada de *Eretmochelys imbricata* (tortuga carey) y *Chelonia mydas* (tortuga blanca).

Tabla 1. Promedios de eclosión y sobrevivencia del año 2006 por especie, Isla Aguada.

Especie	Número de nidos	Número de huevos	Humedad (%)	Eclosión (%)	Sobrevivencia (%)
<i>Chelonia mydas</i>	29	3033	8.38	61.07	70.17
<i>Eretmochelys imbricata</i>	1	159	7.89	81.6	64.5

tos clasificados como arena media. Se observó un menor registro de anidaciones en sitios de textura de arena muy gruesa y fina, probablemente por una preferencia de las tortugas en la selección del sitio buscando condiciones aptas dentro de la cámara de incubación en cuanto a temperatura, humedad y textura del sedimento (figura 8).

Distribución espacio-temporal 2004-2006 de las anidaciones de tortugas marinas en Isla Aguada (playa estable)

La playa de Isla Aguada tiene aproximadamente 28 km de longitud y a pesar de que se considera una playa estable y adecuada para la anidación, no toda su extensión es apta para realizar la ovoposición, debido a las diferencias que se encuentran a lo largo de la playa, como son la pendiente, la presencia de vegetación costera, el contenido de humedad y la textura del sedimento y la presencia de infraestructura.

Al analizar la distribución espacio temporal de las anidaciones se observa que se registraron menores anidaciones durante los años 2004 y 2005, años que coinciden con la instalación de los espigones, infraestructuras para la protección de la playa que representan un obstáculo para la arribazón de las tortugas marinas a las playas de anidación (figura 6). En el caso del año 2006, se registró un aumento en el número de anidaciones, probablemente como una

respuesta de la dinámica de las poblaciones a los esfuerzos conservacionistas implementados a partir de 1979, sin embargo se observa un desplazamiento de los sitios de anidación hacia los sitios adyacentes (figura 9).

La mayor concentración de nidos de ambas especies se registró entre los sitios 435 y 441 de la playa, probablemente por ser la zona con menor perturbación de la playa. En el caso del sitio 430 se observó que el número de anidaciones es casi nulo respecto a los demás sitios, esto se debe posiblemente a la presencia de infraestructuras turística como un balneario y un restaurante, los cuales invaden y perturban los sitios de anidación.

Escenario de pérdida de hábitat de anidación con el aumento del nivel medio del mar, playa Isla Aguada

En la figura 10 se muestra el perfil de playa de Isla Aguada con las cotas de aumento del nivel medio del mar en 40, 60 y 100 cm. Considerando un aumento de 40 cm. en el nivel medio del mar se puede observar como la zona de mesoplaya pasará a ser infraplaya, perdiéndose así la zona donde anidan alrededor del 40 % de las tortugas, esto es, perdiéndose los sitios aptos para la anidación.

Parece ser que la supraplaya no se verá afectada en esta playa, siendo ésta una situación benéfica para las tortugas, ya que la mayoría anidó en la supraplaya.

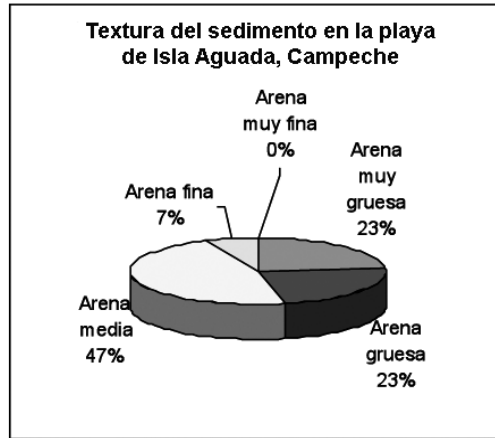


Figura 8. Tipo de textura del sedimento en la playa de Isla Aguada, Campeche.

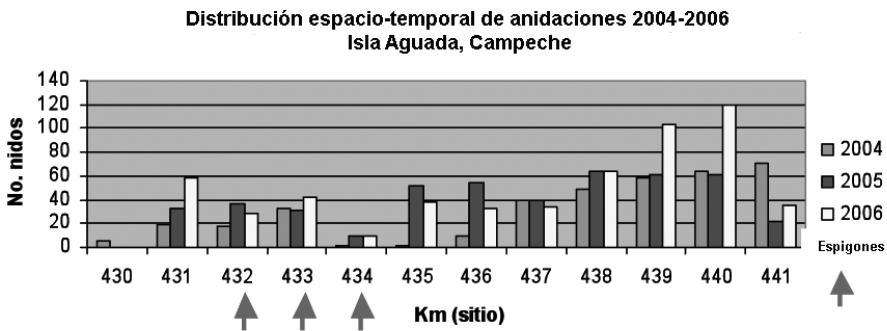


Figura 9. Distribución espacio temporal de anidaciones de 2004-2006, Isla Aguada, Campeche.

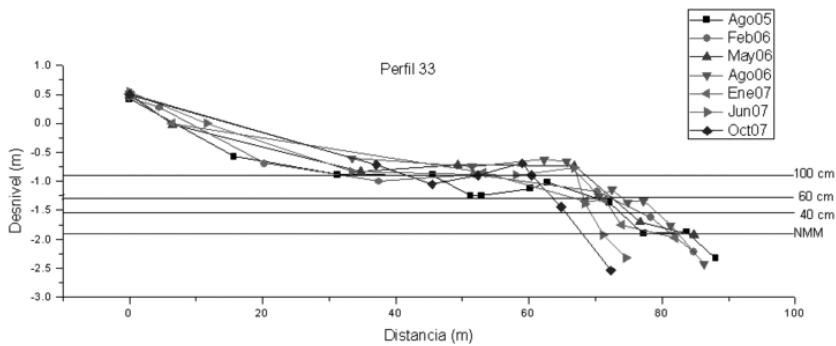


Figura 10. Representación grafica de la pérdida de hábitat de anidación en la playa Isla Aguada con el aumento del nivel medio del mar.

Por otro lado, al analizar los resultados reportados por (Torres *et al.*, 2009) (figura 11) obtenidos a partir de un análisis de los cambios en la línea de costa con imágenes de satélite de distintos años y la modelación del aumento del nivel del mar en escenarios de cambio climático del Panel intergubernamental para el Cambio Climático (Wigley, *et al.*, 2009; ANIDE, 2005), se puede observar que el escenario de pérdida de la superficie costera con la modelación de un aumento en el nivel del mar de 40 cm. es muy amplia y abarca toda la zona del área de los dos campamentos tortugueros, escenario muy crítico considerando la gran superficie costera en riesgo.

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA PLAYA CHENKAN

La playa de Chenkan es altamente dinámica, se encuentra en proceso de erosión. El perfil de playa muestra una pendiente pronunciada, poca amplitud de playa y escalones de 1 m de desnivel entre la zona de supraplaya y mesoplaya (figuras 12 y 13).

En esta playa se observa un litoral que en los últimos 30 años, ha mostrado un proceso de erosión-depósito, donde actualmente está predominando el proceso de erosión (figura 14). El impacto es alto ya que estas playas son dinámicamente activas con una tendencia a disminuir la amplitud ocasionando la pérdida del hábitat de anidación y de los nidos ovopositados. El proceso erosivo puede afectar también a los nidos ovopositados modificando la cantidad de humedad y causando un incremento en la mortalidad de las crías de tortugas marinas durante la incubación.

En esta playa se registran altas densidades de anidaciones de las especies *Chelonia mydas* (tortuga blanca) y *Eretmochelys imbricata* (tortuga Carey), siendo una de las zonas más frecuentadas a nivel nacional por estas especies para anidar (Guzmán, 2005). Los cambios de morfología de la playa por el proceso de la erosión pueden afectar el éxito de las anidaciones al dificultar el acceso de las tortugas a la playa para anidar, así como el éxito de la incubación de los huevos al erosionarse los nidos “*in situ*” y los corrales de incubación (figura 15).

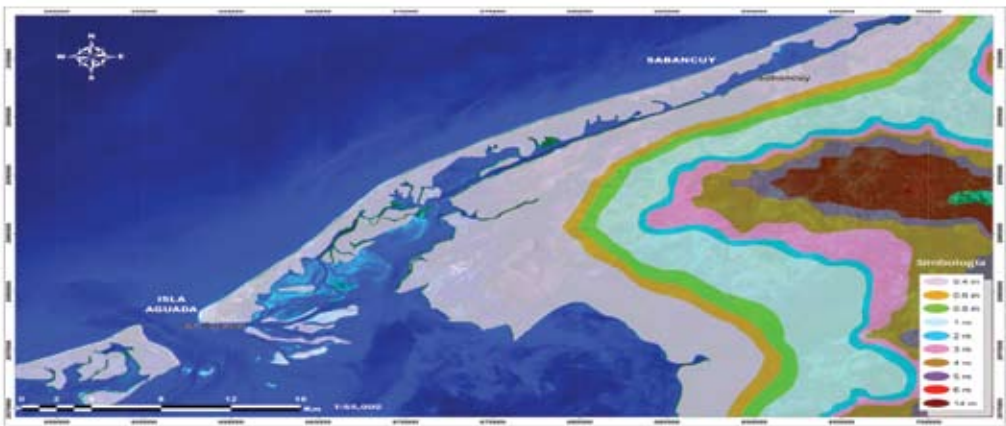


Figura 11. Modelación del aumento en el nivel medio del mar para el área de Isla Aguada, Campeche.

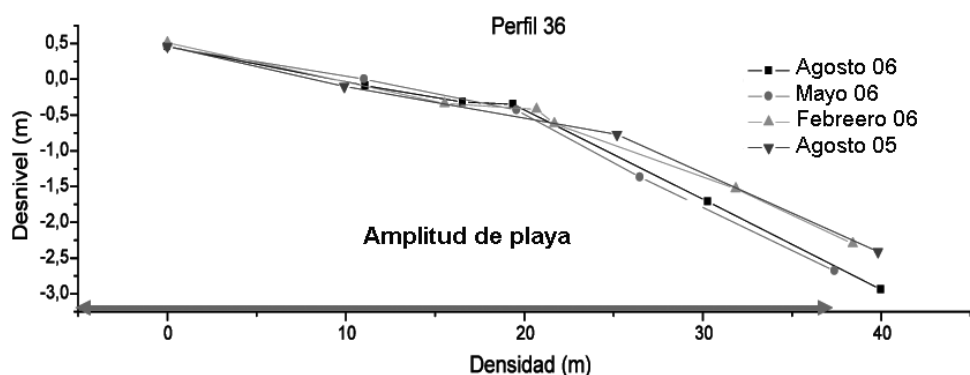


Figura 12. Perfil de playa de Chenkan en época de lluvias 2005, lluvias, nortes y secas del año 2006.



Figura 13. Playas del campamento Chenkan, Campeche.

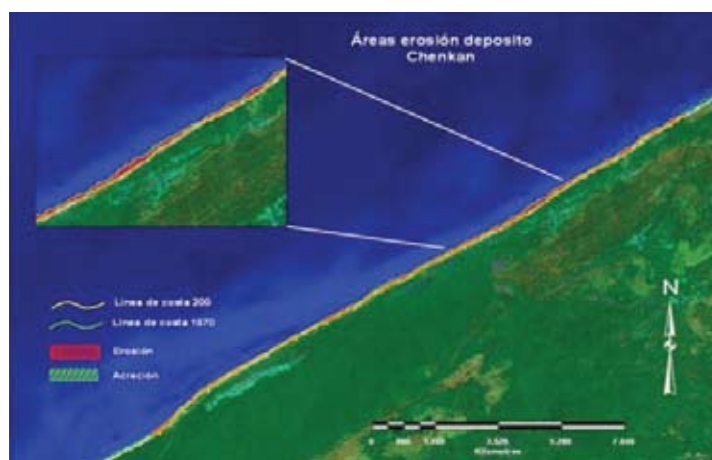


Figura 14. Áreas de erosión-depósito en las playas de Chenkan, Campeche.



Figura 15. *Chelonia mydas* (tortuga blanca) intentando subir la duna para desovar en la playa de Chenkan, Campeche

Factores antropogénicos

En las playas de Chenkan también se registró la presencia de infraestructuras marítimas llamados tetrápodos (figura 16), los cuáles están colocados en forma paralela a la costa a unos 30 metros mar adentro con el objeto de mitigar el proceso de la erosión de las playas. Estos tetrápodos fueron colocados a partir del año 2004. La presencia de éstos bloquea el acceso al hábitat de la tortuga hacia las playas de anidación, además evitan que el sistema dinámico propio de las playas funcione adecuadamente, y como consecuencia queden al descubierto áreas de sustrato rocoso durante la marea baja obstaculizando el acceso de las tortugas a sus sitios de anidación.

Anidaciones por zona de playa en Chenkan

En las playas de Chenkan, las especies *Eretmochelys imbricata* y *Chelonia mydas* anidaron preferentemente en la zona de mesoplaya con 72 y 61% respectivamente (figura 17), da-

tos que se explican al considerar la dificultad para subir el escalón de la playa, a diferencia de la playa de Isla Aguada donde se registró el mayor número de nidos en la zona de supraplaya. Los nidos registrados en la infraplaya fueron del 2 % y correspondieron a la especie *Eretmochelys imbricata*. Estos nidos tienen una probabilidad mínima de sobrevivencia debido a que generalmente se pierden por la erosión o por el exceso de humedad.

A diferencia de las anidaciones registradas en Isla Aguada donde el mayor porcentaje correspondió a la supraplaya, en Chenkan las anidaciones fueron más frecuentes en la mesoplaya debido a la menor amplitud y las pendientes pronunciadas típicas de una playa en erosión que se convierten en un obstáculo para seguir avanzando hacia la supraplaya.

Eclosión y sobrevivencia de tortugas marinas en Chenkan

En la playa de Chenkan durante el trabajo de campo se protegieron un total de 30 nidos



Figura 16. Localización de tetrápodos en las playas de Chenkan, Campeche.

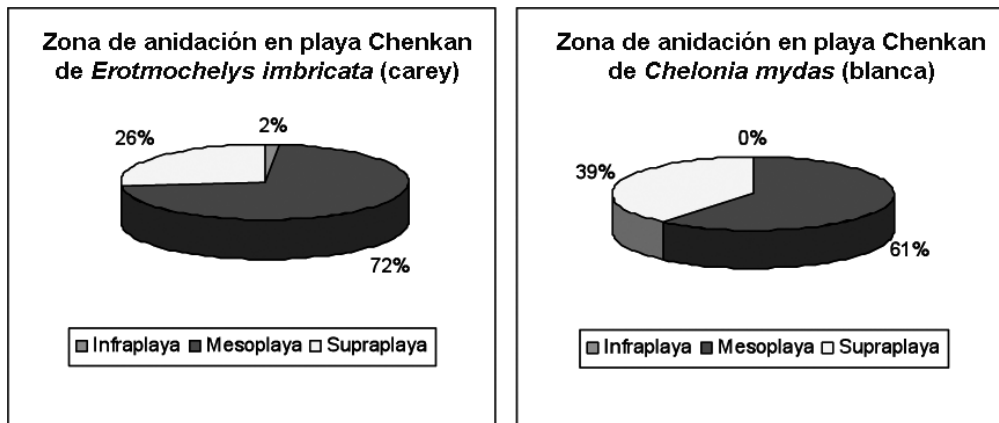


Figura 17. Zona de anidación (infraplaya, mesoplaya y supraplaya) en playa Chenkan de *Eretmochelys imbricata* (tortuga carey) y *Chelonia mydas* (tortuga blanca).

(tabla 2), correspondiendo 10 a la especie *Chelonia mydas* con un total de 1 223 huevos y 20 a la especie *Eretmochelys imbricata* con un total de 2 839 huevos. Todos los nidos fueron reubicados en el corral de incubación.

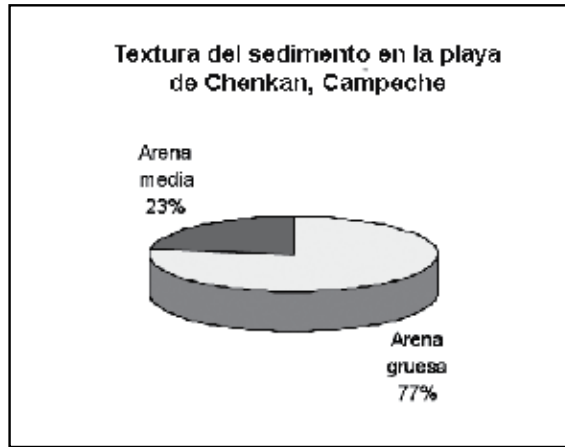
Distribución de anidaciones por tipo de arena y porcentaje de humedad

En las playas de Chenkan se observó un mayor número de anidaciones de *Eretmochelys*

imbricata seguidas por *Chelonia mydas*. La mayoría de éstas (77%) ocurrió en sitios asociados a arena con textura de grano de arena media (figura 18) y con una humedad relativa entre 7 y 11 %, distribuidos a lo largo de toda la playa.

Tabla 2. Promedios de eclosión y sobrevivencia del año 2006 por especie, Chenkan..

Especie	Número de nidos	Número de huevos	Humedad (%)	Eclosión (%)	Sobrevivencia (%)
<i>Chelonia mydas</i>	10	1223	9.42	75.99	58.9
<i>Eretmochelys imbricata</i>	20	2839	9.5	69.93	56.47

**Figura 18.** Textura del sedimento en la playa de Chenkan, Campeche.

Distribución espacio temporal 2004-2006 de las anidaciones en Chenkan (playa con erosión)

En la figura 19 se muestra la distribución espacio-temporal de anidaciones de tortugas marinas registrada en la base de datos de la Conanp para el campamento tortuguero de Chenkan, se observa una baja frecuencia de anidación en los sitios 96, 103 y 108 en los dos últimos años, coincidiendo con los sitios donde están colocados tetrápodos paralelos a la costa.

Con respecto al año 2006 en toda la zona de playa se registró una tendencia de aumento de hembras anidadoras, datos que coinciden con los registros a nivel nacional. Particularmente en los sitios del Km. 99 al 107 se

observó un mayor número de anidaciones, mientras que en los sitios del Km. 90 al 98 el registro de anidaciones fue mínimo, probablemente ocasionado por la presencia de tetrápodos en algunos de estos sitios y a que esta zona se encuentra parcialmente alterada por la erosión y por la presencia de gaviones (estructuras de contención construidas con piedra envueltas en malla galvanizada) construidos por parte de la SCT, para la protección de la carpeta asfáltica. Los gaviones provocan una lenta socavación en su porción baja, finalmente se colapsan y el proceso de erosión continúa, destruyendo lentamente porciones de playa de anidación para estas especies. La presencia de talleres de trabajo de los pescadores en la playa, también obstaculizan sitios de anidación. Los sitios entre los km 99 al 107 se

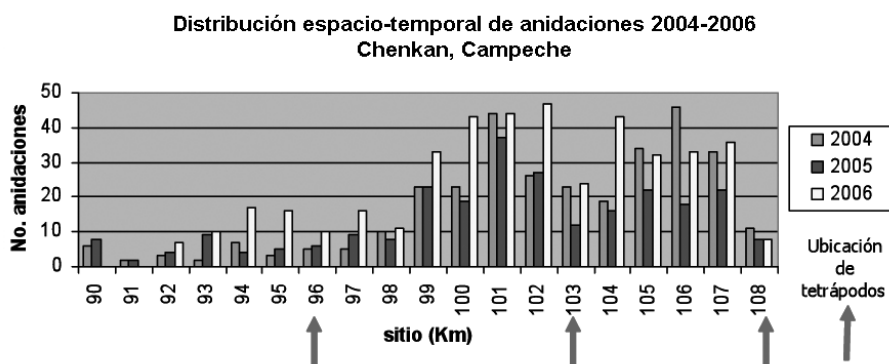


Figura 19. Distribución espacio temporal de anidaciones 2004-2006, Chenkan, Campeche.

consideran playas índices, donde se encuentra la mayor concentración de anidaciones.

La fluctuación registrada en la gráfica de un año a otro es un reflejo de la dinámica de las poblaciones de éstas especies, y en particular el aumento registrado en el año 2006 puede ser una respuesta al esfuerzo de conservación iniciado desde 1979 ya que las crías tardan entre 14 y 20 años en regresar a sus playas natales a anidar.

Escenario de pérdida de hábitat de anidación en la playa con el aumento del nivel medio del mar, Chenkan (playa en franca erosión)

En un escenario de aumento en el nivel del mar se perderían aproximadamente 14 m de amplitud de playa, desplazándose la zona de infraplaya a donde actualmente comienza la mesoplaya (figura 20), destruyéndose ésta última y perdiéndose a su vez la zona donde anidan el alrededor del 70% de las tortugas, esto es, perdiéndose los sitios aptos para la anidación. En este sentido, la playa de Chenkan es un sitio muy crítico, altamente vulnerable por la erosión y la pérdida de hábitat de anidación.

En la figura 21 se muestra el resultado de la modelación de los escenarios de aumento en el nivel medio del mar para varias cotas en el área del campamento tortuguero de Chenkan. En la figura 21 se puede observar la superficie de costa a perder en los distintos escenarios, siendo que con solo un aumento de 40 cm., se estima perder prácticamente toda la playa, situación muy grave para el estado de Campeche y en particular para la tortugas que perderían su hábitat de anidación viéndose obligadas a desplazarse a nuevas zonas para poder cumplir con su ciclo biológico.

La dinámica costera que actualmente se está manifestando en las playas del mundo está causando modificaciones de la línea de costa acrecentadas por factores tanto naturales como antropogénicos y está representando una pérdida del hábitat de anidación de las tortugas marinas, afectando así el proceso reproductivo de éstas. Por lo que se debe considerar muy seriamente como una causa más de las posibles amenazas de las especies de tortuga marina, sensibles a estos cambios.

Entre los factores producto de la dinámica costera que se presentan en las playas del mundo y que de alguna manera afectan el desove

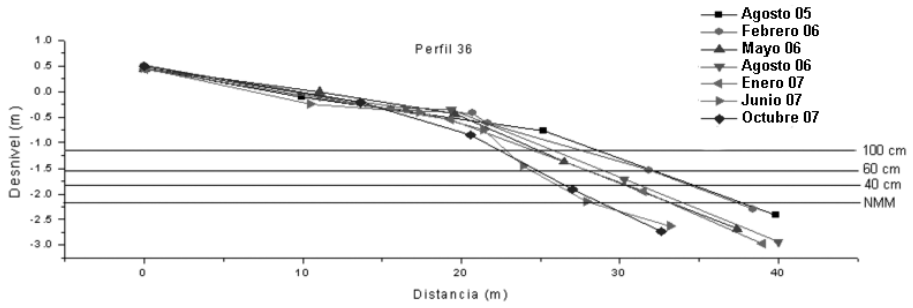


Figura 20. Representación grafica de la pérdida de hábitat de anidación en la playa de Chenkan con el aumento del nivel medio del mar.

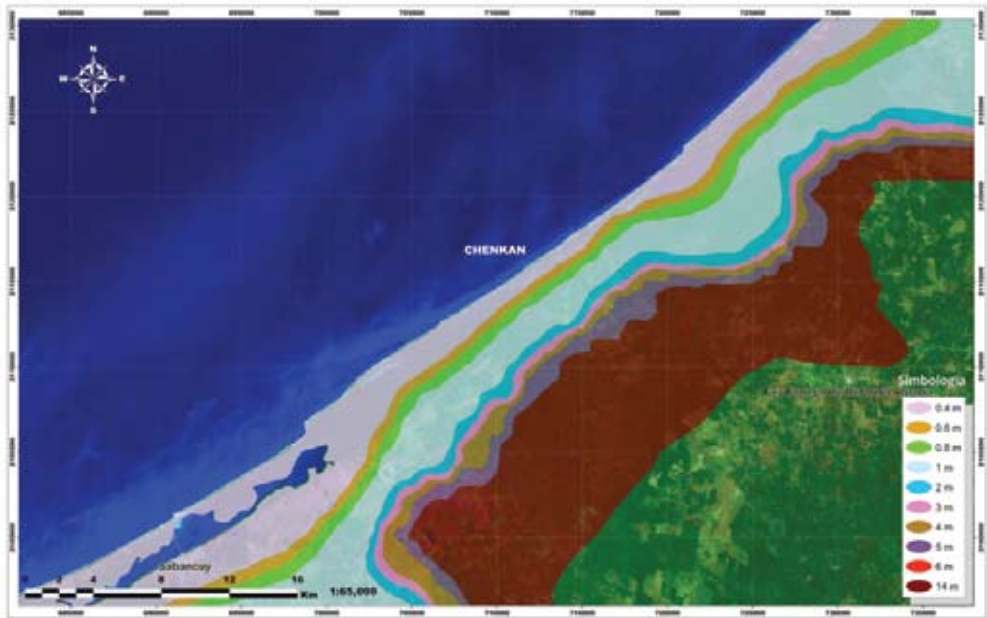


Figura 21. Modelación del aumento en el nivel medio del mar para el área de Chenkan, Campeche.

y éxito reproductivo de las tortugas podemos mencionar los siguientes:

- 1.- Erosión de playa, con pérdida de longitud de playa y aumento de pendiente de playa, lo que provoca que la tortuga encuentre un obstáculo y efectué un

mayor esfuerzo para depositar sus huevos fuera de la zona intermareal. Al no poder superar estas pendientes, se ven obligadas a desovar en zonas afectadas directamente por mareas y oleaje, perdiendo la totalidad de los nidos, y

quizás opten por buscar otras playas donde llevar a cabo el desove.

- 2.- Cambio del tamaño de sedimentos, de manera natural se modifican las condiciones hidrodinámicas por los cambios climáticos, o por procesos antropogénicos, al acarrear arena de otros lados hacia las playas. Esto provoca cambios en la temperatura y humedad de la arena. Existen también cambios en compactación que incrementan el esfuerzo para hacer el nido o que el sedimento no tenga la consistencia adecuada para hacer el nido.
- 3.- Incremento del oleaje y marea, causados por el incremento en el nivel del mar y cambio climático global que producen huracanes y nortes más intensos, afectando partes altas de la playa que normalmente no eran afectadas, siendo más vulnerables las playas de baja pendiente.
- 4.- Construcción de infraestructura en las playas. Los cambios urbanos en la playa al crear nuevas áreas turísticas, crecimiento de ciudades costeras con luces durante toda la noche, compactación de la arena por turistas, destrucción de dunas o de la supraplaya al construir hoteles, malecones, etc., modifican las áreas de desove y desorientan a las tortugas.
- 5.- Cambio muy rápidos en el tiempo. Es importante mencionar que muchos de los factores que han modificado la zona litoral se han dado en el tiempo geológico, y la fecha de la última glaciación fue hace 18 000 años donde el mar se encontraba 120 m abajo del nivel del mar. Sin embargo actualmen-

te los cambios se están dando en años, algunos en meses o en un solo evento catastrófico como puede ser un huracán, un norte, etc.

En fin, son varios los factores que debemos considerar en la pérdida de una playa y un ecosistema, desde locales, regionales, naturales y antropogénicos que se deben de estudiar sin contratiempo para poder en lo posible tomar las acciones pertinentes para la conservación de las playas y por ende de las tortugas, de lo contrario solo veremos los resultados finales que son la modificación de este ecosistema y la posible pérdida de las tortugas marinas, aunque es posible que estos organismos sobrevivan si se logran adaptar, evitando así su extinción como lo han hecho en millones de años de su existencia.

Los resultados obtenidos muestran que la presencia de infraestructura antropogénica (espigones y tetrápodos) afecta la anidación de las tortugas marinas al encontrarse menor número de anidaciones en los sitios de playa con la presencia de esta infraestructura. Es posible que como lo menciona Márquez (1996), que estas obras marítimas obligan a estas especies a recorrer grandes trechos paralelos a la costa y/o finalmente regresar al mar y anidar en sitios menos aptos en otros tramos más alejados de playa por el bloqueo del acceso para arribar a la playa, causando que estas aniden en otros sitios menos aptos para realizarlo y posiblemente con una menor probabilidad de éxito en la sobrevivencia de las crías.

La observación del desplazamiento de los sitios de anidación cuando las tortugas encuentran obstáculos nos habla de su capacidad de adaptación a situaciones nuevas. Este fenómeno probablemente es un indicador de la vulnerabilidad de las tortugas marinas ante

efectos de la erosión y del cambio climático, pues estos son animales que han sobrevivido por más de 250 millones a lo largo del tiempo y de múltiples variaciones climáticas. Sin embargo, actualmente los cambios se están dando en años, algunos en meses o en un solo evento catastrófico como puede ser un huracán o un norte. Es importante considerar que las tortugas marinas han existido y sobrevivido durante los cambios en los tiempos geológicos, siendo que quizás no puedan adaptarse a estos cambios repentinos, causando su extinción, ya que son especies que se encuentran en peligro de extinción.

El mayor número de nidos en el caso de ambas especies se ubicaron en zonas asociadas con textura de sedimentos de tamaño medio, debido a que esta característica sedimentológica mantiene las condiciones de humedad y temperatura dentro de la cámara de

incubación para un mayor éxito de eclosión de crías de tortugas marinas. Dichas variables demuestran tener una importante influencia en la sobrevivencia y eclosión de tortugas marinas como lo han indicado algunos autores (Torrey, 1978; McGehee, 1979; Arzola y Armenta, 1994). La menor frecuencia de anidación en sitios asociados con arenas gruesas y finas se puede explicar por que en estas texturas de sedimentos las condiciones de humedad y temperatura no llegan a mantenerse constantes (Morreale, 1982; Spotila *et al.*, 1981), así, las fluctuaciones de estas variables pueden alterar el desarrollo embrionario principalmente en las épocas de lluvias y secas. En este sentido es importante considerar la textura original de las arenas en las playas de anidación que serán sujetas a programas de recuperación de playas para no afectar los sitios de anidación y el éxito de estas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ambas especies de tortugas marinas prefieren arena con textura de grano medio para anidar, seguramente estas texturas de sedimento se vinculan al mayor éxito de viabilidad de los huevos, al mayor porcentaje de eclosión de huevos y nacimientos de crías. En ambas playas se observó un menor número de anidaciones asociadas con las arenas gruesas y finas.

Se encontró una distribución diferenciada de los nidos por zona de playa, En Chenkan fue mayor el número de nidos en la zona mesolitoral, mientras que en Isla Aguada fue mayor en la zona supralitoral. Posiblemente se trate de una preferencia del sitio de playa por especie, esto es, que a *Quelonia mydas* que fue la principal especie que arribó en Isla Aguada,

tenga preferencia por los sitios de supraplaya asociados a la vegetación de la duna marina y en el caso de *Eretmochelys imbricata* ésta prefiere sitios de la mesoplaya antes del escalón de marea, difícil de librar.

En ambas playas la anidación fue menor en las áreas de erosión y con presencia de infraestructura (espigones y tetrápodos) así como en las zonas de playa asociadas con sedimentos de arena finas. En este sentido, se encontró un desplazamiento de los sitios de anidación en las zonas sujetas a mayor erosión y con presencia de infraestructura.

La disminución del número de anidaciones de *Eretmochelys imbricata* en la playa de Isla Aguada, probablemente refleja un declive en

la población de esta especie que se encuentra en peligro de extinción, por lo que se hace urgente reforzar los esfuerzos y medidas para la protección y conservación de esta especie.

La pérdida del hábitat de anidación afecta la sobrevivencia y abundancia de las tortugas marinas y en un escenario de cambio climático se acelera el proceso de erosión por el aumento de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, por lo que es importante implementar medidas de mitigación ante la erosión costera para proteger el hábitat de anidación de las tortugas marinas.

Considerando lo anteriormente expuesto se pueden hacer las siguientes recomendaciones:

- Cuando se realicen proyectos para recuperación de playas en zonas de anidación de tortugas marinas deberá utilizarse siempre arena que cumpla con las características sedimentológicas de la arena original, esto es, con la misma textura de sedimento de los sitios de anidación originales.
- Se recomienda ampliar este tipo de estudios a los sitios prioritarios de conservación de las tortugas marinas y continuar investigando sobre el papel que juegan los procesos erosivos costeros en el éxito de la anidación de éstas, así como monitorear permanentemente la dinámica de las playas de anidación para evaluar si se encuentran en erosión y poder definir medidas de mitigación.
- Es importante evitar poner obstáculos de origen antropogénico (rompeolas, espigones, tetrápodos, geotubos, etc.) que impidan la arribazón de las tortugas marinas, sin un estudio previo de la dinámica costera y el impacto que pueden causar. Del mismo modo, es importante realizar un análisis del impacto antropogénico por el manejo de las especies de tortugas marinas y considerar los escenarios de erosión y cambio climático para diseñar medidas de mitigación en los programas de conservación de la tortuga marina.
- Para conocer si la nueva condición de erosión afectará al nuevo sitio de la línea de costa y la capacidad para el nuevo desarrollo de playas en la zona erosionada, se recomienda realizar perfiles geomorfológicos de dos o más Km. de longitud, donde se ubiquen los rasgos geomorfológicos y litológicos del mismo. Así como realizar durante los estudios de caracterización de sitios de anidación, trincheras de exploración de dos a tres metros de profundidad (o hasta la cota cero del nivel medio del mar) para conocer la condición sedimentaria tierra adentro y constatar si existe capacidad de generación de nuevas playas en los sitios erosionados.

LITERATURA CITADA

- ANIDE, 2005. Metodología para la determinación de erosión costera. Informe UO-IT-01, 120 pp. Cuernavaca, Morelos (Citado con autorización del propietario de la tecnología).
- Arzola F., y J Armenta, 1994. Análisis comparativo de los factores ambientales en nidos naturales y nidos trasladados y su efecto en crías de tortuga golfina, *Lepidochelys olivacea* en la playa El Verde, Mazatlán, Sinaloa, durante la temporada 1992-1993. Tesis de Biología, Instituto Tecnológico de Los Mochis, México, 72 p.
- CECARENA, 1993. Taller para el manejo de manglares de humedales costeros en el noroeste de México, Memorias, 7,11 de diciembre, p. 8.
- Diario Oficial de la Federación, 2002. Norma oficial mexicana. Protección ambiental – especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo. Nom-059-Semarnat-2001. miércoles 6 de marzo de 2002, 2da. sección: 1-153.
- Folk., R.L.. 1966. A review of grain size parameters. *Sedimentology*, 6: 73-93
- Guzmán Hernández, V., 1996. Reseña de la temporada de anidación en Campeche, México, durante 1996. Doc. Téc. del Centro Reg. de Invest. Pesquera de Cd. del Carmen. N° 3. Programa Nacional de Tortugas Marinas, INP. 9 p. Inédito.
- Guzmán Hernández, V.. 2005. Informe técnico final del programa de conservación de tortugas marinas de Campeche, México en 2005. p. 10-12.
- INE, 1997. Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna d Términos, México. México, D.F. 201 p.
- Lewis, D. W., 1984. Practical Sedimentology. Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 229 p.
- Márquez, R., 1996. Las tortugas marinas y nuestro tiempo. La ciencia para todos No. 144. Fondo de cultura económica. México D. F. 200 p.
- Márquez, G. A. Z., V. Pérez, E. Márquez y Z. Flores, 2007. Cambios en el tamaño de los sedimentos de las playas del litoral del Municipio de Solidaridad por efectos climáticos estacionales. *Revista de la Universidad del Caribe*, : 59-68.
- McGehee, M., 1979. Effects of moisture on eggs and hatchlings of loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*). Thesis. B. S., Presbyterian College, USA 252 p.
- Morreale, S.J., G.J. Ruiz, J.R. Spotila y E.A Standora, 1982. Temperature dependent sex determination: Current practices threaten conservation of sea turtles. *Science*, 216:1245-1247.
- Ortiz-Pérez, M., 1992. Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltático del Río San Pedro; Campeche; Tabasco. *Boletín del Instituto de Geografía*, 25, 7-24.
- Rothwell, R.G., 1989. Minerals and Mineraloids in Marine Sediments, Elsevier Applied Science, London, 278 p.
- Salazar-Vallejo, S.I.1998. Calentamiento global y efectos costeros. *Ava. Cient.*, 25:10-20.
- Spotila, J.R., E.A. Standora, S.J. Morreale y G. J. Ruiz de Clark, 1981. Effects of incubation temperature on the sex of hatchling Caribbean green turtles. Final Report to Rutgers University for sub-grant activity on USFWS Project 14-16-002-80-222. 29 p.
- Spotila, J. R., R. R. Reina, A. C. Steyermark, P. T. Plotkin y F. V. Paladino. 2000. Pacific leatherback turtles face extinction. *Nature*, 405: 529-530.
- Torres R.V, G.A. Márquez, R.-A Bolongaro-Crevenna, H.J. Chavarría y D.G. Expósito, 2009. Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debida a efectos del cambio climático.

- Torrey, M., 1978. Morfogénesis de los vertebrados. Editorial Limusa, México. 776 pp
- IUCN, 2001. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Ruling of the IUCN Red List Standards and Petitions Subcommittee on Petitions Against the 1996 Listings of Four Marine Turtle Species.
- IUCN/CSE, 1995. Estrategia Mundial para la Conservación de las Tortugas Marinas. 24 p.
- Wentworth, C. K., 1922. A scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *Jour. Geol.* 30(5): 377-392.
- Wigley T.M.I., M: Salmon, M. Hulme, S.C.B. Raper, 2009. Model for the Assessment of Greenhouse-gas induced Climate Change (MAGICC, 5.3). NCAR, Boulder, Colorado.
- Woolf P., 1997. Topografía. alfaomega. 9ª Edición. 634 p.
- Salazar-Vallejo, S.I., 1998. Calentamiento global y efectos costeros. *AvaCient*, 25: 10-20
- Zurita G., J.C., R. Herrera, y B. Prezas, 1993. Tortugas marinas del Caribe. p. 735-751. En: S. I. Salazar-Vallejo y N E. González (eds). Biodiversidad Marina y costera de México. Conabio y cicro, México. 865 p.

Márquez R., y Ma. del C. Jiménez, 2010. El posible efecto del cambio climático en las tortugas marinas, p. 97-112. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

El posible efecto del cambio climático en las tortugas marinas

R. Márquez y Ma. del C. Jiménez

RESUMEN

La supervivencia de las tortugas marinas, como la de otros organismos, está siendo afectada en mayor o menor grado por el calentamiento global; uno de los momentos más vulnerables del ciclo de vida es la incubación de los huevos, ya que la determinación del sexo varía con la temperatura, y como resultado hay una feminización de la población y la consecuente disminución de la fecundidad de los huevos al reducirse el número de machos. De manera natural esto se está presentado alternativamente durante periodos cálidos y frescos; sin embargo, el impacto es temporal, por lo que se restablece el equilibrio de sexos. Otro efecto del calentamiento global es la reducción del hábitat de alimentación, como ocurre con los arrecifes coralinos, las zonas de pastizales o de algas marinas, las áreas abundantes en crustáceos y moluscos, etc. La energía del oleaje, la periodicidad de las corrientes y el ciclo de mareas, modelan las características de las playas además de propiciar el ascenso de las hembras al lugar de desove y contribuir a la dispersión de las crías. Por otro lado la elevación del nivel del mar y el incremento de las tormentas y huracanes, contribuiría a modificar las características de las playas. Así el impacto de fenómenos naturales degradará más rápidamente las playas de anidación, y causará alta mortalidad en huevos y crías; asimismo obstaculizará el arribo de las hembras, al formarse paredones en las playas, pero debido al comportamiento migratorio de estas especies, cualquier otra medida se debe establecer debido a la erosión causada por el oleaje extremo. Los esfuerzos de mitigación se deben enfocar hacia la protección de las nidadas en las playas, de una manera coordinada entre los países donde se distribuyen, ya que al ser impactadas también las áreas de alimentación, la protección que se logre en las áreas de reproducción no tendrá algún efecto positivo.

Palabras clave: tortugas marinas, calentamiento global, mitigación

INTRODUCCIÓN

Las tortugas marinas son reptiles anfibios muy longevos que la mayor parte de su vida deambulan en los océanos tropicales y subtropicales, pero que se acercan a las zonas costeras para aparearse y desovar; por lo general alcanzan la madurez sexual a edades entre 10 y 20 años, según la especie, razón por la cual sus poblaciones han sido muy frágiles a la sobreexplotación de que han sido objeto por el hombre.

En la actualidad existen seis géneros, de los cuales *Caretta*, *Chelonia*, *Dermochelys* y *Natator*, aparecieron entre el Mioceno y Plioceno, mientras que los géneros *Eretmochelys* y *Lepidochelys* proceden de finales del Pleistoceno (Romer, 1956). Todas las especies que perduran en nuestra época se originaron, al menos, hace más de un millón de años (Holman, 1967), periodo en el que han sucedido varias glaciaciones; sin embargo, esos cambios ambientales han ocurrido a lo largo de miles de años, lo que les permitió adaptarse. En México existen representantes de cinco géneros¹, de la mayoría hay áreas de alimentación y anidación en todos los litorales.

Las hembras adultas regresan al ambiente terrestre, y suben a las playas arenosas, donde permanecen durante breves periodos para desovar y enterrar sus huevos, los cuales se incuban a la temperatura ambiental, cercana a los 30°C, durante poco menos de dos meses; una vez que eclosiona la mayor parte de las crías, éstas abandonan simultáneamente el nido y se

dirigen hacia el mar, donde permanecen hasta llegar a la edad adulta. En ese lapso los juveniles de algunas especies habitan temporalmente en lagunas costeras antes de regresar al mar y seguir las corrientes marinas para llegar a las áreas de alimentación, cuya ubicación puede variar según la época del año.

El hábitat en el que se desarrollan depende de su tipo de alimentación, así los ejemplares de *Chelonia*, que son vegetarianos, frecuentan áreas donde abundan las algas y pastos marinos, los de tortuga carey (*Eretmochelys*) permanecen en arrecifes ricos en corales blandos, esponjas y moluscos, mientras que los de *Lepidochelys* y *Caretta* habitan en las inmediaciones de áreas en las que abundan los crustáceos bentónicos y pelágicos. Por otro lado, durante las migraciones, los adultos de la tortuga laúd (*Dermochelys*) se alimentan en los frentes marinos donde se congregan medusas, mientras que las crías y juveniles de la mayoría de las especies se han observado en áreas de frentes y giros donde se acumulan macroalgas flotantes, que les puede servir como refugio y los organismos nectónicos que allí se reúnen, como fuente de alimentación.

La ubicación y distancia entre las áreas de alimentación y anidación difiere entre las especies. Así por ejemplo, las tortugas caguamaperica (*C. caretta gigas*) realizan migraciones transoceánicas entre el Pacífico occidental y las costas de Baja California y la tortuga laúd (*D. coriacea schlegelii*), entre el Pacífico sudoc-

¹A excepción de *Natator*, que vive principalmente en Australia, en México existen 5 géneros, 7 especies y 6 subespecies (Márquez, 2002), cuya área de distribución abarca además de territorio mexicano, áreas en Asia, Sudamérica, ambas costas de Estados Unidos, el Caribe o Centroamérica.

cidental y Michoacán, Guerrero y Oaxaca. La tortuga golfina (*L. olivacea*) que anida en México, se distribuye desde Baja California hasta Colombia y Ecuador. En contraste, una alta proporción de los ejemplares de tortuga Carey (*E. imbricata*) permanecen en aguas costeras, rocosas o coralinas no muy alejadas de las playas de anidación de Campeche y Yucatán. Un caso particular es el de la tortuga lora (*L. kempii*) porque mientras los adultos son endémicos del Golfo de México, las crías y juveniles se dispersan por el norte de este cuerpo de agua y la costa oriental estadounidense (Márquez-M., 1990).

Las tortugas marinas son organismos poiquiloterms por lo que su ciclo de vida es regulado directa e indirectamente por la temperatura ambiental. Quizá el efecto más evidente se presenta en la reproducción, ya que controla la migración de las áreas de alimentación hacia las playas de desove, la anidación, la determinación sexual durante la embriogénesis y la duración de la incubación. Por otro lado, los efectos indirectos se manifiestan a través de los cambios que ocurren en los diferentes ecosistemas en los que habitan las tortugas a lo largo de su vida, ya que éstos determinan la disponibilidad del hábitat y las fuentes de alimento por lo que son más difíciles de evaluar.

A partir del siglo XIX, como parte de un proceso cíclico natural, inició el calentamiento paulatino de la biosfera; sin embargo, la industrialización acelerada ha producido gran cantidad de gases de invernadero por lo que

en las últimas décadas se han registrado altas temperaturas atmosféricas y probablemente ha aumentado la frecuencia de las tormentas tropicales y huracanes. Otra consecuencia ha sido el derretimiento de glaciares polares y alpinos, lo que eventualmente puede conducir a la elevación del nivel medio del mar y podría modificar la dinámica costera y los patrones de circulación marina.

Los Modelos de Circulación General Océano-Atmósfera (AOGCM, por sus siglas en inglés) sugieren que el calentamiento en la región de México y Centroamérica, entre los años 2000 y 2100, será mayor que en el resto del globo, mientras que la precipitación decrecerá significativamente (tabla 1). En ese periodo las anomalías térmicas se incrementarán de 1.5 a 3°C en el escenario más frío y de 3 a poco más de 5°C, en el más cálido (Christensen *et al.*, 2007), lo cual contrasta con las condiciones del siglo XX, cuando fue de alrededor 0.5°C. Según estos autores, el impacto será más acusado durante la primavera en la masa continental y en la costa (tabla 1).

Aunado a este proceso, las costas y mares mexicanos presentan cambios derivados de otros eventos naturales, cuyos ciclos duran unos cuantos años, pero cuya influencia es global, tales como El Niño-La Oscilación del Sur (ENOS)² y la Oscilación Decadal del Pacífico Norte (OPN) en el Pacífico mexicano y la Oscilación del Atlántico Norte (OAN) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA), en el Golfo de México y Caribe. Cabe mencionar que existen teleconexiones entre

² El ENOS es un proceso de interacción océano-atmósfera, a cuya fase marina se le conoce como “Niño” de manera genérica; en este documento a la fase cálida del evento, durante la cual se intensifica el transporte de aguas del Centro del Pacífico hacia la costa mexicana, se le denominará “Niño” y “Niña” a la fase fría, durante la cual se incrementa el aporte de la corriente de California y el desplazamiento de las masas de aire de Norteamérica hacia territorio mexicano.

Tabla 1. Proyecciones estacionales para la Región México y Centroamérica.
10° a 30°N, 116 a 83°O (tomado de Christensen *et al.*, 2007).

Estaciones (meses)	Respuesta térmica (°C)						Respuesta pluvial (%)						Estaciones extremas (%)		
	Min	25	50	75	Max	T meses	Min	25	50	75	Max	T meses	Cálida	Húmeda	Seca
DEF	1.4	2.2	2.6	3.5	4.6	15	-57	-18	-14	-9	0	>100	96	2	25
MAM	1.9	2.7	3.6	3.8	5.2	10	-46	-25	-16	-10	15	75	100	2	18
JJA	1.8	2.7	3.4	3.6	5.5	10	-44	-25	-9	-4	12	90	100	*	24
SON	2	2.7	3.2	3.7	4.6	10	-45	-10	-4	7	24		100	*	15
Anual	1.8	2.6	3.2	3.6	5	10	-48	-16	-9	-5	9	65	100	2	33

regiones, por lo cual El Niño influye en la costa nororiental y oriental mexicana, a través de la intensificación de los vientos del norte (Nortes); por otro lado, en los años posteriores a este evento disminuye la frecuencia de los huracanes y tormentas tropicales en el Atlántico.

Las tortugas marinas son especies muy antiguas cuya capacidad de adaptación está determinada por la rapidez y escala geográfica a la que ocurren los cambios en el ambiente; si bien sobrevivieron a las cuatro grandes glaciaciones del Pleistoceno y otra multitud de eventos de menor magnitud que llevó a la extinción de los grandes mamíferos, y han man-

tenido mecanismos fisiológicos que les han permitido amortiguar el efecto de los eventos cuyos ciclos son de corto y mediano plazo, se desconoce el impacto del incremento acelerado de la temperatura y los procesos asociados con éste. En este documento se abordarán, en primera instancia el efecto de la temperatura en la reproducción y otros aspectos de la fisiología; en segundo lugar se presentarán las consecuencias de los cambios ambientales en los ecosistemas en los que se desarrollan, para finalizar con un análisis cualitativo de las consecuencias del cambio climático en las tortugas marinas.

MECANISMOS DE ADAPTACIÓN DE LAS TORTUGAS MARINAS Y SU RELACIÓN CON LA TEMPERATURA AMBIENTAL

Debido a que la reproducción de las tortugas marinas es ovípara, y para la producción de crías se debe cumplir con un protocolo que implica la salida de las hembras maduras a la playa para desovar, lo cual se produce principalmente a través de ciclos anuales o bianuales, y en temporadas específicas, que inician frecuentemente a mediados de primavera. Sin embargo, para que cada especie inicie el perio-

do de anidación, es necesario que se cumplan ciertas características ambientales que faciliten, primero la subida de las hembras a la playa, enseguida, que permitan la construcción de los nidos, que favorezcan la incubación y la supervivencia del mayor número posible de crías en cada nido y finalmente que las crías lleguen exitosamente al mar. En temporadas frías y secas, hay retrasos en el inicio de la

temporada de anidación. Las tortugas acuden a las áreas de anidación siguiendo corrientes marinas y gradientes térmicos. Una vez que llegan a estas zonas, la salida a la playa, que generalmente es nocturna, se incrementa durante la pleamar. En el caso de las tortugas que forman arribazones (lora y golfina), existe un mecanismo fisiológico que las obliga a permanecer frente a la playa y alcanzar cierta concentración numérica y, la cual coincide por lo general, con el cuarto menguante y el cuarto creciente, y da lugar a los desoves masivos.

La distribución de los nidos en las playas también obedece a gradientes térmicos y de humedad óptimos, que generalmente se presentan una vez iniciada la temporada de lluvias, además cada especie tiene sus parámetros específicos de acuerdo a su talla y peso, así la laúd, que es la de mayor tamaño, desova en playas de alta energía con talud pronunciado, muy cerca de la línea de marea alta, las tortugas de talla media (blanca y caguama) hacen mayores recorridos en playas más amplias y anidan cerca del inicio de la vegetación o incluso se internan en ella (carey) y las tortugas pequeñas (lora y golfina) anidan en playas amplias y extensas de menor declive, y forman las grandes arribazones, que se distribuyen en amplias zonas de la playa, muy por arriba de la línea de marea alta.

En la mayoría de los reptiles la definición del sexo en los embriones depende de la temperatura imperante durante el desarrollo; entre las tortugas, cuando esta variable rebasa un determinado umbral³ al finalizar el primer tercio de la embriogénesis, se produce mayor cantidad de hembras, mientras que cuando es menor a ese valor, predominan los machos (Mrosovsky e Yntema, 1995). Por otro lado, el valor de esta variable influye en el periodo de incubación de los huevos, ya que incrementa la tasa metabólica de los embriones.

La temperatura durante la incubación varía de manera natural, por lo que es común que la proporción de sexos sea distinta entre las diferentes clases anuales (Wibbels *et al.*, 1999) e incluso dentro de los nidos puestos en una misma temporada, dependiendo de las condiciones en que se desarrollen; sin embargo, el incremento prolongado de la temperatura media anual podría feminizar a las poblaciones (Limpus, 2006), lo que afectaría la fecundidad total de la población⁴ y por lo tanto su viabilidad. Esto podría agravar la situación de algunas poblaciones de tortugas que actualmente ya están en riesgo de extinción, como las tortugas laúd y de carey.

³ La temperatura pivotal, es aquella a la cual se produce igual cantidad de machos y hembras, en la mayoría de las especies se encuentra alrededor de los 30°C.

⁴ La fecundidad de la población disminuiría ya que, aún cuando las hembras continuaran produciendo la misma cantidad de huevos, éstos no podrían ser fecundados porque el número de machos sería insuficiente y las hembras ovipositarían huevos infértiles. Limpus (2006) menciona que una proporción preocupante sería de 1 macho:4 hembras.

CAMBIOS EN EL ECOSISTEMA Y SU INFLUENCIA EN LAS TORTUGAS MARINAS

Durante su ciclo de vida estos reptiles habitan en tres diferentes ambientes: terrestre, costero-nerítico y oceánico. En el primero ocurre el desove y el desarrollo embrionario, mientras que los otros dos funcionan como áreas de tránsito y alimentación.

En el ambiente terrestre, las tortugas anidan en playas arenosas cuyas características topográficas y sedimentarias, aunadas al gradiente vertical de temperatura, profundidad de la humedad en la playa, la cobertura vegetal en la anteplaya, entre otros, determinan el éxito de la anidación y la eclosión de las crías. La energía del oleaje, la periodicidad de las corrientes y el ciclo de mareas, modelan las características de las playas además de propiciar el ascenso de las hembras sobre la playa y contribuir a la dispersión de las crías.

Las costas se transforman constantemente; así los eventos geológicos de gran escala han producido grandes cambios, pero esto ha ocurrido de tal manera que las tortugas se han ajustado a ellos. Estos reptiles también se han adaptado a procesos geológicos de periodos más cortos, tales como los ciclos alternados de erosión y acreción que suceden estacionalmente en las playas arenosas; sin embargo la actividad humana está modificando esos procesos de manera acelerada a través de obras de ingeniería, la extracción de arena y la construcción de represas a lo largo de los ríos, lo que ha propiciado la pérdida de áreas disponibles para la anidación (Márquez-

García⁵, com. pers.). Se prevé que una de las consecuencias del cambio climático será la elevación del nivel del mar y el incremento de las tormentas y huracanes, lo que contribuiría a modificar sustancialmente las características de las playas.

La rapidez con la que sucedan los cambios en la línea de costa será determinante para que las tortugas se adapten, así por ejemplo, es probable que la pérdida constante de grandes extensiones de playa en cortos periodos de tiempo que esta ocurriendo en Campeche, sea uno de los factores responsables del decremento de la anidación de tortuga carey observado desde 2001 (Guzmán-H., *et al.*, 2008).

Las tortugas son muy fieles a sus playas (filopatría) y aunque pueden desplazarse cuando encuentran algún obstáculo en el sitio elegido para desovar (*v.gr.* la tortuga lora), se supone que las alteraciones en la fisiografía costera tendrían un impacto negativo en sus poblaciones.

La introducción de especies vegetales y animales en las zonas costeras cercanas a las playas de anidación, también afecta a las poblaciones; así por ejemplo, con la llegada de las hormigas de fuego y de armadillos a Florida se incrementó sustancialmente la depredación de huevos y crías (Woolard *et al.*, 2004). En México los principales problemas se han relacionado con animales ferales pero no se descarta que las especies exóticas se tornen un inconveniente, porque la capacidad de

⁵ Antonio Márquez García, Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

dispersión de muchas de ellas probablemente se incrementa con el calentamiento global. Por otro lado, la vegetación introducida tiene menos capacidad para estabilizar el suelo que las especies nativas y las raíces de algunas especies pueden incrementar la mortalidad de los huevos y las crías. La casuarina (*Casuarina equisetifolia*) ha sido plantada en gran parte del Golfo de México y el Caribe, y aunque no hay reportes de efectos negativos en las playas de anidación, como en Florida (Geary, 1983; tomado de Parrotta, 1993), habría que darle seguimiento.

La tendencia de la temperatura ambiental durante el siglo XX en las diferentes playas de México presenta particularidades regionales, que en la mayoría de los casos no ha sido analizada porque la cantidad de datos es insuficiente. En Rancho Nuevo (Tamps.), por ejemplo, donde anida la tortuga lora (*L. kempii*) hubo dos etapas en que las anomalías térmicas positivas fueron más frecuentes, la primera ocurrió hacia el final de la década de los cuarenta, mientras que la segunda inició a mediados de los años setenta y se intensificó a partir de 1990, como en otras partes del mundo (Hidore, 1996), entre ese año y 2003, el incremento en la anomalía estandarizada⁶ fue de 0.015 por año (Jiménez-Quiroz, 2003); en contraste, en la costa de Jalisco donde hay colonias importantes de tortuga golfina (*L. olivacea*), aunque también hubo dos periodos, el primero ocurrió alrededor de los años cincuenta, mientras que el segundo fue semejante al de Tamaulipas, por lo que el aumento entre 1970-2007 fue de 0.0029 por

año (Jiménez-Quiroz, datos sin publicar); no obstante, puesto que esos incrementos son valores promedio, enmascaran los cambios abruptos producidos por el ENOS.

Si bien la temperatura promedio ha mantenido una tendencia positiva desde la década de los setenta, su efecto en las poblaciones es modulado por sus variaciones en el espacio y el tiempo. En el caso de la principal área de anidación de la tortuga lora, que abarca desde Soto la Marina, donde el clima es muy cálido y seco, hasta Tampico, que es más húmedo, podría haber diferencias en la proporción sexual entre las nidadas, dependientes de la ubicación de la puesta. Por otro lado, las arribazones de esta especie inician generalmente entre abril y los primeros días de mayo, cuando aún se presentan vientos del Norte y el ambiente es más fresco que a finales de mayo y junio, cuando es tórrido. Durante cada temporada las tortugas han sido capaces de “ajustar” su comportamiento en respuesta a las condiciones térmicas, de humedad y tipo de sedimentos alterando la periodicidad de las arribazones y la distribución de sus nidos sobre la playa (Jiménez-Quiroz, 2003) ya que incluso se han encontrado nidos en Tamaulipas y Texas de una misma hembra (Peña, com. pers.*). Esto sugiere que las tortugas podrían adaptarse a los cambios ambientales; sin embargo, el riesgo sobre la tortuga lora es grande porque sólo en Tamaulipas se reproduce en cantidades significativas.

En contraste, la tortuga golfina es muy abundante en el Pacífico Mexicano, sus principales playas de anidación se encuentran en

⁶ Las anomalías estandarizadas se refieren a la diferencia de un valor con respecto al promedio de un intervalo de al menos 30 años, dividido entre la desviación estándar.

* Biol. Luis Jaime Peña, Encargado de Programas de Conservación, Zoológico Gladys Porter, Brownsville, Texas.

Oaxaca, pero se reproduce desde el norte de Sinaloa hasta Chiapas, por lo que anida en una mayor variedad de climas. Cabe mencionar que los modelos AOGCM (Christensen *et al.*, 2007) prevén que una de las regiones en donde los cambios serán más acusados es el Golfo de Tehuantepec, en cuyas inmediaciones se encuentran La Escobilla y Morro Ayutad de las playas de anidación más importantes de esta especie en el mundo, mientras que otras áreas significativas, como el playón de Mismaloya, Jalisco, aún son intensamente saqueadas (Trejo com. pers*) y lo mismo sucede en Tierra Colorada, Guerrero. En otras localidades hay una pérdida constante de hábitat por lo que es posible que el impacto del cambio climático dependerá de la presión que ejerzan las poblaciones humanas sobre las diferentes playas de esta especie.

El efecto del cambio climático en otras especies también dependerá de la ubicación de las playas y el impacto de las actividades humanas sobre ellas. Los modelos AOGCM prevén que habrá incrementos significativos de temperatura en la vecindad de la costa sur del Golfo de México, donde se reproducen la tortuga carey y la blanca. El caso de la primera especie se ha detectado un decremento significativo de la anidación desde 2001 que aún no ha sido explicado, pero que como ya se ha mencionado, se supone es resultado de la pérdida del hábitat, pesca inmoderada y cambios climáticos. (Guzmán-H., *et al.*, 2008)

Las playas de la península de Yucatán son particularmente frágiles por sus características fisiográficas, pero además de estar expuestas a las consecuencias del calentamiento glo-

bal (incremento de huracanes, elevación del nivel del mar, etc.) están siendo utilizadas por la industria turística, lo que ha dado lugar a la pérdida del hábitat y por lo tanto, limitará la capacidad de dispersión de las tortugas.

En la zona nerítica y marina los cambios que produciría el calentamiento global podrían ser muy variados. Un ejemplo de cómo afectan dichos cambios puede apreciarse durante “El Niño”, la etapa cálida del evento de El Niño-La Oscilación del Sur (ENOS) y la fase positiva de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA).

Las masas de agua cálida arrastradas desde el Pacífico central durante El Niño modifican significativamente el clima y las características de la capa de mezcla, lo que merma la productividad del Pacífico; mientras que durante La Niña predomina la influencia de la corriente de California y la productividad se incrementa. Al norte del paralelo 20°N se manifiesta la oscilación decadal del Pacífico norte, magnificando o amortiguando el efecto del ENOS, dependiendo de su fase.

En el Pacífico mexicano, incluyendo el interior del Golfo de California, se encuentran algunas de las playas de anidación más importantes de las tortugas golfinas, negra y laúd, así como importantes áreas de alimentación de las dos primeras especies y de la tortuga caguama del Pacífico, cuyos juveniles y subadultos se alimentan en la costa centro y suroccidental de Baja California, pero que se reproduce en el Pacífico occidental.

Uno de los efectos más evidentes del calentamiento que ocurre durante El Niño es la ampliación del área de distribución de las es-

* M. en C. Antonio Trejo Robles, Investigador del Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara.

pecies por lo que se han observado ejemplares de tortugas laúd, caguama del Pacífico y negra hasta el Golfo de Alaska (Whiteford, 1999). Por la dificultad de evaluar la condición de las poblaciones en el mar, a continuación se describen algunas de las hipótesis que podrían explicar las variaciones de la anidación en las playas en relación con los eventos climáticos.

El ENOS de mayo de 1997 a abril de 1998 produjo cambios significativos en las poblaciones de tortugas en el Pacífico Oriental (Briseño, com. pers.*). En la Escobilla durante la temporada 1997 la anidación de la tortuga golfina mantuvo la tendencia creciente que había iniciado en 1989; mientras que en la temporada 1998, cuando persistían las condiciones cálidas, decreció significativamente. La anidación se recuperó durante la Niña de 1999-2000, cuando alcanzó las abundancias más acusadas del periodo 1995-2005 (figura 1). Esta tendencia también se observó en la anidación de esta especie en playas de Colima y Jalisco. Cabe mencionar que estas variaciones solo se presentaron durante los eventos más intensos, no así durante los débiles o moderados.

En 1997 también hubo gran pérdida de nidos, ya que además de elevarse el nivel del mar como resultado del arrastre de las masas de agua cálida del Pacífico central, la temporada de huracanes fue más acusada que en otros años, una de cuyas consecuencias fue la devastación de las playas por inundación y erosión debida al intenso oleaje, así por ejemplo, la cuarta, quinta y sexta arribazones de la temporada 1997 fueron afectadas por los huracanes Paulina y Rich, por lo que se perdió

cerca de 30% del total de las crías esperadas (Márquez-M *et al.*, 2007).

El efecto de El Niño también ha sido documentado en las colonias de Australia y Japón de la caguama del Pacífico (Chaloupka *et al.*, 2008); durante este evento disminuye la cantidad de alimento, lo que a su vez repercute en la anidación y el reclutamiento; por el contrario, durante La Niña se incrementa la productividad oceánica y la abundancia de las presas, lo que favorece la capacidad reproductiva de estas especies. Esto permite suponer que la cantidad de juveniles que lleguen a la costa occidental de Baja California en años posteriores a los Niños será menor que después de las Niñas; sin embargo, no hay evaluaciones al respecto. Por otro lado, cabe mencionar que las surgencias invernales que normalmente se producen en ese litoral disminuyen significativamente durante los Niños, lo cual repercute en la productividad de la zona (Lluch-Cota *et al.*, 1999); sin embargo, el efecto de estos cambios en la tortuga caguama no es muy claro ya que a pesar de que los bancos de langostillas (*Pleuroncodes planipes*), su principal presa, se desplazan hacia el norte, la abundancia de los camarones se incrementa significativamente en el área (Lluch-Cota *et al.*, 1999), lo cual sugiere que estos organismos pueden continuar alimentándose en sus áreas tradicionales o desplazarse tras las langostillas; sin embargo, habrá que hacer los análisis correspondientes, ya que las langostillas son pelágicas y los camarones, bentónicos.

En el caso de la tortuga negra, las principales playas de anidación se encuentran en Michoacán y las áreas de alimentación en el

*M. en C. Raquel Briseño Dueñas Investigadora de la Unidad Académica Mazatlán, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

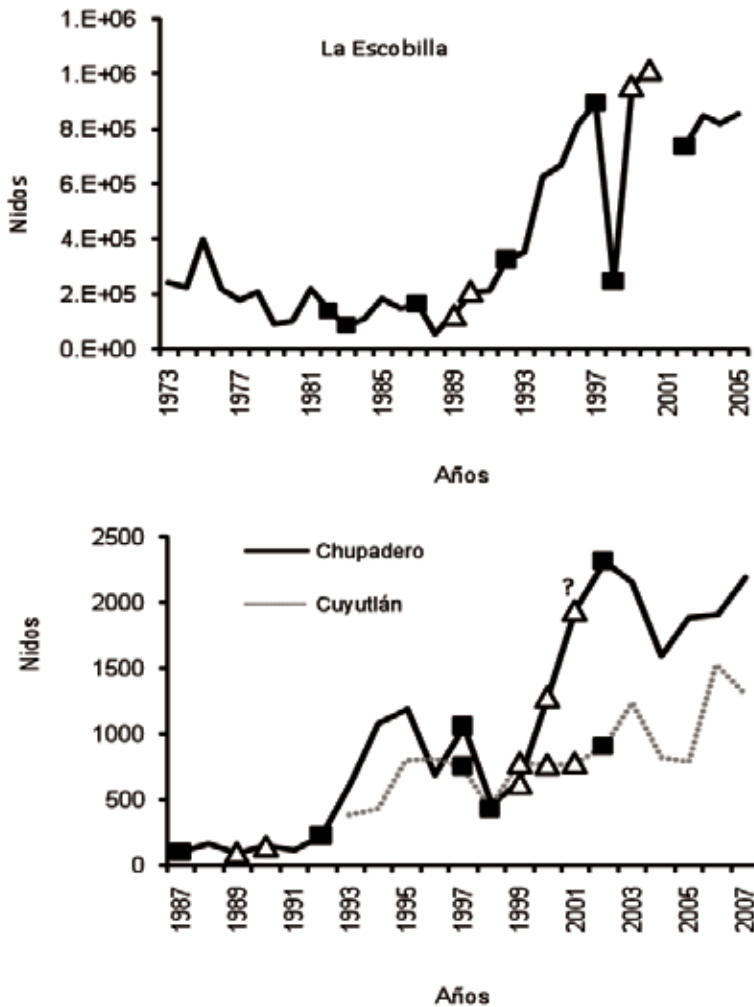


Figura 1. Variaciones de la anidación de tortuga golfinia en los campamentos de La Escobilla (Oax.), Chupadero y Cuyutlán (Col.). La cantidad de nidos en la playa disminuyó cuando se presentaron los Niños (■) más intensos (1981-1982; 1997-1998), pero no durante los moderados (1987; 1991-1992). Por el contrario, durante la Niña (Δ) abundó el desove. En 2002 la prolongación de las condiciones de La Niña fue resultado de la fase fría de la OPN. En Cuyutlán el efecto se enmascaró por problemas de saqueo de huevos en la playa. Fuentes: Cuauhtémoc Peñaflores⁷, Armando Hernández-Corona⁸ y Ma. de la Cruz Rivera-Rodríguez⁹.

⁷Investigador del Centro Mexicano de la Tortuga, en Oaxaca - Semarnat.

⁸Responsable del Campamento Tecuanillo, en Colima - Semarnat-Conanp.

⁹Responsable del Centro Ecológico de Cuyutlán "El Tortugario", en Colima.

interior del Golfo de California, Istmo de Tehuantepec y Centroamérica (Márquez-M., 1990; Alvarado y Figueroa, 1992). En la población anidadora el efecto negativo de El Niño aparentemente se continua manifestando hasta un año después de concluido el evento, a diferencia de la golfinia, donde fue evidente casi de inmediato. Durante El Niño, la influencia de las masas de agua cálidas se presentan hasta el interior del Golfo de California y por la costa occidental de la península, afectando la productividad de toda la región, lo que podría explicar el decremento de la anidación, ya que los periodos reemigratorios pueden abarcar de 1 a 5 años (Alvarado y Figueroa, 1990). En el norte de Australia e Indonesia, Limpus y Nicholls (1988, 1990) encontraron que las variaciones de *C. mydas* estuvieron correlacionadas, aunque desfasadas en un lapso de dos años, con el índice de la Oscilación del Sur, evento atmosférico frecuentemente asociado con El Niño. Ellos encontraron que las variaciones de temperatura, la biomasa de macroalgas en el área de forrajeo y la abundancia de tortuga verde en la playa de anidación estaban relacionadas. De manera similar, Saba *et al.* (2007) encontraron que los intervalos reemigratorios de dos colonias costarricenses de tortuga laúd estaban inversamente relacionados con la productividad de las áreas de alimentación en el Pacífico oriental tropical, por lo que es probable que ocurra algo similar en las colonias mexicanas.

El Golfo de México, hábitat de los adultos de las tortugas lora, Carey y blanca se encuentra en el límite de las regiones tropical y sub-

tropical, por lo que los procesos atmosféricos que influyen sobre él son diferentes a través del mismo cuerpo de agua. El norte y noroeste son afectados con mayor intensidad por los eventos que se generan en el Pacífico, Norteamérica y el Atlántico Norte, en especial durante el invierno y primavera (White y Downton, 1991). La Oscilación del Atlántico Norte afecta principalmente la costa este de los Estados Unidos, y en menor medida el norte del Golfo de México. Durante su fase positiva, la temperatura invernal del sureste de los Estados Unidos es templada, mientras que durante la negativa los inviernos son más crudos. En el Golfo de México, también influye el ENOS; sin embargo, a diferencia del Pacífico, en los inviernos posteriores al Niño se incrementa la precipitación, disminuye la temperatura y el número de huracanes en el Atlántico es menor al promedio (Gray, 1984; Ropelewski y Halpert, 1986; Livezey *et al.*, 1997).

En el caso de la tortuga lora, cuyas principales áreas de alimentación se encuentran en el norte y sur del Golfo de México, aparentemente El Niño favorece la anidación casi un año después de que se presenta en el Pacífico, probablemente porque el aumento de la precipitación y de los escurrimientos continentales repercute positivamente en la productividad de la plataforma continental del norte del Golfo (Manzano-Sarabia¹⁰, 2007). Por otra parte, las variaciones climáticas de la costa oriental de Estados Unidos determinan los desplazamientos estacionales de los juveniles de esta especie (Morreale y Standora, 2005).

¹⁰Manzano-Sarabia M., M. Kahru, C.A. Salinas-Zavala, 2007. Interannual variability of satellite-derived productivity in the Gulf of Mexico and its association with ENSO events. American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract #OS53A-07. Disponible en <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007AGUSMOS53A.07M>

El este y el sur del Golfo son modificados por las oscilaciones en el Atlántico Ecuatorial (Sánchez-Santillán, 1999). Las variaciones del índice de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA), reflejan los ciclos de largo periodo en la temperatura superficial marina al norte del Ecuador. Este índice refleja la aparición de las sequías y la frecuencia de los huracanes más intensos, lo que magnifica el efecto del incremento de temperatura de origen antrópico. Los análisis de la relación de las tortugas con estos índices son escasos, pero en la tortuga carey que anida en el sureste del Golfo de México, se encontró que la fase positiva del OMA que inició en 1995, podría estar relacionada con el decremento en la anidación registrado desde 2001 (Monte-Luna *et al.*, 2008).

El efecto del calentamiento posiblemente se relacione con el blanqueamiento de corales, ya que este es uno de los ecosistemas más vulnerables. Por ejemplo, en la Gran Barrera Arrecifal de Australia, entre 42 y 60% de los arrecifes experimentaron un “blanqueamiento” masivo, el cual fue también reportado en 31 diferentes naciones entre 1997 y 1998, por lo que se estima que 16% de los arrecifes coralinos del mundo fueron severamente dañados. El suceso coincidió con el registro de uno de los eventos más intensos de El Niño. En 2002 se presentó otro blanqueamiento masivo, más fuerte que el de 1998, pero ahora conectado con un ENOS más débil, pero con el registro de altas temperaturas (Fabricius *et al.*, 2007). Estos eventos alertan sobre la gran

vulnerabilidad de los corales al calentamiento global y sus consecuencias negativas, además de la pérdida del hábitat, sobre todas las especies asociadas a estos ecosistemas, entre ellas, las tortugas marinas, en particular la tortuga carey.

De los párrafos previos, donde se describen las consecuencias de las fases cálidas de los eventos oceánico-atmosféricos, se puede suponer que el calentamiento global afectará la reproducción de las tortugas marinas principalmente a través de cambios en la fecundidad relacionados con la disponibilidad de alimento y la feminización de la progenie y en menor medida, cambiando la fisiografía de las playas de anidación; sin embargo, la magnitud del impacto estará en relación con el grado de intervención humana en el ecosistema y el grado de estrés a que estén sometidas las poblaciones. Es posible que las especies con mayor área de distribución se adapten con más facilidad, que aquellas cuya distribución es más restringida (*vg.* tortuga lora).

Otro factor que podría incrementar el efecto del cambio climático es la posible feminización de las colonias como resultado del manejo inadecuado de los nidos. Actualmente en gran parte de los campamentos de México los huevos se trasplantan a corrales, para reducir la depredación y el robo; sin embargo, en los corrales las condiciones térmicas son homogéneas y frecuentemente más altas que en la playa, mientras que a lo largo de ésta hay mayor diversidad de microclimas.

CONSECUENCIAS Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

Previo al conocimiento de las causas y efectos del cambio climático sobre los ecosistemas, una de las actividades efectuadas para favorecer la conservación y recuperación de las tortugas marinas ha sido el establecimiento de los “campamentos tortugueros” a lo largo de ambos litorales del país, cuyo objetivo principal ha sido la protección de la anidación, en las playas más importantes, de las especies que se reproducen en México (Márquez-M, 1976), asimismo en la década de los 80s del siglo pasado, se decretaron las “zonas de reserva y sitios de refugio para la protección, conservación, repoblación, desarrollo y control de las diversas especies de tortuga marina”, ubicadas en los estados de Chiapas, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Sinaloa, Tamaulipas y Yucatán” (DOF, 1986), a las cuales mediante otro acuerdo se elevaron al rango de “áreas naturales protegidas, con la categoría de santuarios” (DOF, 2002).

Las playas consideradas “áreas naturales protegidas o santuarios”, tienen reglamentos adecuados para mitigar o en su caso evitar las actividades antrópicas negativas que puedan afectar la reproducción de estos animales; sin embargo, en el contexto del cambio climático será necesario revisar los reglamentos establecidos en estas áreas a fin de adecuarlos a la prevención y mitigación del efecto del calentamiento global, así como el del aumento del nivel del mar a corto y mediano plazo.

Ya que los campamentos tortugueros han estado funcionando durante varias décadas, en ellos se ha registrado información sobre la evolución de la abundancia de las poblacio-

nes más importantes. En ellos, se podría implementar un programa de trabajo específico, para dar seguimiento a los cambios debidos al calentamiento global.

Por otra parte existen playas de anidación que aún no están en la categoría de “santuarios” pero que se consideran importantes por el volumen de la población que anida y por la importancias de las especies, de acuerdo a su vulnerabilidad, como es el caso de las tortugas de carey, lora, prieta y laúd, las cuales valdría la pena incluir en esa categoría y para mejorar el seguimiento a las poblaciones.

Debido a que la mayoría de las especies mantienen rutas migratorias muy largas, las medidas para la protección y conservación que se realizan en México, deberán tener un componente internacional de acciones y compromisos, con objeto de fortalecer las posibilidades de éxito, y estas acciones podrían plantearse a través de la “Convención Interamericana para la Protección y Conservación de las Tortugas Marinas” (Secretaría CIT, 2004).

En México, todas las especies de tortugas marinas están consideradas en peligro de extinción, y a partir de 1990 está prohibido totalmente su uso comercial (DOF, 1990). Por lo anterior, el efecto del cambio climático, no se puede considerar que tenga una consecuencia económica directa, al no existir ninguna pesquería; sin embargo, la reducción de las poblaciones de tortugas marinas si podrían tener una influencia negativa sobre el complejo equilibrio de los ecosistemas donde éstas se desarrollan.

El cambio climático está afectando a un cúmulo de especies que si bien consideradas por separado, la pérdida de alguna de ellas, podría no tener mucho valor, al considerarlas dentro del entramado biológico del ecosistema, la

pérdida de una especie o incluso alguna población, o el aumento desmesurado de alguna otra, favorecida por estos cambios, puede tener efectos catastróficos.

LITERATURA CITADA

- Alvarado, J. y A. Figueroa, 1990. The ecological recovery of sea turtles of Michoacan, Mexico. Special attention: the black turtle *Chelonia agassizi*. Final report 1989-1990. US Fish and Wildlife Service. Albuquerque, New Mexico. 97 p.
- Alvarado, J. y A. Figueroa, 1992. Recapturas post-anidatoria de hembras de la tortuga marina negra (*Chelonia agassizi*) marcadas en Michoacán, México. *Biotropica*, 24(4):560-566.
- Chaloupka, M., N. Kamezaki, y C. Limpus, 2008. Is climate change affecting the population dynamics of the endangered Pacific loggerhead sea turtle? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 356(1-2):136-143.
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr, y P. Whetton, 2007. Regional Climate Projections. p. 847-940. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press,
- DOF, 1986. Decreto por el que se determinan como zonas de reserva y sitios de refugio para la protección, conservación, repoblación, desarrollo y control de las diversas especies de tortugas marinas, los lugares donde anida y desovan dichas especies. 29 de octubre de 1986. México.
- DOF, 1990. Acuerdo por el que se establece veda para las especies y subespecies de tortuga marina, en aguas de jurisdicción federal del Golfo de México y Mar Caribe, así como en las del océano Pacífico, incluyendo el Golfo de California. 31 de mayo de 1990. México.
- DOF, 2002. Acuerdo por el que se determinan como áreas naturales protegidas, con la categoría de santuarios, a las zonas de reserva y sitios de refugio para la protección, conservación, repoblación, desarrollo y control de las diversas especies de tortuga marina, ubicadas en los estados de Chiapas, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Sinaloa, Tamaulipas y Yucatán, identificadas en el decreto publicado el 29 de octubre de 1986. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Martes 16 de Julio de 2002, México.
- Fabricius, K.E., O. Hoegh-Guldberg, J. Johnson, L. McCook, y J. Lough, 2007. Chapter 17. Vulnerability of coral reefs of the Great Barrier Reef to climate change. p. 515-554. In: J.E. Johnson and P.A. Marshall (eds.). *Climate Change and the Great Barrier Reef. A vulnerability Assessment*, eds: Australia, Queensland.
- Gray, W. H., 1984. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb Quasi-Biennial oscillation influences. *Monthly Weather Review*, 112:1649-1668
- Guzmán-H., V., F.E. Cuevas, F.A. Abreu, G. B. González, A.P. García, y R.P. Huerta, (Compiladores), 2008. Resultados de la reunión del grupo de trabajo de la tortuga de carey en el Atlántico mexicano. *Memorias. Conanp/EPC/APFFLT/PNCTM*. ix+ 244pp

- Hidore, J., 1996. Global Environmental Change. Its nature and impact. Prentice Hall, USA. 263 p.
- Holman, J. A., 1967. The age of the turtle. *Turtle and Tortoise Society Journal*: 15-21
- Jiménez-Quiroz, MC., 2003. Relación entre las variables ambientales y la reproducción de la tortuga lora (*Lepidochelys kempi*, Garman 1880) en la playa de Rancho Nuevo, Tamps. Tesis de Doctorado. Fac. de Ciencias. UNAM, México. 320 p.
- Livezey, R., M. Masutani, A. Leetma, H. Rui, M. Ji, y A. Kumar, 1997. Teleconnections responses of the PNA atmosphere to large central equatorial Pacific SST anomalies. *Journal of Climate*, 10:1787-1820
- Limpus, C.J., 2006. Impacts of climate change on marine turtles. A case study. p. 34-39. In: UNEP/CMS Secretariat. Migratory species and climate change: Impacts of a changing environment on wild animals.
- Limpus, C. J., y N. Nicholls, 1988. The southern Oscillation regulates the annual numbers of green turtles (*Chelonia mydas*) breeding around Northern Australia. *Australian Journal Wildl Resesearch*, 15:157-161
- Limpus, C. J., y N. Nicholls, 1990. Progress report on the study of the interaction of the El Niño Southern Oscillation on annual *Chelonia mydas* numbers at the southern Great Barrier Reef Rookeries. p. 73-78. In: J. Rusell (Ed.). Proc. of the Australian Marine Turtle Conservation Workshop. Queensland Department of Environment and Heritage and Australian Nature Conservation Agency.
- Lluch-Cota D., D. Lluch-Belda, S. Lluch-Cota, J. López- Martínez, M. Nevárez-Martínez, G. Ponce-Díaz, G. Salinas-Zavala, A. Vega-Velazquez, J.R. Lara Lara, G. Hammann y J. Morales, 1999. Las Pesquerías y El Niño. p. 137-178. En: V.O. Magaña-Rueda (ed.). Los Impactos de El Niño en México. UNAM-Sria de Gobernación. Mexico
- Márquez-M, R. 1976. Reservas Naturales para la conservación de las tortugas marinas de México. Inst. Nal. de Pesca, INP/ST:i83
- Márquez-M, R., 1990. FAO Species Catalogue. Vol. 11. Sea turtles of the world. An Annotated and Illustrated Catalogue of Sea Turtle Species Known to Date. *FAO Fisheries Synopsis*, 125(11):1-81
- Márquez-M., R. 2002. Las tortugas marinas y nuestro tiempo. 3ª Ed., Colec. *La Ciencia para Todos*/Fondo de Cultura Económico. 144. 200 p.
- Márquez-M, R., C. Peñaflores y Ma. C. Jiménez, 2007. Protección de la tortuga marina en la costa de Oaxaca por el Instituto Nacional de la Pesca. XXV Aniversario de conservación e investigación en tortuga marina. UABJ de Oaxaca. Tomo II: 4-26.
- Monte-Luna P., V. Guzmán. E. Cuevas, F. Arreguín-Sánchez, M.C. Jiménez-Quiroz y D. Lluch-Belda, 2008. Rise and decline of the hawksbill turtle in the southern Gulf of Mexico as response to short and long term environmental variation. Coping with global change in marine social-ecological systems. 8-11 julio, FAO Roma, Italia. Disponible en: <http://web.pml.ac.uk/globec/structure/fwg/focus4/symposium/posters.htm>
- Morreale S.J., y E. A. Standora, 2005. Western North Atlantic Waters: Crucial developmental habitat for Kemp's Ridley and Loggerhead sea turtles. *Chelonian Conservation and Biology*, 4(4):872-882
- Mrosovsky, N., y C. Yntema, 1995. Temperature dependence of sexual differentiation in sea turtles: Implications for conservation practices. World Conference on Sea Turtle Conservation, Wash., D. C., p. 59-65.
- Parrotta, J. A., 1993. *Casuarina equisetifolia* L. ex J.R. and G. Forst. Casuarina, Australian pine. SO-ITF-SM-56. New Orleans, US. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station.

- Ramírez-Cruz, J.C., I. Peña-Ramírez, y D. Villanueva-Flores, 1991. Distribución y abundancia de la tortuga perica, *Caretta caretta gigas*, Linnaeus (1758), en la costa occidental de Baja California Sur, México. *Archelon*, 1(2):1-4
- Robinson, R. A., H.Q.P. Crick, J.A. Learmonth, I.M.D. Maclean, y C.D. Thomas, 2008. Traveling through a warming world: climate change and migratory species. *Endangered Species Res.* Published online June 17, 2008. 13p.
- Romer, A. S., 1956. Osteology of the reptiles. The Univ. Of Chicago Press. Chic. Ill., 772 p.
- Ropelewski, C. F., y M. S. Halpert, 1986. North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review*, 114:2352-2362
- Saba, V., P. Santidrián-Tomillo, R. D. Reina, J. R. Spotila, J. A. Musick, D. A. Evans y F. V. Paladino, 2007. The effect of El Niño-Southern Oscillation on the reproductive frequency of eastern leatherback turtles. *Journal of Applied Ecology*, 44:395-404
- Sánchez- Santillán, N., 1999. El Cambio Global en Golfo y Caribe Mexicano y su influencia en doce pesquerías de importancia comercial. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias. UNAM. 450 p.
- Secretaría CIT. 2004, Convención Interamericana para la Protección y Conservación de las Tortugas Marinas—Una Introducción. Septiembre 2004, 33p.
- Wibbels, T., Z., M Hillis-Starr y B. Phillips, 1999. Female-biased sex ratios of hatchling hawksbill sea turtles from a Caribbean nesting beach. *Journal of Herpetology*, 33(1):142-144
- White, M. y M. W. Downton, 1991. The shrimp fishery in the Gulf of Mexico: relation to climatic variability and global atmospheric patterns. p. 459-491. In: M. H. Glantz, R. W. Katz y N. Nicholls (eds.). Teleconnections linking worldwide climate anomalies. Scientific basis and societal impact. Cambridge University Press. U.K.
- Whiteford, R., 1999. A Diversity of Ecosystems – Alaska. *Endangered Species Bulletin*, 24(2):6-7
- Woolard, J., R.M. Engeman, H.T. Smith, y J. Griener, 2004. Cheloniidae (marine turtle) nest predation. *Herpetological Review*, 35(4):379-380

Retos para el sector pesquero y acuícola ante el cambio climático

P. Guzmán-Amaya, P. M. Rojas-Carrillo, G. Z. Morales-García y E. Espino-Barr

RESUMEN

Se analizaron como criterios de vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático el estatus de las principales pesquerías y la distribución de los recursos ribereños en los estados de Sinaloa, Nayarit, Tabasco, Yucatán y Quintana Roo. Asimismo se analizaron aspectos relevantes para el sector pesquero y acuícola como, la posible afectación de ecosistemas por los servicios ambientales que ofrecen; la respuesta de los recursos pesqueros ante los efectos de El Niño/La Niña, y los posibles impactos y medidas de adaptación y mitigación para la actividad pesquera y acuícola, aspectos socioeconómicos y aseguramiento alimentario. Se considera que el principal problema de la actividad pesquera y acuícola en México es el modelo económico neoliberal motivado más por la lógica de la ganancia que por la de producción de alimentos, que ha agudizado el problema de la sobreexplotación de las principales pesquerías y el deterioro de los ecosistemas costeros creando costos ecológicos que nadie asume. El sector enfrenta diversos problemas que de no atenderse se acrecentarán ante los efectos del cambio climático. La sobreexplotación de las pesquerías impacta la actividad acuícola. La pesca de camarón y las granjas de cultivo son las que resultarán más afectadas por estar ubicadas en la línea costera, junto con muelles, cuartos fríos, zonas de descarga, etc. Los pescadores ribereños serán los más afectados, básicamente por ser un sector con rezagos históricos y por los cambios en abundancia y distribución de los productos que pescan, que afectará el abasto, la economía y la soberanía alimentaria que es un asunto de seguridad nacional.

Palabras clave: pesca, acuicultura, cambio climático, vulnerabilidad, recursos pesqueros.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas y las actividades productivas son sensibles a las variaciones del clima, especialmente a las de magnitud y rapidez que plantea el cambio climático (CC) y los eventos meteorológicos extremos que se prevé aumentarán en frecuencia e intensidad, como el fenómeno de ENOS. Estos constituyen un factor de presión adicional de desgaste de los ecosistemas, afectados por la contaminación, el aumento de la población (que en muchos países ha crecido dos veces más rápido en las costas que en el país en su conjunto), la creciente demanda de recursos, y las prácticas de gestión insostenibles.

Por tratarse de sistemas complejos, existe una gran incertidumbre sobre las implicaciones del CC. Las proyecciones de los sistemas climáticos predicen al 2100 un aumento de la temperatura media anual de 1-3.5°C y del nivel del mar de 15 a 95 cm (IPCC, 1997). Esta incertidumbre hace difícil determinar cuantitativamente los posibles impactos, especialmente a pequeña escala; se prevé que un aumento de 50 cm en el nivel del mar podría inundar entre 8 500 y 19 000 km², hasta alcanzar más de 23 000 km² de tierras secas, con la consecuente eliminación de hasta 50% de las lagunas costeras que son las áreas más productivas desde el punto de vista pesquero. La actividad pesquera en nuestro país se realiza en la franja costera que va de 0 a 200 m de profundidad. Sólo algunas pesquerías como la de atún y algunas de palangre (tiburón, picudos) se realizan en aguas oceánicas.

Las posibilidades de adaptación de los ecosistemas costeros son limitadas, las marismas, manglares, arrecifes de coral, etc. se verán

afectados por alteraciones en la temperatura y salinidad del agua entre otros factores, que impactarían negativamente la actividad pesquera y acuícola. En consecuencia es importante determinar la vulnerabilidad de los ecosistemas y su resiliencia, la de los recursos pesqueros y acuícolas, la de la propia actividad sectorial, y por consecuencia la de la producción de alimentos, para asegurar a futuro el que se cubran las necesidades mínimas de supervivencia. A mayor vulnerabilidad, mayor probabilidad de generar reacciones en cadena. Cabe señalar que en el contexto de CC no hay un consenso sobre el significado de vulnerabilidad y la forma de medirla (Gómez, 2001).

Algunos de los impactos clave del cambio climático son: la inundación de tierras bajas y desplazamiento de humedales, intrusión salina en estuarios y acuíferos, cambios en la composición y productividad de los ecosistemas, pérdida de biodiversidad, alteración del régimen de mareas, cambios en patrones de sedimentación, disminución de la penetración de la luz para organismos bentónicos, y los impactos socioeconómicos como el daño a la infraestructura costera entre muchos otros (Hernández-Arana, 2007; Estrada-Porrúa, 2001).

En la actualidad millones de personas en el planeta sufren de malnutrición y se espera que en los próximos cuarenta años la creciente población mundial necesitará cuando menos el doble de la producción actual de alimentos. El informe especial del IPCC refuerza su preocupación por “las posibles consecuencias graves de un aumento del hambre en algunas regiones, particularmente en los trópicos y subtró-

picos.” El reporte señala que los impactos más importantes se harán notar a escala nacional y local, con el desplazamiento de los centros de producción. Las pesquerías en este momento están amenazadas por la sobrepesca, la afectación de los criaderos y la contaminación en tierra y en aguas costeras; y los impactos más evidentes serán a escala nacional.

Lluch-Cota (2005) señala que a escala regional no existen escenarios formales para evaluar la vulnerabilidad de la pesca ante el cambio climático; diferentes autores proponen escenarios opuestos, lo que muestra la gran incertidumbre de los impactos más probables a esa escala.

Aún cuando también se espera que el CC aporte efectos positivos, éstos pueden quedar contrarrestados por otros negativos como sensibilidad a enfermedades y toxinas y alteración de las pautas de reproducción, de las tasas de crecimiento, de las rutas migratorias, etc. (IPCC, 1997). La FAO (2008) establece que los cambios provocados por el CC, impactarán fuertemente la pesca y la acuicultura, con importantes consecuencias para la seguridad alimentaria (SA).

En México, el INAPESCA (2000) realizó una evaluación de las principales pesquerías del país y concluye que 85% se encuentran

en su máximo sostenible o en deterioro y sólo 15% con potencial de desarrollo. Fernández-Méndez (2007) analiza la producción pesquera y señala que desde la década de 1980 se ha estancado sobre las 1 200 000 t, con un ritmo de crecimiento mínimo o negativo para las principales pesquerías. Por otro lado, la producción por acuicultura de agua dulce, que mayormente aportan a la SA, han disminuido 30 000 t desde 1990. Lluch-Cota (2005) señala que la limitante que más se menciona para la sustentabilidad pesquera es la sobreexplotación; pero en México la incertidumbre se debe principalmente a la variabilidad climática que desalienta la inversión, situación que puede agravarse por la mera percepción de riesgos mayores debidos al cambio climático.

El desafío que tenemos como país será reducir la vulnerabilidad de nuestros ecosistemas, de los recursos, de la población y de la propia actividad pesquera y acuícola, frente a los impactos causados por el CC, en el marco de un desarrollo sustentable, mediante el impulso de políticas que fortalezcan los sectores más susceptibles a dichos impactos, especialmente los relacionados con la producción de alimentos (IPCC, 1997), que es una actividad de seguridad nacional.

MARCO DE REFERENCIA Y MÉTODO DE TRABAJO

El aprovechamiento de recursos y el desarrollo de la actividad debe estar enfocado hacia la sustentabilidad, la protección de la biodiversidad y la SA. Estos lineamientos tienen su fundamento a escala nacional en los planteamientos de la Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables (LGPAS), que tiene

como fin propiciar el desarrollo integral y sustentable de la pesca y la acuicultura; así como en los del Programa Sectorial de Desarrollo Agropecuario y Pesquero 2007-2012.

A escala internacional el Código de Conducta para la Pesca Responsable es un antecedente de suma relevancia para nuestro país,

de cumplimiento voluntario¹. Por otro lado la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre CC, en la que participa México, tiene como objetivo en su Artículo 2 “...estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en un plazo suficiente para que los ecosistemas se adapten al CC, asegurar la producción de alimentos y permitir el desarrollo económico de manera sostenible.”

Se definieron como criterios de vulnerabilidad para el análisis pesquero y acuícola ante el CC: el estatus de las pesquerías resultado de evaluaciones pesqueras mediante modelos,

y la distribución de los principales recursos ribereños en los estados de Sinaloa, Nayarit, Tabasco, Quintana Roo y Yucatán.

Se analizan aspectos relevantes para el sector ante el CC, como son los servicios ambientales de ecosistemas relevantes para la actividad, la respuesta de los recursos pesqueros ante los efectos de El Niño/La Niña y los impactos, medidas de adaptación y mitigación ante el CC, reportadas por diversos autores en materias relacionadas con la actividad pesquera y acuícola, con aspectos socioeconómicos y de alimentación.

DIAGNÓSTICO PESQUERO Y ACUÍCOLA

La vida marina se concentra en las cercanías de las playas por los aportes de nutrientes que ahí se depositan; ninguna otra región tiene una variedad tan amplia como la plataforma continental, por esa razón, la industria pesquera se ubica casi en su totalidad en esta zona (Odum, 2006). Nuestro país cuenta con una extensión costera de 12 000 km de litoral y un área de 3 millones de km² que corresponden a la Zona Económica Exclusiva (ZEE). Las actividades pesqueras en nuestro país se desarrollan principalmente en la plataforma continental (0-200 m de profundidad), sólo las pesquerías de palangre se realizan más allá de esta zona.

De acuerdo con la FAO, 79% de las pesquerías en el mundo están explotadas al máximo o por encima de los límites sostenibles y sólo 12% tienen aún potencial de desarrollo. En México, evaluaciones realizadas por el Instituto Nacional de Pesca en el periodo de 1994 a 2000 señalan que 85% de las pesquerías se encuentran en su máximo sostenible o en deterioro y sólo 15% se consideran con potencial de desarrollo. De acuerdo con la Carta Nacional Pesquera 2004 los desembarques anuales se han estabilizado alrededor de 1.4 millones de t en peso vivo, pese a la creciente producción acuícola (figura 1).

¹En noviembre de 1997, la Conferencia de la FAO creó la medalla Margarita Lizárraga que se concede a una persona u organización que trabaja meritoriamente en la aplicación del Código de Conducta para la Pesca Responsable. La medalla es un homenaje a la fallecida Dra. Lizárraga bióloga mexicana que fuera Directora del Instituto Nacional de la Pesca, por su papel decisivo en el fomento del Código, por su productiva labor en el campo de la pesca durante casi cuarenta años y por su fuerte compromiso con el impulso a la promoción del sector pesquero, especialmente en los países en desarrollo.

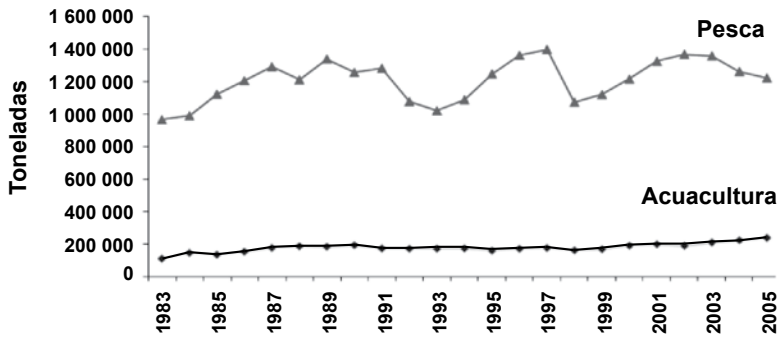


Figura 1. Tendencias históricas en la producción pesquera y acuícola.

Fuente: Anuario Estadísticos de Acuicultura y Pesca de 2005.

Desde el inicio de la década 1980 se observa un estancamiento en las capturas totales, y se presentan descensos importantes en pesquerías de alto valor comercial y un aumento principalmente en las pesquerías artesanales; en contraste, de 1970 al 2000 se observa un aumento de la flota ribereña en más de 500%. Antes de 1982, se incorporaban a la actividad 1 600 embarcaciones por año, después de ese año se duplicó el número de embarcaciones que se sumaron al esfuerzo pesquero. La flota industrial aunque prácticamente no se ha incrementado desde 1990, su poder de pesca si, especialmente en la flota atunera, de pelágicos mayores y de pesca múltiple de arrastre.

En cuanto a la transformación de productos pesqueros, el Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura 2005 reporta 354 plantas que procesan productos congelados, enlatados y para reducción, 67% (237) se encuentran en el Pacífico, 31% (111) en el Golfo de México y 2% (6) en las entidades sin litoral. La producción total nacional es de 1 278 710 t, en el Pacífico es de 1 011 571 t, de la cual se destina a reducción 372 602 t (37%), para obtener una cantidad de 76 229 t de producto que representa 20% de rendimiento. Sonora es el

principal productor con 402 391 t, destina a reducción 60% de su producción (241 232 t), para obtener sólo 45 712 t de producto (19% de rendimiento). En el Golfo de México y Mar Caribe la producción total es 259 646 t, 26% (67 582 t) se procesa congelado con un rendimiento de 22% (57 025 t), para enlatado se destina 6% (15 695 t) para obtener una cantidad de 2 395 t de producto (15%).

De 1980 a la fecha la captura obtenida por persona empleada en el sector pesca ha disminuido en 50%, de 12 t/persona disminuyó hasta aproximadamente 5 t/persona en 2001; esta disminución no es uniforme en todo el país, en el Pacífico norte la captura por persona es aproximadamente dos veces mayor que en otras zonas.

Es importante señalar los factores ambientales (por ejemplo contaminación) como causa de colapsos de algunas pesquerías, como es el caso del camarón rosado en la sonda de Campeche, en la que la intensidad de pesca se considera como un factor adicional. La Comisión Nacional del Agua (CNA) reporta que de 535 reservorios, 73% se encuentran contaminados como resultado de actividades industriales, agrícolas, pecuarias y uso domés-

tico, cuyas aguas residuales son enviadas a los ríos sin mayor tratamiento.

Ante este panorama en las pesquerías, la alternativa es la acuicultura, pero de acuerdo a las estadísticas oficiales de la CONAPESCA la producción acuacultural (que incluye pesquerías de agua dulce), ha disminuido desde 1990 un promedio de 2 000 t por año, en contraste con la producción por cultivo de camarón que aumentó 760%; básicamente el aumento constante en la producción se debe al camarón y ostión (Fernández-Méndez, 2008) (figura 1).

El cultivo de especies de mayor valor económico se propició a partir de 1992, mediante el Acuerdo Nacional para la Modernización de la Acuicultura; así el camarón que es una especie de lujo destinada fundamentalmente para exportación, se constituye en el principal cultivo del país, que provoca problemas de contaminación en las lagunas costeras y tala de mangle por la construcción de granjas, dañando el hábitat de muchas especies de aguas salobres y marinas con consecuencias ecológicas y económicas aún no debidamente valoradas (Villamar *et al.*, 2007).

También se ha impulsado la engorda de atún en el noroeste del país por empresas extranjeras con supuestos socios mexicanos, que para producir 20 000 t de atún para exportación, requieren 320 000 t de sardina aproximadamente como alimento (Fernández-Méndez, 2007), lo que equivale a 74% de la captura de la sardina desembarcada en 2005, con el propósito de obtener un producto que no se destina al consumo nacional y cuyas ganancias quedan en manos de unos cuantos empresarios. Éstos aprovechan las condiciones ambientales propicias que tiene México para el cultivo de especies de alto

valor comercial para exportación, sin que se les cobre por los servicios ambientales que las condiciones geográficas de nuestro país provee. En contraste, a la acuicultura rural se le ha dado poco impulso, lo que resulta contradictorio con las obligaciones que tiene el Estado mexicano ante la SA, que adquiere mayor relevancia frente a los problemas nacionales y mundiales de crisis alimentaria.

Con relación a la producción acuícola, son escasas las especies que se producen en el país; prevalecen las especies dulceacuícolas como el bagre, carpa, charales, langostino, lobina, mojarra y trucha. Los cultivos de organismos marinos que sobresalen por su volumen e importancia económica son camarón, atún y ostión. La producción nacional por acuicultura en 2005 fue de 235 845 t, 16.17% de la producción pesquera nacional, con un valor de \$5 773 502 000. De 1984 a 2005 la producción acuícola promedio de aguas continentales fue de $112\,000 \pm 13\,000$ t, no ha habido aumento significativo de los volúmenes de producción en todo este periodo; la de camarón por el contrario, describe una tendencia siempre en aumento.

En 2005, de las especies dulceacuícolas, la mojarra-tilapia constituye alrededor de 65% de la producción acuícola nacional de agua dulce. La producción total de mojarra-tilapia se obtiene sumando las pesquerías acuaculturales en embalses más la producción en sistemas controlados, se produjeron 67 993 t (4.66% de la producción total nacional); con valor de \$713 217 000 (4.90% del valor total nacional). La carpa es la segunda especie en importancia en las aguas dulces del país, con una producción promedio en el periodo de 1984 a 2005 de $23\,300 \pm 4\,400$ t; en 2005, fue de 21 241 t con valor de \$253 213.

La trucha arcoiris, a diferencia de las anteriores, es producida casi exclusivamente en sistemas controlados, un pequeño volumen es producto de la captura. En 2005 el volumen obtenido fue de 3 829 t, 0.26% del volumen nacional con valor de \$68 000 032, que representa 0.47% del valor total nacional. En el litoral del Pacífico, el principal productor de trucha es Michoacán con 285 t, a escala nacional el Estado de México con 2 289 t.

El bagre, charal, langostino y lobina aportan conjuntamente 4.9% del total nacional por acuicultura, lo que evidencia su bajo nivel de producción.

En la acuicultura continental, las más importantes son especies exóticas que han amenazado y desplazado a las poblaciones silvestres y lo siguen haciendo en la medida en que se amplía intencionalmente su distribución en el país. Es importante señalar que la producción pesquera de los embalses continentales basada en la acuicultura (pesquerías acua-culturales), significaría importantes aportes de alimento para las poblaciones rurales, sin embargo, las siembras de crías para mantener los niveles de producción ha mermado de manera drástica en los últimos años por falta de atención hacia los centros acuícolas productores. En este sentido, la acuicultura que podría aportar de manera importante a la SA está siendo abandonada prácticamente desde que se le dio el impulso a la acuicultura intensiva orientada a las especies de alto valor comercial (Rojas y Fernández, 2003).

La situación de la acuicultura en México relacionada con la generación de alimentos para las mayorías está seriamente afectada, lo que

se refleja en las tendencias hacia la producción de especies de exportación. Se debe tomar en cuenta que los ríos y sus cuencas son usados como drenajes de ciudades, zonas industriales, zonas agrícolas y pecuarias acarreado gran cantidad de contaminantes de todo tipo. La contaminación de las aguas dulces, que a la larga llega al mar, añade un grado más de dificultad al problema del CC.

Las especies marinas que se cultivan son el abulón, almeja arenera, almeja manila, atún, camarón, caracol rosado, jurel, langostino (de ambientes salobres y dulces), mejillón, ostión, ostras perleras, almejas (pectínidos) y pejelagarto (CNP, 2006); de éstas sobresale por su importancia económica el camarón. La producción de camarón por acuicultura ha tenido un aumento muy significativo a partir de 1994, compitiendo en cifras con la producción por captura desde entonces hasta el 2002; a partir de 2003 la producción por cultivo supera la de captura. En 2006 la producción fue de 98 945 t por acuicultura y de 59 716 t por captura (tabla 1). El litoral del Pacífico es el productor más importante de camarón de cultivo y captura, supera casi cuatro veces la producción del Golfo y Caribe. Cabe señalar que la captura se obtiene tanto de mar abierto como de esteros y bahías.

Los principales estados productores de camarón son en orden de importancia, Sonora (61 422 t), Sinaloa (44 637 t), Tamaulipas (20 809 t), Nayarit (11 957 t) y Campeche (7 768 t). El número de granjas comerciales de producción de camarón² asciende a 592. El valor de la producción de camarón es el más importante entre los productos pesqueros y

²Estadísticas de producción de camarón de acuicultura y pesca. http://www.industriaacuicola.com/PDFs/4.1-estadisticas_produccioncamaron_pescayacuicultura.pdf

Tabla 1. Producción de camarón peso vivo en t.

Año	Total	Cultivo	Captura
1994	76 324	13 138	63 186
1995	85 901	15 867	70 034
1996	78 879	13 114	65 765
1997	88 488	17 570	70 918
1998	90 334	23 749	65 586
1999	95 611	29 120	66 491
2000	95 077	33 480	61 597
2001	105 522	48 014	57 508
2002	100 488	45 853	54 635
2003	123 904	62 361	61 543
2004	125 576	76 750	58 060
2005	148 186	92 552	55 634
2006	158 657	98 945	59 716

Fuente: Conapesca-Dirección General de Planeación, Programación y Evaluación

acuícolas del país (tabla 2), en 2005 representó 15% del volumen de producción entre las 12 principales especies pesqueras y 57% del valor de las mismas.

La producción de camarón generó 64 719 empleos directos en 2005 de acuerdo a cifras oficiales, 91.7% en captura y 8.3% en acuicultura. El camarón es el principal producto pesquero de exportación, el principal destino es Estados Unidos con 98%. Por su precio, es un producto que difícilmente se puede considerar dentro de la canasta básica, de manera que su contribución a la SA de las poblaciones vulnerables es poco significativa; sin embargo, el mercado interno absorbe más de la mitad de la producción principalmente de talla chica y mediana.

Sinaloa cuenta con el mayor número de unidades comerciales de producción de cultivo de camarón en el país de acuerdo con la Carta Nacional Pesquera (2006). Se registran 488 granjas con una superficie de 41 557 ha

en 2003; CONAPESCA para 2006 reporta 592. En Nayarit se registraron 60 granjas con una superficie de 3 252 ha; en Tabasco 24 granjas con 330 ha; en Veracruz una de 2 ha y en Yucatán 2 con 92 ha (Sagarpa-INP, 2006).

El atún es otra de las especies de alto valor comercial que se cultivan en México y su producción se destina para exportación; su proceso de cultivo es exclusivamente de engorda, depende del medio natural para el suministro de juveniles y de alimento con una tasa de conversión de 1 kg de atún: 16 kg de alimento. En 2005 se obtuvo un volumen de 4 535 t lo que representa 0.31% de la producción pesquera nacional con valor de \$411 617 000, y valor relativo de 2.83% del total nacional. En Sinaloa se realiza a escala de fomento (Sagarpa-INP, 2006).

La producción de ostión suma 41 701 t en sistemas controlados y pesquerías acuaculturales (2.86% del total de la producción nacional), con valor de \$189 705 000 (1.30% del

Tabla 2. Valor de la producción de camarón (miles de t).

Año	Total	Captura	Acuicultura
1995	468 705	298 050	170 655
1996	490 258	311 755	178 503
1997	870 738	553 702	317 036
1998	1 149 054	730 683	418 371
1999	4 523 834	3 022 475	1 501 359
2000	5 247 165	3 168 051	2 079 114
2001	6 055 347	3 317 329	2 738 018
2002	5 019 772	2 854 043	2 165 729
2003	5 280 928	2 689 935	2 590 993
2004	5 643 395	2 510 455	3 132 940
2005	6 115 391	2 720 422	3 394 969
2006	6 506 753	2 915 759	3 590 994

Fuente: Conapesca-Dirección General de Planeación, Programación y Evaluación

total nacional). Veracruz y Tabasco son los principales productores de ostión en el país, con 24 382 t y 16 391 t respectivamente en 2005.

Algunas de las afectaciones del CC sobre los organismos en cultivo son, en general, las temperaturas por arriba de los intervalos de tolerancia que pueden provocar que éstos no se alimenten efectivamente, sean susceptibles a enfermedades e infecciones y sufran de agotamiento, y ocasione eventualmente su muerte. A temperaturas por debajo de su intervalo de tolerancia pierden el apetito y el crecimiento disminuye o cesa. Una baja en la salinidad del mar afectará a las especies disminuyendo su apetito y causando la muerte de los organismos que no están sanos (Avilés y Castelló, 2004).

Todas las especies de moluscos que se manejan en cultivos en suspensión o en sartas verán afectadas sus zonas de cultivo por el aumento del nivel del mar y por la afectación de las condiciones químicas. El aumento de temperatura también afectará la distribución

del alimento natural del que se nutren estos cultivos. La mayor parte de los cultivos de bivalvos en su fase sésil se verán afectados por el aumento en la intensidad del fenómeno de El Niño, ya que las tormentas provocan alteraciones físicas del sustrato por acarreo y depósito de sedimentos, remoción de fondos y turbidez ocasionada por marejadas (León y Muciño, 1995).

El impacto de la afectación de las más de 500 granjas acuícolas de camarón existentes en México por la subida del nivel del mar, dejaría sin empleo a más de 4 000 personas cabeza de familia, lo que provocaría un serio problema social y económico para el país, por lo que se deben realizar las estimaciones económicas por la pérdida de esos empleos y la no entrada de divisas por la exportación, que constituiría una seria afectación a la economía y a la balanza comercial del país. Es posible que en los cultivos de engorda, como el atún, que dependen de existencias silvestres de juveniles se vea limitado su aporte.

SITUACIÓN DEL SECTOR EN SINALOA, NAYARIT, TABASCO, YUCATÁN Y QUINTANA ROO

En 2005 el volumen de pesca fue 77.3 % en el litoral del Pacífico, 20.1 % en el Golfo de México y Caribe, y 2.3% en los cuerpos de aguas continentales. Esta proporción se ha mantenido en los últimos años. En 2001 por ejemplo con una producción de 1.5 millones de t, el volumen de pesca correspondió a 77% en el litoral del Pacífico, 21% al Golfo de México y Caribe, y 2% a los cuerpos de aguas continentales. Del análisis de producción pesquera y acuícola, en orden de importancia

por volumen (t) y valor de captura (miles de pesos) se tiene a Sinaloa, Tabasco, Yucatán, Nayarit y Quintana Roo (Sagarpa, 2005). En la tabla 3 se presenta volumen y valor de la pesca y acuicultura, y en la tabla 4 la población dedicada a la pesca en el sector social, que se organiza en sociedades cooperativas de producción pesquera (SCPP) y otras formas de organización social (OFOS) (Semarnap/DGAP, 2000).

ANÁLISIS DE LA PESCA RIBEREÑA POR ESTADO

Se analizaron las estadísticas de pesca en el periodo 1996-2006 (Semarnap, 2000; Sagarpa, 2003 y 2007). En la información de los anuarios no se puede diferenciar el producto obtenido por las diferentes flotas (embarcaciones mayores y menores para la pesca ribereña);

las embarcaciones menores capturan algunas de las especies que se encuentran en la zona costera (tabla 5), como es el caso de la langosta, pulpo y escama. En el análisis se utiliza la información de los anuarios (información oficial) como un indicador de la abundancia

Tabla 3. Volumen y valor de la pesca y acuicultura en el país y porcentaje de participación con respecto al valor nacional de la pesca.

Estado	Pesca			Acuicultura		
	Volumen*	Valor	Participación** (%)	Volumen	Valor	Participación** (%)
Sinaloa	249 164	2 964 208	20.38	31 061	1 141 208	7.84
Nayarit	24 596	416 515	2.86	9 595	208 708	1.43
Total Pacífico	1 155 665	10 224 102	70.29	139 755	4 736 188	32.56
Tabasco	47 307	604 804	4.16	19 255	124 022	0.85
Yucatán	23 685	488 645	3.36	1 441	55 369	0.38
Quintana Roo	3 569	125 143	0.86	22	729	0.005
Total G. de M.	272 114	3 836 085	26.37	65 680	552 492	3.80
Total nacional	1 458 197	14 545 449	100	235 845	5 773 502	39.69

Tabla 4. Sector social y otras formas de organización social.

Estado	SCPP		OFOS ¹		Total	
	Número	# Socios	Número	# Socios	Organizaciones	Socios
Sinaloa	639	31 923	20	467	713	32 390
Nayarit	96	7 520	71	3 037	167	10 557
Tabasco	180	8 014	143	4 201	323	12 215
Yucatán	58	2 094	175	3 260	233	5 354
Quintana Roo	39	1 136	5	73	44	1 209

¹ Otras formas de organización social

Tabla 5. Relación de embarcaciones mayores por especie y el total de menores en la pesca marina por estado.

Pesquería	Sinaloa	Nayarit	Tabasco	Yucatán	Q. Roo
Anchoveta	2				
Pelágicos menores	2				
Sardina	2				
Pez espada	11				
Langosta				26	
Túridos	43			8	
Calamar	61				
Tiburón	97	2	5	37	1
Pulpo				219	1
Escama	106	3	33	518	3
Camarón de altamar	644	9	1	1	16
Total mayores	968	14	39	809	21
Total menores	870	258	551	432	116

Fuente: Confederación Nacional Cooperativa Pesquera, S. C. de R. L.

de los recursos, comunidades o especies, sin importar la forma de extracción.

La pesca ribereña es una actividad prioritaria en la alimentación, ya que sus productos aportan proteína de excelente calidad a un bajo precio y no tienen que procesarse para su venta al público; cabe señalar que prácticamente toda la captura de peces proviene de dicha actividad. La captura de camarón se rea-

liza por flota de mediana altura, ribereña y en lagunas costeras; el atún por la flota de altura, aunque ocasionalmente también lo registra la pesca ribereña.

El estado de Sinaloa tiene una gran tradición pesquera. Su captura representa 11% de la actividad pesquera en México, con una producción que alcanza la quinta parte del total nacional, por los recursos abundantes y/o de

alto precio (camarón, sardina, atún). En este estado se tienen registrados el mayor número de embarcaciones mayores y menores en el país (tabla 5).

De las capturas registradas en los anuarios estadísticos de pesca 1990-2006 (Semarnap, 2000; Sagarpa, 2003, 2007), el grupo de peces alcanza 86% de la captura, los crustáceos 12%, elasmobranquios y moluscos 1%. El grupo de crustáceos está compuesto por camarón (89.8%), jaiba (10.1%) y langosta (0.1%). Los moluscos son calamar (47.3%), almejas (37.9%), ostión (12.6%), caracoles (2.1%) y pulpo (0.03%). Los elasmobranquios se registran como tiburón (91.5%), cazón (5.9%) y rayas y similares (2.6%).

En el grupo de peces están registrados 23 nombres comunes (tabla 6). La sardina ocupa el mayor peso (69%) (pesca de mediana altura) y le sigue el atún (25.7%) (pesca de altura).

La captura marina en Sinaloa ha tenido varios altibajos: de 1990 a 1996-1997 la pesca iba en aumento, tres años después disminuyó para volver a incrementarse hasta un máximo en 2002 (figura 2). Nuevamente disminuyó hasta 2006 con niveles de principios de la década de 1990. En cuanto a las especies, su número ha ido en aumento, ya sea porque se están empezando a registrar las que antes se agrupaban bajo nombres comunes más convencionales, o porque la pesca se ha extendido a nuevas especies.

En los gráficos con las series de 17 años (figura 3) se pueden ver diferentes tendencias en las especies: sardina (a) y atunes (b) tuvieron una tendencia positiva en la década de 1990, y negativa de 2002 en adelante; camarón (c), pargos y huachinango (e) presentan una tendencia positiva, mientras que mojarra (d)

parece estabilizarse. Es importante buscar las razones de este comportamiento, mediante el uso de otras variables como el esfuerzo pesquero y muestreos directos en campo para conocer la composición de las especies y encuestas a diferentes actores de la actividad que puedan aportar información sobre los cambios en las capturas o en las especies.

En Nayarit la pesca ribereña es muy relevante, principalmente la que se realiza en sus lagunas costeras, que se infiere por el número de embarcaciones menores (tabla 5). Por su volumen de captura los dos grupos más importantes son crustáceos (44%) y peces (44%), le siguen en importancia los moluscos y elasmobranquios con 6% cada uno.

El grupo de crustáceos está compuesto por 99.3% de camarón, 0.4% de jaiba y 0.3% de langosta. El grupo de elasmobranquios se registra en tres rubros: 89% de tiburón, 7.3% de cazón y 3.7% de rayas y similares. Como moluscos se registran cuatro especies: 94.5% de ostión, 2.6% de almeja, 2.9% calamar y 1% pulpo. El grupo de peces registra 24 rubros de “especies” que en realidad corresponden a nombres comunes que incluyen varias especies. La tabla 7 muestra las principales “especies” registradas en los anuarios estadísticos, las mojarras y lisas ocupan los primeros lugares y cabe decir que son habitantes primordiales de las lagunas costeras.

La figura 4 muestra la captura global en el estado de Nayarit en 17 años. Se observa un aumento constante hasta 2003. La disminución posterior puede ser solamente un ciclo, pero es indudable que además de registrarse un mayor número de especies, debe haber un incremento del esfuerzo de pesca, resultado de la demanda de productos alimenticios de buena calidad.

Tabla 6. Especies de peces capturadas en la costa de Sinaloa.

	Nombre común	Nombre científico	Familia	%
1	sardina	<i>Cetengraulis mysticetus</i> , <i>Opisthonema spp.</i> , <i>Sardinops caeruleus</i>	Clupeidae	69.00
2	atún	<i>Thunnus albacares</i>	Scombridae	25.66
3	mojarra	<i>Gerres cinereus</i> , <i>Diapterus peruvianus</i> , <i>Eucinostomus argenteus</i> , <i>E. gracilis</i>	Gerreidae	2.10
4	barrilete	<i>Katsuwonus pelamos</i> , <i>Euthynnus lineatus</i>	Scombridae	1.41
5	lisa	<i>Mugil cephalus</i>	Mugilidae	0.63
6	sierra	<i>Scomberomorus sierra</i> , <i>S. concolor</i>	Scombridae	0.42
7	bagre	<i>Arius seamanii</i>	Ariidae	0.20
8	corvina	<i>Cynoscion reticulatus</i> , <i>Larimus argenteus</i> , <i>Cynoscion spp.</i>	Scianidae	0.15
9	bandera	<i>Bagre panamensis</i> , <i>B. pinnimaculatus</i>	Ariidae	0.14
10	pargos	<i>Hoplopagrus guntheri</i> , <i>Lutjanus guttatus</i> , <i>L. colorado</i> , <i>L. jordani</i> , <i>L. argentiventris</i>	Lutjanidae	0.11
11	huachinango	<i>Lutjanus peru</i>	Lutjanidae	0.08
12	berrugata	<i>Menthicirrus panamensis</i> , <i>M. nasus</i> , <i>Micropogon megalops</i>	Serranidae	0.07
13	lenguado	<i>Paralichthys aestivalis</i> , <i>P. californicus</i> , <i>Ancyclopsetta dedritica</i>	Paralichthyidae	0.06
14	robalo	<i>Centropomus nigrescens</i> , <i>C. armatus</i> , <i>C. medius</i> , <i>C. viridis</i> , <i>C. robalito</i>	Centropomidae	0.04
15	baqueta	<i>Epinephelus acanthistius</i>	Serranidae	0.02
16	ronco	<i>Haemulon flaviguttatum</i> , <i>Microlepidotus brevipinnis</i> , <i>Pomadasys panamensis</i>	Haemulidae	0.009
17	pámpano	<i>Trachinotus rhodopus</i> , <i>T. paitensis</i> , <i>T. kennedyi</i>	Carangidae	0.007
18	mero	<i>Epinephelus itajara</i>	Serranidae	0.002
19	jurel	<i>Caranx caninus</i>	Carangidae	0.001
20	cabrilla	<i>Epinephelus labriformis</i> , <i>E. analogus</i>	Serranidae	0.001
21	pierna	<i>Caulolatilus princeps</i>	Malacanthidae	0.001
22	lebrancha	<i>Mugil curema</i>	Mugilidae	0.0003

Las especies que han provocado este aumento son el camarón (figura 5a), el ostión (b), la lisa (c) y el huachinango y pargos (f). La producción de tiburón y sierra tiene una tendencia de negativa a estable, probablemente por el retiro de esfuerzo en altamar. Esta información se debe constatar y enriquecer con fuentes de información adicionales, como muestreos directos en los campos pesqueros, encuestas, otras bases de datos como los avisos de arribo.

El estado de Tabasco tiene 39 embarcaciones de altura principalmente para escama, pero también cuenta con muchas embarcaciones menores. Su captura se divide en 49% de peces, 44% de moluscos, 5% de crustáceos y 2% de elasmobranquios; éstos se dividen en 73.5% de tiburón, 19% de cazón y 8.5% de rayas y similares; los crustáceos son 76.6% de jaiba y 23.4 % de camarón; los moluscos son 99.3% de ostión, 0.4% de almejas, 0.2% de caracol y 0.1% de pulpo y calamar.

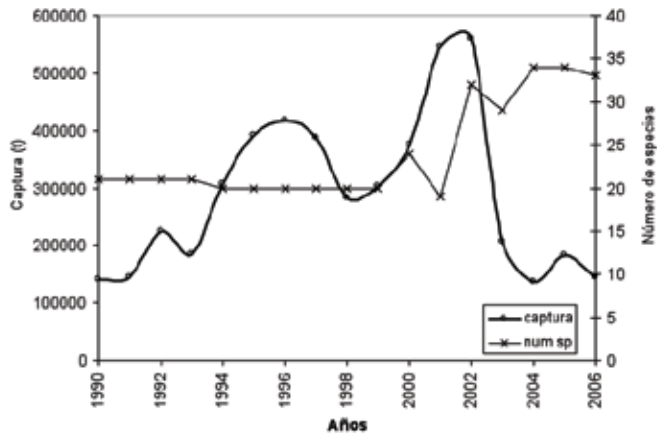


Figura 2. Captura marina anual de Sinaloa, de 1990 a 2006.

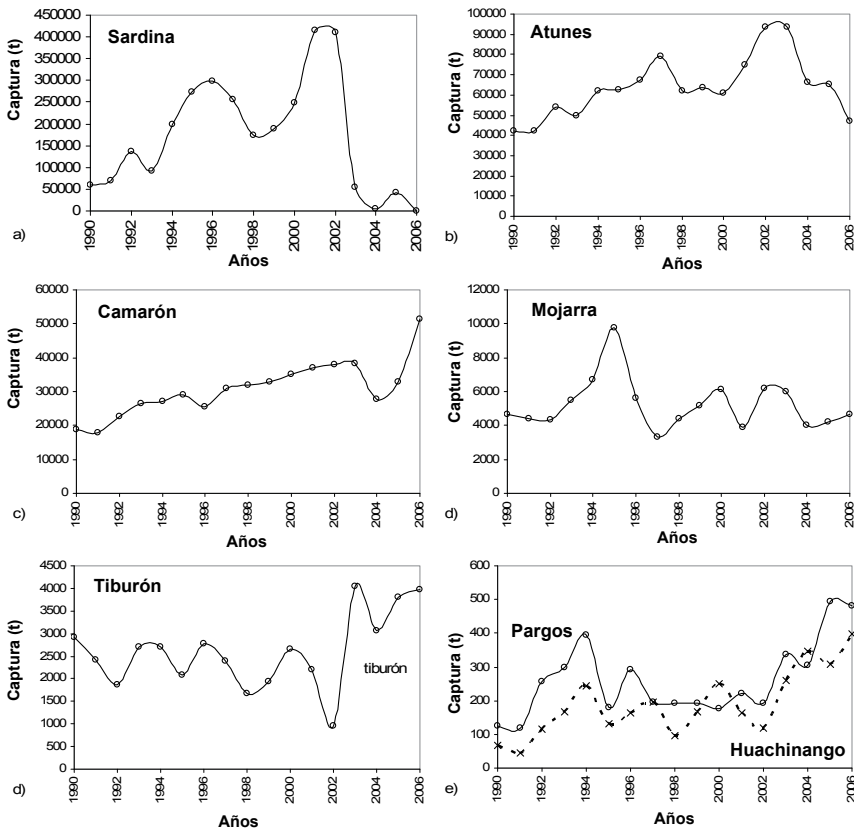


Figura 3. Series de captura de las especies más importantes en la costa de Sinaloa, 1990 a 2006.

Tabla 7. Especies de peces capturadas en la costa de Nayarit.

Nombre común	Nombre científico	Familia	%
1 mojarra	<i>Gerres cinereus</i> , <i>Diapterus peruvianus</i> , <i>Eucinostomus argenteus</i> , <i>E. gracilis</i>	Gerreidae	45.26
2 lisa	<i>Mugil cephalus</i>	Mugilidae	11.34
3 sierra	<i>Scomberomorus sierra</i>	Scombridae	9.79
4 robalo	<i>Centropomus nigrescens</i> , <i>C. armatus</i> , <i>C. medius</i> , <i>C. viridis</i> , <i>C. robalito</i>	Centropomidae	7.91
5 bandera	<i>Bagre panamensis</i> , <i>B. pinnimaculatus</i>	Ariidae	7.52
6 huachinango	<i>Lutjanus peru</i>	Lutjanidae	6.65
7 pargos	<i>Hoplopagrus guntheri</i> , <i>Lutjanus guttatus</i> , <i>L. colorado</i> , <i>L. jordani</i> , <i>L. argentiventris</i>	Lutjanidae	3.37
8 sardina	<i>Cetengraulis mysticetus</i> , <i>Opisthonema spp.</i> , <i>Sardinops caeruleus</i>	Clupeidae	2.07
9 bagre	<i>Arius seemanii</i>	Ariidae	1.96
10 curvina	<i>Cynoscion reticulatus</i> , <i>Larimus argenteus</i> , <i>Cynoscion spp.</i>	Scianidae	1.19
11 atún	<i>Thunnus albacares</i>	Scombridae	0.99
12 barrilete	<i>Katsuwonus pelamis</i> , <i>Euthynnus lineatus</i>	Scombridae	0.62
13 berrugata	<i>Menthirrus panamensis</i> , <i>M. nasus</i> , <i>Micropogon megalops</i>	Serranidae	0.51
14 jurel	<i>Caranx caninus</i>	Carangidae	0.24
15 baqueta	<i>Epinephelus acanthistius</i>	Serranidae	0.16
16 mero	<i>Epinephelus itajara</i>	Serranidae	0.15
17 ronco	<i>Haemulon flaviguttatum</i> , <i>Microlepidotus brevipinnis</i> , <i>Pomadasys panamensis</i>	Haemulidae	0.11
18 pámpano	<i>Trachinotus rhodopus</i> , <i>T. paitensis</i> , <i>T. kennedyi</i>	Carangidae	0.09
19 lenguado	<i>Paralichthys aestivalis</i> , <i>P. californicus</i> , <i>Ancyclopsetta dedritica</i>	Paralichthyidae	0.03
20 medregal	<i>Seriola rivoliana</i>	Carangidae	0.020
21 bonito	<i>Sarda chiliensis</i> , <i>S. orientalis</i> , <i>Auxis thazard</i>	Serranidae	0.016
22 lebrancha	<i>Mugil curema</i>	Mugilidae	0.005
23 cabrilla	<i>Epinephelus labriformis</i> , <i>E. analogus</i>	Serranidae	0.001
24 macarela	<i>Scomber japonicus</i>	Scombridae	0.0001

Los peces se registran bajo 27 nombres comunes (tabla 8). En primer lugar están las mojarra y bandera, habitantes de lagunas costeras y litoral muy cercano a las lagunas.

La captura global registrada en el estado de Tabasco ha tenido un aumento paulatino, con algunos años de receso, pero con tendencia positiva en general. Para poder explicarla se

tiene que considerar más información de otras fuentes como avisos de arribo, muestreos directos en campo y encuestas a los usuarios de los recursos pesqueros (figura 6).

En los gráficos de la figura 7 se observa que el ostión (a), lisa (b), peto (c) y guachinango (f) tienen una captura con tendencia positiva, mientras que en el tiburón (e) es negativa; la



Figura 4. Captura marina anual de Nayarit, de 1990 a 2006.

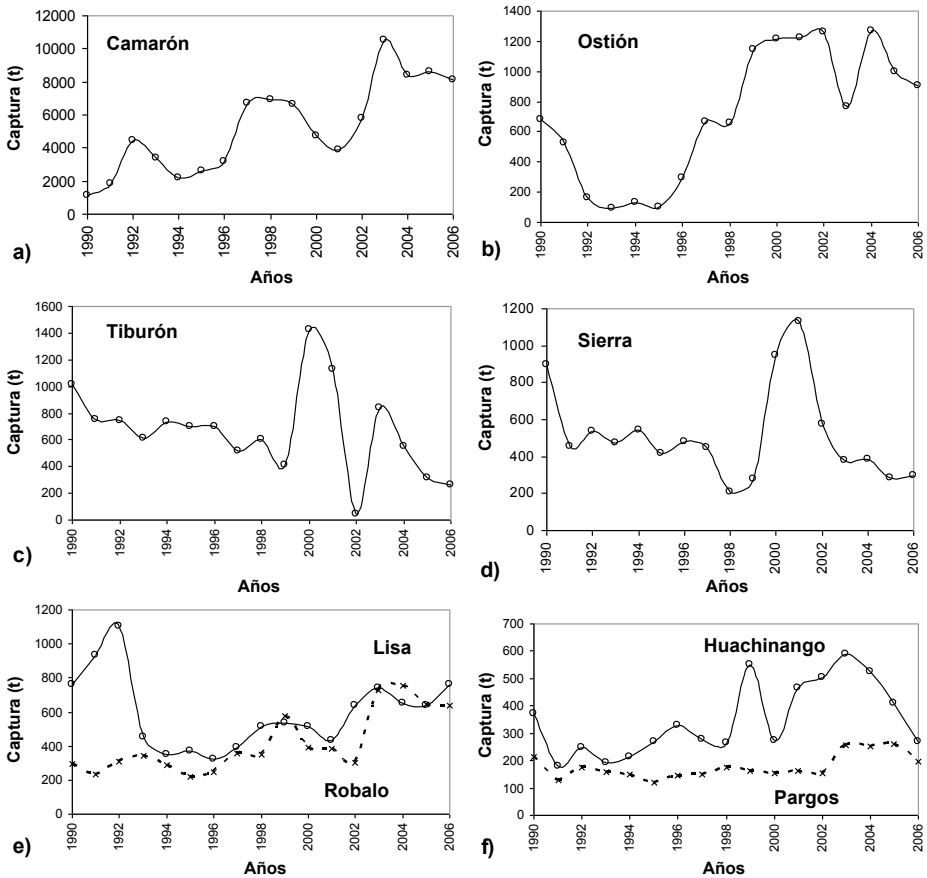


Figura 5. Series de captura de las especies más importantes en la costa de Nayarit, 1990 a 2006.

sierra (c) y mojarra (d) tienen una tendencia bastante estable, a pesar de las fluctuaciones que se observan en el periodo.

La pesca en la costa de Yucatán se concentra en la captura de pulpo y mero, como producto de la pesca ribereña, aunque para el mero existe también una flota de mediana altura cuyos registros se suman con los de la pesca

ribereña. Además de estas especies, el estado registra la captura de otros moluscos (45%), elasmobranquios (5%), crustáceos (4%) y pepino de mar (0.0013%). Los peces son el 46% de la captura total. El grupo de los moluscos está formado por pulpo (99.9%), caracol (0.1%) y un mínimo de calamar. Los elasmobranquios se componen de 93.8% de tiburón,

Tabla 8. Especies de peces capturadas en la costa de Tabasco.

	Nombre común	Nombre científico	Familia	%
1	mojarra	<i>Diapterus rhombeus</i> , <i>D. auratus</i> , <i>Eucinostomus</i> spp., <i>Gerres cinereus</i>	Gerreidae	41.26
2	bandera	<i>Bagre marinus</i>	Ariidae	18.65
3	sierra	<i>Scomberomorus maculatus</i>	Scombridae	7.49
4	peto	<i>Scomberomorus cavalla</i>	Scombridae	6.40
5	jurel	<i>Caranx hippos</i>	Carangidae	4.93
6	guachinango	<i>Lutjanus campechanus</i>	Lutjanidae	4.50
7	robalo	<i>Centropomus undecimales</i>	Centropomidae	4.48
8	lisas	<i>Mugil cephalus</i>	Mugilidae	2.72
9	cintilla	<i>Trichiurus lepturus</i>	Trichiuridae	2.45
10	mero	<i>Epinephelus morio</i>	Serranidae	1.69
11	atunes	<i>Thunnus albacares</i>	Scombridae	1.47
12	pargos	<i>Lutjanus</i> spp.	Lutjanidae	1.18
13	besugo	<i>Rhomboplites aurorubens</i>	Lutjanidae	0.99
14	bonito	<i>Euthynnus alletteratus</i> , <i>Auxis thazard</i>	Scombridae	0.70
15	esmedregal	<i>Seriola zonata</i>	Carangidae	0.36
16	ronco	<i>Conodon nobilis</i> , <i>Larimus fasciatus</i> , <i>Bairdiella ronchus</i>	Scianidae	0.33
17	berrugata	<i>Menticirrhus saxatilis</i>	Serranidae	0.11
18	rubia o villajaiba	<i>Lutjanus synagris</i>	Lutjanidae	0.11
19	cabrilla	<i>Mycteroperca phenax</i> , <i>M. tigris</i> , <i>Epinephelus guttatus</i>	Serranidae	0.06
20	corvina	<i>Sciaenops ocellata</i> , <i>Cynoscion arenarius</i> , <i>C. nebulosus</i> ,	Scianidae	0.04
21	pámpano	<i>Trachinotus carolinus</i> , <i>T. goodei</i>	Carangidae	0.04
22	bagre	<i>Ariopsis felis</i>	Ariidae	0.03
23	pierna	<i>Caulolatilus</i> sp.		0.010
24	anchoveta	<i>Anchovia</i> spp.	Engraulidae	0.006
25	rubio	<i>Prionotus evolans</i> , <i>P. punctatus</i>	Triglidae	0.002
26	lenguado	<i>Bothus robinsi</i> , <i>Cyclopsetta fimbriata</i> , <i>Syacium gunteri</i>	Paralichthyidae	0.001
27	lebrancha	<i>Mugil curema</i>	Mugilidae	0.000

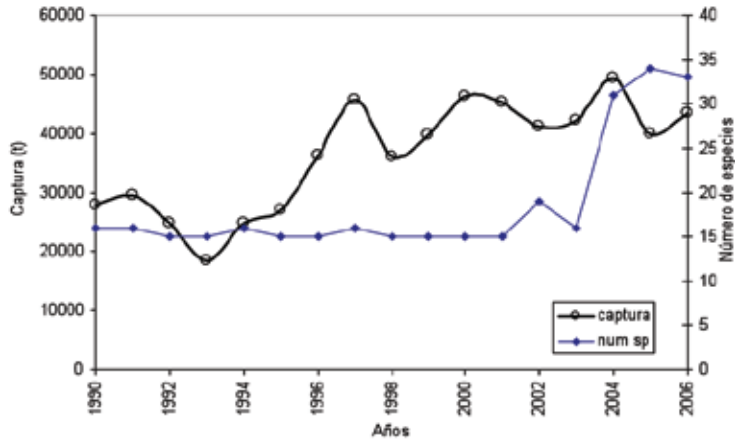


Figura 6. Captura marina anual de Tabasco, de 1990 a 2006.

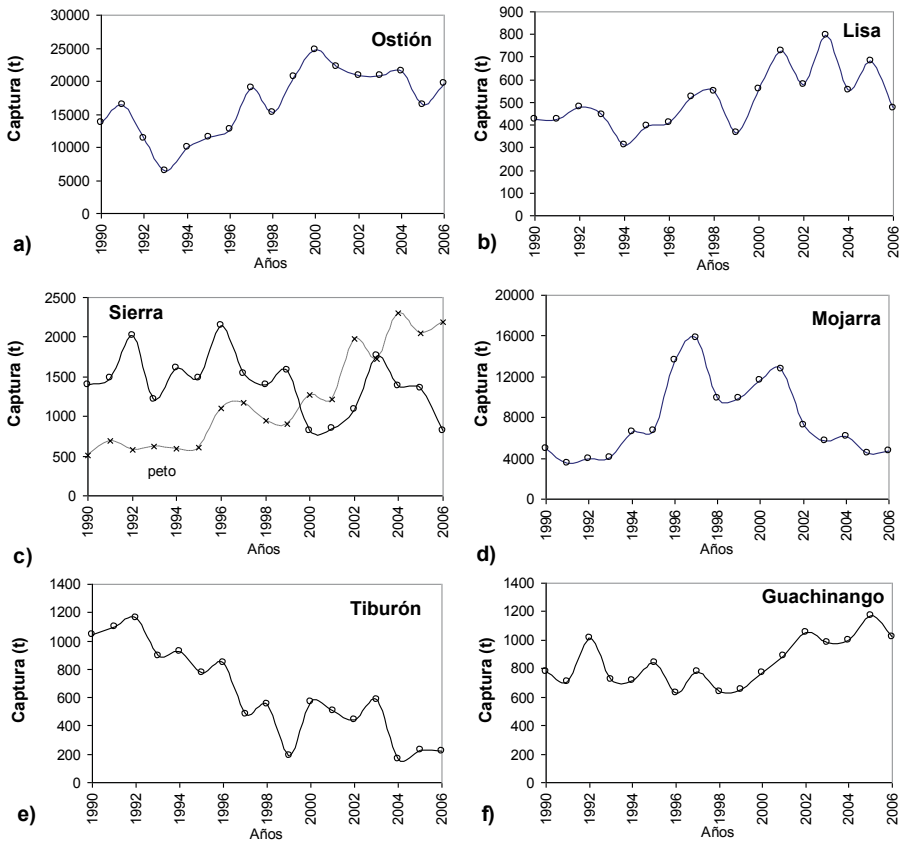


Figura 7. Series de captura de las especies más importantes en la costa de Tabasco, 1990 a 2006.

5.1% de cazón y 1.1% de raya y similares. Los crustáceos corresponden a 58.6% de camarón, 30.7% de langosta y 10.7% de jaiba.

El registro de peces se divide en 25 nombres comunes, el mero con 68.17% es la especie objetivo; le siguen en orden de importancia el guachinango, con menos de 10% de la captura. En la tabla 9 se enlistan los nombres comunes, científicos, familias y proporción en la captura de peces.

En los últimos 17 años las capturas de Yucatán han variado entre 42 428 t y 19 729 t con una leve disminución a través de estos años (figura 8). Después del 2002 se incrementó el número de especies, debido quizá a la desagregación de especies agrupadas bajo nombres comunes.

La figura 9 muestra una serie de gráficos de las especies o grupos de especies más importantes. Las especies más importantes que representan esa tendencia negativa son mero (a), guachinango (b), tiburón (c) y pulpo (e).

En Quintana Roo la pesca es principalmente ribereña. Algunos barcos se dedican a la pesca de camarón de altura y algunas embarcaciones de mediana altura pescan mero, guachinango y pargos. En los Anuarios Estadísticos de Pesca (Semarnap, 2000; Sagarpa, 2003 y 2007), la producción pesquera se compone de cuatro grandes grupos: 47% de peces, 29% de crustáceos, 13% de moluscos, 11% de elasmobranquios y 0.01 de pepino de mar.

El grupo de crustáceos está formado por camarón (64.0%), langosta (35.7%) y jaiba (0.3%); el de moluscos por caracol (56.5%), pulpo (40.3%), almeja (1.6%), calamar (1.4%) y ostión (9.3%). Los elasmobranquios por tiburón (98.2%), cazón (1.8%) y rayas y similares (0.02%), algunos costeros y otros de mar adentro. El grupo de peces registra 25

nombres comunes, los principales son el mero y los pargos, el resto constituyen menos de 10%. La tabla 10 enlista los nombres comunes, científicos, familias y la proporción que guardan dentro de su grupo. Se puede observar que la pesca está dirigida principalmente al mero y en segundo término a los lutjánidos (pargos y guachinango).

La captura marina ha fluctuado en los últimos 17 años entre 2 200 y 4,300 t con un promedio de 3 135 t; de 1993 a 2001 tuvo una tendencia negativa y desde este año se ha mantenido alrededor de 3 000 t (figura 10). El número de especies que se registran se ha incrementado, debido a que se están desagregando los grandes grupos de “especies” o se están registrando nuevas pesquerías.

En la figura 11 se muestran las series de datos de captura de 17 años de las “especies” o grupo de “especies” más abundantes; las que presentan una tendencia a disminuir son el mero (a) y el caracol (e). En los otros casos hay una aparente estabilidad.

En términos generales el grupo de tiburones y cazón se registran más de 20 especies. Tradicionalmente el cazón alcanza mayor precio, por lo que todo el tiburón de menos de 1.5 m se registra como cazón. Se encontró que aparentemente todas las series de tiburón son negativas y las de cazón son poco importantes, datos que están ocultando otro tipo de variables. Independientemente de ello, se está tratando de reducir el esfuerzo pesquero dirigido a estos dos grupos que son muy vulnerables a la pesca. Un cambio en su ambiente probablemente redistribuiría su abundancia y sus zonas de crianza y alimentación.

Otros grupos abarcan igualmente varias especies que se capturan temporalmente o durante todo el año, lo que no permite explicar

Tabla 9. Especies de peces capturadas en la costa de Yucatán.

	Nombre común	Nombre científico	Familia	%
1	mero	<i>Epinephelus morio</i>	Serranidae	68.17
2	guachinango	<i>Lutjanus campechanus</i>	Lutjanidae	8.73
3	sardina	<i>Brevoortia gunteri</i> , <i>B. patronus</i> , <i>Opisthonema oglinum</i>	Clupeidae	6.93
4	peto	<i>Scomberomorus cavalla</i>	Scombridae	2.78
5	pargos	<i>Lutjanus spp.</i>	Lutjanidae	2.15
6	corvina	<i>Sciaenops ocellata</i> , <i>Cynoscion arenarius</i> , <i>C. nebulosus</i> ,	Scianidae	2.05
7	mojarra	<i>Diapterus rhombeus</i> , <i>D. auratus</i> , <i>Eucinostomus spp.</i> , <i>Gerres cinereus</i>	Gerreidae	1.84
8	atunes	<i>Thunnus albacares</i>	Scombridae	1.71
9	rubia o villajaiba	<i>Lutjanus synagris</i>	Lutjanidae	1.38
10	rubio	<i>Prionotus evolans</i> , <i>P. punctatus</i>	Triglidae	1.34
11	sierra	<i>Scomberomorus maculatus</i>	Scombridae	0.92
12	lisa	<i>Mugil cephalus</i>	Mugilidae	0.59
13	robalo	<i>Centropomus undecimales</i>	Centropomidae	0.56
14	esmedregal	<i>Seriola zonata</i>	Carangidae	0.30
15	bonito	<i>Euthynnus alletteratus</i> , <i>Auxis thazard</i>	Scombridae	0.26
16	jurel	<i>Caranx hippos</i>	Carangidae	0.13
17	anchoveta	<i>Anchovia spp.</i>	Engraulidae	0.07
18	besugo	<i>Rhomboplites aurorubens</i>	Lutjanidae	0.05
19	bagre	<i>Ariopsis felis</i>	Ariidae	0.01
20	pámpano	<i>Trachinotus carolinus</i> , <i>T. goodei</i>	Carangidae	0.01
21	bandera	<i>Bagre marinus</i>	Ariidae	0.01
22	ronco	<i>Conodon nobilis</i> , <i>Larimus fasciatus</i> , <i>Bairdiella ronchus</i>	Scianidae	0.01
23	pierna	<i>Caulolatilus sp.</i>		0.01
24	macarela	<i>Scomber japonicus</i>	Scombridae	0.00
25	cabrilla	<i>Mycteroperca phenax</i> , <i>M. tigris</i> , <i>Epinephelus guttatus</i>	Serranidae	0.00

los cambios observados referidos a una sola especie. Sin embargo, las series de captura son un reflejo de la actividad y pueden mostrar si hay aumento en las capturas o no. Muchas de estas ganancias se explican con los apoyos que el gobierno da al sector: nuevas embarcaciones, nuevos motores, artes, etc.

La pesca es una actividad de importancia social y económica, en la que confluyen un sin número de variables que la hacen difícil de

estudiar, analizar, predecir y administrar. Por ser una actividad basada en la extracción de recursos renovables, provoca alteraciones sobre el objeto de operación, o sea, los recursos pesqueros. Aunado a esta presión, los cambios en el ambiente aumentan el estrés de las comunidades costeras, produciendo una dinámica que puede ser adversa en el desarrollo normal de su ciclo de vida.



Figura 8. Captura marina anual de Yucatán, de 1990 a 2006.

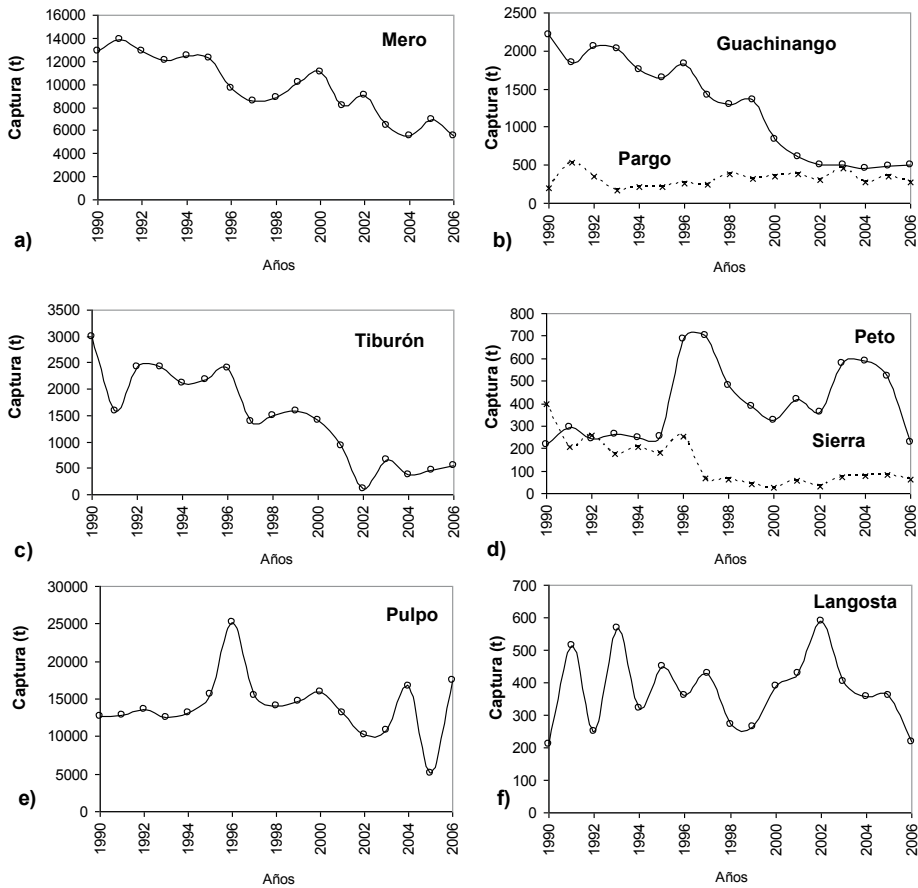


Figura 9. Series de captura de las especies más importantes en la costa de Yucatán, 1990 a 2006.

Tabla 10. Especies de peces capturadas en la costa de Quintana Roo.

	Nombre común	Nombre científico	Familia	%
1	mero	<i>Epinephelus morio</i>	Serranidae	53.98
2	pargos	<i>Lutjanus spp.</i>	Lutjanidae	11.70
3	mojarra	<i>Diapterus rhombeus</i> , <i>D. auratus</i> , <i>Eucinostomus spp.</i> , <i>Gerres cinereus</i>	Gerreidae	8.94
4	peto	<i>Scomberomorus cavalla</i>	Scombridae	8.18
5	robalo	<i>Centropomus undecimalis</i>	Centropomidae	3.91
6	guachinango	<i>Lutjanus campechanus</i>	Lutjanidae	2.74
7	jurel	<i>Caranx hippos</i>	Carangidae	2.21
8	rubio	<i>Prionotus evolans</i> , <i>P. punctatus</i>	Triglidae	1.53
9	sierra	<i>Scomberomorus maculatus</i>	Scombridae	1.24
10	lisa	<i>Mugil cephalus</i>	Mugilidae	1.19
11	esmedregal	<i>Seriola zonata</i>	Carangidae	1.11
12	rubia o villajaiba	<i>Lutjanus synagris</i>	Lutjanidae	1.08
13	sardina	<i>Brevoortia gunteri</i> , <i>B. patronus</i> , <i>Opisthonema oglinum</i>	Clupeidae	0.64
14	corvina	<i>Sciaenops ocellata</i> , <i>Cynoscion arenarius</i> , <i>C. nebulosus</i>	Scianidae	0.34
15	cabrilla	<i>Mycteroperca phenax</i> , <i>M. tigris</i> , <i>Epinephelus guttatus</i>	Serranidae	0.24
16	pámpano	<i>Trachinotus carolinus</i> , <i>T. goodei</i>	Carangidae	0.23
17	atunes	<i>Thunnus albacares</i>	Scombridae	0.18
18	bonito	<i>Euthynnus alletteratus</i> , <i>Auxis thazard</i>	Scombridae	0.07
19	bagre	<i>Ariopsis felis</i>	Ariidae	0.03
20	bandera	<i>Bagre marinus</i>	Ariidae	0.01
21	ronco	<i>Conodon nobilis</i> , <i>Larimus fasciatus</i> , <i>Bairdiella ronchus</i>	Scianidae	0.01
22	lenguado	<i>Bothus robinsi</i> , <i>Cyclopsetta fimbriata</i> , <i>Syacium gunteri</i>	Paralichthyidae	0.004
23	anchoveta	<i>Anchovia spp.</i>	Engraulidae	0.0003

Se han realizado trabajos para tratar de explicar la abundancia de algunas especies, la persistencia de otras y las relaciones interespecíficas dentro de la comunidad (Margalef, 1977; Penchaszadeh y Salaya, 1985; Longhurst y Pauly, 1987; De Fontaubert *et al.*, 1996; Pérez y Mendoza, 1998). Se han clasificado de *grosso modo* por sus características estructurales de especies dominantes, por su hábitat físico que moldea el tipo de vida, su capacidad de reproducción, territorialidad, estrategia de crecimiento, etc. (Margalef, 1977). Pero para

generalizar, puede afirmarse que la diversidad alta se encuentra en comunidades maduras, poco perturbadas y la diversidad baja en comunidades de reciente establecimiento o con cambios en su interior (Odum, 1982).

Además de lo anterior, existen los cambios en la estructura de la comunidad en el tiempo y espacio que son indicadores de alguna perturbación (Pitcher y Hart, 1982; Leigh, 1990) y pueden llegar a servir para diagnosticar la fuente de variación. En el caso de que la perturbación sea de origen humano y a corto

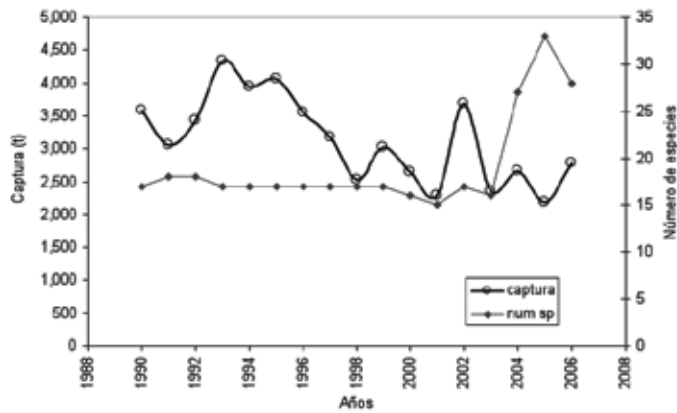


Figura 10. Captura marina anual de Quintana Roo, de 1990 a 2006.

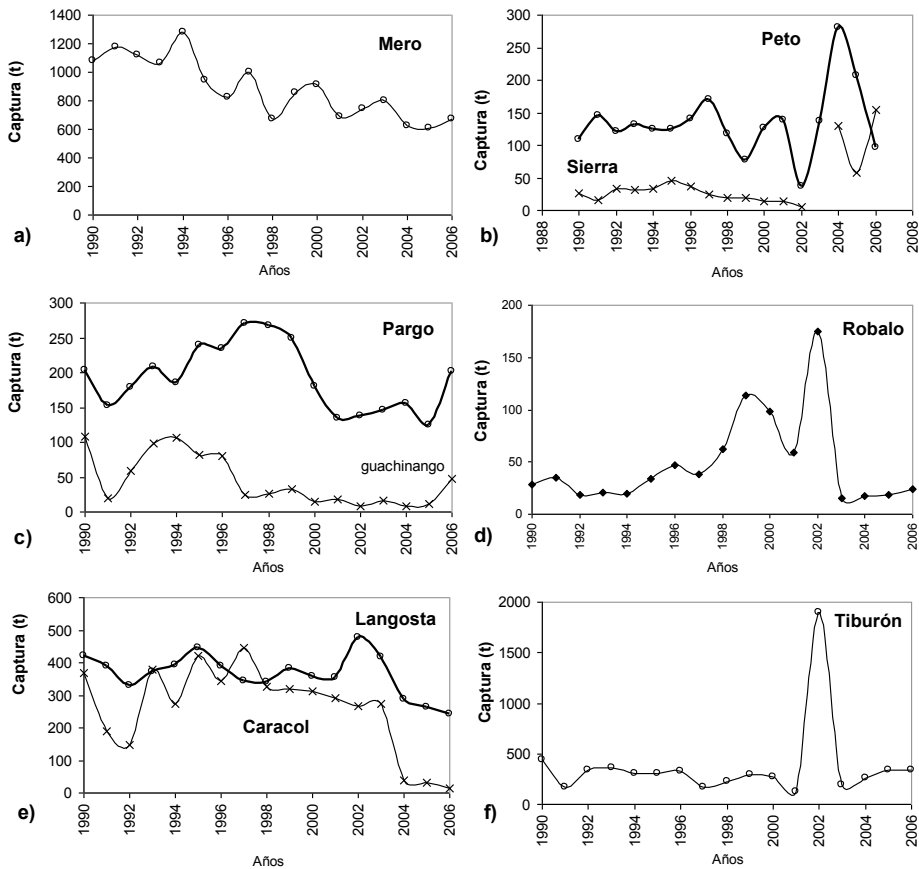


Figura 11. Series de captura de las especies más importantes en la costa de Quintana Roo, 1990 a 2006.

plazo o inmediato, la información puede servir para evitarla o buscar mecanismos que la disminuyan, como en el caso del uso de pesticidas y otros contaminantes, artes no selectivas, o actividades altamente nocivas como explosivos, venenos, etc. (Bechtel y Copeland, 1970; McKenna y Sails, 1991). Caso diferente cuando la perturbación es a largo plazo y a escala global, cuando se afectan los aportes de agua y nutrientes a las lagunas costeras y zonas marinas; y cuando las perturbaciones atmosféricas son más fuertes y frecuentes que evitan que las comunidades pesqueras vuelvan a su “normalidad”.

El primer paso es conocer la comunidad marina y estuarina que se está aprovechando para consumo humano, la descripción en términos de las especies que existen y que se utilizan en la pesca comercial (Fischer *et al.*, 1995; De la Cruz-Agüero, 1997; Castro-Aguirre, 1999; Espino-Barr *et al.*, 2004; Cruz-Torres y Morán-Angulo, 2007; Ulloa-Ramírez *et al.*, 2008). Posteriormente, la obtención de series de datos de captura que sirvan de monitoreo de la abundancia y estructura de la comunidad. Es importante empezar a llevar un registro más fino de las especies, ya que por tradición se concentran o mezclan en aproximadamente 30 grupos de “especies” que en realidad son nombres comunes.

Para medir el efecto del CC global en la pesca ribereña se requiere del conocimiento de las especies que se capturan a lo largo del año y los cambios que se van dando a través de los años. En Colima se han observado relaciones entre la abundancia de algunas especies en la captura con los efectos de ENSO. El efecto en el huachinango (*Lutjanus peru*) fue que en año Niño la distribución de los organismos los hacía más vulnerables a la pesca, con una

respuesta de más captura y mayores tallas (Espino-Barr *et al.*, 2008).

Arreguín-Sánchez *et al.* (2008) mencionan que los cambios ambientales que afectan el reclutamiento del camarón son de dos tipos: a) a corto plazo por efectos antropogénicos o fenómenos meteorológicos, y la capacidad de respuesta tiende a ser resiliente, b) con efectos de largo plazo como el CC, el reclutamiento se puede ver afectado de manera definitiva.

Entre los efectos del CC que los especialistas mencionan está el aumento del nivel del mar que afectará la flora de la región, base de la cadena alimenticia en forma directa o indirecta (generación de nutrientes) y que alteraría las condiciones fisicoquímicas del agua, y provocaría un cambio total de la dinámica de las lagunas costeras, ya de por sí compleja, afectando a las especies que viven allí por temporadas o permanentemente. Aquellas que viven una temporada de su vida se afectarán críticamente si dependen de aguas salobres para completar su ciclo de vida, quizá logren adaptarse aquellas que lo usan meramente de resguardo. El daño a las lagunas costeras y a las especies que dependen de estos ecosistemas afectará fundamentalmente a la pesca ribereña.

Diversos grupos de trabajo han mencionado que en las costas mexicanas se espera un aumento de 4°C. El efecto más notorio a este cambio será en el desplazamiento de las especies en busca de su hábitat. Las especies más afectadas son las sésiles y las que tienen una distribución latitudinal estrecha, y las menos afectadas las de nado libre y que tienen una amplia distribución.

Cabe señalar que una amplia distribución de las poblaciones pesqueras, posibilitaría su sobrevivencia, pero no necesariamente garantiza su disponibilidad como recurso pesquero

a escala local. Para otras especies con distribución más restringida, un aumento en la temperatura podría ampliar su área de distribución o limitarla aún más. El anexo 1 enlista los principales recursos de los estados de interés y su área de distribución.

Los tiburones son oceánicos y sus distribuciones amplias, hay especies tropicales y otras de aguas templadas. Se identifican 8 especies de tiburón, dos de las cuales se encuentran en ambas costas del país. Los anuarios estadísticos generalizan estas especies bajo el rubro de “tiburones”, sin especificar los oceánicos, costeros, cosmopolitas o endémicos. Dos especies de la familia Sphyrnidae se captura comercialmente en el Pacífico: *S. lewini* se distribuye de California a Perú, mientras que *S. zygaena* solamente en el Golfo de Cortés, que la hace mucho más vulnerable a cualquier cambio, sin registro en los datos oficiales.

Entre los elasmobranchios también se registran “rayas y similares” que agrupan nueve especies, seis en el Pacífico (Sinaloa y Nayarit) y una de ellas sólo en Golfo de California. Seis especies se reportan como cazón, dos de ellas también se registran como tiburón. Otras tres tienen distribución amplia en el Golfo de México y hasta el Caribe y Brasil, pero *Mustelus norrisi* solamente se distribuye dentro del Golfo de México.

Aun cuando los escómbridos son pelágicos su distribución varía, en los registros pesqueros se identificaron 9 especies en Sinaloa y Nayarit y seis en Tabasco, Yucatán y Quintana Roo. Entre las especies con mayor

distribución se encuentran las oceánicas: el atún se encuentra en todos los mares y desde aguas templadas hasta las tropicales, hay especies oceánicas limitadas a latitudes tropicales como los bonitos del género *Auxis* y *Sarda*. Para aquellas especies restringidas a las zonas más templadas, los cambios en el ambiente van a provocar desplazamientos a otros hábitats con la consecuente desaparición de las zonas de pesca tradicionales.

Las sardinas también son especies pelágicas y oceánicas con distribuciones amplias, su pesquería aporta grandes volúmenes de captura. Se identificaron 6 especies, tres en el Pacífico y tres en Yucatán y Quintana Roo. *Sardinops caeruleus* se restringe a la costa de Baja California y Golfo de California, las otras cuentan con mayor distribución.

Hay ocho especies importantes en la pesquería de camarón: tres en Sinaloa y Nayarit, cuatro en Tabasco, Yucatán y Quintana Roo y una en Quintana Roo, con distribución restringida al Caribe. Estas especies además de ser bentónicas, que las hace menos móviles que otros organismos, dependen de las lagunas costeras en el periodo más vulnerable de su vida.

A partir de los nombres comunes de 33 peces en los anuarios estadísticos de pesca se identificaron 97 especies, de las cuales cinco existen en ambas costas. Al igual que en los grupos anteriores, bajo el nombre común de “mojarra” o cualquier nombre común hay varias especies. Esto hace que el análisis de la vulnerabilidad de las especies sea muy difícil.

RECURSOS PESQUEROS VULNERABLES EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En las tablas 11, 12 y 13 se presentan las especies comerciales sobre las que existen estudios de evaluación de sus poblaciones y que de acuerdo con el criterio de vulnerabilidad adoptado en el presente trabajo, están en la categoría de pesquerías aprovechadas al máximo permisible, esto significa que han sido utilizadas de forma que sus niveles de biomasa son menores que aquellas con potencial de desarrollo; por lo general el esfuerzo se encuentra en los niveles recomendados o estable, la biomasa es abundante o está cerca de los niveles de máxima productividad, y el reclutamiento no se encuentra disminuido. En esta categoría la probabilidad de que los niveles de aprovechamiento de las pesquerías sean sostenibles en el largo plazo, es alta.

Las pesquerías en deterioro o en riesgo son aquellas en las que el exceso de capacidad, el sobredimensionamiento de la flota pesquera y las tasas excesivas de aprovechamiento, en combinación con la variabilidad ambiental, han provocado un deterioro expresado en una menor capacidad de la población para regenerarse o en un nivel de biomasa por debajo del de mayor producción biológica. En general, estas pesquerías presentan altas tasas de explotación, bajo nivel de biomasa y reclutamiento disminuido. Los niveles de aprovechamiento actuales pueden no ser sostenibles (Semarnap/INP, 1999). Las especies acuaculturales son las que se cultivan en los estados de interés.

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE EL NIÑO-LA NIÑA SOBRE LOS RECURSOS PESQUEROS

Las pérdidas socioeconómicas relacionadas con las variaciones climáticas son considerables aunque aún no se han logrado cuantificar, particularmente las asociadas con el fenómeno El Niño. Los estudios que existen son limitados y en general no consideran la interacción entre ambiente y sociedad. La producción de alimentos en su mayoría está relacionada con regiones frágiles, muy sensibles a malas políticas de uso del suelo, disminución en la disponibilidad del agua o inundaciones. Una de las actividades más afectadas por El Niño es la pesca, la FAO señala que la producción mundial de alimentos disminuyó de 2 a 4% en

1997; para la mayoría de los recursos los efectos a mediano plazo han sido poco evaluados. En México no existen cifras oficiales, pero se sabe que los impactos han sido fuertes, especialmente en el Pacífico que aporta el mayor volumen y valor de producción pesquera.

Algunos de los efectos climáticos de El Niño son: elevación de la temperatura superficial del océano, hundimiento de la termoclina y aumento del nivel medio del mar, intensificación de las corrientes costeras hacia los polos y las lluvias de invierno, disminución de las lluvias de verano, incremento de frentes fríos en invierno y sequías en verano, disminución

Tabla 11. Pesquerías del litoral del Pacífico aprovechadas al máximo, en deterioro o en riesgo; de importancia comercial en los estados de Sinaloa y Nayarit.

Especie	Nombre común	Temperatura	Salinidad	D B ³	Efecto ENSO	Modelos	Estatus
<i>Farfantepenaeus californiensis</i>	camarón café	Euritérmicos 24-28°C	Eurihalinos 23-36‰/00	11-20 brazas	Favorece reclutamiento y crecimiento	Dinámico de Biomasa de Schaefer (versión de Hilborn y Walters)	Aprovechada al máximo¹ $B_{actual}/[Bo/2]$ 0.974 Riesgo 54%
<i>Litopenaeus stylirostris</i>	camarón azul	Euritérmicos 24-28°C	Eurihalinos 23-36‰/00	25 brazas	Favorece reclutamiento y crecimiento	Estructurado por edades de Deriso y estructurado por tallas	En deterioro¹ $B_{actual}/[Bo/2]$ 0.905 Riesgo 82.8%
<i>Litopenaeus vannamei</i>	camarón blanco	Euritérmicos 24-28°C	Eurihalinos 23-36‰/00	2-10 brazas	Favorece reclutamiento y crecimiento		En deterioro¹ $B_{actual}/[Bo/2]$ 0.123 Riesgo 100%
<i>Thunnus albacares</i> ²	atún aleta amarilla	18 a 31°C			Favorece reclutamiento e incrementa el hábitat por la profundización de la termoclina	Rendimiento Máximo por Recluta (PRP) Modelos de biomasa	Aprovechada al máximo² Edad crítica de captura: dos años RMS 369,160 tm
Tiburones oceánicos <i>Alopias pelagicus</i> <i>Prionace glauca</i> <i>Isurus oxyrinchus</i>	T. zorro T. azul T. mako o alecrin	20-25°C 10-21°C >21°C		Variable	Cambia la distribución del recurso, se mueve hacia el norte desde centroamérica hacia E.U.	Demográfico (frecuencia de aparición -fa-)	En deterioro¹ El resto aprovechadas al máximo fa 9.1% fa 2.6%
<i>Carcharhinus limbatus</i>	T. volador, puntas negras						
<i>Sphyrna lewini</i>	Cornuda						
<i>Scomberomorus sierra</i> <i>S. concolor</i>	Sierra, vago, pinto					Poblacional de crecimiento logístico que incluye cosecha	Aprovechada al máximo con riesgo¹ Población 1'798,866 organismos
<i>Mugil cephalus</i> <i>M. curema</i>	Lisa Lebrancha, liseta	Euritérmicas 4.5-37°C 10-36°C	Eurihalinas 0-55 ‰/00 0-55 ‰/00			Rendimiento por recluta (Beverton y Holt, modificado por Pauly y Soriano)	En deterioro¹ Sinaloa Emáx=0.635 Nayarit Emáx=0.545
<i>Istiophorus platypterus</i>	Pez vela	Isoterma 28°C			Muy susceptible a cambios ambientales, especialmente al ENSO	Demográfico estructurado por edades	Aprovechada al máximo¹ RMS 8,300t anuales
<i>Tetrapturus audax</i>	Marlin rayado	20-25°C			Muy susceptible a cambios ambientales, especialmente al ENSO	Dinámico de biomasa de Schaefer (versión de Hilborn y Walters)	Aprovechada al máximo¹ RMS 56,991 organismos/ año

1. Sagarpa/INP. 2001. Sustentabilidad y pesca responsable en México. Evaluación y manejo 1999-2000.

2. Sagarpa/INP. 2006. Sustentabilidad y pesca responsable en México. Evaluación y manejo 2006.

3. DB Distribución Batimétrica

Tabla 12. Pesquerías del litoral del Golfo de México y mar Caribe aprovechadas al máximo, en deterioro o en riesgo; de importancia comercial en los estados de Tabasco, Yucatán y Quintana Roo.

Especie	Nombre común	Temperatura	Salinidad	D B	Modelos	Estatus
<i>Farfantepenaeus duorarum</i>	camarón rosado			12-42 brazas	Estructurado por edades de Deriso y de rendimiento por recluta.	En deterioro ²
<i>F. brasiliensis</i>	camarón rojo				Estructurado por edades de Deriso y de rendimiento por recluta.	En deterioro ²
<i>Sicyonia brevirostris</i>	camarón roca			18-36 brazas	Estructurado por edades de Deriso y de rendimiento por recluta.	En deterioro ²
<i>Xiphopenaeus kroyeri</i>	camarón siete barbas		20 ‰/00	2-7 brazas	Estructurado por edades de Deriso y de rendimiento por recluta.	En deterioro ²
<i>Litopenaeus setiferus</i>	camarón blanco	Desove asociado a cambios de temperatura		≤15 brazas	Estructurado por edades de Deriso y de rendimiento por recluta.	En deterioro ²
<i>Epinephelus morio</i>	mero			20 brazas	Estructurado por edades.	En deterioro ² biomasa 46,487t <PRL (78,000t)
<i>Rhizoprionodon terraenovae</i> <i>Sphyrna lewini</i> <i>S. tiburo</i> <i>Carcharhinus limbatus</i> <i>C. leucas</i>	cazón de ley, caña hueca cornuda cazón cabeza pala tiburón puntas negras t. chato				Demográfico dinámico y de rendimiento por recluta.	Aprovechada al máximo ² (cazón de ley). Para el resto de las especies no se cuenta con información suficiente para definir puntos de referencia biológicos.
<i>Scomberomorus maculatus</i> <i>S. cavalla</i>	sierra peto, carito	Isoterma de 20°C en verano	Salinidad media	Hasta 40 brazas	Rendimiento por recluta de Beverton y Holt (Gulland, 1971) Coeficiente de explotación	Aprovechada al máximo ¹ 3 años- 697 mm. E= 0.5 ± 0.1 4 años- 842 mm. E= 0.56 ± 0.1
<i>Lutjanus campechanus</i>	guachinango	19-24°C		5-12 brazas	Dinámico de biomasa de Schaefer (versión de Punt y Hilborn).	Aprovechada al máximo ¹ . B0= 33740 t. MRS= 1,271 t/año. EMRS= 2,197 viajes/año.
<i>Strombus gigas</i>	caracol rosado			Hasta 24 brazas	Espacial Estructurado por Edades (YAREA).	Aprovechada al Máximo ¹ (Cozumel) PRL= 0.04/m ² . Máximo 12 t/año En deterioro ¹ (Banco Chinchorro) PRO= 500t biomasa, CPUE= 70-100 kg/viaje de pesca
<i>Octopus maya</i> <i>O. vulgaris</i>	pulpo rojo p. común, patón	6-33°C 10-30°C		0-32 brazas 10-90 brazas.	Método de la distancia* Método de área barrida* Modelo dinámico de biomasa**.	Aprovechada al máximo ² cuota captura 12,000 t
<i>Panulirus argus</i>	langosta espinosa	16-28°C		Hasta 60 brazas.	Modelo de decaimiento Análisis de cohortes.	Aprovechada al máximo ¹ (Yucatán) RMS 494,815 kg de cola En deterioro ¹ (Quintana Roo) talla mínima 145mm y 25% menos de esfuerzo pesquero

B₀= Biomasa inicial. MRS= Máximo Rendimiento Sostenible. EMRS= Esfuerzo en el Máximo Rendimiento Sostenible. PRL= Punto de Referencia Límite. E=Coeficiente de explotación. *para la estimación de biomasa, poblacional y susceptible a la pesca respectivamente; **para la estimación de la cuota de captura

1. Sagarpa/INP.. 2001. Sustentabilidad y pesca responsable en México. Evaluación y manejo 1999-2000.

2. Sagarpa/INP.. 2006. Sustentabilidad y pesca responsable en México. Evaluación y manejo 2006.

Tabla 13. Especies acuaculturales para consumo humano.

Recurso	Producción (t)	Unidades de P	Superficie (Ha)	Sistema	A/I (ubicación)	Destino	Estado	Estatus y Vulnerabilidad
Atún aleta azul <i>Thunnus thynnus orientalis</i> A.A. amarilla T. albacares A. ojón T. obesus	2 700 (2003) principalmente A.A. azul	14 comerciales y 3 de fomento	168	SI (juveniles obtenidos del medio natural).	Jaulas o encierros marinos (bahías, ensenadas)	Exportación.	Sin BC, BCS Jal	No hay estimaciones de biomasa de A.A. azul. Pesquería depende de condiciones oceanográficas, ENSO; disminuye captura de adultos y juveniles para engorda ¹
Camarón <i>Litopenaeus vannamei</i> <i>L. stylirostris</i>	98 945 (2006)	592 comercial ² 744 comercial ³ y 17 de autoconsumo ³ 37 LPP	60 283.9	I, SI y E	Estanquería rústica y de concreto (zona costera)	Mercado interno y Exportación.	Sin, Nay Tab, Yuc BC, BCS, Camp, Col, Gro, Jal, Son, Tamp, Ver	Cambios de salinidad. Infraestructura: vulnerable al aumento del nivel del mar.
Caracol rosado <i>Strombus gigas</i>		1 comercial 1 LPL	1	I	Jaulas y corrales (mar)	Mercado interno.	Q, Roó	Deteriorado
Ostión <i>Crassostrea virginica</i> <i>C. corteziensis</i> <i>C. gigas</i>	29 000 (2003)	90 comercial 6 autoconsumo 1 laboratorio	5 867.2	SI, E Semilla de bancos silvestres S. laboratorio.	Camias, estantes y empilados con sarras, balsas ostrícolas, long-line	Mercado interno y exportación O. japoneses (<i>C. gigas</i>).	Nay, Tab, BC, BCS, Camp, Jal, Son, Tamp, Ver	Poblaciones del G. de M. afectadas por contaminación de hidrocarburos. Sensibles a los cambios climáticos.
Pejelagarto <i>Atractosteus tropicus</i>	150 (2003)	2 comerciales 3 autoconsumo 2 laboratorios		E reproducción	Estanquería rústica, concreto, jaulas flotantes, jagüeyes rios y lagunas	Mercado interno.	Tab, Ver, Chis	Deteriorado Captura de adultos se realiza en ríos, lagunas y áreas de inundación. Se requieren áreas naturales protegidas para su protección.

1. Sustentabilidad y Pesca Responsable en México, 2. Conapesca, 3. CNP, 2006
A/I. Artefacto, Infraestructura, I. Intensivo, SI. Semi-intensivo, E. Extensivo, LPP. Laboratorio de producción de postlarvas, LPL. Laboratorio de producción de larvas

del número de huracanes en el Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México.

En 1998 se registraron alteraciones biológicas severas como, disminución de nutrientes para la producción primaria que tiene efectos complejos y poco entendidos en los recursos pesqueros, alteraciones en la abundancia y distribución de organismos que afecta la disponibilidad de los recursos, desplazamiento de poblaciones de peces, así como recomposición de comunidades, migración de especies autóctonas hacia mayores profundidades; invasión de organismos tropicales y mortandad masiva de organismos locales, incremento en la mortalidad natural, alteraciones en el crecimiento corporal, en los ciclos reproductivos relacionados con la temperatura del agua y los cambios en los patrones de circulación, con desoves fuera de temporada, por ejemplo, que da lugar a organismos inmaduros o enfermos, lo que afecta el reclutamiento. Los recursos más afectados son los bentónicos, por ser sésiles o de baja movilidad los hace más vulnerables a los efectos de El Niño, ya que están sujetos a condiciones que ponen en riesgo su supervivencia o en los límites de tolerancia, que provoca pérdida de peso, propensión a enfermedades, e incrementos en la mortalidad natural (Lluch-Cota *et al.*, 1999, Rojo-Vázquez *et al.*, 2001). En la tabla 14 se presentan algunos de los efectos de El Niño, La Niña sobre algunas pesquerías tropicales y subtropicales.

Los recursos pesqueros en zonas tropicales y subtropicales presentan complejas interrelaciones, son muy diversos y de baja biomasa por especie, lo que los hace vulnerables. Las comunidades de peces tropicales y subtropicales en el Pacífico Mexicano están más influenciadas por los cambios asociados a la temperatura del

agua; se considera que los eventos que tienen mayor influencia sobre la estructura de dichas comunidades son la corriente de California, la Contracorriente Norecuatorial y El Niño (Rojo-Vázquez *et al.*, 2001).

Los impactos de ENSO sobre las pesquerías pueden ser positivos o negativos, en el primer caso un aspecto importante a considerar es el hecho que muchas pesquerías no están equipadas para enfrentar el reto de nuevas especies objetivo, por lo que el beneficio es limitado (Arntz y Tarazona, 1990). Los efectos a largo plazo de ENSO sobre los ecosistemas tropicales oceánicos se desconocen, se facilitaría su comprensión el realizar estudios sobre los cambios de la composición de las especies en el tiempo (Vilchis *et al.*, 2007).

El manejo costero integrado (MCI) ayuda a conocer los impactos sobre el ambiente y evaluar el éxito y efectividad de los esfuerzos de manejo. El MCI requiere de indicadores robustos para medir el estado de salud de la costa, en los ámbitos ambiental, social y económico; los bioindicadores en particular permiten observar señales tempranas de contaminación o degradación de un ecosistema, para mantener la salud de los recursos (una especie o grupos de especies, procesos biológicos) y ecosistemas críticos (arrecifes de coral, pastos marinos, manglares) (Linton y Warner, 2003).

Es importante contar con bases de datos de series de tiempo largas, para comprender la dinámica de los ecosistemas y las historias de vida, para entender cómo reaccionan las especies ante el forzamiento ambiental, incluyendo el plancton (Rebstock, 2003). Los registros de CALCOFI son apropiados para estudiar los mecanismos de interacciones físico-biológicas interdecadales en el océano costero (Bograd y Lynn, 2003).

Tabla 14. Efecto de El Niño (ENSO, EN) y La Niña (LN) sobre algunas pesquerías tropicales y subtropicales.

Especie/grupo (años-evento)	Efecto sobre el recurso	Autor
Bentos, peces y pesquerías (1982-1983)	Cambios en la composición de especies y migración de poblaciones de invertebrados y peces con incrementos de 11°C TSM. Impacto severo en Perú y Ecuador sobre especies de importancia comercial por sobrepesca y ENSO anteriores. Impactos positivos por migración de macarelas, dorados, barrilete hacia la costa, con beneficios de menor importancia. Mortandad masiva de organismos bentónicos, pero el efecto total fue positivo	Arntz y Tarazona, 1990
<i>Argopecten purpuratus</i> (concha de abanico)	Grandes variaciones interanuales en la captura y el esfuerzo en Perú; aumento repentino en los eventos de 1983, 1998, después de los cuales la captura bajó a niveles normales	Wolff <i>et al.</i> , 2007
<i>Dosidicus gigas</i> (calamar gigante)	En las costas de Perú se presenta reducción de la abundancia bajo condiciones inusuales de calor o frío, y aumento en otras áreas como el Domo de Costa Rica y el Golfo de California	Waluda <i>et al.</i> , 2006
	En 1983 se colapsó la pesquería en el Golfo de California. A principios de la década de 1980 había un solo stock con múltiples cohortes y reclutamiento en mayo; en el periodo de 1994-1996 hubo sólo una cohorte anual con reclutamiento en mayo	Morales-Bojórquez <i>et al.</i> , 2001
<i>Panulirus interruptus</i> (langosta)	Impactos evidentes de EN y LN (1996, 1999 y 2000) al inicio y durante la época de reproducción. Temperaturas altas aceleraron reproducción, y con bajas (LN) lo contrario. El patrón de reproducción y reclutamiento larvario están relacionados a las características físicas dominantes de la corriente de California	Vega-Velázquez, 2003
<i>Oreochromis niloticus</i> (tilapia) (1996, 1999 y 2000)	En Colombia se presentó aumento la abundancia por cambios hidrológicos y climáticos favorables debidos a LN. De 2001-2005 la población casi desaparece por su intolerancia a concentraciones de salinidad > 10	Blanco <i>et al.</i> , 2007
Pesquerías ribereñas de escama	Cambios en la estacionalidad de aparición y abundancia inusual de especies poco comunes del Pacífico central mexicano (<i>Microlepidotus brevipinnis</i> , <i>Caranx caninus</i> , <i>C. caballus</i> , <i>Kyphosus analogus</i> y <i>C. sexfasciatus</i>). Mayor diversidad en eventos EN-LN, que en el año no anómalo.	Godínez-Domínguez <i>et al.</i> , 2000
	Recomposición y aumento del número de especies. Se mantiene <i>Microlepidotus brevipinnis</i> , desaparecen <i>Haemulon flaviguttatum</i> y <i>Lutjanus guttatus</i> de importancia comercial. Migran a la costa especies que normalmente se encuentran alejadas: <i>Caranx caninus</i> , <i>C. caballus</i> , <i>C. sexfasciatus</i> , <i>Kyphosus analogus</i> y <i>Katsuwonus pelamis</i>	Rojo-Vázquez <i>et al.</i> , 2001
Pesquerías pelágicas (1972-73, 1982-83, 1997-98)	Afecta la abundancia, distribución y esfuerzo pesquero de las poblaciones de peces costeros pelágicos. Incremento del reclutamiento anual de la anchoveta y sardina en relación directa con la intensidad de la turbulencia	Yáñez <i>et al.</i> , 2001
	Mayor diversidad y menos productividad en el ecosistema pelágico. La anchoveta <i>Engraulis ringens</i> disminuyó su biomasa, pero aumentó la de <i>Sardinops sagax</i> , <i>Trachurus murphyi</i> , <i>Scomber japonicus</i> y <i>Anchoa nasus</i> . Bajó el desove de anchoveta, y el de la sardina y macarela subió. Incremento de juveniles de sardina y macarela, la anchoveta mostró un grupo modal de adultos, post ENSO se observó un incremento en juveniles	Ñiquen y Bouchon, 2004
<i>Sardinops caeruleus</i> (sardina)	Decayó drásticamente la pesquería en el Golfo de California (1997-1998). Los cambios en el ambiente de desove coinciden con una en la baja abundancia de larvas	Sánchez-Velasco <i>et al.</i> , 2002
<i>Sardinella maderensis</i> (Sm), <i>S. aurita</i> (Sa) (1964-1999)	Sm se pesca en la estación cálida y aguas de baja salinidad, Sa se asocia a surgencias de aguas frías; de 1964 a 1983 Sm dominó las capturas del Congo, de 1984 en adelante Sa fue más abundante. Esto puede deberse al movimiento de masas de agua debido a ENSO. Agua caliente de baja salinidad lleva a Sm hacia la costa y Sa fuera lo que la hace menos accesible a la pesquería	Binet <i>et al.</i> , 2001
<i>Strangomera bentincki</i> (sardina), <i>Engraulis ringens</i> (anchoveta) (1997-1998)	Relación negativa entre reclutamiento de sardina, con TSM y IS promedio durante la máxima actividad reproductiva; el de la anchoveta no se vio afectado por condiciones ambientales. ENSO afectó la abundancia de la cohorte de sardina en 1997, su disminución favoreció el reclutamiento de anchoveta	Cubillos y Arcos, 2002
<i>Engraulis ringens</i> (anchoveta peruana) (1965, 1972 y 1976)	Durante ENSO los hábitats de desove son menos favorables por la calidad del alimento, menor sobrevivencia larvaria y reclutamiento, mayor mortalidad de larvas y adultos. En 20 años el stock ha disminuido a menos del 20% de la biomasa que había en los tiempos de máxima producción	Walsh <i>et al.</i> , 1980
<i>Trachurus symmetricus</i> (jurel) (1997-1998)	Dominancia de juveniles en los campos pesqueros por efecto de ENSO sobre las áreas de alimentación, se observaron cambios en la estructura de longitud. Se afectó la ruta migratoria de los organismos juveniles	Arcos <i>et al.</i> , 2001
TSM temperatura superficial del mar. ENSO ó ENOS El Niño. LN La Niña. IS índice de surgencia		

ECOSISTEMAS COSTEROS DE IMPORTANCIA PESQUERA Y ACUÍCOLA, E IMPORTANCIA DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES QUE OFRECEN

Existe un estrecho vínculo entre el bienestar humano y el mantenimiento de las funciones ecológicas del planeta (Balvanera y Cotler, 2007). La sociedad obtiene de los ecosistemas naturales y la biodiversidad una amplia gama de beneficios, que se conocen como servicios ambientales o ecosistémicos. De acuerdo con Daily (1997), éstos son las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas y las especies que viven en éstos, nutren a la vida humana. Los servicios toman la forma de producción de bienes, regeneración y estabilización de procesos, funciones estéticas y de conservación. Son esenciales para la vida humana y operan a tan gran escala y de manera tan intrincada y poco explorada, que la mayoría no pueden ser sustituidos por la tecnología; los impactos cada vez mayores de las actividades humanas sobre los sistemas naturales impiden que esos servicios ambientales se sigan dando (Daily, 1999).

La degradación de los ecosistemas se debe a que no se han valorado los servicios ambientales que ofrecen: se transforman o muchas veces se destruyen con el propósito de obtener beneficios inmediatos. Los servicios que proporcionan los ecosistemas costeros y oceánicos se afectarán por el CC con repercusiones para la vida social y económica de las poblaciones ribereñas en lo inmediato, y de la población en general a mediano o largo plazo. Algunos de los impactos a ecosistemas costeros (lagos, lagunas, manglares, petenes, arrecifes, etc.) afectarán la biodiversidad, las principales pesquerías y la actividad acuacultural.

Los servicios ecosistémicos que proporcionan los humedales son diversos, uno muy importante es el de mantener una gran biodiversidad (en tres niveles: especies, genético y ecosistemas), filtran contaminantes y estabilizan las condiciones climáticas locales. Los humedales reportan beneficios económicos enormes, entre muchos otros está el hecho de mantener los recursos pesqueros, más de dos tercios de las capturas mundiales de peces están vinculadas a la salud de las zonas de humedales (Conanp. www.conap.gob.mx. En línea, consultado 15 enero, 2009).

Son hábitat de estadios juveniles de muchos peces pelágicos y litorales, moluscos, crustáceos, equinodermos, anélidos, cuyo hábitat en estadios adultos son las praderas de fanerógamas, marismas y lagunas costeras, arrecifes coralinos u otros (aproximadamente 70% de los organismos capturados en el mar, realizan parte de su ciclo de vida en una zona de manglar o laguna costera). Poseen una productividad primaria muy alta que mantiene una compleja red trófica en zonas de alimentación, crecimiento y protección de reptiles, peces, crustáceos, moluscos, etc. (MacNae, 1968; Flores-Verdugo, 2001).

En las lagunas costeras muchas especies comerciales pasan su etapa juvenil o preadulta y después migran hacia el mar para reproducirse (como la lisa), a diferencia del ostión que pasa todo su ciclo de vida en ellas. Llevan a cabo diversas funciones como alimentación, tránsito, reproducción, refugio, crianza, protección, etc.³

México cuenta con más de 133 lagunas costeras; en las del Golfo de México la mayor actividad pesquera es la ostrícola (incluyendo su cultivo) y en el Pacífico el recurso más importante es la pesca y el cultivo de camarón. Las actividades acuícolas en las lagunas desde hace varios decenios, se han enfocado al cultivo de especies de alto valor comercial como el camarón (FAO, 1994). En nuestro país existen pocos trabajos sobre el impacto de dicho cultivo sobre los ecosistemas costeros y marinos. El aumento del nivel del mar afectará estos sistemas en los balances de entradas y salidas de agua, salinidad, temperatura, pH, etc. Los cambios en las condiciones fisicoquímicas afectará a las especies, muchas de interés pesquero, en su dominancia, abundancia y distribución.

Los ecosistemas de manglar son muy importantes para la actividad pesquera y acuícola por ser lugares de crianza, alimentación y protección de muchas especies. El ciclo de vida de diversas especies de alto valor comercial están ligados a los manglares: moluscos, crustáceos y peces, como el ostión, camarón, serránidos (meros), lutjánidos (pargos) y carángidos (jureles). Se estima que dos terceras partes de las poblaciones de peces en el mundo y entre 80 y 90 por ciento de las pesquerías del Golfo de México dependen del manglar en uno o más partes de sus ciclos de vida, por lo que su destrucción incide en la disminución de la pesca (Sáenz, 2000). Tiene un valor directo para las poblaciones de pescadores artesanales que de-

penden de este ecosistema, que por años les ha brindado su sustento familiar y es fuente de SA⁴.

Por cada hectárea de manglar destruido, se pierden al año 757 kilogramos de camarón, además de otras especies de importancia comercial⁵. En la Laguna de Términos en Campeche, una tasa de deforestación de manglar de 0.4% ocasiona una pérdida de 14.4 t métricas de camarón con un valor aproximado de 140 mil dólares; esto sin contar la deforestación causada por el cultivo de camarón en la zona, por lo que se piensa que esta cifra puede ser mayor. Cabe señalar que en el mismo periodo de análisis (1980-1990) no se tenía la presión de la industria del cultivo de camarón, que se incrementó en la siguiente década.

Los daños que han sufrido estos ecosistemas se deben principalmente a la acción antropogénica más que a la acción de fenómenos climáticos como El Niño, huracanes, ciclones, etc. Los que puedan surgir por efecto del CC son inciertos, pueden traer inestabilidad al sistema y aumentar su vulnerabilidad (Yáñez *et al.*, 1998). El incremento del nivel del mar se ha calculado entre 10 y 90 cm, esto puede dañar los manglares y pantanos que mantienen las poblaciones de peces y el abasto de semillas para la acuicultura y puede provocar la salinización del agua subterránea, que dañaría la pesca de agua dulce y la acuicultura.

Los sistemas arrecifales de coral son áreas de alimentación de diversos organismos y constituyen el hábitat permanente o tempo-

³ <http://www.ejournal.unam.mx/cns/no03/CNSE0313.pdf>

⁴ Gervacio-Jiménez, H. y B. Castillo-Elías. Aprovechamiento de bosques de mangle a través de unidades de manejo sustentable como recurso para el desarrollo económico local y su importancia en la educación ambiental. <http://www.sicbasa.com/tuto/AMECIDER2006/PARTE%208/142%20Herlinda%20Gervacio%20Jimenez%20et%20al.pdf>

⁵ http://portal.semarnat.gob.mx/estados/veracruz/noticias/Pages/manglares_incubadoras.aspx

ral (como los estadios juveniles) de muchas especies de peces. En el Caribe 10% de los 62 arrecifes de coral se encuentran bajo amenaza debido al CC. Gran parte de ellos se localizan en países pobres, donde los impactos a los recursos naturales traen fuertes pérdidas económicas para la población, donde la pesca es su única fuente de ingresos⁶. En estos ecosistemas el CC tendría importantes efectos negativos sobre las pesquerías, la diversidad biológica y el turismo. El PNUMA⁷ estima que el valor anual de los arrecifes de coral se encuentra entre US\$100 000 y 600 000 por km². El valor de los arrecifes de coral se estima en 29.3 billones de dólares en todo el mundo⁸.

Los pastos marinos son hábitats valiosos a los que no se les da mucha importancia, aunque existen grandes extensiones de pastos en todos los continentes, éstas han disminuido o han sido totalmente destruidas. La UNEP (United Nations Environment Programme) no señala al CC global como un factor en la pérdida del lecho de los pastos marinos; las razones para la destrucción de los pastos parecen ser más localizadas, como la contaminación del agua. Algunos de los daños directos a

los lechos de pastos marinos son el tránsito de botes, los terrenos ganados al mar, infraestructura en zona costera, actividades de dragado y relleno y prácticas pesqueras destructivas.

Poco se sabe sobre la importancia de los pastos marinos en el mantenimiento de los recursos, de la productividad y de la biodiversidad regional y global, debido a que se menosprecia su importancia y su distribución no está bien documentada; por tal razón estos ecosistemas no se incorporan de manera específica a planes de manejo costero, y poco se ha investigado en regiones como el Caribe, Océano Índico, sureste de Asia y el Pacífico, justo donde las comunidades costeras tienen una alta dependencia cultural y económica sobre los recursos, incluyendo los pastos marinos. Se deben percibir los ecosistemas de pastos marinos al mismo nivel que los arrecifes de coral y manglares, se deben elaborar mapas, realizar estimaciones económicas y ecológicas por su pérdida, estudiar los impactos provocados por el hombre, realizar estudios regulares de su estatus, y elaborar un plan de acción global para revertir la disminución de estos ecosistemas⁹.

⁶ <http://www.ambiental.net/noticias/biodiversidad/CoralesManglaresCaribeAmenazados.htm> (1 of 2)31/07/2007 03:23:54 p.m.

⁷ La Amenaza del CC para la pesca y la acuicultura. Domingo, 24 de junio de 2007. World Fish Center. Policy Brief.

http://agricultura.vicar.es/cdigital/html/portal/com/bin/contenidos/agriculturaMA/actualidad/documentos/cambio_climatico_aquahoy/1201602936993_cambio_climatico_aquahoy.pdf

⁸ Conservation International/The Ocean Foundation/ICRI/NOAA/World Resources Institute. Economic Values of Coral Reefs, Mangroves, and Seagrasses. A Global Compilation 2008. http://www.conservation.org/Event%20Documents/Economic%20values%20of%20coral%20reefs%20mangroves%20seagrass_a%20global%20compilation.pdf

⁹ World Atlas of Seagrasses. <http://www.unep-wcmc.org/marine/seagrassatlas/introduction.htm>

IMPACTOS DEL CC Y FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS, MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN EN ZONA COSTERA Y PESQUERÍAS

PESCA Y ACUACULTURA

La pesca enfrenta diversos problemas de sustentabilidad y en su manejo se ignora la variabilidad ambiental (Lluch-Cota, 2005). La vulnerabilidad de la pesca no se puede evaluar, pues no existen escenarios formales a escala regional para los mares mexicanos, derivados por ejemplo de la modelación; esto es importante ya que existe gran incertidumbre respecto a los impactos más probables a esta escala.

La modelación pesquera debe considerar al ecosistema como objeto de estudio en tiempo y espacio e incorporar los efectos ambientales. Desarrollar conocimiento mínimo sobre los efectos ecológicos de la variabilidad ambiental, tanto la natural como la asociada al CC.

Se deben aprovechar los recursos potenciales, aumentar el valor de la producción y el acceso a mejores mercados mediante el procesamiento y la certificación de los productos. Instrumentar esquemas de monitoreo compatibles con sistemas globales, que alimenten bases de datos de variables físicas y biológicas de los mares mexicanos en tiempo real y de libre acceso. El manejo tradicional de los recursos debe evolucionar hacia un esquema de manejo adaptativo que pueda responder a los cambios con rapidez, lo que implica cambios administrativos y legales, y la participación de la autoridad, usuarios e investigadores.

La FAO¹⁰ señala que algunos de los impactos del CC afectará la intensidad y la frecuencia de las corrientes marinas, que a su paso limpian zonas de la plataforma continental en 75% de las principales zonas pesqueras del mundo. Los océanos de regiones tropicales y latitudes medias serán menos productivos, muchos peces no tolerarán el aumento rápido de temperatura y cambiarán sus pautas de distribución, dichos cambios serán más fuertes y acelerados para aquellas poblaciones que se encuentran en los márgenes de su hábitat. Se modificará el reloj biológico de algunas especies, especialmente las de ciclo corto; el plancton florecerá antes, lo que desfazará el encuentro entre las etapas iniciales de vida de los peces y sus presas, con la consiguiente disminución de las poblaciones.

Las comunidades de pescadores en algunas regiones se enfrentarán a mayores incertidumbres al reducirse la disponibilidad, el acceso, la estabilidad y el uso de alimentos y suministros de origen acuático, así como de las oportunidades de trabajo. La mayoría de los pescadores de pequeña escala o ribereños están en los países en desarrollo, si se modifica la distribución de los peces, será difícil para ellos seguirlos con sus embarcaciones hacia las nuevas áreas de pesca.

Los animales acuáticos están expuestos a enfermedades relacionadas con el clima, ya

¹⁰ "Mitigación del CC y adaptación en la agricultura, la silvicultura y la pesca" y el comunicado de prensa de 2008

que sus ecosistemas son muy frágiles y el agua es un medio propicio para la propagación de enfermedades; lo que tendría repercusiones en la inocuidad de los alimentos, por lo que se deben fortalecer los sistemas de salud animal y vegetal.

Propone estrategias con un enfoque ecosistémico integral, para entender y anticipar los cambios ecológicos, evaluar las consecuencias y elaborar respuestas apropiadas de gestión. En este enfoque serán decisivos el estudio del fenómeno del CC y sus repercusiones en la actividad pesquera.

La pesca y la acuicultura deben limitar en lo posible las emisiones de bióxido de carbono, para que los ecosistemas acuáticos tengan mayor capacidad de respuesta y adaptación. Se deben eliminar las flotas y las prácticas pesqueras ineficientes, para disminuir el consumo de combustibles. La acuicultura que tiene especial importancia en regiones tropicales y subtropicales de América Latina, debe aumentar la eficiencia en los cultivos para disminuir el uso de agua y energía, reducir las pérdidas postcosecha y aumentar el reciclado de desechos.

Para apoyar las políticas y programas de adaptación y mitigación es necesario estimar los niveles de producción en el futuro a escala global y regional, mediante predicciones probabilísticas del CC a mediano y largo plazo, en un contexto de incertidumbre ecológica y de manejo. Se requieren predicciones detalladas sobre sistemas pesqueros y acuícolas, para determinar consecuencias adicionales netas positivas o negativas, para recursos y regiones vulnerables.

Se deben redefinir instrumentos adaptativos en el sector pesquero y acuícola, ex profeso para guiar a los tomadores de decisiones en

condiciones de incertidumbre, y ligarlas con los sectores más relevantes. Los principales aspectos de incertidumbre deben contemplar: 1) las respuestas y adaptación de los sistemas de producción marina y dulceacuícola al cambio gradual del clima, incluyendo los umbrales críticos y los puntos de no retorno, 2) las interacciones sinérgicas entre el CC y otras tensiones como el uso del agua, eutrofización, pesca, agricultura, energía alternativa y 3) la habilidad y resiliencia de los sistemas de producción acuática y la forma en que las comunidades humanas pueden enfrentar y adaptarse al estrés múltiple. Cabe señalar que la pesca y acuicultura son a menudo una actividad menor y políticamente débil, por lo que puede ser particularmente vulnerable en condiciones de competencia y conflictos.

El WorldFish Center (2007) señala que los eventos extremos, como ciclones, tormentas asociadas e inundaciones, pueden impactar fuertemente las pesquerías, y particularmente la acuicultura, por daño o pérdida de organismos en existencia, servicios públicos e infraestructura. El CC puede afectar las pesquerías y la acuicultura directamente, influenciando las poblaciones de peces y el abasto global de pescado para consumo, o indirectamente influenciando los precios del pescado o el costo de los bienes y servicios que requieren los pescadores y acuicultores. Es una necesidad urgente determinar las áreas en las que el CC con mayor probabilidad puede reducir las opciones de vida para los pescadores y que por tanto exista una mayor necesidad de inversión en empresas alternativas rurales o urbanas.

Como medidas de adaptación señala que con las tecnologías y los sistemas de cultivo adecuados, se pueden utilizar para cultivo de peces aquellas áreas inundadas y salinas que

ya no son adecuadas para la agricultura. Se deben desarrollar estrategias en áreas de alto riesgo, que incluyan el seguimiento y valoración de riesgos y promover el cultivo de especies y técnicas que maximicen la producción y el beneficio.

Arreguín-Sánchez *et al.* (2008) analizan los efectos de huracanes (Gilberto, Opal y Roxana) que removieron grandes cantidades de material del lecho marino, e impactaron áreas de crianza y pesqueras de camarón rosado, lo que disminuyó su hábitat; la modificación de hábitats críticos impacta el reclutamiento; el camarón tiene una relación inversa con la temperatura y directa con la salinidad. La disminución en la tasa de reclutamiento a largo plazo está fuertemente asociada con la disminución de productividad primaria en el ecosistema. Por ser una especie de vida corta, las fallas en el reclutamiento originan poblaciones más pequeñas y por tanto una menor producción.

El incremento en el nivel del mar tiene un impacto en el reclutamiento, facilitando el acceso a áreas de crianza, atribuibles a cambios estacionales en procesos de flujo y reflujo; para los primeros estadios juveniles el nivel del mar también es relevante, a medida que se transforman en bentónicos, están fuertemente influenciados por las fuerzas de marea, y no pueden ser retenidos en las áreas de crianza. El colapso de la pesquería de camarón rosado está fuertemente relacionado con procesos a gran escala asociados con anomalías en la temperatura en el Atlántico norte, pero también con riesgos naturales o antropogénicos, que impactan a corto plazo las poblaciones y la pesquería. Un aspecto importante que plantean los autores como medida de mitigación es la restauración del hábitat que podría

impactar positivamente la recuperación de la población por el incremento del reclutamiento.

Páez-Osuna (2008) señala que la temperatura superficial del mar afecta la abundancia del sargazo gigante (*M. pyrifera*) (importante para la producción de alginatos) del que dependen muchas especies para su subsistencia; su baja tolerancia a las variaciones de temperatura se hicieron evidentes durante El Niño 1982-1983 y 1997-1998. El CC puede expandir hacia el norte la región de mayor producción de camarón; suponiendo que las áreas de crianza no se afecten negativamente por factores como cambios del nivel del agua. La variación estacional de la salinidad puede incrementarse fuertemente en algunas áreas por la elevación del nivel del mar, esto podría afectar especies costeras como el camarón, con un intervalo de tolerancia muy estrecho a los cambios de salinidad, en parte o en la totalidad de su ciclo de vida.

El delta del Usumacinta se podría reducir por la elevación del nivel del mar, con la probable eliminación de organismos, como los peces cíclidos, y la disminución en biomasa de especies que dependen en parte de su ciclo de vida de un hábitat de agua dulce. Por otro lado el calentamiento superficial del agua ha estimulado el brote de parásitos como *Perkinsus marinus* que afecta al ostión (*Crassostrea virginica*).

ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS Y ALIMENTACIÓN

FAO¹⁰ analiza diversos impactos y medidas de adaptación y mitigación; señala que las personas de bajos recursos de zonas rurales y urbanas serán los más afectados, ya que dependen

de actividades susceptibles al clima y por su poca capacidad de adaptación. Muchos países en desarrollo son muy vulnerables porque dependen de actividades como la agricultura y la pesca que son sensibles al clima, tienen ingresos per cápita bajos, instituciones débiles y un acceso limitado a la tecnología y a los mercados.

El aumento en el nivel del mar puede obligar a numerosas comunidades de las costas y deltas de los ríos en los países en desarrollo a trasladarse hacia zonas más altas; este desplazamiento propiciaría la competencia por el acceso de las tierras con las comunidades establecidas. Las comunidades indígenas son particularmente vulnerables, porque los gobiernos no reconocen la legitimidad de sus derechos a la tierra, muchos pueblos indígenas ocupan territorios vulnerables al CC.

El cambio gradual en temperaturas y régimen de lluvias, y un aumento en la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos representa una amenaza para la producción de alimentos y también para el acceso a recursos alimentarios. La pérdida irreversible de biodiversidad tendrá serias consecuencias para la SA mundial. Variedades de peces cuya distribución geográfica es limitada pueden enfrentar el peligro de extinción, como es el caso de la tilapia de gran importancia para la SA, la pérdida de diversidad genética en sus subespecies, muchas de las cuales sólo existen en lagos y ríos africanos, disminuirán las opciones de mejoramiento de la especie en todo el mundo. Conforme el clima se modifica, aumentará el valor de la biodiversidad para la alimentación; se debe mantener, utilizar y aprovechar el potencial de estas reservas de diversidad genética ya que serán la base para afrontar el CC.

Las personas dedicadas a la pesca y las instituciones deben tener acceso a la información sobre CC y cómo la biodiversidad local puede ayudarlos a adaptarse. Los gobiernos deben asegurar a las comunidades rurales el acceso a la biodiversidad, y deben garantizar una distribución justa y equitativa de los beneficios que produzca su uso.

Los enfoques de adaptación más efectivos en países en desarrollo deberán ocuparse de diversos factores como, la tenencia de la tierra, conflictos armados, la inseguridad alimentaria, la emigración en masa, enfermedades como VIH/SIDA; y fortalecer las medidas actuales como, sistemas de alerta temprana, sistemas de detección de lugares críticos frente al CC y gestión de riesgos. Se deben contemplar sistemas alimentarios con capacidad de recuperación, integrales y seguros, que se adapten al CC y a otros factores de presión.

El desarrollo sostenible debe ser la base de toda política de adaptación. Se deben promover medios de subsistencia diversos y flexibles, se pueden integrar por ejemplo los sistemas piscícolas y agrícolas para alternarlos con sus actividades de acuerdo a las características de sus tierras y la disponibilidad de agua.

Los gobiernos y las comunidades locales tienen que estar al día en investigación, métodos e instrumentos más recientes en materia de clima, así como en evaluaciones locales de las repercusiones y mecanismos de financiamiento. A escala nacional, es necesario identificar la falta o deficiencia de información y los requerimientos de capacidad instalada, y dirigirlos a instituciones y redes de investigación. A escala internacional se deben integrar redes de trabajo para promover y facilitar el intercambio de información y experiencias a escala regional y global, articulando aspec-

tos pesqueros con aquellos de otros sectores como el manejo del agua, desarrollo comunitario, comercio y SA. Se deben promover más ampliamente fondos de emergencia a través del sector.

Se deben incentivar consensos políticos para ajustar los niveles de captura en las pesquerías, enfocándose en aspectos clave como, ajuste de la capacidad y flexibilidad de la flota e infraestructura. Por otro lado es importante saber quien es o será vulnerable ante los impactos del CC y de la SA; al respecto es importante considerar aspectos de género y equidad.

Se requiere mejorar la articulación entre pesquerías, acuacultura y otros sectores que comparten o compiten por los recursos, pro-

cesos de producción o posición en el mercado, con el propósito de manejar conflictos y asegurar que se mantengan los objetivos de la SA. Así mismo se requiere articular las políticas nacionales de adaptación al CC y los programas, así como los sistemas nacionales de políticas transectoriales como, la SA, la reducción de la pobreza, preparación y respuesta ante emergencias, esquemas de seguridad social, desarrollo rural y políticas comerciales. Los incentivos fiscales se pueden manejar como una opción de mitigación para reducir las emisiones de carbono del sector, mediante el desarrollo de acuerdos sectoriales, y estipular el pago por servicios ambientales.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las actividades pesqueras y acuícolas en México están orientadas a dos objetivos fundamentales, la producción de alimentos y la generación de divisas. Las premisas para el desarrollo de esta actividad se establecen en ordenamientos nacionales y acuerdos internacionales: la seguridad alimentaria, el aprovechamiento de los recursos y el desarrollo sustentable de la actividad, la protección del medio ambiente y la biodiversidad de los recursos acuáticos.

En nuestro país, la principal actividad pesquera es la pesca artesanal que alcanza el mayor volumen de captura a escala nacional y es la que aporta de manera categórica a la SA. Dicha actividad será la más afectada ante el CC por realizarse en la zona costera y por los rezagos históricos tanto sociales como económicos de los pescadores. Las afectaciones de los recursos pesqueros y acuícolas costeros

repercutirán en el sector social y en las actividades económicas que les sirven de sustento.

En la actualidad el manejo de las pesquerías toma la forma de la ganancia en el corto plazo, en términos de beneficio-costos, y aún cuando se enfatice el máximo rendimiento sostenible, se opta por explotar el recurso en el presente, hipotecando el futuro. Las pesquerías comerciales son recursos comunes y se sobreexplotan sin una política adecuada de manejo para su conservación, lo que arriesga los servicios ecosistémicos (Peterson y Lubchenco, 2007), uno de los servicios básicos es la provisión de alimentos para todos los mexicanos.

Se deben definir las causas de la sobreexplotación de los recursos pesqueros para elaborar estrategias para su recuperación, y planear medidas de mitigación y adaptación ante el CC. Castelló *et al.* (2007) señalan que la sobreexplotación de las pesquerías de pequeña

escala de las zonas tropicales, obedece a las políticas que fomentan el intercambio comercial de productos primarios (políticas neoliberales), a fenómenos estructurales, sociales y económicos, además de los biológicos, de tal forma que se precisan cambios profundos en la forma de estudiar, manejar y administrar los recursos pesqueros con métodos propios, con nuevas orientaciones de participación, con un enfoque ecosistémico e integral, que implique la perspectiva de sistemas complejos socioecológicos. En México se sigue un esquema de investigación generalmente desarrollado en los países del norte para pesquerías mono-específicas, que no es aplicable a las pesquerías multi-específicas del trópico.

La participación de pescadores y acuicultores en la administración de los recursos por medio del comanejo, no se ha alcanzado por múltiples razones como son las prácticas antidemocráticas, la falta de recursos, de capacitación y desarrollo de habilidades para la organización y administración entre otras. Para llevar a cabo estrategias de manejo efectivas, se requiere democratizar los procesos de participación en el manejo de las pesquerías, recursos financieros suficientes, profesionistas entrenados y la generación del conocimiento necesario sobre los sistemas ecológicos. El comanejo implica la participación activa de los actores en la planificación y administración de sus pesquerías que los hace corresponsables. Convenientemente administradas en comanejo por comunidades costeras, se pueden crear reservas marinas que sirvan de resguardo y protección para larvas, y les permitan ofrecer servicios de ecoturismo y recreación (Kaufman y Dayton, 1997).

El CC afectará la zona costera en múltiples e imprevisibles maneras, el aumento de nivel

afectará las actividades e infraestructura pesqueras y acuícolas instaladas en las costas; con el aumento de temperatura, los fenómenos de El Niño y La Niña intensificarán sus impactos sobre los ecosistemas y los recursos; los impactos sobre aquellas poblaciones pesqueras cuya distribución exceda los límites nacionales son difíciles de prever a escalas locales.

Los impactos negativos en las pesquerías, afectan ahora y a futuro la actividad acuícola, pues los recursos pesqueros son potencialmente recursos acuaculturales. Considerando que la acuicultura es la alternativa del sector para generar alimentos y empleos, es fundamental prever los posibles efectos del aumento del nivel del mar, como el daño principal de las granjas de camarón, recurso de importancia pesquera y acuícola que genera divisas. Cabe señalar que el objetivo principal de los modelos intensivos de monocultivo es la generación de ganancias/divisas, que no aportan soluciones al problema alimentario que vive el país y que generan costos ambientales que no internalizan.

Para finalizar, se puede decir que el principal problema de la actividad en este momento en México no es el CC, sino el modelo económico neoliberal, que ha agudizado el problema de la sobreexplotación de la mayor parte de las pesquerías y la contaminación de los ecosistemas costeros, motivado más por la lógica de la ganancia que por la de la seguridad alimentaria, creando costos ecológicos que nadie asume. Ha provocado que más de la mitad de la población nacional esté en niveles de pobreza extrema, sin participar de los beneficios obtenidos por la explotación de los principales recursos que se destinan a la exportación, y sin ningún futuro inmediato de mejora, por lo que el principal reto para nosotros

como sociedad será participar activamente y demandar esquemas diferentes para el manejo de los recursos; asegurar el mantenimiento de la estructura y función de los ecosistemas, generar, a través de la investigación interdisciplinaria, el conocimiento requerido para el ma-

nejo de sistemas complejos, en el que la lógica no sea ya más la ganancia para unos pocos, a costa de los ecosistemas y las personas, sino el bienestar de la población, principalmente la más vulnerable entre los que se encuentran los pescadores.

RECOMENDACIONES DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN

Dados los altos niveles de pobreza que hay en México, se hace indispensable el ordenamiento de las actividades pesqueras y acuícolas; impulsar un enfoque ecosistémico en el diagnóstico, planeación y diseño de sus modelos de producción; la elaboración de planes de manejo integrales, cuya estrategia central sea el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural, que incluye a los pescadores. La atención a los problemas históricos de rezago social que vive el sector debe ser una de las tareas prioritarias, ya que éstos se recrudecerían ante las consecuencias del CC, a los que se suma la crisis alimentaria.

Una estrategia de manejo debe ser la diversificación de la pesca, para cubrir de manera prioritaria las necesidades alimentarias de la población (Pikitch *et al.*, 2004 en Castelló *et al.*, 2007), realizar prospecciones para buscar nuevas áreas de pesca y recursos potenciales. La acuicultura también se debe diversificar y reorientar hacia un modelo de policultivos principalmente de especies nativas, desarrollando tecnologías propias con granjas integrales que generan empleos, reciclan materiales y vierten al ambiente escasos desechos. Se deben rescatar los centros acuícolas productores y el trabajo de siembra de crías para mantener el nivel de producción de los

embalses continentales que aportan alimento y generan riqueza a las poblaciones rurales.

Este enfoque permitiría guiar la toma de decisiones para el desarrollo del sector y la elaboración de medidas de adaptación y mitigación frente al CC. La toma de decisiones implica visualizar el rumbo hacia donde se quiere reorientar el desarrollo de las actividades productivas y sus posibles afectaciones. En el manejo de los ecosistemas es muy importante conocer y prever las implicaciones (*trade-offs*) en la toma de cada decisión, ya que con esto se definen diferentes interacciones entre la sociedad y los ecosistemas, en función de la coevolución sociedad-naturaleza (Norgaard, 1994 en Costanza *et al.*, 1997).

Se debe evaluar el grado de aplicación del Código de Conducta para la Pesca Responsable y el Enfoque Precautorio, e implementar medidas y prácticas para orientar la pesca y acuicultura hacia la sustentabilidad. Al mismo tiempo es necesario que las reglamentaciones sean efectivas en su aplicación y cumplimiento.

La investigación pesquera y acuícola debe ser el eje rector para la planeación y elaboración de estrategias enfocadas al análisis de las posibles afectaciones del sector ante el CC y la seguridad alimentaria, con el propósito de

implementar medidas de adaptación y mitigación viables. Se debe asignar mayor presupuesto para investigación y desarrollo tecnológico; ésta debe ser integral, interdisciplinaria y con enfoque ecosistémico, para el manejo de pesquerías multiespecíficas de pequeña escala, en contraste con las mono-específicas que dañan al ecosistema y al recurso objetivo. Las pesquerías se deben concebir como sistemas complejos y tomar en cuenta su resiliencia. *La conservación de las pesquerías sólo es posible a través de una comprensión integrada entre los stocks pesqueros y las sociedades que los explotan* (Castelló *et al.*, 2007).

Para medir y enfrentar los efectos del CC sobre estas actividades se debe diseñar una estrategia planeada (acopiar y evaluar información, y proyectar los estudios que se requieran). Es necesario conocer las especies pesqueras y acuícolas objetivo más importantes de nuestras costas, la composición de especies a lo largo del año y los cambios que se registran a través del tiempo, y analizar el estatus de sus pesquerías en su entorno ambiental y socioeconómico. Se deben generar bases de datos públicas de series de tiempo largas en aspectos climáticos, meteorológicos, pesqueros, acuícolas, ambientales, sociales, económicos, etc.

Se deben valorar y proteger los servicios ecosistémicos de las pesquerías tropicales, y en general de los ecosistemas de interés pesquero y acuícola (arrecifes coralinos, manglares, lagos y lagunas costeras, pastos marinos), por su alta diversidad y por las actividades económicas que sustentan; evaluar su estado de salud para valorar las repercusiones debidas a alteraciones o posible desaparición de estos ecosistemas (*e.g.* el número de personas que podrían resultar afectadas por el dete-

rioro o desaparición de su fuente de empleo basada en actividades pesqueras artesanales y acuícolas en la costa).

En la actualidad las actividades económicas no valoran los servicios ambientales de los cuales se generan, por lo que es muy importante hacerlos debidamente, considerando que con el CC éstos se pueden alterar o perder, quedando en riesgo la propia actividad económica. Otro aspecto fundamental es conocer y reconocer el valor de la biodiversidad, con el fin de conservar, mantener y aprovechar el potencial de las reservas genéticas como un recurso básico para enfrentar el CC.

Es necesario llevar a cabo un plan nacional para disminuir la contaminación de las aguas dulces, estuarinas y marinas, y revertir su deterioro. La actividad pesquera y acuícola debe contribuir eliminando flotas y prácticas pesqueras ineficientes para disminuir el consumo de combustibles, y aumentar la eficiencia en los cultivos para reducir el uso de agua y energía, las pérdidas postcosecha y aumentar el reciclado de desechos.

El diseño de las políticas públicas debe estar dirigido a reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas y sus recursos, en cumplimiento del Artículo 2 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el CC. Deben contemplar la administración integrada de sistemas complejos y el mejoramiento de su resiliencia (Walker *et al.*, 2002). Esto es de gran relevancia ante la incertidumbre de los efectos del CC, pues la forma en la que el ser humano intervenga será determinante en la evolución de dichos sistemas. Su capacidad de reflexión y decisión basada en información científica sobre el desarrollo y salud de los ecosistemas, será un factor de peso en la rapidez y efectividad de su respuesta ante lo imprevisible.

LITERATURA CITADA

- Arcos, D.F., L.A. Cubillos y S.P. Núñez, 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997–98 effects off Chile. *Progress in Oceanography*, 49(1-4): 597-617.
- Arntz, W. E. y J. Tarrazona, 1990. Effects of El Niño 1982-83 on benthos, fish and fisheries off the South American Pacific Coast. *Oceanography Series*, 52: 323-360.
- Arreguín-Sánchez, F., M. Ramírez-Rodríguez, M.J. Zetina-Rejón y V.H. Cruz-Escalona, 2008. Natural hazards, stock depletion and management in the southern Gulf of Mexico pink shrimp fishery. *Am. Fish. So. Symp.*, 64: 419-428.
- Avilés Q. A. y F. Castelló O., 2004. Manual para el cultivo de *Seriola lalandi* (Pisces: Carangidae) en Baja California Sur, México. Instituto Nacional de Pesca. Sagarpa. México, D. F.
- Balvanera P. y H. Cotler, 2007. Acercamiento al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta Ecológica*, 84-85: 8-15.
- Bechtel, T.J., y B.J. Copeland, 1970. Fish species diversity indices as indicators of pollution in Galveston Bay, Texas. *Contributions in Marine Science*, 15: 103-132.
- Binet, D., B. Gobert, y L. Maloueki, 2001. El Niño-like warm events in the Eastern Atlantic (6°N, 20°S) and fish availability from Congo to Angola (1964-1999). *Aquatic Living Resources*, 14(2): 99-113.
- Blanco, J. A., J. C. Narváez-Barandica, y E. A. Vilorio, 2007. ENSO and the rise and fall of a tilapia fishery in northern Colombia. *Fisheries Research*, 88(1-3): 100-108.
- Bograd, S. J., y R. J. Lynn, 2003. Long-term variability in the Southern California Current System. Deep Sea Research Part II. *Topical Studies in Oceanography*, 50(14-16): 2355-2370.
- Calderón-Aguillera, L.E., H. Reyes-Bonilla y J. D. Carriquiry, 2007. El papel de los arrecifes coralinos en el flujo de carbono en el océano: estudio en el Pacífico mexicano. En: B. Hernández-de la Torre y G. Gaxiola-Castro (eds.). Carbono en ecosistemas acuáticos de México. Semarnat/INE. 508 p.
- Castro-Aguirre, J.L., H.S. Espinosa Pérez y J. J. Schmitter-Soto, 1999. Ictiofauna estuarino-lagunar y vicaria de México. Serie Biotecnologías. IPN y Ed. Noriega-Limusa. 711 p.
- Conanp, 2009. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. [www.conap.gob.mx][En línea, consultado 15 enero, 2009]
- Cruz-Torres, M.L. y R.E. Morán-Angulo, 2007. Pesca, medio ambiente y sustentabilidad en Sinaloa. Editorial UAS. FACIMAR, 240 p.
- Cubillos, L. A., y D. F. Arcos, 2002. Recruitment of common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) off central-south Chile in the 1990s and the impact of the 1997-1998 El Niño. *Aquatic Living Resources*, 15(2): 87-94.
- Daily, G. C., 1997. Nature's Services. Societal Dependence on Natural Ecosystems. Island Press. Washington, DC. 392 p.
- Daily, G. C., 1999. Developing a scientific basis for managing earth's life support systems conservation ecology. [online] <http://www.consecol.org/vol3/iss2/art14/>
- De Fontaubert, A.C., D. R. Downes, y R. S. Agardy, 1996. Biodiversity in the Seas. Implementing the Convention on Biological Diversity in Marine and Coastal Habitats. IUCN Environmental Policy and Law Paper No. 32. A marine conservation and development report. 84 p.
- De la Cruz-Agüero, J., 1997. Catálogo de los peces marinos de Baja California Sur. IPN, CICIMAR, Conabio. 346 p.
- De La Lanza-Espino, G. J. J. Salaya-Avila, y E. Vargas, 1994. Manejo y aprovechamiento acuícola de lagunas costeras en América Latina y el Caribe. II Taller Regional sobre Lagunas Costeras. México, DF., 9–12 de febrero 1993. GCP/RLA/102/ITA. FAO/Aquila II.

- Espino-Barr, E., E.G. Cabral-Solís, A. García-Boa, y M. Puente-Gómez, 2004. Especies marinas con valor comercial de la costa de Jalisco, México. Sagrapa-INP, México, 145 p.
- Espino-Barr, E., A. García-Boa, E.G. Cabral-Solís y M. Puente-Gómez, 2008. Pesca artesanal multiespecífica en la costa de Colima, criterios biológicos para su administración. Serie Linderos de la costa 5, IPN, 102 p.
- FAO/ONU, Mitigación del CC y adaptación en la agricultura, la silvicultura y la pesca. <ftp.fao.org/docrep/fao/010/i0142s/i0142s.pdf>
- FAO/ONU, 2008. El CC tendrá un fuerte impacto en la pesca. Comunicado de prensa. 08/75 esp. 10 de julio.
- Fernández-Méndez, I., 2007. Indicadores del desempeño de la pesca en México y propuestas alternativas de políticas de administración. p. 95-283. En: J. B. Santinelli (Coord.) . Estudios e investigaciones. La situación del sector pesquero en México. CEDRSSA/Cámara de Diputados.
- Fischer, W., F. Krupp, W. Schneides, C. Sommer, K.E. Carpenter, y U.H. Niem (eds.), 1995. Guía FAO para la identificación de especies para los fines de la pesca. Pacífico Centro Oriental. Vols. II y III.
- Flores-Verdugo, F., 2001. Procesos ecológicos en los humedales. En: F. Abarca, y J. Herzig (eds.). Manual para el manejo y conservación de los humedales de México. Producción especial bajo colaboración de la Semarnat, US Fish & Wildlife Serv. Arizona Game & fish Dep.
- Godínez-Domínguez, E., J. Rojo-Vázquez, V. Galván-Piña, y B. Aguilar-Palomino, 2000. Changes in the structure of a coastal fish assemblage exploited by a small scale gillnet fishery during an El Niño-La Niña event. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51(6): 773-787.
- Gómez, J. J., 2001. Vulnerabilidad y medio ambiente. Seminario Internacional. Las diferentes expresiones de la vulnerabilidad social en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, 20 y 21 de junio. CEPAL/CELADE/ONU. 36 p.
- Leigh, E.G., 1990. Community diversity and environmental stability: A re-examination. *Tree*, 5(10): 340-344.
- León, C. J. G. y M. Muciño, 1995. Nota informativa sobre la pesquería de abulón en Baja California. CRIP-La Paz. Informe Técnico del Instituto Nacional de la Pesca (documento interno).
- Linton, D. M., y G. F. Warner, 2003. Biological indicators in the Caribbean coastal zone and their role in integrated coastal management. *Ocean & Coastal Management*, 46(3-4): 261-276.
- Lluch-Cota, D., D. Lluch-Belda, S. Lluch-Cota, J. López-Martínez, M. Nervárez-Martínez, G. Ponce-Díaz, G. Salinas-Zavala, A. Vega-Velázquez, J. R. Lara-Lara, G. Hammann, y J. Morales, 1999. Las pesquerías y El Niño. En: Los impactos de El Niño en México. Ed. Magaña, R. V. O. CCA/UNAM y Segob/DGPC. México. 229 p.
- Lluch-Cota, D., 2005. El sector pesquero. p. 327-335 En: J. Martínez, A. Fernández-Bremaunts y P. Osnaya (Comp.). Cambio Climático: una visión desde México. Semarnat/INE.
- Longhurst, A.R., y D. Pauly, 1987. Ecology of tropical oceans. Academic Press, Inc., San Diego, Ca. 407 p.
- MacNae, W., 1968. A general account of the fauna and flora of mangrove swamps and forests in the Indo-West-Pacific region. *Adv. Mar. Biol.*, 6: 73-270.
- Margalef, R., 1977. Ecología. Ediciones Omega, S.A., España, 951 p.
- Mckenna, J. E., y S.B. Saila, 1991. Application of an objective method for detecting changes in fish communities: Samar Sea, Philippines. *Asian fisheries Science*, 4: 201-210.
- Morales-Bojórquez, E., M. A. Cisneros-Mata, M. O. Nevárez-Martínez, y A. Hernández-Herrera, 2001. Review of stock assessment and fishery biology of *Dosidicus gigas* in the Gulf of California, México. *Fisheries Research*, 54(1): 83-94.

- Ñiquen, M., y M. Bouchon, 2004. Impact of El Niño events on pelagic fisheries in Peruvian waters. Deep Sea Research Part II. *Topical Studies in Oceanography*, 51(6-9): 563-574.
- Odum, E.P., 1982. Ecología. Ed. Interamericana 3ª ed. México, 639 p.
- OMM/PNUMA/IPCC, 1997. Resumen para responsables de políticas. Impactos regionales del cambio climático: Evaluación de la vulnerabilidad. 16 p.
- Páez-Osuna, F., 2008. Efectos del Cambio climático para las costas, la pesca y la producción acuícola: una síntesis. Centro de Estudios de Justicia Agraria. V Reunión Nacional de Magistrados de los Tribunales Agrarios. Revista de los Tribunales Agrarios. No. 44. pp. 54-63.
- Penchaszadeh, P.E., y J.J.Salaya, 1985. Estructura y ecología trófica de las comunidades demersales en el Golfo Triste, Venezuela. Cap-12: 571 a 598. In: A. Yáñez-Arancibia, (ed.). Recursos Pesqueros Potenciales de México: La pesca acompañante del camarón. Progr. Inv. de Alimentos, ICMYL. INP. UNAM, México, DF. 748p.
- Pérez, J.F., y J.J. Mendoza, 1998. Marine Fisheries, Genetic Effects and Biodiversity. *Naga, The ICLARM Quarterly*, Oct-Dec.: 7-14.
- Pitcher, T.J., y P.J.B. Hart, 1982. Fisheries ecology. Croom Helm and Am. Ed., 414 p.
- Rebstock, G. A., 2003. Long-term change and stability in the California current System: lessons from CALCOFI and other long-term data sets. Deep Sea Research Part II. *Topical Studies in Oceanography*, 50(14-16): 2583-2594.
- Rojas-Carrillo P. M., y I. Fernández-Méndez, 2006. La pesca en aguas continentales. p. 49-67. En: P. Guzmán-Amaya, y D. F. Fuentes-Castellanos (Coord.). Pesca, Acuicultura e Investigación en México. CEDRSSA/Comisión de Pesca. Cámara de Diputados.
- Rojo-Vázquez, J. A., B. Aguilar-Palomino, V. H. Galván-Piña, E. Godínez-Domínguez, S. Hernández-Vázquez, S. Ruíz-Ramírez, y G. Lucano-Ramírez, 2001. Ictiofauna de la pesquería ribereña en Bahía de Navidad, Jalisco, México, asociada al evento El Niño 1997-1998. *Rev. Biol. Trop.*, 49(3-4): 915-929.
- Sagarpa, 2003. Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2002. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, 266 p.
- Sagarpa, 2005. Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2005. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, 220 p.
- Sagarpa, 2007 (en prensa). Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2006. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca.
- Sagarpa/INP, 2000. Estado de salud de la acuicultura. DGIA. Noviembre.
- Sagarpa/INP, 2001. Sustentabilidad, y pesca responsable en México: Evaluación y manejo 1999-2000. 1111 p.
- Sagarpa/INP, 2004. Carta Nacional Pesquera. D. O. F. 15 marzo.
- Sagarpa/INP, 2006. Carta Nacional Pesquera. D. O. F. 25 agosto.
- Sagarpa/INP, 2006. Sustentabilidad, y pesca responsable en México: Evaluación y manejo. 543 p.
- Semarnap, 1999. Norma Oficial Mexicana de Emergencia Nom-EM-001-REC/NAT-1999. Que establece las especificaciones para la preservación, conservación y restauración del manglar. DOF 16 de agosto. 1ª. Sección. pp. 33-39.
- Semarnap, 2000. Anuario Estadístico de Pesca 1999. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 271 p.
- Semarnap/DGAP, 2000. Federaciones y/o uniones regionales de sociedades cooperativas de la industria pesquera y otras formas de organización social que operan a nivel nacional. Documento interno.
- Semarnap/INP, 1999. Sustentabilidad, y pesca responsable en México: Evaluación y manejo 1997-1998.
- Semarnap/INE, 2000. Sustentabilidad, y pesca responsable en México: Evaluación y manejo 1999-2000.

- Sáenz, A., 2000. Servicios ambientales de los manglares: ¿Qué perdemos cuando los transformamos? Greenpeace. Expedientes ambientales. Manglares bosques costeros. 53 p.
- Sánchez-Velasco, L., J.E. Valdez-Holguín, B. Shirasago, M.A. Cisneros, y A. Zarate, 2002. Changes in the Spawning Environment of *Sardinops caeruleus* in the Gulf of California during El Niño 1997–1998. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(2):207-217.
- Ulloa-Ramírez, P.A., J.L. Patiño-Valencia, M.L. Guevara-Rascado, S. Hernández-Ventura, R. Sánchez-Regalado, y A. Pérez-Velázquez, 2008. Peces marinos de valor comercial del estado de Nayarit, México. INP, CRIP Bahía Banderas, Nayarit, 91p.
- Vega-Velázquez, A., 2003. Reproductive strategies of the spiny lobster *Panulirus interruptus* related to the marine environmental variability off central Baja California, México: management implications. *Fish. Res.*, 65(1-3): 123-135.
- Villamar, C. A., D. Aburto-Perdomo, J. I. Fernández-Méndez, A. Vásquez, y P. Rojas-Carrillo, 2007. Políticas para el Fomento de la Producción Pesquera y Acuícola. p. 351-382. En: J. L. Calva (Coord.). Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesquero. Agenda para el Desarrollo. UNAM. Miguel Angel Porrúa. Cámara de Diputados.
- Waluda, C.M., C. Yamashiro, y P.G. Rodhouse, 2006. Influence of the ENSO cycle on the light-fishery for *Dosidicus gigas* in the Peru Current: An analysis of remotely sensed data. *Fisheries Research*, 79(1-2): 56-63.
- Walsh, J. J., T. E. Whitley, W. E. Esaias, R. L. Smith, S. A. Huntsman, H. Santander, y B. R. de Mendiola, 1980. The spawning habitat of the Peruvian anchovy, *Engraulis ringens*. Deep Sea Research Part A. *Oceanographic Research Papers*, 27(1):1-27.
- Watson, R.T., M. C. Zinyowera, R. H. Moss, y D. J. Dokken, 1997. Resumen para responsables de políticas. Impactos regionales del CC: evaluación de la vulnerabilidad. Informe especial del Grupo de trabajo II del IPCC. 16 p.
- Wolff, M., M. Taylor, J. Mendo, y C. Yamashiro, 2007. A catch forecast model for the Peruvian scallop (*Argopecten purpuratus*) based on estimators of spawning stock and settlement rate. *Ecological Modelling*, 209(2-4): 333-341.
- WorldFish Center, 2007. The threat to fisheries and aquaculture from climate change. Policy Brief. 8 p. <http://www.rsis-ntsasia.org/resources/publications/policy-briefs/environment/ClimateChange.pdf>
- WorldFish Center, 2007. Fisheries and aquaculture can provide solutions to cope with climate change. 4 p. http://www.worldfishcenter.org/resource_centre/CC-ThreatToFisheries1701.pdf
- Yáñez, E., M. A. Barbieri, C. Silva, K. Nieto, y F. Espíndola, 2001. Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile. *Progress In Oceanography*, 49(1-4): 581-596.

ANEXO 1

Nombre común	Nombre científico	Familia	Lugar de registro	Distribución geográfica
Crustáceos				
Langosta	<i>Panulirus interruptus</i>	Palinuridae	S	Ambas costas de BC
	<i>Panulirus inflatus</i>		S, N	BCS, GC a Oaxaca
	<i>Panulirus gracilis</i>		S, N	BCS, GC a Perú
	<i>Panulirus argus</i>		Y, QR	GM y Caribe
Camarón	<i>Farfantepenaeus californiensis</i>	Penaeidae	S, N	California a Perú
	<i>Litopenaeus stylirostris</i>		S, N	Costa occidental de BC, GC a Perú
	<i>Litopenaeus vannamei</i>		S, N	Sinaloa a Perú
	<i>Farfantepenaeus brasiliensis</i>		T, Y, QR	Caribe a Brasil
	<i>Farfantepenaeus aztecus</i> , <i>F. duorarum</i> , <i>Litopenaeus setiferus</i>		T, Y, QR	Florida y GM
	<i>Sicyonia brevirostris</i>	Sicyonidae	T, Y, QR	Florida y GM
Jaiba	<i>Callinectes arcuatus</i>	Portunidae	S, N	BC, GC a Ecuador
	<i>Callinectes belicosus</i>		S, N	BC, GC a Oaxaca
	<i>Callinectes toxotes</i>		S, N	S a Perú
	<i>Callinectes sapidus</i>		T, Y, QR	GM y Caribe
Elasmobranquios				
Cazón	<i>Rhizoprionodon longurio</i>	Carcharhinidae	S, N	California a Perú
	<i>Rhizoprionodon terraenovae</i>		T, Y, QR	Atlántico occidental desde Terranova a Brasil
	<i>Carcharhinus falciformis</i>		T, Y, QR	O, Carolina a Brasil, GM y Caribe
	<i>Sphyrna tiburo</i>	Sphyrnidae	T, Y, QR	Florida, GM a Brasil
	<i>Mustelus norrisi</i>	Triakidae	T, Y, QR	GM
Tiburón	<i>Alopias pelagicus</i>	Alopiidae	S, N	Boca del GC
	<i>Carcharhinus limbatus</i> , <i>C. leucas</i>	Carcharhinidae	S, N	California a Perú

S = Sinaloa, N = Nayarit, T = Tabasco, Y = Yucatán, QR = Quintana Roo, BC = Baja California, BCS = Baja California Sur, GM = Golfo de México, GC = Golfo de California

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS

mexicanas ante el cambio climático

Nombre común	Nombre científico	Familia	Lugar de registro	Distribución geográfica
	<i>Carcharhinus falciformis</i>		S, N	O, BC Sur a Perú
	<i>Carcharhinus leucas</i> , <i>C. limbatus</i>		T, Y, QR	California a Perú
	<i>Carcharhinus brevipinna</i>		T, Y, QR	Florida a Brasil y GM
	<i>Carcharhinus obscurus</i>		T, Y, QR	Florida a Centroamérica y GM
	<i>Carcharhinus falciformis</i>		T, Y, QR	O, Carolina a Brasil, GM y Caribe
	<i>Sphyrna zygaena</i>	Sphyrnidae	S, N	Costa de BC y GC
	<i>Sphyrna lewini</i>		S, N	Costa de California a Perú
raya y similares	<i>Dasyatis brevis</i>	Dasyatidae	S, N	California a Ecuador
	<i>Dasyatis longus</i>		S, N	Sinaloa a Colombia
	<i>Gymnura marmorata</i>	Gymnuridae	S, N	Costa de California a Perú
	<i>Gymnura crebipunctata</i>		S, N	S y N
	<i>Gymnura micrura</i>		T, Y, QR	Atlántico, de Maryland a Brasil
	<i>Aetobatus marinari</i>	Myliobatidae	T, Y, QR	Atlántico, de Carolina a Brasil
	<i>Raja texana</i>	Rajidae	T, Y, QR	GM y Caribe
	<i>Zapterix exasperata</i>	Rhinobatidae	S, N	Costa de California a Perú
	<i>Rhinoptera steindachneri</i>		S, N	GC
Equinodermo				
pepino de mar	<i>Holothuria floridana</i>	Holothuroidea	Y, QR	GM y Caribe
	<i>Isostichopus badionotus</i> , <i>Astichopus multifidus</i>	Stichopodidae	Y, QR	GM y Caribe
Moluscos				
almeja arca auriculada	<i>Anadara notabilis</i>	Arcidae	T, QR	
almeja pata de mula	<i>Anadara turbeculosa</i>		S, N	BC Sur, GC a Ecuador
almeja catarina	<i>Argopecten ventricosus</i>	Pectinidae	S, N	California a Perú
caracol panocha	<i>Astraea undosa</i>	Turbinidae	S	Costa occidental de BC
almeja callo de hacha	<i>Atrina tuberculosa</i>	Pinnidae	S, N	GC a Perú
almeja tigre	<i>Codakia orbicularis</i>	Lucinidae	T, QR	
almeja chocolata	<i>Megapitaria aurantiaca</i>	Veneridae	S, N	GC a Perú
almeja del sur	<i>Mercenaria campechiensis</i>		T, QR	
ostión	<i>Crassostrea corteziensis</i>	Ostreidae	S, N	GC a Ecuador

S = Sinaloa, N = Nayarit, T = Tabasco, Y = Yucatán, QR = Quintana Roo, BC = Baja California, BCS = Baja California Sur, GM = Golfo de México, GC = Golfo de California

Nombre común	Nombre científico	Familia	Lugar de registro	Distribución geográfica
	<i>Crassostrea rhizophorae</i>		T, QR	
	<i>Crassostrea virginica</i>		T, QR	Carolina a todo el GM
	<i>Striostrea prismatica</i>		S, N	Boca del GC a Ecuador
calamar	<i>Dosidicus gigas</i>	Ommastrephidae	S, N	O, California a Perú
	<i>Loligo pealei</i>	Loliginidae	T, Y, QR	GM y Caribe
caracol chino rosa	<i>Hexaplex spp.</i>	Muricidae	S	Boca del GC a Centroamérica
caracol	<i>Melongena melongena</i>	Melongenidae	T, Y, QR	Florida a Centroamérica
caracol burro	<i>Melongena patula</i>		S	GC a Ecuador
caracol burro	<i>Strombus galeatus</i>	Strombidae	S	GC a Ecuador
caracol	<i>Strombus gigas</i>		T, Y, QR	T, QR y Caribe
	<i>Octopus bimaculatus</i>	Octopodidae	S, N	California a N
	<i>Octopus hubbsorum</i>		S, N	GC a Oaxaca
pulpo	<i>Octopus maya</i>		T, Y	GM
	<i>Octopus vulgaris</i>		T, Y	Cosmopolita en mares templados y tropicales
almeja gallito	<i>Rangia cuneata</i>	Mactridae	T, QR	
Peces				
bagre	<i>Arius seemanii</i>	Ariidae	S, N	Sinaloa a Perú
	<i>Ariopsis felis</i>		T, Y, QR	Georgia, GM a Yucatán
	<i>Bagre pinnimaculatus</i>		S, N	Golfo de California a Ecuador
bandera	<i>Bagre panamensis</i>		S, N	Sinaloa y Sur de BC a Perú
	<i>Bagre marinus</i>		T, Y, QR	Florida a Brasil
lenguado	<i>Bothus robinsi</i>	Bothidae	T, QR	Carolina a Brasil, GM y Caribe
esmedregal	<i>Seriola zonata</i>	Carangidae	T, Y, QR	Florida a Brasil y GM
	<i>Caranx caninus</i>		S, N	California a Ecuador
jurel	<i>Caranx hippos</i>		T, Y, QR	Carolina a Brasil, GM y Caribe
medregal	<i>Seriola rivoliana</i>		N	California a Perú
	<i>Trachinotus paitensis</i>		S, N	BC a Perú
pámpano	<i>Trachinotus rhodopus</i>		S, N	Golfo de California a Perú
	<i>Trachinotus kennedyi</i>		S, N	Sinaloa a Ecuador

S = Sinaloa, N = Nayarit, T = Tabasco, Y = Yucatán, QR = Quintana Roo, BC = Baja California, BCS = Baja California Sur, GM = Golfo de México, GC = Golfo de California

Nombre común	Nombre científico	Familia	Lugar de registro	Distribución geográfica
	<i>Trachinotus carolinus</i> , <i>Trachinotus goodei</i>		T, Y, QR	Carolina a Brasil, GM y Caribe
robalo	<i>Centropomus viridis</i>	Centropomidae	S, N	BC Sur, Sinaloa a Perú
	<i>Centropomus armatus</i>		S, N	N a Ecuador
	<i>Centropomus robalito</i>		S, N	Sinaloa a Colombia
	<i>Centropomus nigrescens</i>		S, N	Sur de BC y Sinaloa a Colombia
	<i>Centropomus medius</i>		S, N	Sur de BC y Sinaloa a Ecuador
	<i>Centropomus undecimalis</i>		T, Y, QR	Sur de Florida, Veracruz a Brasil y Caribe
sardina	<i>Opisthonema libertate</i>	Clupeidae	S, N	BC Sur, GC a Perú
	<i>Sardinops caeruleus</i>		S, N	Costa occidental de BC y GC
	<i>Brevoortia gunteri</i> , <i>Brevoortia patronus</i>		Y, QR	Florida a Campeche
	<i>Opisthonema oglinum</i>		Y, QR	Florida, GM a Brasil
	<i>Cetengraulis mysticetus</i>	Engraulidae	S, N	BC Sur, GC a Ecuador
anchoveta	<i>Anchovia spp.</i>		T, Y, QR	O tropical
mojarra	<i>Diapterus peruvianus</i> , <i>Eucinostomus gracilis</i> , <i>Gerres cinereus</i>	Gerreidae	S, N	Boca del GC a Perú
	<i>Eucinostomus argenteus</i>		S, N	California a Perú
	<i>Diapterus rhombeus</i>		T, Y, QR	Campeche, Y y Caribe
	<i>Diapterus auratus</i> , <i>Eucinostomus spp.</i> , <i>Gerres cinereus</i>		T, Y, QR	GM y Caribe
ronco	<i>Microlepidotus brevipinnis</i>	Haemulidae	S, N	BC a Chiapas
	<i>Haemulon flaviguttatum</i>		S, N	BC a Ecuador
	<i>Pomadasys panamensis</i>		S, N	GC a Perú
besugo	<i>Rhomboplites aurorubens</i>	Lutjanidae	T, Y	Carolina a Brasil, GM y Caribe
guachinango	<i>Lutjanus campechanus</i>		T, Y, QR	Florida y GM
huachinango	<i>Lutjanus peru</i>		S, N	BCS a Perú
pargos	<i>Hoplopagrus guntheri</i> , <i>Lutjanus colorado</i>		S, N	BC a Panamá
	<i>Lutjanus argentiventris</i>		S, N	BC a Perú
	<i>Lutjanus guttatus</i>		S, N	Golfo de California a Ecuador

S = Sinaloa, N = Nayarit, T = Tabasco, Y = Yucatán, QR = Quintana Roo, BC = Baja California, BCS = Baja California Sur, GM = Golfo de México, GC = Golfo de California

Nombre común	Nombre científico	Familia	Lugar de registro	Distribución geográfica
	<i>Lutjanus jordani</i>		S, N	Sur de Sonora a Perú
	<i>Lutjanus campechanus</i>		T, Y, QR	
rubia o villajaiba	<i>Lutjanus synagris</i>		T, Y, QR	Florida, GM a Brasil
pierna	<i>Caulolatilus princeps</i>	Malacanthidae	S, T y Y	California a GC
	<i>Mugil curema</i>	Mugilidae	S, N	GC a Chile
lebrancha	<i>Mugil curema</i>		T	Circunglobal aguas templadas y tropicales
	<i>Mugil cephalus</i>		S, N	Circunglobal aguas templadas y tropicales
lisa	<i>Mugil cephalus</i>		T, Y, QR	Florida, GM a Brasil
	<i>Paralichthys californicus</i>	Paralichthyidae	S, N	California, BC y GC
	<i>Paralichthys aestuarius</i>		S, N	GC
lenguado	<i>Ancyclopsetta dedritica</i>		S, N	Sur de BC Sur, GC a Perú
	<i>Cyclopsetta fimbriata, Syacium gunteri</i>		T, QR	Carolina a Brasil, GM y Caribe
	<i>Menticirrus panamensis</i>	Scianidae	S, N	California, GC a N
	<i>Micropogon megalops</i>		S, N	GC a Oaxaca
berrugata	<i>Menticirrus nasus</i>		S, N	GC, Sur de BC Sur a Perú
	<i>Menticirrus saxatilis</i>		T	Florida y GM
	<i>Larimus argenteus</i>		S, N	Boca del GC, Sur de BCS a Perú
	<i>Cynoscion reticulatus</i>		S, N	S a Panamá
corvina	<i>Cynoscion nebulosus</i>		T, Y, QR	Florida a T
	<i>Sciaenops ocellata</i>		T, Y, QR	Florida a V
	<i>Cynoscion arenarius</i>		T, Y, QR	GM
	<i>Larimus fasciatus</i>		T, Y, QR	Florida y GM
ronco	<i>Bairdiella ronchus</i>		T, Y, QR	Y a Brasil, Caribe
	<i>Thunnus albacares</i>	Scombridae	S, N	O, California a Perú
atún	<i>Thunnus albacares</i>		T, Y, QR	Circunglobal aguas templadas y tropicales
	<i>Euthynnus lineatus</i>		S, N	Costa de BC a Perú
barrilete	<i>Katsuwonus pelamis</i>		S, N	O, California a Perú
	<i>Auxis thazard</i>		N	O, California a Perú
bonito	<i>Sarda orientalis</i>		N	O, N a Perú

S = Sinaloa, N = Nayarit, T = Tabasco, Y = Yucatán, QR = Quintana Roo, BC = Baja California, BCS = Baja California Sur, GM = Golfo de México, GC = Golfo de California

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS

mexicanas ante el cambio climático

Nombre común	Nombre científico	Familia	Lugar de registro	Distribución geográfica
bonito	<i>Sarda chiliensis</i>		N	O, BC
	<i>Euthynnus alletteratus</i>		T, Y, QR	Georgia a Texas y el Caribe
	<i>Auxis thazard</i>		T, Y, QR	Venezuela a Brasil
macarela	<i>Scomber japonicus</i>		N y Y	O, Chiapas a Ecuador, Norte de Centro y Sur-América
peto	<i>Scomberomorus cavalla</i>		T, Y, QR	Florida, Caribe a Brasil, dentro del GM, de Tamaulipas a Y
sierra	<i>Scomberomorus concolor</i>		S	Costa occidental de BC y GC
	<i>Scomberomorus sierra</i>		S, N	California a Perú
	<i>Scomberomorus maculatus</i>		T, Y, QR	Georgia a Y
baqueta	<i>Epinephelus acanthistius</i>	Serranidae	S, N	GC a Perú
cabrilla	<i>Epinephelus analogus</i>		S, N	California a Perú
	<i>Epinephelus labriformis</i>		S, N	GC a Perú
	<i>Mycteroperca tigris</i>		T, Y, QR	Campeche a Y y las islas del Caribe
	<i>Mycteroperca phenax</i>		T, Y, QR	Carolina a Louisiana y T a Y
	<i>Epinephelus guttatus</i>		T, Y, QR	Georgia a Florida y Caribe
mero	<i>Epinephelus itajara</i>		S, N	GC a Perú
	<i>Epinephelus morio</i>		T, Y, QR	GM y Caribe
cintilla	<i>Trichiurus lepturus</i>	Trichiuridae	T	Circunglobal aguas templadas y tropicales
rubio	<i>Prionotus punctatus</i>	Triglidae	T, Y, QR	Belice a Brasil
	<i>Prionotus evolans</i>		T, Y, QR	Georgia a Florida

S = Sinaloa, N = Nayarit, T = Tabasco, Y = Yucatán, QR = Quintana Roo, BC = Baja California, BCS = Baja California Sur, GM = Golfo de México, GC = Golfo de California

Flores Verdugo, F.J., P. Casasola, G. de la Lanza-Espino, y C. Agraz Hernández, 2010. El manglar, otros humedales costeros y el cambio climático, p. 165-188. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

El manglar, otros humedales costeros y el cambio climático

*F. J. Flores Verdugo, P. Casasola,
G. de la Lanza-Espino y C. Agraz Hernández*

RESUMEN

Los efectos del cambio climático sobre los ambientes costeros, incidirán en los patrones de temperatura y precipitación, la circulación oceánica y atmosférica, la tasa de elevación del nivel del mar; así como la estacionalidad y distribución de los huracanes y las tormentas tropicales. Modificándose con esto, la distribución y tamaño de las superficies de los humedales costeros, ya que estos ecosistemas se caracterizan por prosperar dentro de un intervalo de salinidad, microtopografía y bajo un hidropereodo determinado. En particular, el aumento en el nivel del mar provocará un desplazamiento tierra adentro de los manglares al disponer de los espacios correspondientes y de no mantenerse igual la tasa de acumulación de sedimentos con respecto a la tasa de elevación del mar, se afectará la distribución y expansión o contracción de los humedales costeros. Por otra parte, el aumento en la temperatura asociada al aumento del bióxido de carbono de origen antrópico principalmente, afectará a su vez la distribución geográfica de los humedales y favorecerá el establecimiento de las especies invasoras. Con el calentamiento global en algunas regiones se espera un incremento de las lluvias y en la frecuencia de huracanes nivel 4. Por lo cual, es de esperarse erosión de las playas y dunas, así como una mayor probabilidad de afectación directa hacia los manglares en periodos menores a los 25 años. Considerando lo anterior es fundamental que se tome en cuenta el cambio climático como un factor significativo dentro de los planes de desarrollo social y económico de México.

Palabras clave: manglares, humedales costeros, cambio climático

LOS HUMEDALES COSTEROS

Entre las predicciones del cambio climático global se espera que se afecten los patrones de temperatura y precipitación, la circulación oceánica y atmosférica, la tasa de elevación del nivel del mar, así como la estacionalidad y distribución de los huracanes y las tormentas tropicales. La magnitud de estos cambios físicos y los impactos subsecuentes en los humedales costeros y en las playas y dunas variará regionalmente. Hoy en día se conocen ya algunos de los efectos ecológicos que tienen las tormentas tropicales y huracanes en la zona costera. Esta revisión indica que la estacionalidad de las tormentas, su frecuencia e intensidad pueden alterar la hidrología, la geomorfología, la estructura biótica, la selección natural, las tasas de extinción, la biodiversidad los patrones de energía, la productividad y los ciclos de nutrientes en los humedales costeros (Michener *et al.*, 1997).

Olmsted (1993) elaboró un mapa de humedales de México, localizándose la mayoría de ellos en zonas costeras. Frecuentemente los humedales de agua dulce se ubican por atrás de los humedales con influencia de marea como son los manglares y las marismas, y forman un gradiente de aguas salobres hasta aguas dulces. Constituyen mosaicos complejos en los que la salinidad, la profundidad del agua de inundación, la duración de la inundación y las condiciones de anoxia que ésta conlleva, así como la periodicidad (hidroperiodo) son determinantes. La ubicación de los humedales de agua dulce en zonas costeras y su dependencia del hidroperiodo e intrusión salina, los hacen particularmente vulnerables a los efectos del cambio climático.

Estos ecosistemas juegan un papel fundamental por la importancia de los servicios ambientales que prestan (regulación de flujos de agua, protección de la costa y mitigación del cambio climático, captura de carbono y regulación climática, protección de los mantos freáticos costeros, dilución y retención de contaminantes, fertilización del suelo y de los cuerpos de agua, hábitat de vida silvestre y mantenimiento de la biodiversidad, así como valores de tipo cultural, ético y espiritual) y por el valor que tienen (Constanza *et al.*, 1989; Mitsch y Gosselink, 2000). Proporcionan servicios de regulación de procesos climáticos e hidrológicos, así como soporte y mantenimiento de procesos de formación de suelo y de reciclaje de nutrientes (*sensu* Millenium Ecosystem Assessment, 2005), de ahí que exista preocupación por mantener los humedales o incrementar su superficie.

Mitsch y Gosselink (2000) proporcionan algunas cifras sobre la pérdida de humedales en distintas regiones. Se considera que Europa ha perdido el 95%, Canadá el 65% y Estados Unidos el 53%. México no tiene una valoración de la superficie perdida, excepto para manglares, pero cerca de las tres cuartas partes de los humedales de agua dulce han sido transformados en potreros, lo cual altera su funcionamiento, por ejemplo la capacidad de almacenar agua y de filtrarla (Travieso-Bello *et al.*, 2005). El cambio climático traerá modificaciones sustanciales de las superficies cubiertas por humedales de agua dulce, ya que éstos dependen de la presencia de zonas bajas donde se acumule el agua, y éstas se reducirán con el avance de la intrusión salina.

EL ECOSISTEMA DE MANGLAR

Los ecosistemas de manglar comprenden a las comunidades vegetales arbóreas ó arbustivas que se desarrollan en los litorales costeros de las regiones tropicales y subtropicales y se caracterizan por presentar adaptaciones especiales para estos entornos tales como: ser tolerantes a suelos salinos (halófitas facultativas), crecer en zonas afectadas por inundaciones periódicas por mareas, aportes fluviales o del manto freático, a suelos pobres en oxígeno, pueden sobrevivir en regiones afectadas por huracanes y tifones y presentan cierto grado de viviparidad (Chapman, 1977).

En el mundo existen más de 80 especies de manglar distribuidos en más de 26 familias, encontrándose la mayor variedad de especies en el sureste asiático de donde se inició su propagación al resto del planeta (Tomlinson, 1986). En América existen 8 especies y en México solamente se encuentran 5: El manglar rojo (*Rhizophora mangle*), el manglar blanco (*Laguncularia racemosa*), el manglar negro (*Avicennia germinans*), el manglar botoncillo (*Conocarpus erectus*) y en Chiapas solamente el manglar rojo (*Rhizophora harrisonii*) (Pennington y Sarukhan, 1968). Otros autores proponen como manglar el manglar dulce o mangle falso (*Maitenus sp*) en Baja California Sur (F. Picos, comunicación personal) y el Zapotón (*Pachira aquatica*) en el sureste de México (Infante *et al.*, datos no publicados). Así como, para las costas del Caribe mexicano donde se considera que existe otras especies de manglar negro (*Avicennia bicolor*) y otra variedad de manglar botoncillo (*Conocarpus erectus var. sericeus*).

La importancia del ecosistema de manglar está ampliamente descrita por Flores-Verdugo (1989) y Flores-Verdugo *et al.* (1992, 2007). El manglar es el ecosistema más productivo del planeta por lo que sostiene una compleja cadena alimenticia. Estos ecosistemas son de vital importancia como hábitat de apoyo a las pesquerías, zona de amortiguamiento contra inundaciones, biofiltro, refugio de fauna regional y migratoria, en particular aves. Los manglares se distribuyen de forma discontinua a lo largo de sus 20 000 km de litoral de México (Ortiz-Pérez y de la Lanza-Espino, 2007). Como consecuencia del viento y oleaje, el manglar en general se localiza principalmente en las áreas protegidas (sotavento) de las islas y penínsulas de barrera arenosa, en los esteros y venas de mareas, islotes y deltas interiores de lagunas costeras y bahías. En algunas regiones de Campeche (Reserva de Biosfera de “Los Petenes”) y de Quintana Roo (Bahía de Chetumal) los manglares llegan a colonizar hacia el mar (barlovento) como consecuencia de ser regiones con muy baja energía de oleaje. También existen manglares en el interior de algunas planicies costeras (manglares “tierra adentro”) donde se pueden observar manglares en cenotes y ríos a varios kilómetros de distancia del mar (Candelaria-Las Delicias, Campeche).

Una importante actividad que se realiza a todo lo largo de las costas de México, tanto en las lagunas costeras y bahías (pesca ribereña) como en la plataforma continental (pesca de “altura”) es la pesca del camarón (*Litopenaeus spp*), por su elevado precio en el merca-

do nacional e internacional. La mayor parte de las especies de camarón utilizan a las lagunas costeras y bahías como zonas de alimentación y refugio desde sus etapas larvarias hasta preadultos para posteriormente salir al mar abierto a desovar. Los manglares, por su elevada productividad, exportan dicha productividad hacia los cuerpos de agua adyacentes (lagunas

costeras, bahías y zona marina adyacente) a través de los reflujos de marea, aumentando significativamente la fertilidad de estos ecosistemas. Se estima que una hectárea de manglar produce anualmente 800 kg de pescado y camarón, sin requerir de agroquímicos y sin los riesgos ambientales asociados a estos compuestos (Turner, 1991).

LOS HUMEDALES Y EL HIDROPERIODO

Los humedales más ampliamente distribuidos en México son: los sistemas acuáticos de ríos y lagunas, los manglares, las selvas inundables, los tulares, los popales, los bosques y selvas riparios y las marismas. Cada uno de ellos se caracteriza por prosperar dentro de un intervalo de salinidad y bajo un hidroperiodo determinado. La figura 1 muestra los hidroperiodos de distintos tipos de humedales a lo largo de un gradiente descrito por Yetter (2004) y Flores-Verdugo *et al.* (2007), en La Mancha, Veracruz. Pueden observarse distintos tiempos de inundación. La selva inundable de *Annona glabra* y el manglar de *A. germinans*,

son los que pasan menor tiempo inundados, mientras que el popal es el que permanece más tiempo. El nivel de inundación es menor en el popal y el tular con respecto a los otros humedales.

Las estructuras geomorfológicas, como son los distintos tipos de humedales, playas y dunas, sufrirán ajustes espaciales como respuesta a los gradientes de energía cambiantes. Frecuentemente estos ajustes se darán a través de la migración de las estructuras geomorfológicas, manteniendo con ello su posición en el gradiente de energía costera (Pethick, 2001).

FUNCIONES Y SERVICIOS DE LOS HUMEDALES

Los manglares y humedales de agua dulce actúan como “esponjas” y las marismas como “vasos reguladores” de las inundaciones. Los manglares con sus raíces, así como las playas y dunas, funcionan como “colchones” amortiguando el efecto erosivo de las olas al dispersar la energía del oleaje y al refractar el oleaje con el sistema de raíces aéreas y por la suspensión de las partículas de arena.

Los manglares y otras macrófitas acuáticas actúan como importantes biofiltros, por lo que son considerados los “riñones” del ambiente, remueven importantes cantidades de nutrientes provenientes de las descargas urbanas y agrícolas, manteniendo de esta forma (con ayuda de la dilución marina por las marismas), la calidad del agua de diversas lagunas costeras.

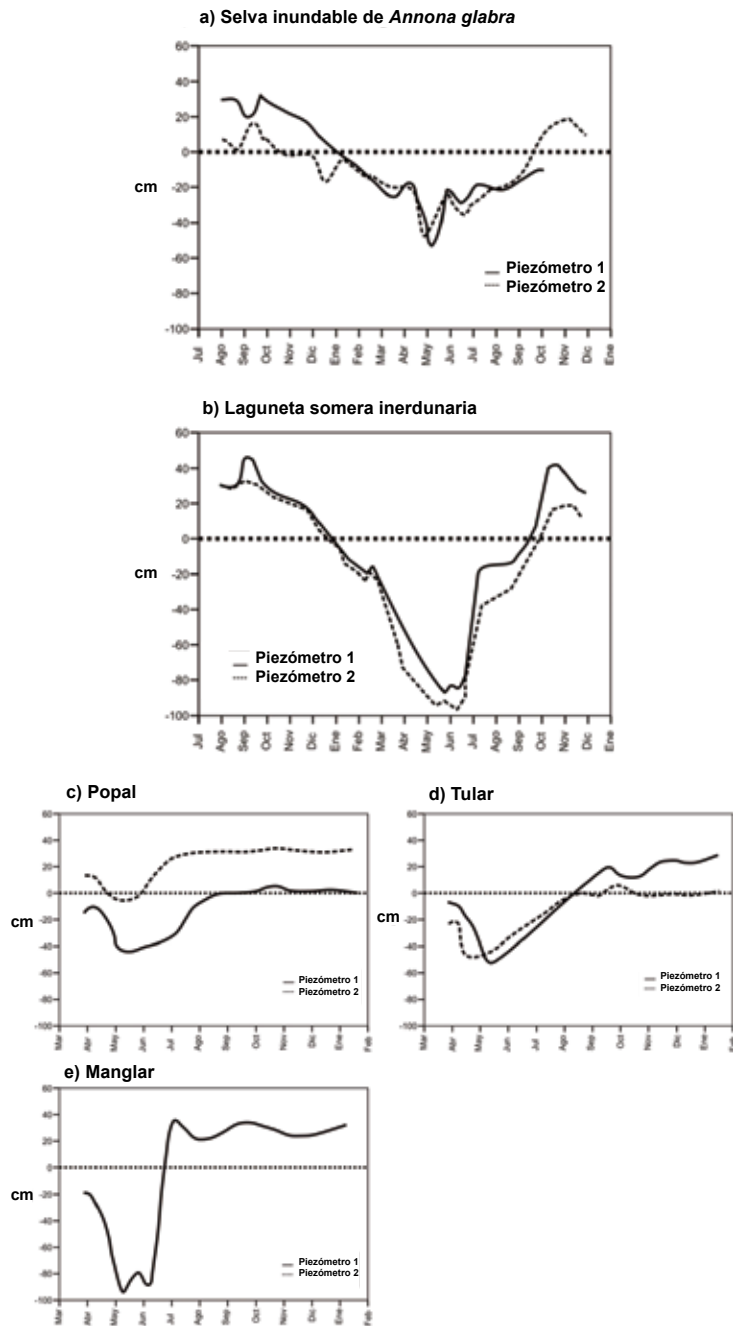


Figura 1. Hidroperiodos de distintos tipos de humedales (a) selva inundable de *Annona glabra*, b) laguneta somera interdunaria de agua dulce y cubierta por *Pistia stratiotes*, c) popal de *Sagittaria lancifolia*, d) tular de *Typha domingensis* y e) Manglar de *Laguncularia racemosa* y *Avicennia germinans*. Redibujado de Yetter (2006).

También son el refugio de una gran diversidad de aves acuáticas así como de aves migratorias que utilizan como zonas de alimentación tanto las zonas de manglar de grandes cuerpos lagunares como la cadena de pequeños cuerpos costeros con manglar a lo largo de las costas de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa durante su migración en el invierno. Algunas aves migran desde Alaska y Canadá, y en Marismas Nacionales (sur de Sinaloa y Nayarit) se concentra 80% de las aves migratorias del corredor migratorio de Pacífico. En Chirichahueto y Bahía de Santa María-La Reforma se concentran poblaciones de varios cientos de miles de patos golondrino

(*Anas acuta*) durante el invierno, manteniendo una actividad cinegética que produce una importante derrama económica en la región. En particular, en el noroeste (Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa), por sus características climáticas de áridas a semi-áridas, los pequeños cuerpos lagunares con manglar son ecosistemas críticos tanto para aves migratorias que las utilizan durante su migración como para diversas especies de la fauna acuática y terrestres regional; estos ambientes acuáticos funcionalmente son equivalentes a un “oasis costero” manteniendo una mayor diversidad y densidad de organismos del desierto.

LOS HUMEDALES COSTEROS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

La distribución y tamaño de las superficies de los humedales costeros se verán sustancialmente modificados por el cambio climático. Algunas áreas de la tierra se volverán más húmedas y otras más secas, produciéndose un cambio en la distribución de los ríos, lagos y humedales (Carpenter *et al.*, 1992). Una de las predicciones del cambio climático en el centro del Golfo de México es una mayor cantidad de lluvia y por tanto escurrimiento; estará llegando mayor cantidad de agua a las zonas bajas. Sin embargo, hay un límite de distribución dado por la topografía, ya que el agua corre por superficies (*e.g.* planicies de inundación) o se acumula en depresiones. En algunos casos se incrementará la intrusión salina. El espacio entre esos dos límites se verá reducido en aquellas costas donde la planicie costera tenga una topografía con deltas y canales donde el agua rápidamente se vaya elevando; por ejemplo, las lagunas de Marismas

Nacionales, Nayarit, resultado también de la acreción-erosión, o bien se extenderá donde la geomorfología sea muy plana como en los deltas del Papaloapan, Grijalva y Usumacinta. En estos casos se puede decir que los humedales van a migrar sobre las tierras bajas donde ahora se desarrollan actividades productivas.

La acumulación de agua modificará el hidropereodo de los humedales alterando el tiempo que permanecen inundados y el nivel de la inundación. Esta última es crítica para los popales, ya que algunos como los de *Sagittaria lancifolia*, solamente alcanzan alturas de 80 a 150 cm; si quedan totalmente sumergidos morirán y los popales más altos como los de *Thalia geniculata*, *Pontederia sagittata*, *Cyperus giganteus*, aunque toleran niveles un poco más altos, solamente resisten tiempo de residencia del agua más cortos. Sin embargo, todos ellos necesitan de un periodo con el suelo seco, para que las semillas germinen y las

plántulas se establezcan. Los árboles de selva (el apompo *P. aquatica* y la anona *A. glabra*) dispersan sus semillas por agua y mejora la germinación después de un tiempo flotando, pero se obtienen mayores porcentajes de germinación y plántulas con un sistema radicular mejor desarrollado cuando hay periodos con humedad, no solamente inundación (Infante, 2004; Infante y Moreno Casasola, 2005). Se ha visto que cuando se modifica el hidropereodo y un humedal se convierte en un cuerpo de agua, su recuperación es casi imposible (Carpenter *et al.*, 1992).

Por otro lado, una de las características de los popales, las selvas inundables y muchos tulares, es la presencia de suelos orgánicos; siendo estos, producto de la acumulación de materia orgánica a lo largo de cientos de años, y de las bajas tasas de descomposición en suelos anóxicos. La migración de humedales, que tendrá velocidades mayores que las que se han presentado en el pasado, les permitirá colonizar nuevos sitios que se vuelven inundables, pero la acumulación de materia orgánica tardará mucho tiempo. Las características de los suelos orgánicos (gran porosidad y por tanto

capacidad de retención de agua) permiten su funcionamiento como control de inundaciones. Este servicio ambiental fundamental en escenarios de desarrollo de la zona costera, se perderá con la migración de los humedales.

Además de la modificación del hidropereodo, la intrusión salina también afectará de manera importante la distribución de humedales. *Typha domingensis*, especie dominante del tular, tolera aguas ligeramente salinas, mientras que las especies de popal son totalmente de agua dulce (Flores Verdugo *et al.*, 2007). *P. aquatica* tolera salinidades altas y en diversos manglares del país aparece como especie acompañante (D. infante, comunicación personal), no así *A. glabra* o *Ficus* spp. El cambio climático alterará la biomasa, productividad y composición de especies de muchos humedales y por tanto el aporte que hacen de materia orgánica y nutrientes a los cuerpos de agua (Carpenter *et al.*, 1992). Los cambios en la temperatura y en la concentración de CO₂ generalmente resultan en un incremento en la productividad, aunque la respuesta varía considerablemente entre especies (Field *et al.*, 2000).

EL MANGLAR, ESPECIES INVASORAS Y EL INCREMENTO DEL BIÓXIDO DE CARBONO ATMOSFÉRICO

El aumento en la temperatura del planeta producto del calentamiento global asociada al aumento del bióxido de carbono de origen antrópico principalmente, ha sido calculado en 280 ppm (partes por millón) a finales del siglo XIX, en 368 ppm en el 2000 y en continuo aumento debido a la combustión de combustibles fósiles (20% atribuido a los vehículos) y al efecto invernadero a pesar de

existir aspiraciones para reducir las emisiones (Watson *et al.*, 2001).

Las plantas dependen del bióxido de carbono para llevar a cabo la fotosíntesis y el aumento de este gas, demostrándose que en algunas especies de manglar estimula la fotosíntesis y el crecimiento. Aunque la asimilación del bióxido de carbono por los estomas provoca la pérdida de agua por transpiración;

se ha observado que los manglares a elevadas concentraciones de bióxido de carbono disminuyen la conductividad de los estomas incrementando la fotosíntesis, pero siendo más eficientes en el uso de agua. Sin embargo, en periodos largos a elevadas concentraciones de bióxido de carbono, el incremento en la fotosíntesis no se mantiene por largo tiempo, regresando a su tasa de asimilación original. Por otro lado, se considera en general que el efecto directo del aumento del bióxido de carbono es el de menor impacto en los manglares que otros factores asociados al cambio climático (Hoghart, 2007).

Las especies invasoras se verán favorecidas por el cambio climático. Los componentes del cambio global, como es el incremento en la depositación de nitrógeno y la concentración de CO₂ atmosférica, favorecerá grupos

de especies que comparten ciertos rasgos de historia de vida o comportamientos fisiológicos. Las especies invasoras comparten rasgos que les permitirán capitalizar los cambios, alterando aún más las propiedades básicas y el funcionamiento de los ecosistemas (Dukes y Mooney, 1999). En diversos países hay ejemplos de ocupación de humedales de agua dulce por especies exóticas sumamente agresivas (*Lythrum salicaria* en Estados Unidos, *Tamarix* spp. en la cuenca y el delta del río Colorado). En el trópico de México también hay ejemplos como el del pasto africano *Echinochloa pyramidalis*, introducido como pasto ganadero en los humedales potrerizados. Esta una gramínea C4 debido a su gran productividad que le permite acumular gruesas capas de biomasa seca, “va formando suelo” y desecando el humedal (López-Rosas, 2007).

EL MANGLAR Y EL AUMENTO EN LA TEMPERATURA

El bióxido de carbono es considerado uno de los gases de invernadero, sin embargo también se debe de considerar al metano que está en aumento (0.9% anual) y es diez veces más eficiente en retener calor que el bióxido de carbono así como el óxido nitroso (N₂O). El metano en general es el producto de la respiración anaeróbica donde el agente oxidante de la glucosa es el propio bióxido de carbono. Las principales fuentes del metano producto de la respiración anaeróbica son la flora intestinal del ganado doméstico (*e.g.* ganado vacuno) y silvestre (manadas de ñus, cebras, antílopes, caribúes, etc.) y los pantanos de agua dulce y otros suelos saturados de agua (Hoghart, 2007). En los manglares en general, a diferencia de los pantanos de agua dulce, el producto

predominante de la respiración anaeróbica, es el sulfuro proveniente de la reducción de los iones sulfatos del agua marina. El ión sulfato es el tercer elemento más abundante del agua marina, después de los iones cloruro y sodio. En realidad se desconoce el efecto de los sulfuros como gas de invernadero.

Otras fuentes de metano provienen de la extracción minera, del petróleo y del gas. Recientemente se sospecha que habrá liberaciones significativas de gas metano provocado por el derretimiento del agua del permafrost de las turbas asociadas al polo norte con el calentamiento global. La liberación de metano en pantanos de manglar se localizaría en algunas regiones donde predomina el agua dulce sobre la marina como en los deltas de

los grandes ríos de Asia (Sandarbans, delta del Ganges entre Bangladesh e India), África (río Congo) y América (Amazonas). En México probablemente en las desembocaduras del Grijalva-Usumacinta y en el Caribe a través de los sistemas cársticos.

En el último siglo se ha observado un aumento en la temperatura de 0.6 °C y se predice un aumento de 0.2 a 0.5 °C por década durante este siglo, por lo que se estima será 3.5°C más elevada para finales del siglo XXI; sin embargo, para los trópicos se ha calculado que será menor. Asociado a esto se espera una atmósfera con mayor humedad y en general un aumento en las lluvias. Otros autores pronostican lo contrario con un aumento en el periodo y extensión de las sequías, sobretodo alrededor de las zonas áridas de América (estados fronterizos de EUA y México) y África (el Sahel y otras zonas del SubSahara) bajo el argumento que gran parte del agua producto del derretimiento de los polos, quedará atrapada como agua marina.

Los manglares según la especie, poseen reacciones diferentes, al aumento en la temperatura. En general las condiciones óptimas se encuentran por arriba de los 22 °C. El principal efecto del aumento de la tempera-

tura en los manglares sería en su distribución geográfica a expensas de los pantanos salobres de *Spartina* spp. (Louisiana y Mississippi), aumentando hacia el norte y sur de su distribución original. Esto es de esperarse debido a que los límites de distribución latitudinal del manglar están asociados con la temperatura (Hogarth, 2007). En México sería de esperarse una mayor colonización dentro del Golfo de California por arriba del estero de El Soldado e Isla Tiburón en Sonora y Bahía de Los Ángeles en Baja California. Sin embargo, en el Pacífico, la corriente de California seguiría siendo una barrera infranqueable para que los manglares dieran el salto de Abreojos en San Ignacio (BCS) al otro lado de la península del Vizcaíno a la playa del Malarrimo en Guerrero Negro (BC). Por otro lado, aunque existen reportes de colonización por manglares en la costa Atlántica de EUA (Georgia), se especula que con el derretimiento de los glaciares de Groenlandia y costa este de Canadá, se puede interrumpir por completo la celda de circulación marina asociada a la Corriente del Golfo de México provocando un descenso de la temperatura en el Reino Unido y en la costa este de Norteamérica incluyendo la Florida.

EL MANGLAR, OTROS HUMEDALES Y EL AUMENTO EN EL NIVEL DEL MAR

Está ampliamente reconocido que uno de los efectos del calentamiento global es el aumento en el nivel medio (eustático) del mar más asociado a la expansión térmica de los océanos que al aumento por el derretimiento de los glaciares y las principales masas de hielo continental (Hogarth, 2007).

Se estima que de 1990 a finales del siglo XXI un aumento en el nivel medio del mar de 9 a 88 cm. Esta elevada diferencia de variaciones en el nivel del mar está relacionada con la combinación de los ascensos y descensos ocasionados por los procesos de la actividad tectónica local por el reajuste del nivel isos-

tático de la corteza terrestre a su vez asociada con la redistribución de hielo y agua de una era postglaciar (Watson *et al.*, 2001).

Los cálculos del impacto por el incremento del nivel del mar en un metro, en la laguna de Alvarado y en el curso bajo del río Papaloapan, indican una afectación de 47.5 km tierra adentro, en el río Usumacinta de 55 km, en el río Grijalva de 25 km y en laguna de Términos de 20 km, siendo éstos de los sitios más vulnerables (Estrategia Nacional del Cambio Climático, 2007). Ello da una indicación del nivel de impacto y los cambios que se sucederán en la planicie costera.

El efecto del aumento en el nivel del mar en los manglares va a depender de las condiciones hidrológicas locales, en especial de los aportes de sedimentos de la planicie costera y cuenca, la microtopografía, así como del transporte litoral asociado a las condiciones oceanográficas locales y a mayor escala y a las mareas.

La zonación de las diferentes especies de manglar obedece en gran medida a hidroperiodos selectivos por determinada frecuencia

de inundación para cada especie. El hidroperiodo a su vez va a estar determinada por las mareas y/o los aportes de agua dulce y el gradiente topográfico.

En general un aumento en el nivel del mar provocaría un desplazamiento tierra adentro de los manglares al disponer de los espacios correspondientes. La expansión o compresión de la zonación o la distribución preferencial por una especie de manglar va a depender de las características topográficas tierra adentro. En una región del Pacífico de México con influencia de mareas semidiurnas (Estero de Urías, Sinaloa), Hernández (2005), demostró que el manglar rojo (*R. mangle*) tiene preferencia por permanecer inundado por periodos de 5 a 8 horas por cada 12 horas, el manglar blanco (*L. racemosa*) 1:30 a 2:30 horas cada 12 horas y el manglar negro (*A. germinans*) entre 1 y 1:40 horas cada 12 horas.

En la tabla 1 se puede observar la extensión de las áreas inundadas con un ascenso en el nivel del mar de un metro. Es de esperarse que el cambio en el nivel del mar ocasione la transformación de amplias zonas de humedales

Tabla 1. Pérdida neta en extensión de humedales (km²) por algunos estados costeros de México asumiendo un ascenso en el nivel del mar de 1 metro para fines del siglo XXI.

Región	Pérdida de humedales (sumergencia)	Ganancia de hábitats espacios nuevos disponibles (2 m)	Ganancia neta (+) ó pérdida neta	% pérdida
Sinaloa	3 775.4	1 331.2	- 2, 444.2	64.7
Quintana Roo	4 011.0	1 047.0	- 2 954.0	73.9
Campeche	4 321.0	1 182.0	-3 139.0	72.6
Veracruz	3 591.0	215.0	-3 376.0	94.0
Tabasco	2 024.0	1 439.0	- 585.0	28.9
Tamaulipas	1, 604.0	1 282.0	- 322.0	20.1
Yucatán	1, 862.0	622.0	-1 243.0	66.8
Nayarit	890.0	426.0	464.0	52.1
Totales	22 078.0	7 545.0	-14 533.0	65.8

regulados por hidroperiodos selectivos (*e.g.* “zona intermareal”) a cuerpos de agua permanente (humedales submareales) y se desplacen los primeros tierra adentro. Sin embargo, las nuevas zonas disponibles para los humedales (de mareas), asumiendo las planicie costera a un metro por arriba del futuro ascenso del nivel del mar (y sin aportes significativos de sedimentos), en general presentan menores extensiones que las áreas afectadas por lo que se presentarán más pérdidas que ganancias netas oscilando entre pérdidas del 20 al 94% de los humedales costeros en función de las pendientes topográficas dominantes de cada región.

El comportamiento de los manglares en México con respecto al ascenso del nivel del mar en gran medida va a depender del tipo de costa en función de su origen morfotectónico (Carranza-Edwards *et al.*, 1975), así como su combinación con las características climáticas regionales (Flores-Verdugo *et al.*, 1992). Las costas del Golfo de México corresponden a una costa de arrastre con una extensa plataforma continental y por lo tanto una extensa planicie costera y elevada precipitación que ha permitido el desarrollo de extensas zonas de manglar con buen desarrollo estructural como son los manglares asociados a Laguna de Términos (Campeche), Alvarado (Veracruz) y Altamira (Tamaulipas). Las costas del Caribe por su origen cárstico con aportes subterráneos de agua dulce aunque con pocos nutrientes (oligotróficos) y escasas mareas (< 50 cm) permiten un desarrollo de bajo a intermedio de los manglares como en Los Petenes (Campeche), Ría Lagartos (Yucatán), Chacmuchuk, Nichupté, humedales de Puerto Morelos, Sian kan (Quintana Roo). En la zona de los Petenes (Campeche), la baja

energía de oleaje ha permitido la colonización por el manglar hacia el mar abierto. Las costas del Pacífico sur (sur de Nayarit a Chiapas) se caracterizan por ser una costa de colisión entre la placa de Cocos y la placa Americana lo que determina una plataforma continental corta con un litoral montañoso de pronunciada pendiente que limita el desarrollo de los manglares a estrechas franjas y de manera discontinua, bordeando pequeños cuerpos lagunares y a sotavento de las islas y penínsulas de barrera con excepción de las costas de Chiapas (Chantuto-Teculapa-Panzacola) donde existen extensas zonas de manglar con alturas superiores a los 20 m. Como ejemplos de estos pequeños ecosistemas se tienen a los manglares asociados a los cuerpos lagunares de Chacahua, Mazunte, La Ventana (Oaxaca), Mitla, Chautengo (Guerrero), Playa Azul (Michoacán), Cuyutlán, Las Garzas (Colima), Chalacatepec, Paramán-Xola, El Salado (Jalisco), El Quelele, Platanitos (Nayarit). La costa continental del Golfo de California y Pacífico norte clasificadas como una costa de neoarrastre presenta una relativamente extensa planicie costera con climas que van de árido a subhúmedo, los que han permitido el desarrollo de extensas zonas de manglar a sotavento de las islas de barrera y alrededor de las lagunas costeras con un desarrollo como bosque desde matorral (< 2 m de altura) hacia las zonas áridas y de matorral y borde (> 8m) hacia las regiones subhúmedas como son La Bahía de Lobos (Sonora), San Ignacio-Navachiste, Santa María-La Reforma, Ensenada del Pabellón (Sinaloa) y Marismas Nacionales (Nayarit). La costa oeste de Baja California corresponde a una costa de colisión del Pacífico norte y de Neo-arrastre la costa este. Ambas costas se caracterizan por una escasa

o nula planicie costera, una elevada aridez y bajas temperaturas hacia el norte, lo que limita de forma notable la extensión de los manglares predominando los matorrales densos a dispersos en extensas marismas hipersalinas.

Asumiendo un ascenso en el nivel del mar de menos de un metro para finales de este siglo es de esperarse una respuesta selectiva de los manglares en función del tipo de costa (tabla 1). También es de esperarse una pérdida neta significativa en extensión del manglar para las costas del Pacífico sur, las costas de la península de Baja California y el Caribe; este último en particular por su escaso nivel de mareas (< 50 cm), así como el efecto del aumento en la frecuencia de los huracanes de mayor categoría y el deterioro de su barrera natural (el arrecife de coral). Un probable au-

mento neto en la extensión de los manglares del Golfo de México sería desplazando otros humedales como los pantanos dulceacuícolas, en particular de Alvarado, Tabasco y Laguna de Términos (Campeche), pero con el riesgo adicional de ser erosionadas las penínsulas e islas de barrera arenosa al ser sobrepasadas con el aumento del nivel del mar, exponiendo al oleaje directo a los manglares de Veracruz y Tamaulipas. También es probable un aumento neto en la extensión del manglar en Sinaloa y Sonora desplazando a las marismas y salitrales así como su desplazamiento septentrional más al norte en el interior del Golfo de California (Estero del Sargento e isla Tiburón) y del Pacífico de Baja California (Punta Abreojos-La Bocana, BCS) de desplazarse más al norte la corriente de California.

CAMBIOS EN LA DINÁMICA DE LOS SEDIMENTOS

En los humedales costeros el aporte de sedimentos tiene gran importancia para mantener la acumulación vertical del sustrato durante la elevación del nivel del mar. Los humedales costeros logran mantenerse durante estos periodos de elevación del mar, siempre y cuando la tasa de acumulación de sedimentos sea igual a la tasa de elevación del nivel del mar, de modo que se mantengan al mismo nivel con respecto al régimen de mareas (Field *et al.*, 2000). Estos sedimentos provienen de la erosión de tierras interiores, ya que las lluvias y escurrimientos acarrearán sedimentos y cuando los ríos se desbordan sobre las planicies de inundación y deltas, las plantas de los humedales van capturando los sedimentos, incrementándose la acumulación vertical. Sin embargo, si los humedales no pueden migrar

o si no mantienen esta tasa de acumulación, el humedal se verá sumergido por el incremento en el nivel del mar. Hoy en día las obras de protección a la orilla de los ríos y las presas impiden que los sedimentos lleguen a las partes bajas y se acumulen en los humedales. En la costa de Louisiana, se ha calculado una pérdida de 24 a 40 millas cuadradas anuales, durante los últimos cuarenta años, debido principalmente al manejo del río Mississippi (Boesch *et al.*, 1994 en Field *et al.*, 2000).

Un factor determinante en la distribución y expansión o contracción de la franja de manglares va a depender de los aportes de sedimento terrigénicos. Durante la transgresión del Holoceno (> 10, 000 años a.p.), a pesar del aumento en el nivel del mar, los manglares de Marismas Nacionales tuvieron la capaci-

dad de extenderse con dirección al mar por ser mayor el ascenso en el nivel del suelo por el aporte de los sedimentos de los ríos que el ascenso del nivel del mar (Curry *et al.*, 1969).

Las tasas de azolvamiento en diversos cuerpos lagunares de México han variado en el tiempo y de lugar a lugar. El azolvamiento de las lagunas costeras, manglares, marismas y otros humedales costeros se puede considerar uno de los principales factores de impacto ambiental en estos ecosistemas. El azolvamiento es consecuencia directa de la erosión de los suelos tanto de la planicie costera como de la cuenca media y alta. Esta erosión es el producto del uso de técnicas agrícolas y ganaderas inadecuadas y la deforestación.

Existen evidencias de sistemas acuáticos azolvados a todo lo largo de la costa de Sinaloa. Ruiz-Fernández *et al.*, (2005) estimó un azolvamiento de una tonelada de sedimentos hectárea⁻¹año⁻¹ en Ohuira (Topolobampo) hace 125 años, antes del desarrollo agrícola de Los Mochis y de 18 toneladas hectárea⁻¹año⁻¹ en años recientes. Esto indica una tasa de azolvamiento 18 superior a lo que se podría considerar como asolvamiento natural anterior a la agricultura industrial. Arenas-Fuentes y de la Lanza-Espino (1979) estimaron una tasa promedio de sedimentación de 230 toneladas hectárea⁻¹año⁻¹ para Huizache-Caimanero equivalente a 1 cm hectárea⁻¹año⁻¹ en los últimos 50 años. Es decir que asumiendo una profundidad promedio de un metro en 50 años se tendría una profundidad de 50 cm. A esta profundidad se estimula la evaporación por lo que es de esperarse una profundidad menor a los 50 cm, condiciones de hipersalinidad, una mayor propensión a perder la comunicación al mar y por lo tanto un abatimiento significativo en las pesquerías.

Sin embargo, hay un límite de distribución dado por la topografía, ya que el agua corre por superficies (*e.g.* planicies de inundación) o se acumula en depresiones. Por otro lado se incrementará la intrusión salina, en consecuencia el espacio entre estos dos límites se verá reducido en aquellas costas donde la planicie costera tiene una topografía que rápidamente se va elevando, i.e. muchas zonas del Pacífico, o bien se extenderá donde la geomorfología es muy plana como en los deltas del Papaloapan, Grijalva y Usumacinta. En estos casos se puede decir que los humedales van a migrar, sobre las tierras bajas donde ahora se desarrollan actividades productivas. La acumulación de agua modificará el hidropериодо de los humedales alterando el tiempo que permanecen inundados y el nivel de la inundación. Esta última es crítica para los popales, ya que algunos como los de *S. lancifolia*, solamente alcanzan alturas de 60 100 cm. Si quedan totalmente sumergidos morirán, aunque popales más altos pueden tolerar niveles un poco más altos. Los árboles de selva (el apompo *P. aquatica* y la anona *A. glabra*) dispersan sus semillas por agua y mejora la germinación después de un tiempo flotando, pero se obtienen mayores porcentajes de germinación y plántulas con un sistema radicular mejor desarrollado cuando hay periodos con humedad, no solamente inundación (Infante, 2004). Sin embargo todos ellos necesitan de un periodo con el suelo seco, para que las semillas germinen y las plántulas se establezcan. Se ha visto que cuando se modifica el hidropериодо y un humedal se convierte en un cuerpo de agua, su recuperación es casi imposible (Carpenter *et al.*, 1992).

Los suelos orgánicos característicos de los popales, las selvas inundables y muchos tu-

lares, son el resultado de la acumulación de materia orgánica a lo largo de cientos de años, y de las bajas tasas de descomposición. Cuando la inundación es producto del desborde de ríos como en Tecolutla (Ciénega del Fuerte) y en Alvarado, las aguas de inundación aportan sedimentos a los humedales. Estos suelos les permiten acumular agua entre los poros y mitigar las inundaciones. Actualmente la tala de vegetación y el drenaje de esos humedales dulceacuícolas, los convierte en terrenos muy productivos debido a la materia orgánica acumulada, pero las nuevas condiciones hacen que se pierda su capacidad de retención y filtración de agua (Travieso-Bello *et al.*, 2005).

La migración de humedales provocado por los nuevos patrones de inundación que sobrevendrán con el cambio climático, les permitirá colonizar nuevos sitios que se vuelven inundables, pero la acumulación de materia orgánica será lenta y se perderá este servicio ambiental.

Sin embargo, algunos autores sugieren que un ascenso en el nivel del mar mayor a los 12 cm en 100 años pueden llevar a que el ecosistema se colapse (Ellison y Stoddart, 1991). Snedaker *et al.*, (1994) sugieren que los manglares han sobrevivido en Florida con ascensos en el nivel del mar de 23 a 37 cm en 100 años.

EL MANGLAR, LAS LLUVIAS Y LOS HURACANES

Se asume que asociado al calentamiento global será de esperarse un incremento en algunas regiones de las lluvias como en la frecuencia de huracanes nivel 4.

Las regiones donde el nivel de lluvias se incrementa es de esperarse un aumento en extensión y estructura de los manglares de tipo borde (6-10 m de altura) a ribereño (12 a 25 m) y de tipo matorral (< 2m) a tipo cuenca (4-10 m) o su desplazamiento por pantanos de agua dulce de tulares (*Typha* spp), popales u otra macrófita acuática.

En regiones donde se incrementen las sequías tendría consecuencias negativas para los manglares con una pérdida de estructura (de ribereño a borde o matorral) o incluso llegar a desaparecer de incrementarse la salinidad del suelo a salinidades superiores a las 70 ups (la salinidad del mar es de 35 ups).

Los manglares están adaptados a ser afectados ocasionalmente por los huracanes. En re-

giones tropicales fuera de la influencia de los huracanes, es posible encontrar una mayor heterogeneidad en la distribución de estructura forestal del manglar (tamaños y frecuencias diametrales) y edades.

En el cinturón de huracanes los manglares tienden a ser más homogéneos en su estructura forestal y edad. En estas regiones en particular, se estima una probabilidad de un impacto directo por huracanes cada 25 años, por lo que los manglares tienden a recolonizar el sitio por propágulos prácticamente de la misma generación, lo que determina un crecimiento similar en altura y frecuencia diametral. El lado positivo de los huracanes es la de favorecer una mejor distribución de los propágulos del manglar y revitalizar los sistemas lagunares en calidad del agua y biodiversidad acuática al reabrir bocas de sistemas lagunares con comunicación estacional ó efímera con el mar y reducir el tiempo de residencia del agua

en los cuerpos de agua semicerrados (Saenger, 2002).

El aumento en la frecuencia de huracanes nivel 4 con el cambio climático, en particular en el cinturón de huracanes, es de esperarse una mayor probabilidad de afectación directa hacia los manglares en periodos menores a los 25 años lo que implicaría un cambio en la distribución de las estructuras forestales del manglar hacia manglares de menor edad y de tallas menores o llegar a desaparecer. Esto se ha observado en San Blas y Marismas Nacionales (Nayarit) donde recientemente por el efecto de los huracanes de los últimos 15 años los manglares de mayores tallas prácticamente han desaparecido (Kovacs *et al.*, 2004).

Sin embargo, consideramos que el efecto más importante del aumento en la frecuencia de los huracanes y que ha repercutido de ma-

nera negativa en los manglares ha sido la erosión de la playa y duna. Este proceso ha sido particularmente crítico en la Riviera Maya en Quintana Roo, donde en algunos puntos han desaparecido las playas y dunas de manera significativa, quedando expuestos a la erosión directa del oleaje los humedales costeros con pérdidas superiores a los 100 metros de ancho de franjas de manglar a lo largo de la costa (Tres Ríos, Punta Brava, etc.).

La misma situación, aunque en menor intensidad se ha detectado en el Pacífico de México y Golfo de California donde diversas islas y penínsulas de barrera presentan sitios donde el oleaje llega a atravesar la barra, con en riesgo potencial de la apertura de nuevas bocas como se ha observado en la península de Lucenilla, Ensenada del Pabellón (Sinaloa).

PLAYAS Y DUNAS

Los paisajes costeros formados por playas suaves, dunas de arena y marismas, representan sistemas geomorfológicos móviles de respuesta rápida, altamente sensibles a los cambios ambientales (Hansom, 2001). Las costas arenosas son ambientes estresantes, dinámicos, en los que la acción de las olas y mareas determinan de manera importante la diversidad de especies, la biomasa y la estructura de las comunidades. Hay un intercambio de arena, materia biológica y otros materiales entre las dunas, las playas intermareales y la zona de rompiente del oleaje. Las tormentas y la erosión asociada representan el mayor riesgo para la fauna y la flora de las playas, dunas embrionarias y primer cordón de dunas. Las perturbaciones relacionadas con la actividad

humana varían de una playa a otra; sin embargo, las estructuras o actividades que impiden el transporte natural de arena o alteran el presupuesto de arena, normalmente dan lugar a una erosión severa, a menudo de naturaleza permanente. El incremento en la frecuencia e intensidad de tormentas tendrá como consecuencia un escalamiento de la erosión y pérdida de hábitats de playa para las plantas, las aves, tortugas y numerosos invertebrados (Brown y McLachlan, 2002).

Ciertos procesos básicos (como la construcción de dunas o su migración, la formación de bocas, el transporte litoral, y las zonas de erosión por entrada del oleaje) se dan a lo largo de toda la costa, aunque no con la misma importancia o frecuencia. La importan-

cia relativa de estos procesos depende de las condiciones climáticas y oceánicas generales de cualquier área dada. Los vientos prevalentes, la orientación de la línea de la costa, la energía del oleaje, el cambio del nivel del mar, la frecuencia de las tormentas, los perfiles de la playa sumergida y de la plataforma continental, la configuración de la costa y el intervalo de las mareas, son factores ambientales importantes que determinan la importancia de la construcción de las dunas, de la erosión producida por el oleaje (*overwash*), o las diversas combinaciones de las dos. Aunado a los factores climáticos están las respuestas de las especies pioneras a los factores ambientales y la distribución de las especies adaptadas a estos factores a lo largo de la costa. El comportamiento de las plantas adaptadas para construir y estabilizar las dunas, soportar la erosión producida por el oleaje, o ambos, puede ser un factor en el desarrollo de la morfología de la línea de costa (Godfrey, 1977).

Un fuerte problema a que se enfrentan las playas es que su espacio físico está cada vez más reducido. Están atrapadas entre el crecimiento de las poblaciones humanas con sus desarrollos costeros y actividades productivas y los efectos del cambio del clima global que se están produciendo en el mar. Las intervenciones de la sociedad (*e.g.* la línea de la costa acorazada con ingeniería dura (como el caso de Nueva York, Gornitz *et al.*, 2001; Bird, 1996), la alimentación artificial de playas para combatir los cambios en los ambientes playeros, como la erosión y retirada de la línea de la costa, pueden resultar en impactos ecológicos severos y pérdida de biodiversidad en escalas locales, pero también se predice que tendrán consecuencias cumulativas de gran escala a nivel mundial (Schlacher *et al.*, 2007).

Las playas y dunas constituyen otro de los ecosistemas que proporcionan importantes servicios ambientales, sobre todo de protección de la zona costera (Hesp, 2000). Son acumulaciones de arena, móviles, que se acomodan constantemente ante la energía de la marea, de las olas, y del viento. Los sedimentos, proceden de cuenca arriba y son acarreados por escurrimientos y ríos y después redistribuidos y arrojados a la playa por mareas y oleaje. Hoy en día, debido a la escasez de sedimentos, cerca del 70% de las playas del mundo se están erosionando, es decir están perdiendo sedimentos (Bird, 1996). En México no se cuenta con monitoreos de las playas que permitan dimensionar la problemática, pero hay numerosos casos aislados, bien conocidos. Han resultado tanto de causas naturales (huracanes) como de actividades humanas (obras de ingeniería costera como espigones, escolleras) y presas. Ejemplos de ellos son Ensenada, el puerto de Veracruz, Tecolutla, Antón Lizardo, Cancún, entre muchos otros. La elevación del nivel del mar y el incremento en la frecuencia e intensidad de huracanes afectarán aún más a las playas.

Las dunas son la fuente de arena que retorna a la playa y al mar y se vuelve a redistribuir. Hoy en día están siendo transformadas drásticamente por la construcción de zonas hoteleras y la expansión de ciudades y casas de verano. La definición de zona federal marítimo terrestre es totalmente obsoleta y resulta perjudicial bajo escenarios de cambio climático. Las dunas embrionarias y el primer cordón de dunas constituyen la principal protección para la vida humana, sus actividades económicas y sus posesiones. La ley no protege estas unidades geomorfológicas, permitiendo su ocupación por infraestructura de ingeniería

dura. Hay varios casos en los municipios de Veracruz y Alvarado, de reciente construcción, donde el muro de la propiedad recibe el embate de las olas durante los nortes. El desarrollo costero en México constituye uno de los ejemplos más claros donde el ambiente debe ajustarse al proyecto y no viceversa, y éste es un ambiente frágil, cambiante, de gran dinamismo y valor por sus servicios ambientales. Su destrucción tiene y tendrá un alto costo para la población y la sociedad en general.

Se ha prestado muy poca atención al impacto del calentamiento global, sobre todo la elevación del nivel del mar, en el paisaje de dunas costeras, a pesar del hecho que éstas proporcionan protección natural a lo largo de muchas de las líneas de la costa del mundo. Las dunas costeras reaccionarán de diversas maneras en función de los factores regionales y locales. Los niveles del mar crecientes aumentarán la susceptibilidad a la erosión, pero el destino del sedimento liberado puede permitir la construcción de dunas costeras, al punto de lograr el crecimiento de playas en otras zonas. La respuesta de la vegetación de la duna a un clima más caluroso y más húmedo es incierta. La mayoría de las especies de las dunas de zonas templadas son principalmente C3; estas plantas, bajo condiciones favorables, responderían positivamente a la mejora de CO₂ (Carter, 1991). Las plantas de dunas tropicales incluyen tanto especies C3 como C4, éstas últimas mejor adaptadas a las altas temperaturas.

Poco se sabe de las respuestas de las comunidades de dunas dependientes del espacio a la pérdida o restricción de dicho espacio (hábitat). Se desarrolló un modelo para analizar la sucesión en las dunas de la isla de Galveston, Texas. Este modelo consideró que la elevación

del nivel del mar era el principal mecanismo que produce erosión local y se demostró que esa erosión de la playa construyó a las plantas a un área más restringida, resultando en un desajuste del proceso sucesional (Feagin *et al.*, 2005).

La elevación del nivel del mar y el incremento en la frecuencia e intensidad de huracanes afectarán aún más a las playas. La pendiente de la playa está en función de diversos factores, entre ellos la geomorfología de la zona, el oleaje y el tamaño de grano de arena (Bird, 1996). Las playas con pendientes mayores son más erosionables que aquellas con pendientes más suaves. La elevación del nivel del mar hará que el oleaje pegue más arriba de lo que ocurre actualmente, quedando una mayor superficie de la playa sujeta al impacto del oleaje. El incremento en la frecuencia e intensidad de huracanes hará que estas mismas playas se vean golpeadas por un oleaje de mayor energía, propiciando una erosión aun mayor.

El viento mueve la arena que el mar arroja en la playa y la deposita formando dunas embrionarias. Estas son estructuras geomorfológicas terrestres formadas por pequeñas acumulaciones de arena. Se originan cuando las corrientes de viento que acarrear los granos de arena se topan con un obstáculo, como son las plantas, y dejan caer la arena formando un montículo. Existen especies fijadoras o estabilizadoras de dunas que no solamente toleran el enterramiento por arena, sino que crecen mejor y más vigorosas cuando se deposita arena alrededor de ellas (Martínez y Moreno-Casasola, 1996). En el Golfo de México las especies que juegan este papel son *Chamaecrista chamaecristoides*, *Palafoxia lindenbergii*, *Croton punctatus*, *Uniola paniculata* y en el Pacífico *Scaevola plumierii*, *Pectis pos-*

trata, *Abronia maritima*, *Uniola pittieri*. En el Caribe son *Coccoloba uvifera*, *Tournefortia gnaphalodes*, *Suriana maritima* y *Scaevola plumierii*. Otras especies tienen una distribución más extensa como *Sporobolus virginicus*. Especies como *Ipomoea pes caprae*, *Canavalia rosea*, *Ipomoea imperatii*, *Sesuvium portulacastrum* son pantropicales. Todas ellas acumulan la arena y forman dunas embrionarias y cordones de dunas que reducen la energía del oleaje y regresan arena al mar para ser depositada en otras playas.

Entre las principales causas de erosión de playas están las represas de los ríos que evitan que lleguen sedimentos a la costa y por tanto se ha reducido la principal fuente de arena de las playas (Bird, 1996). A nivel mundial se calcula que de 3 a 6 veces más agua se encuentra en las presas que en los ríos y arroyos, y el confinamiento de agua en reservorios se ha cuadruplicado de 1960 a la fecha (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Mucho del sedimento de las playas proviene de otras épocas, ya que durante la transgresión marina se acumularon sedimentos que actualmente han pasado a formar parte de las playas, pero que hoy en día se están perdiendo (Bird, 1996; Hesp, 2000).

En nuestro país hay costas sumamente vulnerables. Algunas costas están retrocediendo hacia el continente, otras están avanzando hacia el mar y otras más están estables. En el Golfo y Caribe de México existen costas que están en retroceso hacia el continente, debido a sumersión, a inactividad deltaica o a elevación del nivel del mar o bien a un conjunto de estos factores (Ortiz-Pérez y Espinosa, 1991). Estas costas son sumamente vulnerables a los efectos del cambio climático y sus pobladores están en riesgo. Este es el caso de las costas

del norte de Tamaulipas, tanto en la zona de la llanura de inundación del río Bravo, como a lo largo de la Laguna Madre, donde sobre todo las islas de barrera se verán fuertemente afectadas. La tendencia de estas islas es irse fragmentando y erosionando, haciéndose más delgadas y seccionadas. El sur de Tamaulipas y la mayor parte de Veracruz presentan una línea costera que está avanzando hacia el mar o bien costas en equilibrio, excepto en la zona de Coatzacoalcos. Hay cordones de dunas o bien campos extensos de médanos; éstos sufrirán erosión, pero tienen suficiente masa y tamaño como para resistir la pérdida de sedimentos, a pesar de la erosión de las playas. De manera más específica, también son vulnerables las barras temporales que separan el mar de las lagunas costeras en esta región. En estos casos el equilibrio, y por tanto el tiempo que permanece abierta la barra, depende de los sedimentos que se arrastran a lo largo del litoral y de la cantidad de agua de lluvia que baja y se acumula en la laguna. Las escolleras y obras de apertura de barras también están incrementando la vulnerabilidad de estas barreras (Ortiz-Pérez y Espinosa, 1991; Moreno-Casasola, 2004).

La zona del delta del Grijalva y Usumacinta también es una zona muy vulnerable ya que la línea de costa está en retroceso, además de que hay una disminución del aporte de sedimentos, colocándola en una situación semejante a la del delta del Mississippi (Day *et al.*, 1999). Así, en la zona oeste de Tabasco, las barras frente a las lagunas más pequeñas desaparecerán al ser arrastradas por el mar, creando una línea costera muy indentada. El segmento que abarca desde Tupilco (Tabasco) hasta Champotón, es muy bajo y ancho y se erosionará rápidamente conforme los mayores niveles de

mar remueven los sedimentos (Ortiz-Pérez, 1994; Ortiz-Pérez *et al.*, 1996). La región de laguna de Términos es una zona frágil fisiográficamente. En general, la península de Yucatán, excepto la región de Progreso, presentan una línea costera que está avanzando hacia el mar o bien costas en equilibrio, mientras que en la mayor parte de Quintana Roo, está retrocediendo (Ortiz-Pérez y Espinosa, 1991). De manera particular el incremento en el nivel del mar afectará las islas de barrera del Caribe (Isla del Carmen, norte de Yucatán y Cancún), así como los humedales y las islas de bahía de Espíritu Santo y de Ascensión. En el Pacífico, el norte de la península de Baja California, tanto sobre el Mar de Cortés como sobre el Pacífico, tienen costas en retroceso, así como el sur de la Península, sobre el Pacífico. También hay áreas en retroceso en Sinaloa y Nayarit, mientras que en el resto de las costas del Pacífico tropical, la mayoría están estables o avanzando (Ortiz-Pérez y Espinosa, 1991).

Martínez *et al.* (2006) realizaron un análisis de vulnerabilidad de las costas de Veracruz. Diseñaron un indicador basado en características geomorfológicas, condición de la vegetación, influencia marina y eólica e impactos humanos. Encontraron que la vulnerabilidad era muy variable de sitio a sitio y que solamente 19 % de los sitios muestreados presentaba condiciones de baja vulnerabilidad. Ello habla de la necesidad de evaluaciones locales y de cómo, aún en costas que están avanzando sobre el mar, hay situaciones de alta vulnerabilidad.

Es probable que la alimentación artificial de playas se vuelva más común. Sin embargo, el continuo “endurecimiento” por recubrimiento de concreto de las dunas y alrededor de ellas está siendo y va a ser aún más dañino.

En muchos países en vías de desarrollo no hay muestras de cambios en políticas y la situación de deterioro de la costa no está siendo mitigada por las medidas de conservación. Es probable que estas costas se sigan deteriorando durante el primer cuarto de siglo (Brown y McLachlan, 2002).

Las playas y dunas, al igual que los humedales, también podrían migrar, pues en muchas costas del país se cuenta con sistemas de dunas, tanto sobre el Golfo y Caribe como el Pacífico (Moreno-Casasola *et al.*, 1998; Moreno-Casasola, 2004). Sin embargo la mala o nula planificación del desarrollo costero ha permitido que se edifique sobre las dunas costeras, transformándolas de manera definitiva. Las dunas son la fuente de arena que retorna a la playa y al mar y se vuelve a redistribuir. Hoy en día están siendo transformadas drásticamente por la construcción de zonas hoteleras y la expansión de ciudades y casas de verano. La definición de zona federal marítimo terrestre es totalmente obsoleta y resulta perjudicial bajo escenarios de cambio climático. Las dunas embrionarias y el primer cordón de dunas constituyen la principal protección para la vida humana, sus actividades económicas y sus posesiones. La ley no protege estas unidades geomorfológicas, permitiendo su ocupación por infraestructura de ingeniería dura. Actualmente las concesiones se están otorgando más bajo una visión económica que ambiental, dándose numerosos ejemplos en los cuales la infraestructura autorizada ya ha repercutido ambientalmente provocando problemas de erosión de playas colindantes. Estas áreas se vuelven mucho más vulnerables al impacto de huracanes como ha sucedido en Cancún, donde se sigue autorizando costa abajo desarrollos donde se eliminan las dunas

de protección. Ello ya tiene y tendrá un alto costo para la población y la sociedad en general (Moreno-Casasola *et al.*, 2006).

La Ley de Bienes Nacionales considera a las playas como *“las partes de tierra que por virtud de la marea cubre y descubre el agua, desde los límites de mayor reflujo hasta los límites de mayor flujo anuales”*. La zona bajo administración federal se define en el Capítulo IV como *“la faja de veinte metros de ancho de tierra firme, transitable y contigua a dichas playas”*. Esta definición no toma en cuenta el funcionamiento y la dinámica natural de las mismas, ni los actuales escenarios de cambio climático global.

La definición legal en el caso de México, un país en el cual predominan las costas arenosas (Ortiz-Pérez y de la Lanza-Espino, 2007) es de vital importancia. Asimismo, es necesario adecuar los reglamentos para el uso, manejo y conservación de ecosistemas frágiles como playas y dunas a los escenarios de erosión de playas e incremento de vulnerabilidad. La erosión, promovida y acelerada por la elevación del nivel del mar, también puede aumentar la vulnerabilidad a los daños producidos por las

tormentas al reducir la distancia entre la orilla y las estructuras de ingeniería y construcciones, y erosionando las estructuras de protección de la costa como son las dunas. El incremento creciente en el nivel del mar e incluso los pequeños cambios en la estacionalidad de las tormentas, la frecuencia y la intensidad tendrán impactos sustanciales en los modelos y procesos de los humedales costeros. Su preservación va a depender en gran medida de los impactos antropogénicos, sobre todo por la forma en que los humanos respondan a la elevación del nivel del mar. Las predicciones confiables de los impactos del cambio global en los humedales costeros, requerirán el entender bien las interacciones y vínculos entre los componentes terrestres, acuáticos, atmosféricos, oceánicos y humanos (Micheener *et al.*, 1997). La reducción del abasto de sedimento costero ha dado lugar a un proceso interno de re-organización, que debido a una sensibilidad inherente al cambio del nivel del mar y a bajos umbrales para los impulsores del cambio, restringe de manera importante las opciones de dirección futuras (Hansom, 2001).

ALGUNAS CONSIDERACIONES PARA LA MITIGACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES EN HUMEDALES COSTEROS

El cambio climático es una realidad para la cual es necesario tomar en cuenta como un factor significativo dentro de los planes de desarrollo económico de muchos países y en particular en México por su alta vulnerabilidad. La indiferencia ante este hecho repercutirá de manera negativa en todos los aspectos tanto ambientales como sociales y económicos.

Deberán definirse estrategias por la reducción del cambio climático como de mitigación de sus efectos por los siguientes 50 años.

Los planes de desarrollos urbanos y turísticos en zonas costeras deberán contemplar amplias zonas de amortiguamiento por daños potenciales ocasionados por huracanes e inundaciones como la prohibición de la urbanización de zonas inundables, playas y dunas.

Una estrategia de mitigación específica del impacto en los manglares y otros humedales por el ascenso en el nivel del mar, podría ser el evitar el aprovechamiento o transformación de los hábitats terrestres por actividades humanas por arriba de 2 metros del nivel medio del mar, lo que permitiría el desplazamiento del manglar y otros humedales tierra adentro y el mantenimiento de sus servicios ambientales.

La implementación de un derecho a una cuota de agua dulce ("gasto ecológico") hacia los ecosistemas costeros (ríos, humedales dulceacuícolas, manglares y lagunas costeras) es insuficiente, debido a que los humedales requieren de los pulsos de inundación y de sedimentos para su conservación.

Se requerirá de evitar la construcción se presas que secuestren significativamente los aportes fluviales ó con planteamientos hidráulicos que garanticen además de una cuota de agua dulce, un aporte de sedimentos que permitan

la sustentabilidad ambiental de los humedales costeros, la biodiversidad y las pesquerías, así como de los pulsos de agua necesarios que propicien inundaciones hacia el complejo de humedales en su totalidad, es decir mantener el caudal ecológico (Alonso-Eguía y Moreno-Casasola. 2007).

Es necesario definir estrategias para la conservación y restauración de los cauces naturales de los aportes de agua marina (esteros y venas) y agua dulce.

Se deberá evitar la fragmentación hidrológica de los humedales con la construcción de carreteras o cualquier tipo de bordo en los humedales o de ser necesarios dejar el suficiente número de pasos de agua ó de preferencia construir sobre pilotes para mantener la continuidad hidrológica. Los ductos enterrados para conducción de hidrocarburos, gas, etc. deben tener una dirección y profundidad de enterramiento que asegure que no impiden u obstruyen el flujo de agua subsuperficial.

LITERATURA CITADA

- Alonso Eguía-Lis, P., y P. Moreno-Casasola, 2007. Aspectos ecológicos de importancia en la determinación del caudal ambiental. En: P. Alonso Eguía-Lis, M.A. Gómez Balandra, P. Saldaña Fabela (eds.). Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México. IMTA-WWF-PHU/UNESCO-Semarnat. México D.F. 33-58.
- Arenas Fuentes, V., y G. de la Lanza Espino, 1980. Organic carbon budget of a coastal lagoon in northwest Mexico. p. 179-195. In: Utilization of Science in the decision-making process. Proceedings of the 6th Annual Conference. The Coastal Society.
- Bird, E.C., 1996. Beach management. John Wiley & Sons. New York. 281 p.
- Boesh, D.F., M.N., Josselyn, A.J. Mehta, J.T. Morris, W.K. Nuttle, C.A. Simenstad, y J.P. Swift, 1994. Scientific assessment of coastal wetland loss restoration and management in Louisiana. *Journal of Coastal Research Special Issue*, 20: 103 p.
- Brown, A.C., y A. McLachlan, 2002. Sandy shore ecosystems and the threats facing them: some predictions for the year 2025. *Environmental Conservation*, 29:1:62-77
- Carpenter, S.R., S.G. Fisher, N.B. Grimm, y J.F. Kitchell, 1992. Global change and freshwater ecosystems. *Annual Review Ecology and Systematics*, 23: 119-3

- Carranza-Edwards, A., M. Gutierrez-Estrada y R. Rodríguez-Torres, 1975. Clasificación morfo-tectónica de las costas de México. *An. Centro Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. de México*, 2: 81-88.
- Carter, R.W.G., 1991. Near-future sea level impacts on coastal dune landscapes. *Landscape Ecology*, 6 (1-2): 29-39.
- Chapman, V.J., 1977. Wetland Coastal Ecosystems. Elsevier. Netherlands. 428 p.
- Costanza, R, S.C. Farber y J. Maxwell, 1989. Valuation and management of wetland ecosystems. *Ecological Economics*, 1: 335-361.
- Curry, J.R., F.J. Emmel, y P.J. Crampton, 1969. Holocene history of a Strand Plain lagoonal coast, Nayarit, Mexico. p. 63-100. En: Ayala Castañares y F. B. Pheger (eds.) *Lagunas Costeras. Un Simposio. Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Day, J., G.P. Schaffer, L.D. Britsch, D.J. Reed, S.R. Hawes y D.Cahoon, 1999. Pattern and process of land loss in the Louisiana coastal zone: an analysis of spatial and temporal patterns of wetland habitat change. p. 193-202. In: L.P. Rozas *et al.* (eds). *Symposium on Recent research in coastal Louisiana: natural system function and response to human influence. Louisiana Sea Grant Program*.
- Diario Oficial Federal (DOF), 2004. Ley de Bienes Nacionales. 20 05 2004.
- Dukes, J.S., y H.A. Mooney, 1999. Does global change increase the success of biological invaders? *TREE*, 14 (4): 135-139.
- Ellison, J.C., y D.R. Stoddart, 1991. Mangrove ecosystem collapse during predicted sea level rise: Holocene analogues and implications. *J. Coastal Res.*, 7: 151-165
- Estrategia Nacional de Cambio Climático México, 2007. (http://www.semarnat.gob.mx/quees-semarnat/politica_ambiental/cambioclimatico/Documents/enac/sintesis/sintesisjecutiva/Estrat_nal_Sintesis%20espa%C3%B1ol.pdf).
- Feagin, R.A., D.J. Sherman, y W.E. Grant, 2005. Coastal erosion, global sea-level rise, and the loss of sand dune plant habitats. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3 (7): 359-364.
- Field, J.C., D.F. Boesch, D. Scavia, R. Budde-meier, V.R. Burkett, D. Cayan, M. Fogarty, M. Harwell, R. Howarth, C. Mason, L.J. Pietrafesa, D. Reed, T. Royer, A. Sallenger, M. Spranger y J.G. Titus, 2000. Potential consequences of climate. Variability and change on coastal Areas and marine resources. National Assessment Synthesis Team (Ed) *Climate Change Impacts on the United States. The Potential Consequences of Climate Variability and Change: overview. Foundation Report. Cambridge University Press, Cambridge*, 154 p.
- Flores-Verdugo, F., F. Gonzáles-Farías, D.S. Zamorano, y P. Ramirez-García, 1992. Mangrove ecosystems of the Pacific coast of Mexico: Distribution, structure, litterfall and detritus dynamics. p. 269-288. In: U. Seeliger (Ed.). *Coastal Plants Communities of Latin America. Academic Press*.
- Flores-Verdugo, F., P. Moreno-Casasola, C. M. Agraz- Hernández, H. López Rosas, D. Benítez Pardo, y A.C. Travieso-Bello, 2007. La topografía y el hidroperiodo: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros. *Boletín Sociedad Botánica de México* 80 (Suplemento): 33-47.
- Godfrey, P.J., 1977. Climate, plant response and development of dunes on barrier beaches along the US east coast. *International Journal of Biometeorology*, 21 (3): 203-316.
- Gornitz, V., S. Couch y E. K. Hartig, 2001. Impacts of sea level rise in the New York City metropolitan area. *Global and Planetary Change*, 32 (1): 61-88.
- Hansom, J.D., 2001. Coastal sensitivity to environmental change: a view from the beach. *CATENA*, 42 (2-4): 291-305.
- Hernández, M., 2005. Distribución de tres especies de manglar en relación al hidroperiodo y salinidad intersticial en el Estero de Urías,

- Mazatlán. Sinaloa. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 83 p.
- Hesp, P., 2000. Coastal sand dunes. Form and function. CDVN Technical Bulletin no. 4. Massey University. Nueva Zelanda. 29 p.
- Hogarth, P.J., 2007. The Biology of Mangroves and Seagrasses. Second Edition. Oxford University Press. 273 p.
- Infante, M. D., 2004. Germinación y establecimiento de *Annona glabra* (Annonaceae) y *Pachira aquatica* (Bombacaceae) en humedales, La Mancha, Actopan, Ver. Tesis de Maestría. Maestría en Ecología y Manejo de Recursos. Instituto de Ecología A.C., Xalapa. Ver.
- Infante M., D., y P. Moreno-Casasola, 2005. Effect of in situ storage, light, and moisture on the germination behavior of two wetland trees: *Annona glabra* (Annonaceae) and *Pachira aquatica* (Bombacaceae). *Aquatic Botany* (83) 3: 206-218.
- Kovacs, J. M., J. Melczwski, y F. Flores-Verdugo, 2004. Examining local ecological knowledge of hurricane impacts in a mangrove forest using an analytical hierarchy process (AHP) approach. *J. Coastal Research*, 20 (3): 792-800
- López-Rosas, H., 2007. Respuesta de un humedal transformado por la invasión de la graminéa exótica *Echinochloa pyramidalis* (Lam.) Hitchc. & A. Chase a los disturbios inducidos (cambios en el hidropereodo, apertura de espacios y modificación de la intensidad lumínica). Doctorado en Ecología y Manejo de Recursos. Tesis Doctoral. Instituto de Ecología A.C., Xalapa. Ver.
- Martínez, M.L., y P. Moreno-Casasola, 1996. Effects of burial by sand on seedling growth and survival in six tropical sand dune species. *J. Coastal Research* 12 (2): 406-419.
- Martínez, M.L., J. B. Gallego-Fernández, J. García-Franco, C. Moctezuma, y C. D. Jiménez, 2006. Assessment of coastal dune vulnerability to natural and anthropogenic disturbances along the Gulf of Mexico. *Environmental Conservation*, 33 (2): 109-117.
- 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: 254-272
- Michener, W.K, E.R. Blood, K.L. Bildstein, M.M. Brinson, y L.R. Gardner, 1997. Climate change, hurricanes and tropical storms, and rising sea level in coastal wetlands. *Ecological Applications*, 7 (3): 770-801.
- Millenium Ecosystem Assessment, 2005. Organización de las Naciones Unidas. www.MAweb.org
- Mitsch, W.J., y J.G. Gosselink, 2000. Wetlands. John Wiley & Sons. N. York. 30. Edición. 920 pp.
- Moreno-Casasola, P., I. Espejel, S. Castillo, G. Castillo-Campos, R. Durán, J.J. Pérez-Navarro, J.L. León, I. Olmsted, y J. Trejo-Torres, 1998. Flora de los ambientes arenosos y rocosos de las costas de México. p. 177-258. En: G. Halffter, G. (ed.). Biodiversidad en Iberoamérica. Vol. II. CYTED- Instituto de Ecología A.C.
- Moreno-Casasola, P., 2004. Playas y dunas del Golfo de México. Una visión de su situación actual. p. 491-520. En: M. Caso, I. Pisanty y E. Ecurra (comp.). Diagnóstico ambiental del Golfo de México. Semarnat (INE)-INECOL-Harte Research Institute for Gulf of México Studies. .
- Moreno-Casasola, P., E. Peresbarbosa, y A.C. Travieso-Bello (eds), 2006. Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal. Instituto de Ecología A.C.-Comisión Nacional de Areas Naturales Protegidas, SEMARNAT- Gobierno del Estado de Veracruz. Xalapa, Ver., México. Volumen I, II y III. 1251 p.
- Olmsted, I., 1993. Wetlands of Mexico. p. 637-678. En: D.F. Whigham, D. Dykyjová y S. Hejný, (eds.) Wetlands of the world I: inventory, ecology and management. Handbook of Vegetation Science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

- Ortiz-Pérez, M.A. 1994. Repercusiones del ascenso del nivel del mar en el litoral del Golfo de México: un enfoque geográfico de los problemas del cambio global. p. 191-196. En: C. Gay, L.G. Ruiz, M. Imaz, C. Conde y O. Sánchez (eds.) *Memorias del 1er Taller de estudio del país: México. México ante el cambio global. Memorias. Cuernavaca 18-22 abril, 1994. Instituto Nacional de Ecología, UNAM.*
- Ortiz-Pérez, M.A., y R.L.M. Espinosa, 1991. Clasificación geomorfológica de las costas de México. *Geografía y Desarrollo*, 2 (6): 2-9.
- Ortiz-Pérez, M.A., C. Valverde y N.P. Psuty. 1996. The impacts of sea level rise and economic development on the low-lands of the Mexican Gulf coast. p. 459-470. En: A.V. Botello, J.L. Rojas-Galaviz, J.A. Benítez y D. Zárate (eds.) *Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX. Serie Científica 5.* 459-470.
- Ortiz-Pérez, M.A., y G. de La Lanza Espino. 2007. Diferenciación del espacio costero de México: un inventario regional. Instituto de Geografía. Serie Textos Universitarios. UNAM. 138 p.
- Pennington, T.D., y J. Sarukán, 1968. Manual para la identificación de campo de los principales árboles tropicales de México. Naciones Unidas. FAO. Librería del Congreso, México, D.F. 413 p.
- Pethick, J., 2001. Coastal management and sea-level rise. References and further reading may be available for this article. To view references and further reading you must purchase this article. *CATENA*, 42 (2-4): 307-322
- Ruiz-Fernández, A.C., F. Páez-Osuna, M. Frigmani, T. Tesi, y H. Bojórquez-Leyva, 2005. Recent Sedimentary History of Organic Matter and Nutrient Accumulation in the Ohuira lagoon, NW Mexico. *Environmental Pollution* 00: 00-00.
- Saenger, P., 2002. *Mangrove Ecology, Silviculture and Conservation.* Kluwer Academic Publishers. p. 291-294.
- Schlacher, T.A., J. Dugan, D.S. Schoeman, M. Lastra, A. Jones, F. Scapini, A. McLachlan y O. Defeo, 2007. Sandy beaches at the brink. *Diversity and Distributions*, 13 (5): 556-560.
- Snedaker, S.C., J.F. Medder, M.S. Ross, y R.G. Ford, 1994. Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise: Holocene analogues and implications. *J. Coastal Res.*, 10: 497-498
- Technical Report Series TR-E-6 Internat. COSAT. Resour. Manag. Proj. Univ. Rhode Island, NY., Gob. of Ecuador and USAID. p. 121-139 .
- Tomlinson, P.B., 1986. *The botany of Mangroves.* Cambridge University Press. 450 p.
- Travieso-Bello, A.C., P. Moreno-Casasola, y A. Campos, 2005. Efecto de diferentes manejos pecuarios sobre el suelo y la vegetación en humedales transformados a pastizales. *Interciencia*, 30 (1):12-18.
- Turner, E., 1991. Factors affecting the relative abundance of shrimp in Ecuador. In: S. Olsen, and L. Arriaga (Eds.) *A sustainable shrimp mariculture industry for Ecuador.*
- Watson, R.T., D.L. Arbritton, T. Barker, I.A. Bashmakov, O. Canziani, R. Chris, et al., 2001. *Climate Change 2001: Synthesis Report. Intergovernmental Pannel on Climate Change, Genova.*
- Yetter, J. Ch., 2004. Hydrology and geochemistry of freshwater wetlands on the Gulf coast of Veracruz, México. Thesis Master of Science. University of Waterloo, Ontario, Canada. 168 p.

Gallegos Martínez, M.E., 2010. Efectos del cambio climático sobre las praderas de pastos marinos, p. 189-210. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Efectos del cambio climático sobre las praderas de pastos marinos

M. E. Gallegos Martínez

RESUMEN

Los pastos marinos crecen en la zona costera donde sostienen buena parte de la productividad, son hábitat de numerosas especies de especies y tienen un alto valor económico por las múltiples funciones y valor ecológico que proporcionan al ecosistema. La biodiversidad dentro de las comunidades de pastos marinos es mayor en órdenes de magnitud que en las áreas adyacentes desprovistas de vegetación. En las costas mexicanas se desarrollan las especies *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii*, *Halodule beaudettei*, *Halophila engelmanni*, *Halophila decipiens*, y *Ruppia maritima*. Las acciones humanas en la zona costera se han incrementado durante las últimas décadas, ocasionando graves impactos en los pastos marinos a nivel mundial. Se estima que 51 000 km² de pastos marinos han desaparecido en las costas del mundo durante los últimos 127 años y su tasa de disminución se ha incrementado a partir de los 80s. Las causas de su disminución son tanto de tipo natural como antropogénicas. A nivel mundial los pastos marinos son los que experimentan las amenazas más serias a la biodiversidad marina debido a que las acciones que se realizan en la zona costera, han alterado significativamente su hábitat ocasionando modificaciones en el régimen hidrológico, eutrofización, erosión, sedimentación, propóleo de los fondos, acuacultura, sobrepesca, e incremento de enfermedades. En México no se conoce el área que ocupan los pastos marinos, ni su composición específica en los sitios en los que se desarrollan, ni se cuenta con los estudios ecológicos y biológicos suficientes para enfrentar los efectos del CCG. Es urgente impulsar programas que permita entender los procesos globales que operan en las comunidades de los pastos marinos y su entorno y aplicar este conocimiento para desarrollar programas de manejo efectivo de este valioso recurso.

Palabras clave: Pastos marinos, cambio climático.

INTRODUCCIÓN

Durante siglos el crecimiento económico se ha basado en actividades industriales que consumen combustibles fósiles. No obstante, cada vez es más claro que dicho crecimiento resulta insostenible, entre otras razones porque ha dado lugar al calentamiento de la tierra.

El análisis de la información histórica sobre el cambio climático, presentado en la reunión de las Naciones Unidas en 2005, puntualiza que en los últimos 200 años la concentración de dióxido de carbono había subido de 280 a 368 partes por millón, es decir, a 368 moléculas de dióxido de carbono por cada millón de moléculas en el aire, con aumentos semejantes en los casos del metano y el óxido nitroso (figura 1). Tomando como base diversos supuestos, demográficos, sociales, económicos y tecnológicos, se presentaron proyecciones sobre las futuras concentraciones de gases de efecto invernadero. Para el año 2100, los resultados propuestos oscilan entre 540 y 970 partes por millón.

También se proyectó que entre 1990 y 2050 la temperatura aumentaría entre 0,8°C

y 2,6°C, y para el año 2100 entre 1,4°C y 5,8°C. Además, durante el siglo XXI habría cambios en los niveles de precipitación, tanto aumentos como disminuciones, del orden del 5% al 20%, junto con mayores y más bruscas variaciones climáticas. Se han generado diversos modelos en donde los datos incorporados ayudan a prever los efectos de los gases de efecto invernadero en el cambio climático y a comprender mejor los efectos de este cambio en los sistemas naturales y en la actividad humana. Uno de estos modelos se presentó en el año 2000 en el Informe especial sobre escenarios de emisiones (Special Report on Emission Scenarios) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (figura 2). Se deduce que las emisiones mundiales aumentarán al menos hasta mediados del siglo XXI, así como la temperatura y el nivel del mar, después de lo cual las emisiones podrían comenzar a disminuir, si el mundo toma medidas desde este momento, de lo contrario el modelo propuesto puede tener proyecciones más preocupantes.

IMPORTANCIA DE LOS PASTOS MARINOS

Los pastos marinos son un grupo único de plantas con flores que se han adaptado a pasar todo su ciclo de vida totalmente sumergidos, ya que han desarrollado adaptaciones morfológicas, fisiológicas y ecológicas únicas. Tienen un eficiente sistema de anclaje constituido por rizomas y raíces que crecen horizontalmente enterradas en el sustrato y que les permite soportar el efecto de las mareas y

el oleaje. Obtienen los nutrientes disueltos en el agua y en los sedimentos mediante las hojas y raíces. Las hojas absorben CO₂ y otras formas de carbono orgánico disuelto, principalmente iones bicarbonato. Tienen un eficiente sistema de transporte gaseoso interno que les permite vivir en ambientes anóxicos (den Hartog, 1970; Les *et al.*, 1997; Borum *et al.*, 2005).

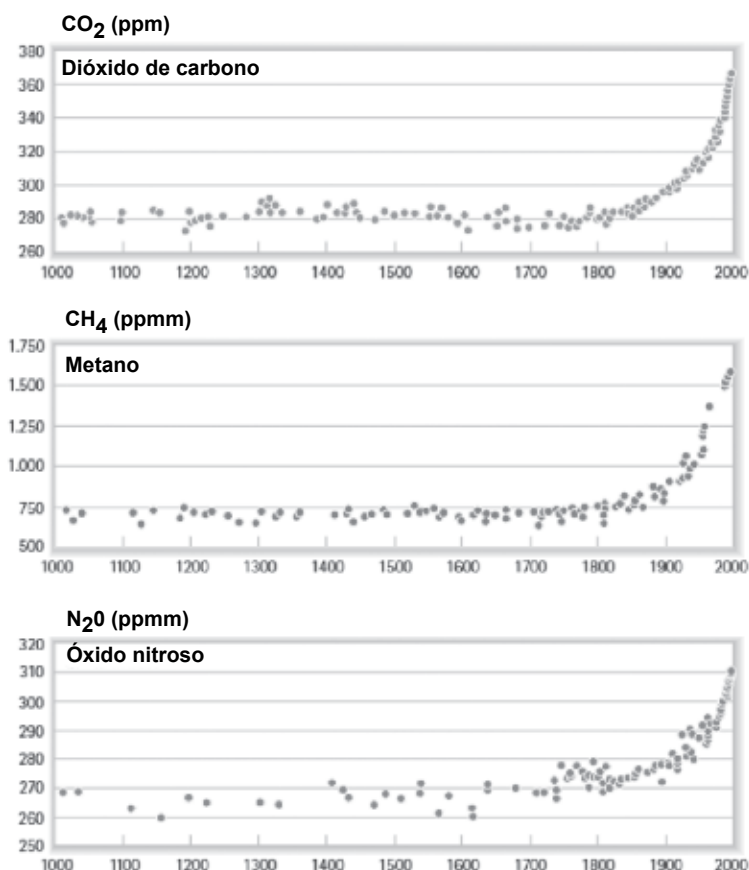


Figura 1. Influencia humana en la atmósfera durante la era industrial. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (2004).

Forman haces verticales con hojas muy especializadas que tienen cutícula muy reducida y la epidermis que es el principal tejido fotosintético, carece de estomas. Son plantas modulares que se reproducen asexual y sexualmente formando flores y frutos. Aproximadamente el 75 % de las especies son dioicas, tienen eficientes mecanismos de polinización hidrófila y los frutos pueden ser dispersados en forma biótica y abiótica.

Estas comunidades tienen gran importancia en los ecosistemas costeros ya que propor-

cionan alimento a numerosas especies de herbívoros, constituyen hábitats de anidamiento, reproducción, protección y desarrollo de numerosas especies de invertebrados y vertebrados de valor comercial y recreativo (Beck *et al.*, 2001).

Se les considera excelentes protectores de la línea de costa ya que con sus hojas, rizomas y raíces modifican las olas y corrientes, atrapan los sedimentos, almacenan y filtran los aportes de nutrientes al océano con lo cual influyen en las condiciones físicas, químicas

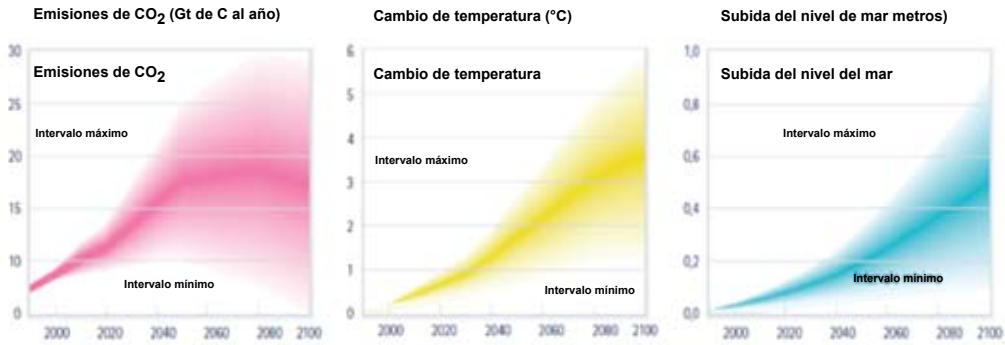


Figura 2. Efectos previstos de las emisiones en la temperatura y el nivel del mar. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (2004).

y biológicas (Hemminga y Duarte, 2000). Los pastos marinos y sus macro y micro epifitas asociadas, son tan o más productivas que muchos de los cultivos terrestres (Duarte y Chiscano, 1999). La biodiversidad dentro de las comunidades de pastos es mayor en órdenes de magnitud que en las áreas adyacentes desprovistas de vegetación.

Duarte y Cebrian (1996), escalaron la producción calculada de los pastos marinos considerando su cobertura a nivel global, y estimaron que la contribución a la producción primaria marina es de 0.6×10^{15} g C yr⁻¹, o el 1.13% de la producción primaria marina total. Duarte y Chiscano (1999), calcularon una producción primaria neta de $1012 \text{ g DW}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ en donde incluyeron el aporte de las raíces, las cuales no se habían considerado en las estimaciones previas reportadas en la literatura, lo cual los coloca como uno de los ecosistemas más productivos de la biosfera.

Mientras la producción fitoplanctónica es consumida en el mar, la de los pastos marinos es almacenada en los sedimentos o exportada a los ecosistemas adyacentes. Son la fuente de carbono que es exportado a las profundidades

en mar abierto, en donde es el suministro más importante de materia orgánica en ambientes limitados en alimento (Suchanek *et al.*, 1985). Duarte y Cebrian (1996) y Duarte y Chiscano (1999), calcularon que anualmente se almacena en los sedimentos marinos 0.16×10^{15} g de C yr⁻¹ o el 16 % constituyendo un sumidero o reservorio de carbón para el ecosistema que es secuestrado a la atmósfera (Duarte *et al.*, 2005). Los pastos marinos aportan energía a las cadenas tróficas de las comunidades adyacentes, como son los pantanos salados o marismas en las regiones templadas, y a los manglares y corales en las tropicales, las cuales a su vez sostienen una gran riqueza faunística (Beck *et al.*, 2001).

Costanza *et al.* (1997) señalan que los pastos marinos proporcionan numerosos servicios ecológicos al ecosistema y los valoraron en 19,004 USD/ha/año, el cual resultó ser mayor que el que proporcionan otros ecosistemas tanto marinos como terrestres. Wright y Jones (2006), mencionan que los pastos marinos ejercen una gran influencia en las condiciones ambientales físicas, químicas y biológicas en las áreas costeras actuando como ingenieros

ecológicos (*sensu*). La susceptibilidad de los pastos marinos a los estresores y el gran valor de los servicios que proporcionan a los ecosistemas costeros ha llevado a la US National Estuarine Eutrophication Assessment ha utilizar a los pastos marinos como uno de los cinco indicadores de contaminación en la zona

costera (Brick *et al.*, 2003). Orth *et al.* (2006) proponen un diagrama de las funciones y servicios que proporcionan los ecosistemas de pastos marinos tropicales y templados y los principales factores que están ocasionando su pérdida (figura 3).

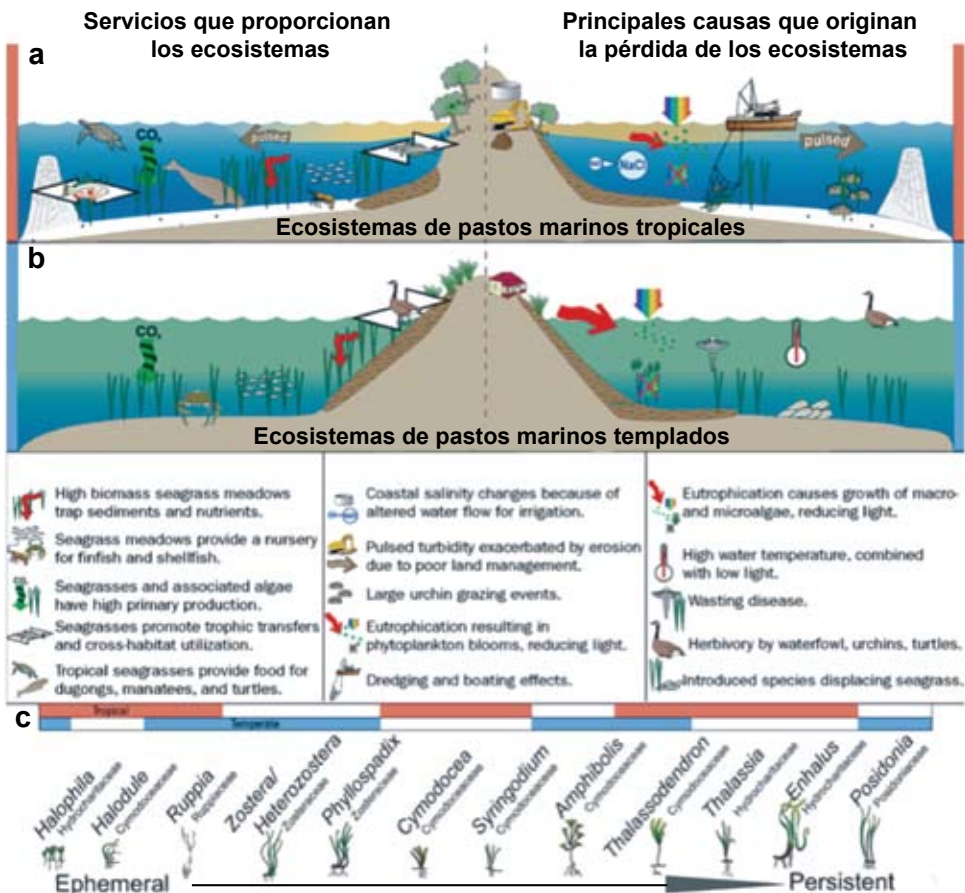


Figura 3. Diagrama conceptual de los ecosistemas de pastos marinos (a) tropicales y (b) templados, se detallan los servicios que proporcionan los ecosistemas de pastos marinos y las principales causas que originan la pérdida de los mismos. Se ejemplifican los géneros de pastos marinos templados y tropicales y los nombre de las familias, desde los efímeros hasta los permanentes. Tomado de Orth *et al.*, 2006.

TAXONOMÍA

Los pastos marinos son un grupo con poca diversidad taxonómica ya que comprenden aproximadamente 66 especies comparadas con las 250,000 de las angiospermas terrestres (Hartog y Kuo, 2006). Pertenecen al orden Helobiae (Tomlinson y Posluszny, 2001) y de acuerdo a den Hartog y Kuo (2006) están constituidos por 14 géneros y 66 especies agrupadas en 6 familias que se distribuyen en todas las costas del mundo, excepto en las polares. Estas familias son las Zosteraceae, Cymodoceae, Posidonaceae, Hydrocharitaceae, Ruppiaceae, y Zannichelliaceae, lo cual es aún tema de debate entre ecólogos y taxónomos.

El escaso número de especies que conforman la flora de pastos marinos ha llevado a diversos autores (den Hartog y Kuo, 2006) ha sugerir que tienen un origen reciente, pero los fósiles de la fauna asociada encontrados sugiere que aparecieron desde las primeras etapas de evolución de las angiospermas. Den Hartog (1970) señala que existe evidencia de que

las angiospermas colonizaron el medio marino hace 100 millones de años, lo cual apoya el que aparecieron desde las primeras etapas de evolución de las angiospermas.

Con respecto a cuales son los ancestros de los pastos marinos, se ha propuesto que descienden de formas dulceacuícolas así como de mixohalinas, pero no existe la suficiente evidencia fósil al respecto. Recientemente se han utilizado las herramientas que proporcionan la genética molecular para tratar de clarificar su origen. Les *et al.* (1997) examinaron la secuencia de genes de los cloroplastos en varias especies de pastos marinos y plantearon la hipótesis de un origen pofililético. Larkum y den Hartog (1989) y Kuo y den Hartog (2000, 2001), proponen que los pastos marinos son un grupo ecológico más que taxonómico, lo cual significa que las familias de pastos marinos no están cercanamente relacionadas y que la transición evolutiva a partir de distintos ancestros pudo haberse llevado a cabo varias veces.

HÁBITAT DE LOS PASTOS MARINOS

Los pastos marinos se desarrollan en todas las costas del mundo excepto en las polares. Crecen desde la zona intermareal hasta profundidades de 20 m y el límite al que pueden desarrollarse esta en función de la penetración de la luz y de los requerimientos de luz de cada especie. Estos requerimientos de acuerdo con (Dennison *et al.*, 1993) están definidos como el porcentaje de la irradiancia superficial, cuyo rango es de 4% y 29% con un prome-

dio de 11% de irradiancia incidente debajo de la superficie del agua. Estos requerimientos son mayores que para otros organismos marinos autótrofos como las macro y microalgas (Duarte, 1995). La luz es el factor abiótico que controla su productividad y distribución espacial. La cantidad de luz o irradiancia que llega a los pastos determina el crecimiento diario y la productividad estacional, pero este puede verse alterado por cambios en factores

ambientales como profundidad del agua, turbidez, latitud y las condiciones superficiales del agua.

Las comunidades que se desarrollan en la zona intermareal están expuestas a desecación durante las variaciones de la marea y si la exposición es prolongada, pueden experimentar fotodaño por irradiancia. Los niveles elevados de UV ocasionan estrés y reducen la fotosíntesis (Dawson y Dennison, 1996). Algunas especies de pastos desarrolla pigmentos rojos en sus hojas para bloquear la acción de los UV.

La temperatura y salinidad son factores abióticos importantes que también controlan la producción de los pastos marinos. La tolerancia a la temperatura varía ampliamente entre las especies tropicales y templadas. Se propone que si en las zonas templadas la temperatura excede los 25°C afectará negativamente a las especies y valores por arriba de los 43°C a las especies tropicales (Campbell *et al.*, 2006; Díaz-Almela *et al.*, 2007; Ehlers *et al.*, 2008). El rango de salinidad a las que los pastos marinos sobreviven va de 5 PSU a 60 PSU (Walker, 1989), pero algunas especies

pueden tolerar valores menores (0 PSU) y de hasta 140 PSU.

Los pastos marinos pueden crecer en substratos, arenosos, limosos, carbonatados y rocosos. El exceso de materia orgánica en los sedimentos puede transformar el hábitat dificultando el desarrollo de los pastos marinos. De acuerdo con Hemminga (1998) el exceso de materia orgánica estimula la actividad bacteriana, con lo cual aumenta la capa anóxica de los sedimentos cerca de la superficie y permite el desarrollo de comunidades bacterianas, que producen y acumulan compuestos fitotóxicos como el sulfuro y el metano. Los pastos marinos pueden contrarrestar este estrés mediante el bombeo de oxígeno a través de sus raíces hacia los sedimentos en donde la rizósfera se mantiene relativamente oxidada. Los pastos pueden crecer en sedimentos con un rango en el potencial redox de altamente oxidado a moderadamente reducido (>100mV). Las elevadas concentraciones de nitratos y amonio en la columna de agua son factores que también pueden limitar el hábitat de los pastos marinos (Hemminga y Duarte, 2000).

DIVERSIDAD DE PASTOS MARINOS EN MÉXICO

Las costas mexicanas cuentan con una gran riqueza florística a nivel de familias y géneros, ya que se desarrollan 3 familias de 6 y 7 géneros de 14 de los reportados a nivel mundial. En lo que respecta a especies, crecen 9 del total de 66 especies reportadas a nivel mundial. Biogeográficamente la mayor diversidad de especies se localiza en las costas del Pacífico Oriental (den Hartog y Kuo, 2006; Short *et al.*, 2007).

Las especies mexicanas están agrupadas en las familias Zosteraceae (*Zostera marina*, *Phyllospadix scouleri* y *Phyllospadix torreyi*), Cymodoceae (*Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii*, *Halodule beaudettei*) e Hydrocharitaceae (*Thalassia testudinum*, *Halophila engelmanni*, *Halophila decipiens*) (tabla 1).

Short *et al.* (2007) proponen un modelo de distribución en biorregiones con base en los rangos de distribución de las especies y la

Tabla 1. Lista de especies de Pastos Marinos en México de acuerdo a la clasificación de den Hartog y Kuo 2006.

ZOSTERACEAE	HYDROCHARITACEAE
<i>Zostera</i> Linnaeus	<i>Thalassioideae</i>
<i>Zostera</i> subgenero <i>Zostera</i>	<i>Thalassia</i> Banks ex König in König et Sims
<i>Zostera marina</i> Linnaeus	<i>Thalassia testudinum</i> Banks ex König in König et Sims
<i>Phyllospadix</i> W.J. Hooker	
<i>Phyllospadix scouleri</i> W.J. Hooker	<i>Halophiloideae</i>
<i>Phyllospadix torreyi</i> S. Watson	<i>Halophila</i> Du Petit Thouars
	<i>Halophila</i> sect. <i>Halophila</i>
	<i>Halophila decipiens</i> Ostenfeld
CYMODOCACEAE	
<i>Halodule</i> Endlicher	<i>Halophila</i> sect. <i>Americanae</i> Ostenfeld
<i>Halodule beaudettei</i> (den Hartog) den Hartog	<i>Halophila engelmanni</i> Ascherson
<i>Halodule wrightii</i> Ascherson	
<i>Syringodium</i> Kutzing in Hohenacker	
<i>Syringodium filiforme</i> Kutzing in Hohenacker	

influencia de la temperatura, ubicando a las especies mexicanas en la biorregión del Atlántico tropical.

En las Costas del Golfo de México y en el Caribe, la flora de pastos marinos esta representada por las especies *Thalassia testudinum*, *Halophila engelmanni*, *Halophila decipiens*, *Syringodium filiforme* y *Halodule wrightii* (Short *et al.*, 2007; den Hartog y Kuo, 2006). Crecen en diversos tipos de sedimentos: arenosos, carbonatados, rocosos, arenoso/rocoso y lodosos formando extensas poblaciones monoespecíficas y/o mixtas que se distribuyen desde la zona intermareal hasta profundidades de 8 ó 10 m lo cual representa una enorme extensión de la zona costera y desafortunadamente no se cuenta con mapas precisos de su distribución, composición específica, condiciones ecológicas prevalecientes, ni del área que ocupan.

En las costas del Golfo de México y Caribe Mexicano *Halodule wrightii* y *Syringodium filiforme* son consideradas especies pioneras (Gallegos *et al.*, 1994) y *Thalassia testudinum* (figuras 4 y 5) la comunidad clímax (Gallegos *et al.*, 1993; Marbà *et al.*, 1996; Van Tussenbroek *et al.*, 2006). Es posible encontrar pequeños manchones de *Halophila engelmanni* en zonas de 5 a 10 m de profundidad, en fondos arenosos o rocosos y aguas claras (van Tussenbroek, en prensa). (figuras 4 y 5).

En el Pacífico se localizan las especies *Zostera marina*, *Phyllospadix scouleri*, *Phyllospadix torreyi* y en el Mar de Cortéz *Halodule beaudettei* (den Hartog y Kuo, 2006).



Figura 4. Pradera de *Thalassia testudinum*.

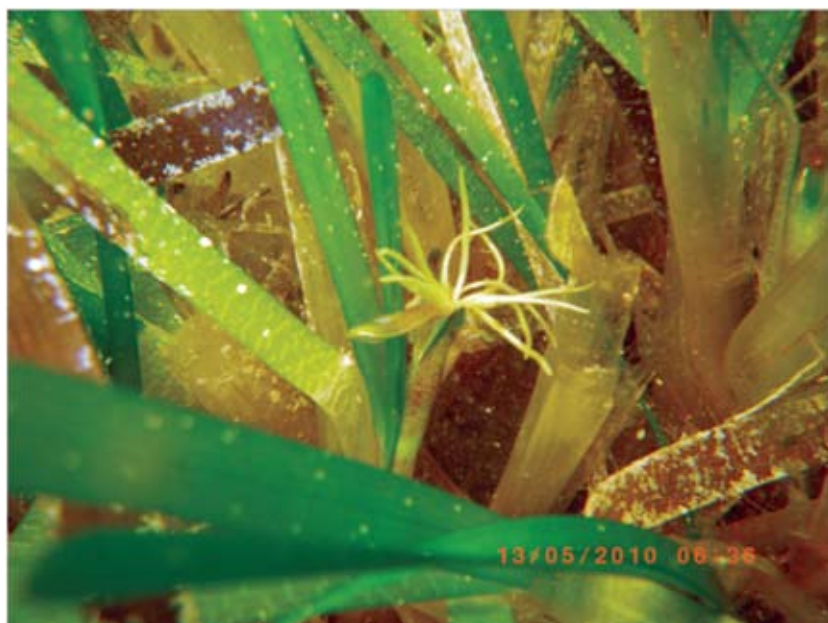


Figura 5. Flores femeninas de *Thalassia testudinum*.
Peten Neyac, Campeche.

IMPACTOS DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS Y DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

Se cuentan con investigaciones a nivel mundial que documentan los impactos que las actividades humanas han ocasionado en la zona costera y en sus ecosistemas. Estos impactos han ocasionado la eutrofización de las aguas debido al incremento en el aporte de nutrientes provenientes de los cultivos o del vertido de aguas negras sin tratamiento previo (Fourqurean *et al.*, 2003). Esto ha favorecido el desarrollo de zonas de hipoxia, anoxia e incrementado la frecuencia de blooms fitotóxicos (Kemp *et al.*, 2005; Rabalais y Nixon, 2002.). La tala de la vegetación tierras arriba o circundante a la zona costera, ha cambiado la dinámica sedimentaria generando procesos de erosión y sedimentación. El uso de artes de pesca y motores han modificado profundamente los fondos en muchas áreas de la zona costera, como en Florida, estados Unidos (Durako *et al.*, 1992). Las construcciones y dragados alteran la redistribución de los sedimentos, la hidrodinámica, los ciclos biogeoquímicos y modifican los habitats naturales (Erftemeijer and Lewis, 2006) . El cambio de uso del suelo para la construcción permanente de infraestructura portuaria, pesquera, petroquímica o acuicola, elimina en forma permanente a los ecosistemas que crecen en la zona costera.

A estos impactos se suman los ocasionados por el Cambio Climático Global (CCG). El CCG tienen una acción directa en los océanos los cuales cubren dos terceras partes de las superficie terrestre juegan un papel vital en los ciclos biogeoquímicos, contribuyen de manera importante en la biodiversidad del planeta y proveen de recursos vitales a millo-

nes de personas en todo el mundo (Björk *et al.*, 2008). Estos impactos han favorecido el crecimiento de especies exóticas (Ruíz *et al.*, 2000), incremento de la herbivoría y de enfermedades. Al menos 28 especies no nativas se han establecido en las comunidades de pastos marinos a nivel mundial de los cuales el 64 % se ha documentado que han ocasionado efectos negativos. (figuras 6 y 7).

Los océanos absorben dióxido de carbono de la atmósfera (CO_2) lo que ocasiona cambios químicos volviéndolos más ácidos (debido a la disminución del pH). En los últimos 200 años los océanos han absorbido aproximadamente la mitad del CO_2 producido por la quema de combustibles fósiles y producción de cemento. Los cálculos efectuados en la superficie del océano indican que esta absorción de CO_2 ha reducido el pH de la superficie en 0.1 unidades que equivalen al 30% de incremento de los iones hidrógeno (Ocean Acidification. Royal Society). Si las emisiones globales de CO_2 generadas por las actividades humanas continúan en aumento, el promedio del pH de los océanos tendrá unidades de 0.5 lo que equivale a tres ordenes de magnitud en el incremento de iones hidrógeno para el año 2100. Este valor del pH, probablemente sería el menor registrado en cientos de miles de años y esta tasa de cambio es quizá cien veces mayor que la que se haya registrado en este periodo. La escala de cambio puede variar regionalmente y afectar la magnitud de los efectos biológicos (Ocean Acidification. Royal Society).

La acidificación de los océanos se conside-



Figura 6. Praderas de *Thalassia testudinum* con varias especies de *Caulerpa* creciendo dentro de ella. Costa de Campeche.

Presiones y respuestas de los pastos marinos a través del tiempo

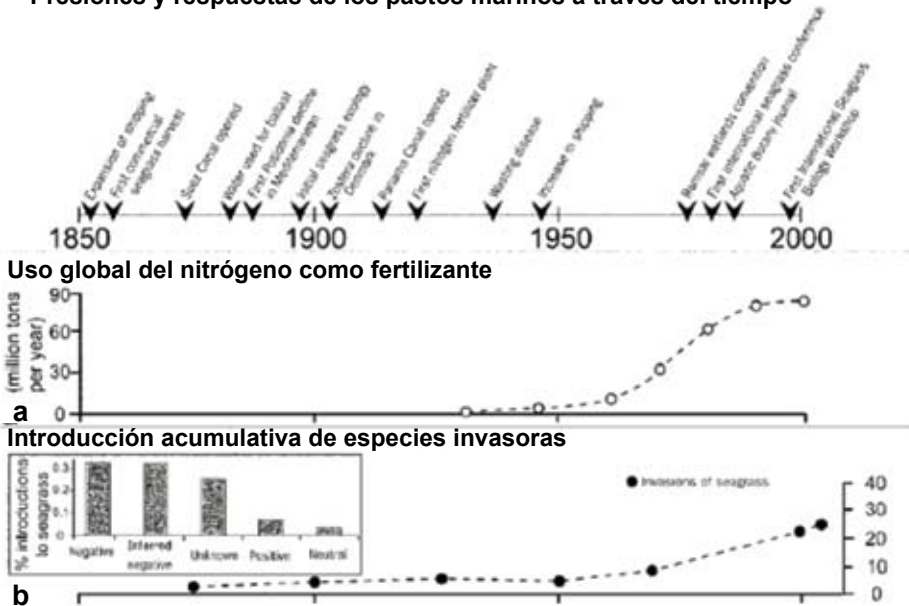


Figura 7. Se muestra las presiones sobre las poblaciones de pastos marinos y sus respuestas durante los últimos 150 años. Se muestra el uso de (a) fertilizantes nitrogenados (Frink *et al.*, 1999) y (b) especies introducidas en el medio marino (Ruíz *et al.*, 2000), (c) número de casos reportados de pérdida de pastos marinos en regiones tropicales y templadas desde 1965, (d) áreas marinas protegidas (basado en Spalding *et al.*, 2003), y (e) acciones de monitoreo (Duarte *et al.*, 2004). Tomado de Orth *et al.* 2006.

ra que será irreversible durante el tiempo de nuestros ciclo de vida. Tomaría miles de años para que la química del océano regresara a las condiciones similares a la de los tiempos pre industriales (hace aproximadamente 200 años). La magnitud de la acidificación de los océanos puede ser predicha con mucha exactitud, pero el impacto de esta acidificación en los organismos marinos y el ecosistema es menos exacto debido a las particularidades fisiológicas de los organismos, pueden verse afectados unos más que otros.

Los océanos juegan un papel muy importante en el ciclo global del carbono y en el sistema climático de la tierra. Existen interacciones potenciales y retroalimentación entre los cambios en el estado de los océanos (como el pH) y los cambios del clima global y la quími-

ca atmosférica. Los cambios en la química de los océanos puede reducir su habilidad para absorber más CO₂ de la atmósfera, la cual a su vez puede afectar la tasa y escala del calentamiento global (Ocean Acidification. Royal Society).

Aunque suena catastrófico, los océanos han empezado a calentarse y acidificarse, se han incrementado el número y tamaño de las zonas eutrofizadas, hipóxicas y anóxicas, la mezcla vertical de las aguas oceánicas muestran ya señales de disminución y muchas de las pesquerías mas importantes han colapsado y a la fecha no se han podido recuperar (Jackson, 2008). La degradación ecológica en las plataformas continentales es tan grave como en los estuarios y zonas costeras, y las causas son similares aunque en algunos casos en pro-

porciones diferentes.

ZONA COSTERA

La zona costera es la franja del planeta en donde se pone en contacto la tierra, la atmósfera y el agua dulce o salada y es considerada una de las zonas más productivas a nivel mundial. Aunque comprende sólo el 1-2% del área oceánica, sus aguas aportan aproximadamente el 20% de la producción primaria oceánica (Jackson, 2008) el suministro del 50% de la producción de peces marinos. Las aguas de las zonas costeras son productivas porque en ellas confluyen los aportes de nutrientes terrestre y marinos. Sin embargo, en los últimos años estos aportes se han incrementado debido al crecimiento acelerado de las poblaciones humanas. Estimaciones recientes muestran que el 20% de las poblaciones humanas viven dentro de los 30 Km. de costas y este porcentaje

parece que se incrementará en el futuro.

En la reunión del Panel de Cambio Climático se informó que en los últimos años el nivel del mar se ha elevado 10-25 cm y se propone que en el próximo siglo el nivel subirá de 15 a 95 cm, con un estimado óptimo de 50 cm. El incremento de la temperatura acelerará el derretimiento de las áreas polares generando un incremento en la elevación media de los océanos. La variación media de las mareas y su altura se modificaran afectando la velocidad de las corrientes, la profundidad del agua, así como la variación y distribución de la salinidad. Los cambios en los flujos de las mareas puede alterar los patrones de circulación afectando la dinámica sedimentaria, erosionando algunas áreas y acelerando la deposición en

otras.

La interacción de todos los efectos generados por los impactos directos o indirectos de las actividades humanas, y los que se proyecta ocasionaran el CCG, dibujan un panorama difícil para las comunidades de pastos a nivel mundial. Walker *et al.* (2006), señalan que

los pastos se ven afectados por la interacción de los estresores que actúan a nivel global, regional y local además de operar a diferentes escalas de tiempo y espacio. En la mayoría de las regiones con pastos marinos se carece de estudios que examinen sus interacciones por lo que se desconoce la extensión y velocidad

con la que los pastos pueden verse afectados.

ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR

La elevación del nivel del mar impactará a los pastos marinos ya que puede reducir la cantidad de luz que requieren para realizar la fotosíntesis, disminuyendo por lo tanto su

productividad, alterando la estructura del hábitat y hasta la pérdida de la función. Los requerimientos de captación de luz son diferentes para cada especie y dependen de las condiciones topográficas, pero los 50 cm que se proyecta que se elevará el nivel del mar en este siglo puede reducir en 50% la disponibi-

lidad de luz y ocasionar una reducción de 30 a 40% en el crecimiento de los pastos marinos (Short y Neckles, 1999).

AUMENTO DE LA TEMPERATURA

Las proyecciones de aumento de la temperatura global es de 1-3.5 °C para finales de siglo, lo cual representa el mayor incremento de temperatura registrado durante los pasados 10 000 años. El aumento en la temperatura del agua puede afectar el metabolismo y balance de carbono, lo cual a su vez generará cambios en los patrones estacionales y geográficos de los pastos marinos, así como en la abundancia y distribución de las especies (Short y Neckles, 1999). El incremento de la temperatura también puede alterar la distribución y abundancia de los pastos al afectar la biología floral de las especies.

Los efectos directos del aumento de la tem-

peratura estarán en relación con la tolerancia individual de las especies y de la temperatura optima para que efectúen la fotosíntesis, respiración y crecimiento. Short y Neckles (1999) y Björk *et al.* (2008) señalan que el incremento en el promedio anual de la temperatura del agua, ocasionará una disminución en la producción y distribución de las especies que crecen en localidades con temperaturas por arriba de su óptimo de crecimiento, o cerca de su límite superior de tolerancia térmica.

El incremento en el aporte de nutrientes puede favorecer un crecimiento explosivo de las algas que se desarrollan entre los pastos marinos de tal forma que terminen por sustituirlos (Short y Wyllie-Echeverria, 1996; Valiela 1997). El incremento de la temperatura también puede ocasionar que las epifitas crez-

can explosivamente limitando la capacidad de captación de luz y disponibilidad de carbono

en las hojas de los pastos marinos. El efecto a largo plazo del calentamiento global puede

acelerar la eutrofización y la pérdida del hábitat de los pastos marinos en las aguas costeras poco profundas (Short y Neckles, 1999).

VARIACIÓN DE LA SALINIDAD

Tanto el aumento como la disminución de la salinidad regula el potencial osmótico y puede afectar a los pastos marinos al igual que a otras plantas vasculares que crecen en ambientes salinos. La resistencia a la salinidad o el grado en que las plantas pueden evitar el estrés salino y mantener el crecimiento, es resultado del desarrollo de diversas adaptaciones

fisiológicas. Se han observado que las células epidérmicas de las hojas de los pastos marinos se modifican en respuesta a la concentración salina, y en algunas especies han desarrollado ciertos mecanismos de exclusión de sales (Jagels, 1983). Estos consisten en adelgazar las células de la pared e incrementar el número de cloroplastos y mitocondrias en las células epidérmicas (Jagels y Barnabas, 1989).

INCREMENTO DEL CO₂

Son escasos los estudios efectuados acerca del efecto del incremento de CO₂ en las tasas fotosintéticas y de crecimiento en macroalgas y pastos marinos (Beer *et al.*, 2002).

La fotosíntesis en el agua siempre ocasiona un incremento en el pH. Esto se debe a que el CO₂ es tomado de la columna de agua de los protones asociado a los ácidos carbónicos. Debido a que las masas de agua que fluyen alrededor de las plantas es considerable, el incremento en el pH generalmente es pequeño y registrable dentro de las paredes de difusión de la superficie de las hojas. Sin embargo en áreas con gran densidad de plantas, el pH puede fluctuar significativamente debido a la toma de carbón para la fotosíntesis y la respiración. Recientemente se ha encontrado que el incremento diario del pH limita la fotosín-

tesis en algas y en pastos y estimula la calcificación de las algas calcáreas que crecen en las praderas de pastos.

El incremento en las concentraciones de CO₂ puede reducir en el futuro el promedio del pH del océano en 0.1-0.4 unidades. En las áreas costeras esta reducción puede incrementarse con las emisiones antropogénicas de compuestos nitrogenados y sulfurosos. La magnitud en que la disminución proyectada del pH puede estar balanceado o disminuido y afectar la biota de los pastos es tema de discusión y análisis. Dentro de la discusión se considera que el incremento del CO₂ disuelto puede traer cambios en otras formas inorgánicas del carbono que están en equilibrio con el CO₂ (*i.e.* HCO₃⁻ y CO₃²⁻).

EVIDENCIAS DE LA DISMINUCIÓN DE PASTOS MARINOS

A nivel mundial existe preocupación por el efecto que todas estas acciones, y las asociadas al CCG, pueden ocasionar en los pastos marinos. Orth *et al.* (2006) señalan que la distribución y abundancia de los pastos marinos han cambiado durante su evolución en respuesta a los cambios del nivel del mar, a las alteraciones de la línea de costa, a los cambios globales en la concentración de CO₂ atmosférico y de la temperatura del agua (Crowley, 1990; Bemer y Kothavala, 2001). Sin embargo las alteraciones que el hombre ha generado

en la zona costera en los últimos años, han ocasionado que estos cambios que fueron graduales en el pasado, actualmente se están intensificando. (figura 8).

Waycott *et al.* (2009), analizaron la información científica publicada para 128 sitios a nivel mundial, de las cuales 77 aportan información acerca de las causas que han ocasionado la disminución o pérdida de las comunidades de pastos marinos. Del análisis de esta información, se señala que las 2 principales causas de la pérdida de los pastos son; a) im-

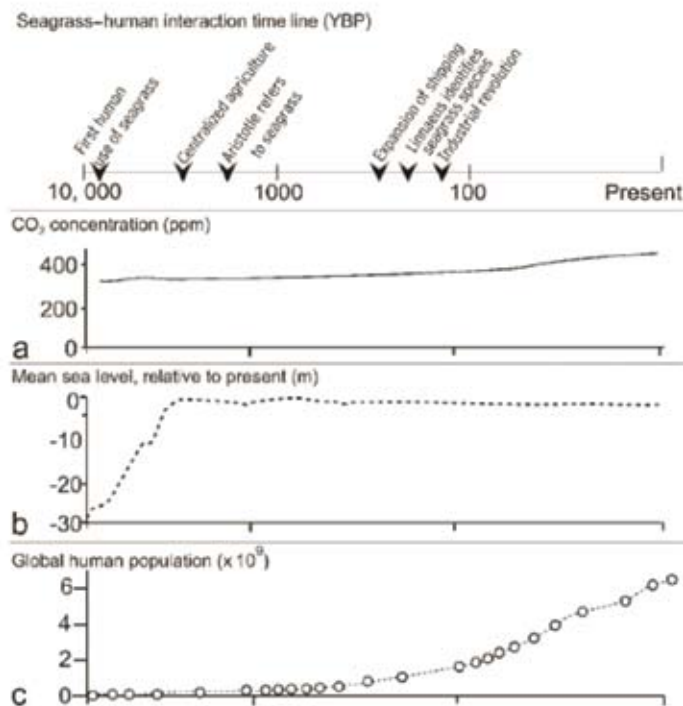


Figura 8. Pastos marinos – y su interacción con las comunidades humanas durante los pasados 10 000 años, mostrando (a) las concentraciones de CO₂ (Thoning *et al.*, 1998; Petit *et al.*, 1999), (b) nivel medio del mar (Fleming *et al.*, 1998), y (c) población humana global (Cohen *et al.*, 1995). Abreviaciones: m, metros; ppm, partes por millón; YBP, years before present. Tomado de Orth *et al.* 2006.

pactos directos del desarrollo costero y actividades de dragado (en 21 sitios); b) impactos indirectos que deterioran la calidad del agua (35 sitios). Sólo 6 sitios desaparecieron a causa del daño ocasionado por procesos naturales como tormentas o perturbación biológica. (figura 9).

Desafortunadamente existen varios casos a nivel mundial de la desaparición de pastos marinos a gran escala en lapsos de tiempo relativamente cortos, como las que se reportan para el Mediterráneo Europeo (Marbà *et al.*, 2005), Japón (Environment Agency of Japan, 2000), Chesapeake Bay (Orth y Moore, 1983) y Florida Bay (Fourqurean y Robblee, 1999; Fourqurean *et al.*, 2003) en North América, y Cockburn Sound (Walker *et al.*, 2006) y Western Port (Bulthuis, 1983) en Australia

Waycott *et al.* (2009), calcularon que la tasa de pérdida de los pastos a nivel mundial es de

110 km²/año desde 1980 y la desaparición es del 29% de la extensión registrada por primera vez en 1879. Estos autores consideran alarmante que la tasa de desaparición se ha incrementado en los últimos años, ya que paso de una mediana de 0.9% al año antes de 1940, al 7% al año después de 1990. La tasa de pérdida de las comunidades de pastos marinos es comparable a la reportada para los manglares, arrecifes coralinos y selvas tropicales, con lo cual los pastos marinos se ubican entre los ecosistemas más amenazados en la tierra (Waycott *et al.*, 2009).

En respuesta a ello se han impulsado acciones a nivel mundial encaminados a proteger estos ecosistemas desde el punto de vista ecológico y legal. Se ha propuesto la creación de áreas naturales protegidas en donde se efectúen estudios permanentes que incluyan la conectividad con los ecosistemas circun-

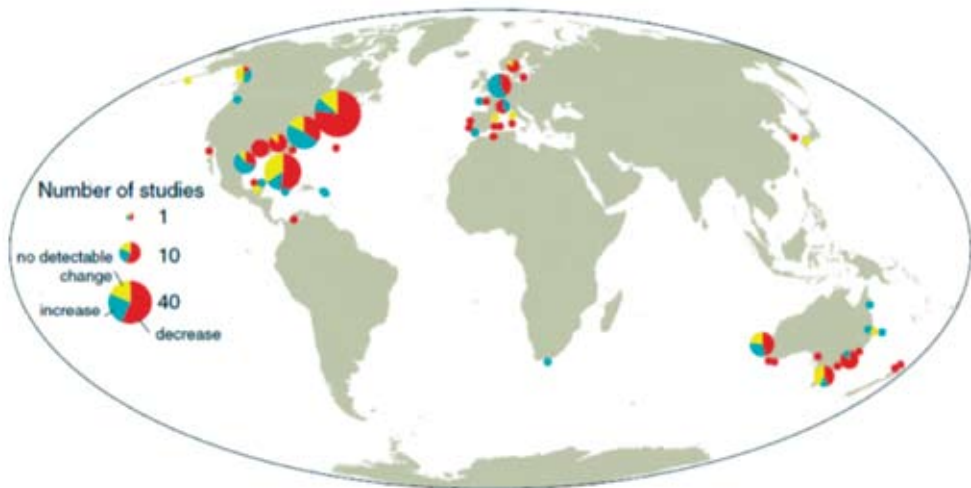


Figura 9. Mapa global en el que se indica los cambios en las áreas de pastos marinos en las regiones costeras. Cambios en la extensión de las áreas en cada sitio están definidos como en disminución (rojo) o en incremento (verde) donde la extensión de las áreas cambiaron >10% ó no hay cambios detectables (amarillo) cuando sus áreas finales estuvieron dentro $\pm 10\%$ del área inicial. Se analizaron 131 sitios en Norte América, 34 en Europa y 40 en Australia. Tomado de Walcott *et al.* (2009).

dantes. Programas de monitoreo, ya que son excelentes indicadores y su desaparición o cambios en su composición significan cambios en el ecosistema. Programas de restauración, en los sitios en donde los pastos marinos han desaparecido. Programas de educación, a las comunidades humanas que hacen uso de los recursos de la zona costera y público en general. Programas de mapeo, a nivel mundial existe un desconocimiento del área que ocupan los pastos marinos, la diversidad de especies, composición del sedimento, calidad del agua, biomasa etc. Se han utilizado varios métodos como es el uso de satélites (Ferweda *et al.*, 2007), pero la mayoría tiene limitaciones para detectar a los pastos y diferenciarlos de otras comunidades como algas y corales.

Sin duda es un gran reto contar con información que nos permita entender los procesos globales que operan en las comunidades de los pastos marinos y su entorno y aplicar este conocimiento para desarrollar programas de manejo efectivo de los recursos. El manejo efectivo es medular para cualquier estrategia ya que debe contemplarse mejorar la calidad del agua que se vierte a la zona costera, reducir la deforestación, las construcciones que modifican la dinámica hidrológica, el aporte de fertilizantes y contaminantes, ya que el cambio climático puede ocasionar un incremento en la frecuencia de inundaciones y erosión (Björk *et al.*, 2008) agravando esta condición. La aplicación de los programas de manejo deben fundamentarse en el conocimiento del funcionamiento de los pastos marinos en las distintas áreas, para poder establecer los estándares de la calidad del agua que permitan conservar o restaurar las comunidades de pastos (Dennison *et al.*, 1993; Coles y Fortes, 2001; Kenworthy *et al.*, 2006; Orth *et al.*, 2006).

En nuestro país no se han efectuado estudios encaminados a analizar el efecto del Cambio Climático Global (CCG) en las comunidades de pastos marinos que se desarrollan en la zona costera. Sin embargo en muchos sitios existe evidencias sobre los efectos generados por los impactos del desarrollo urbano, petroquímico, turístico, industrial, portuario. De acuerdo con Yáñez y Day (2004) en las áreas costeras del Golfo de México se manifiestan los impactos de las actividades realizadas tierras arriba, así como las ocasionadas por el desarrollo urbano, pesquero, turístico, de la industria alimentaria, portuaria y todas las relacionadas con la exploración, explotación, transportación y refinación de petróleo y gas. Los ecosistemas costeros en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche presentan signos de estrés ocasionados por contaminantes químicos, reestructuración física de la costa, sobrepesca de algunas especies e incremento de sedimentos y nutrientes de los ríos y de las poblaciones urbanas adyacentes. En la costa de Campeche se reporta modificaciones de la línea de costa, presencia de varias especies de *Caulerpa* compitiendo con las comunidades de pastos marinos (figura 6). Los huracanes y tormentas también impactan directamente a la zona costera y al respecto podemos mencionar la pérdida de playas en algunos sitios de la costa de Quintana Roo, después del paso del huracán Wilma.

Los efectos del CCG interactúan con las alteraciones ocasionadas en las zonas costeras por las acciones humanas, y los escenarios que se vislumbran para los pastos marinos no son optimistas. En todas las regiones se identifica al aporte excesivo de nutrientes y sedimentos como la causa más común y significativa de la pérdida de las áreas de pastos marinos y de la

velocidad con la que se manifiesta (Waycott *et al.*, 2009). La pérdida de los pastos tiene un efecto en cascada en la dinámica trófica que puede ser seguida por la pérdida de los consumidores de mayor nivel tanto del ecosistema

de pastos marinos como de los adyacentes. La pérdida del hábitat de los pastos marinos ocasiona la fragmentación de las comunidades cuyas consecuencias aún son desconocidas y afectarán su supervivencia a largo plazo.

LITERATURA CITADA

- Beck MW., *et al.*, 2001. The identification, conservation, and management of estuarine and marine nurseries for fish and invertebrates. *BioScience*, 51: 633–641.
- Beer, S., Björk, M., F. Hellblom, y L. Axelsson, 2002. Inorganic Carbon Utilisation in Marine Angiosperms (Seagrasses). *Functional Plant Biology*, 29: 349–354.
- Beer S., E.W. Koch, 1996. Photosynthesis of seagrasses vs. marine macroalgae in globally changing CO₂ environments. *Marine Ecology Progress Series*, 141: 199–204.
- Beer, S., L. Axelsson, y M. Björk, 2006. Modes of photosynthetic bicarbonate utilisation in seagrasses, and their possible roles in adaptations to specific habitats. *Biologia Marina Mediterranea*, 13: 3–7.
- Berner RA., Z. Kothavala, 2001. GEOCARB III: A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *American Journal of Science*, 301: 182–204.
- Bricker, S.B., J.G. Ferreira, y T. Simas, 2003. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status. *Ecological Modelling*, 169: 39–60.
- Björk M., F. Short, E. Mcleod, y S. Beer, 2008. Managing Seagrasses for Resilience to Climate Change. IUCN Resilience Science Group Working Paper Series No. 3. 56 p.
- Borum, J., O. Pedersen, T.M. Greve, T.A. Frankovich, J.C. Zieman, J.W. Fourqurean, y C.J. Madden, 2005. The potential role of plant oxygen and sulphide dynamics in die-off events of the tropical seagrass, *Thalassia testudinum*. *Journal of Ecology*, 93: 148–158.
- Bulthuis DA., 1983. Effects of *in situ* light reduction on density and growth of the seagrass *Heterozostera tasmanica* (Martens ex Aschers.) den Hartog in Western Port, Victoria, Australia. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 67: 91–103.
- Coles RC., y M. Fortes, 2001. Protecting seagrass—approaches and methods. p. 445–463 In: FT. Short, RG. Coles (eds.). *Global Seagrass Research Methods*. Elsevier.
- Campbell, S.J., L.J. McKenzie, y S.P. Kerville, 2006. Photosynthetic responses of seven tropical seagrasses to elevated seawater temperature. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 330: 455–468.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Suttonkk, y M. Marjan van den Belt, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253–260.
- Crowley TJ., 1990. Are there any satisfactory geologic analogs for a future greenhouse warming? *Journal of Climate*, 3: 1282–1292.
- Dawson, S.P., y W.C. Dennison, 1996. Effects of ultraviolet and photosynthetically active radiation on five seagrass species. *Marine Biology*, 124: 629–638.
- Den Hartog, C., 1970. *The Sea-grasses of the World*, North Holland, Amsterdam.
- Den Hartog, C., y J. Kuo, 2006. Taxonomy and biogeography of seagrasses. p. 1–23. In: A.W.D. Larkum, R.J. Orth and C.M. Duarte (eds). *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*, Springer. Printed in Netherlands.

- Dennison WC., R.J. Orth, KA. Moore, JC. Stevenson, V. Carter, S. Kollar, PW. Bergstrom, y RA Batiuk, 1993. Assessing water quality with submersed aquatic vegetation. *BioScience*, 43: 86–94.
- Duarte CM., 1995. Submerged aquatic vegetation in relation to different nutrient regimes. *Opheelia* 41:87–112.
- Duarte, C.M., 1999. Seagrass ecology at the turn of the millenium: Challenges for the new century. *Aquat. Bot.*, 65: 7-20.
- Duarte, C.M., 2002. The future of seagrass meadows. *Environ. Conserv.*, 29: 192-206.
- Duarte, C.M., M. Merino, y M. Gallegos, 1995. Evidence of iron deficiency in seagrasses growing above carbonate sediments. *Limnology & Oceanography*, 40: 1153-1158.
- Duarte C.M., y J. Cebrián, 1996. The fate of marine autotrophic production. *Limnology & Oceanography*, 41: 1758–1766
- Duarte CM., y C.L. Chiscano, 1999. Seagrass biomass and production: A reassessment. *Aquatic Botany*, 65: 159–174.
- Duarte CM., E. Alvarez, A. Grau, y D. Krause-Jensen, 2004. Which monitoring strategy should be chosen? p. 41–44. In: J. Borum, CM. Duarte, D. Krause-Jensen, and TM. Greve (eds.). *European Seagrasses: An Introduction to Monitoring and Management*. (13 November 2006; [www.seagrasses.org/ Handbook / european_seagrasses_high.pdf](http://www.seagrasses.org/Handbook/european_seagrasses_high.pdf))
- Duarte CM., J. Middelburg, N. Caraco, 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2: 1–8.
- Duarte CM., WC. Dennison, RJ. Orth, y TJB. Carruthers, 2008. The charisma of coastal ecosystems. *Estuaries and Coasts*, 31:233–238.
- Durako, M. J., y M.D. Moffler, 1987. Factors affecting the reproductive ecology of *Thalassia testudinum* (Hydrocharitaceae). *Aquatic Botany*, 27: 79-95.
- Durako, M.J., M.O. Hall, F. Sargent, y S. Peck, 1992. Propeller scars in seagrass beds: An assessment and experimental study of recolonization in Weedon Island State Preserve, Florida. p. 42-53. In: F.J. Webb Jr. (ed.) *Proceedings of the Nineteenth Annual Conference on Wetlands Restoration and Creation*, Tampa: Hillsborough Community College.
- Ehlers, A., B. Worm, y B.H. Reutsch, 2008. Importance of genetic diversity in eelgrass *Zostera marina* for its resilience to global warming. *Marine Ecology Progress Series*, 355: 1-7.
- Environment Agency of Japan, 2000. *Threatened Wildlife of Japan: Red Data Book*. 2nd ed., vol. 8: Vascular Plants. Tokyo: Japan Wildlife Research Center.
- Erftemeijer P.L.A., y R.R.R. Lewis III, 2006. Environmental impacts of dredging on seagrasses: A Review. 2006. *Marine Pollution Bulletin*, 52: 1553-1572.
- Ferwerda, J.G., J. de Leeuw, C. Atzberger, y Z. Vekerdy, 2007. Satellite-based monitoring of tropical seagrass vegetation: current techniques and future developments. *Hydrobiologia*, 591: 59-71.
- Fonseca MS., WJ. Kenworthy, y GW. Thayer, 1998. Guidelines for the conservation and restoration of seagrasses in the United States and adjacent waters. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Ocean Office. Decision Analysis Series No. 12.
- Fonseca MS., WJ. Kenworthy, y PE. Whitfield, 2000. Temporal dynamics of seagrass landscapes: A preliminary comparison of chronic and extreme disturbance events. *Biologia Marina Mediterranea*, 7: 373–376.
- Fourqurean JW., y MB. Robblee , 1999. Florida Bay: A recent history of ecological changes. *Estuaries*, 22: 345–357.
- Fourqurean JW, JN. Boyer, MJ. Durako, LN. Hefty, y BJ. Peterson, 2003. Forecasting responses of seagrass distributions to changing water quality using monitoring data. *Ecological Applications*, 13: 474–489.

- Gallegos, M.E., M. Merino, N. Marbà y C.M. Duarte, 1993. Biomass and dynamics of *Thalassia testudinum* in the Mexican Caribbean: elucidating rhizome growth. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 95: 185-192.
- Gallegos, M.E., M. Merino, A. Rodríguez, N. Marbà y C. M. Duarte, 1994. Growth patterns and demography of pioneer caribbean seagrasses *Halodule wrightii* and *Syringodium filiforme*. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 199: 99-104.
- Hemminga M., y CM. Duarte, 2000. Seagrass Ecology. Cambridge (United Kingdom): Cambridge University Press.
- Howarth R., *et al.*, 2000. Nutrient pollution of coastal rivers, bays and seas. *Issues in Ecology*, 7:1-14.
- Jackson J. B. C., 2008. Ecological extinction and evolution in the brave new ocean. *Pnas.*, 105 (suppl 1): 11458-11465.
- Jagels, R., 1983. Further evidence for osmoregulation in epidermal leaf cells of seagrasses. *Am. J. Bot.*, 70, 327-333.
- Jagels, R., y A. Barnabas, 1989. Variation in leaf ultrastructure of *Ruppia maritima* L. along a salinity gradient. *Aquat. Bot.*, 33, 207-221.
- Kemp WM., *et al.*, 2005. Eutrophication of Chesapeake Bay: Historical trends and ecological interactions. *Marine Ecology Progress Series*, 303: 1-19.
- Kenworthy, W.J., S. Willie-Echeverria, R.G. Coles, G. Pergent, y C. Pergent-Martini, 2006. Seagrass conservation biology: an interdisciplinary science for protection on the seagrass biome. p. 595-623. In: AWD. Larkum, AJ. McComb and SA. Sheperd (eds). Biology of seagrasses: Biology, ecology and conservation, Springer. .
- Kendrick GA., BJ. Hegge, A. Wyllie, A. Davidson, y DA. Lord, 2000. Changes in seagrass cover on success and *Parmelia* Banks, Western Australia between 1965 and 1995. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50:341-353.
- Kuo, J., y C. den Hartog, 2000. Seagrasses: A profile of an ecological group. *Biologia Marina Mediterranea* 7(2): 3-17.
- Kuo, J., y C. den Hartog, 2001. Seagrass taxonomy and identification key. p. 31-58. In: FT. Short and RG. Coles (eds) Global Seagrass Research Methods. Elsevier, Ámsterdam.
- Larkum, A.W.D., y C.den Hartog, 1989. Evolution and biogeography of seagrasses. p. 112-156. In: AWD. Larkum, A.J. McComb y S. A. Sheperd (eds). Biology of seagrasses . A treatise on the biology of seagrasses with special reference to the Australian region. Elsevier.
- Larkum WD., RJ. Orth, y CM. Duarte (eds.), 2006. Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation. Dordrecht. Springer.
- Les DH., MA. Cleland, y M. Waycott, 1997. Phylogenetic studies in the Alismatidae, II: Evolution of the marine angiosperms (seagrasses) and hydrophily. *Systematic Botany* 22: 443-463.
- Marbà N., CM. Duarte, E. Díaz-Almela, J. Terrados, E. Álvarez, R. Martínez, R. Santiago, E. Gacia, AM. Grau, 2005. Direct evidence of imbalanced seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot population dynamics along the Spanish Mediterranean. *Estuaries*, 28: 53-62.
- Orth RJ, y KA. Moore, 1983. Chesapeake Bay: An unprecedented decline in submerged aquatic vegetation. *Science*, 222: 51-53.
- Orth RJ., RA. Batiuk, PW. Bergstrom, y KA. Moore, 2002. A perspective on two decades of policies and regulations influencing the protection and restoration of submerged aquatic vegetation in Chesapeake Bay, USA. *Bulletin of Marine Science*, 71: 1391-1403.
- Orth RJ., ML. Luckenbach, SR. Marion, KA. Moore, y DJ. Wilcox, 2006. Seagrass recovery in the Delmarva coastal bays. *Aquatic Botany*, 84: 26-36.
- Orth, R.J., T.J.B. Curruthers, WC. Dennison, CM. Duarte, JW. Fourqurean, KL. Heck, AR. Hughes, GA. Kendrick, WJ. Kenworthy, S. Olyarnik, FT. Short, M. Waycott, y SL. Williams, S.L. 2006. A global crisis for seagrass ecosystems. *BioScience*, 56: 987-996.

- Rabalais, N.N., y SW. Nixon, (eds.), 2002. Nutrient over-enrichment in coastal waters: Global patterns of cause and effect. *Estuaries* 25 (dedicated issue).
- Ralph, P.J, D. Tomasko, K. Moore, S. Seddon, y M.O. Macinnis-Ng, 2006. Human impacts on seagrasses: eutrophication, sedimentation and contamination. p. 567-593. In: AWD Larkum, R., J. Orth and C. M. Duarte (eds). *Seagrasses : Biology, Ecology and Conservation*. Springer. Printed in Netherlands.
- Rasmussen E., 1977. The wasting disease of eelgrass (*Zostera marina*) and its effects on environmental factors and fauna. p. 1-51. In: CP: McRoy and C. Helfferich (eds.). *Seagrass Ecosystems*. New York:Marcel Dekker.
- Royal Society., 2005. Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy document 12/05. ISBN 0 85403 617 2. This report can be found at www.royalsoc.ac.uk
- Ruiz GM., PW. Fofonoff, JT. Carlton, MJ. Wigham, y AH. Hines, 2000. Invasion of coastal marine communities in North America: Apparent patterns, processes, and biases. *Annual Review of Ecology and Systematics* 31: 481-531.
- Ryther, J. H., 1963. Geographic variations in productivity. p. 347-380. In: M. N. Hill [ed.], *The Sea*. V. 2. Interscience.
- Secretaría del Cambio Climático, 2004. *Convencción Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Bonn (Alemania),
- Short, F.T., y S. Wyllie-Echeverria, 1996. Natural and human-induced disturbance of seagrasses. *Environmental Conservation*, 23: 17-27.
- Short FT., y H. Neckles, 1999. The effects of global climate change on seagrasses. *Aquatic Botany*, 63: 169-196.
- Spalding M., M. Taylor, C. Ravilious, F. Short, y E. Green, 2003. Global overview: The distribution and status of seagrasses. p. 5-26. In: EP. Green, and FT. Short (eds). *World Atlas of Seagrasses: Present Status and Future Conservation*. Berkeley: University of California Press.
- Short, F.T., y DM. Burdick, 2005. Interactive GIS-based, site selection model for seagrass restoration on CD-ROM, a final report submitted to the NOAA/UNH Cooperative Institute for Coastal and Estuarine Environmental Technology. University of New Hampshire, Durham.
- Short, F.T., E. Koch, JC. Creed, KM. Magalhaes, E Fernandez, y JL. Gaeckle, 2006. SeagrassNet monitoring across the Americas: Case studies of seagrass decline. *Marine Ecology*, 27: 277-289.
- Short FT., TJB. Carruthers, WC. Dennison, y M. Waycott, 2007. Global seagrass distribution and diversity: A bioregional model. *J Exp Mar Biol Ecol.*, 350:3-20.
- Suchanek TH., SW. Williams, JC. Ogden, DK. Hubbard, y IP. Gill, 1985. Utilization of shallow-water seagrass detritus by Caribbean deep-sea macrofauna: δ ¹³C evidence. *Deep Sea Research*, 32: 2201-2214.
- Tomlinson, P.B., y U. Posluszny, 2001. Generic limits in the seagrass family Zosteraceae. *Taxon*, 50: 429-437.
- Van Tussenbroek, B. I., J. A. Vonk, J. Stapel, P. Erftemeijer, J.J. Middelburg, y J. C. Zieman, 2006. The biology of Thalassia: paradigms and recent advances research. p. 409-439. In: AWD Larkum, R J, Orth and C M Duarte (eds). *Seagrasses : Biology, Ecology and Conservation*. Springer.
- Valiela I., 1997. Macroalgal blooms in shallow estuaries: Controls and ecophysiological and ecosystem consequences. *Limnol Oceanogr.*, 42:1105-1118.
- Walker, D.I., 1989. Seagrass in Shark Bay - the foundations of an ecosystem. p. 182-210. In: A. W. D. Larkum, A. J. McComb and S. A. Shepherd (eds.). *Biology of Seagrasses: A Treatise on the Biology of Seagrasses with special reference to the Australian Region*. North Holland.

- Walker DI., GA. Kendrick, y AJ. McComb, 2006. Decline and recovery of seagrass ecosystems—the dynamics of change. p. 551–565. In: AWD. Larkum, RJ. Orth, and CM. Duarte (eds). *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Dordrecht Springer.
- Waycott, M., G. Procaccini, D. H. Les y T.B. Reusch, 2006. Seagrass evolution, ecology and conservation: a genetic perspective. p. 25–50. In: A.W.D. Larkum, R.J. Orth and C.M. Duarte (eds). *Seagrasses; Biology, Ecology and Conservation*. Springer. Printed in Netherlands.
- Waycott, M., C. Collier, K. McMahon, P. Ralph, L. McKenzie, J. Udy, and A. Grech, 2006. Vulnerability of seagrasses in the Great Barrier Reef to climate change. In: JE. Johnson and PA. Marshall (eds). *Climate Change and the Great Barrier Reef*. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia.
- Waycott M., CM. Duarte, JB. Tim, JB. Carruthers Orth, W. Dennison, S. Olyarnik, A. Calladine James, W. Fourqurean, L. Kenneth, A. Heck Jr., H. Randall, A. Gary, W. Kendrick, W.J. Kenworthy, T. Frederick and Short, y S L. Williams, 2009. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *www.pnas.Org “cgi” doi”10.1073” pnas.0905620106*.
- Williams SL., 2007. Introduced species in seagrass ecosystems: Status and concerns. *J ExpMar Biol Ecol.*, 350:89–110.
- Wright JP., y CG. Jones, 2006. The concept of organisms as ecosystem engineers ten years on: Progress, limitations, and challenges. *BioScience*, 56: 203–209.
- Yáñez-Arancibia A., y JW. Day, 2004. Environmental sub-regions in the Gulf of Mexico coastal zone: the ecosystem approach as an integrated management tool. *Ocean & Coastal Management*, 47:727–757.

Liceaga-Correa, M.A., L.U. Arellano Méndez y H. Hernández-Núñez, 2010. Efectos de los huracanes y cambio climático sobre el caribe mexicano: Adaptabilidad de los pastos marinos, p. 211-2228. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Efectos de los huracanes y cambio climático sobre el Caribe mexicano: adaptabilidad de los pastos marinos

M. A. Liceaga-Correa, L.U. Arellano Méndez y H. Hernández-Núñez

RESUMEN

Las principales amenazas que afectan la zona costera del Caribe mexicano son los huracanes y “nortes”, eventos naturales extremos, los disturbios antropogénicos puntuales, como los asentamientos humanos, y el cambio climático global. Los ecosistemas costeros (manglares, pastos marinos, esponjas y arrecifes de coral), de una gran riqueza y diversidad de especies, se ven a su vez amenazados por estas contingencias. Aquí mostramos que los huracanes de gran intensidad que sacuden las costas del Caribe mexicano modifican la cobertura de los pastos marinos de Bahía de la Ascensión, Quintana Roo, México; no obstante, dejan inalterada su composición y distribución, ya que estos dependen de la geomorfología e hidroquímica de la Bahía. Además, se documentan tres factores ambientales (temperatura, nivel medio del mar y reducción de la luz), cuyas variaciones por el cambio climático modifican la cobertura, estructura, biomasa y función de los pastos marinos. Tecnologías espaciales como la percepción remota y los sistemas de información geográfica son ampliamente utilizados en este estudio.

Palabras clave: Hábitats bénticos, *Thalassia testudinum*, Bahía de la Ascensión, tecnologías espaciales.

INTRODUCCIÓN

La zona costera, área de transición entre los ambientes terrestres y marinos, resguarda importantes cuerpos de agua (humedales, lagunas, bahías, y el mar costero) que albergan ecosistemas (manglares, pastos marinos, esponjas, arrecifes de coral, entre otros) de una gran riqueza y diversidad de especies (Christensen *et al.*, 1996). Asimismo por su belleza escénica, la zona costera, ha sido atractiva para el establecimiento y desarrollo de asentamientos humanos. Las principales amenazas que flagelan la zona costera de la península de Yucatán, son los eventos extremos naturales, huracanes y “nortes”, los disturbios antropogénicos puntuales, como los asentamientos humanos, y el cambio climático global.

En este trabajo abordamos la vulnerabilidad de los pastos marinos ante los huracanes que sacuden el Caribe mexicano; que podría considerarse como parte de su vulnerabilidad ante el cambio climático, si se confirmará su causalidad de incremento en la intensidad y frecuencia de los huracanes. Además se documentan algunos de los factores ambientales que se ven alterados por el cambio climático, modificando, en consecuencia, la cobertura, estructura, biomasa y función de los pastos marinos.

Los pastos marinos son plantas vasculares que viven y completan sus ciclos de vida totalmente sumergidas en medios salinos o salobres. Conforman el único grupo representante de las angiospermas que ha evolucionado de tierra firme al mar en etapas progresivas de adaptación al agua dulce, a aguas salobres y finalmente al agua marina (Hartog, 1970). Como fanerógamas marinas poseen hojas, tallos y raíces, y forman flores, frutos y semillas (Hemminga y Duarte, 2000). La importancia ecológica de los pastos marinos, ha sido reconocida en numerosos trabajos científicos como áreas de alimentación (forrajeo), criaderos para juveniles y adultos de peces (Randall, 1965; Stoner, 1983; Robble y Zie-man, 1984); invertebrados (Thayer y Chester, 1989), tortugas (Klima *et al.*, 1986), aves (Larkum *et al.*, 1989) y manatíes (Lefebvre y Powell, 1990). El sistema de raíces y rizomas de los pastos marinos fijan y estabilizan los sedimentos del fondo, sus hojas disminuyen las corrientes (Ward *et al.*, 1984; Koch, 1996; Komatsu, 1996) y mejoran la calidad del agua filtrando la materia suspendida (Short y Short, 1984). Existe suficiente evidencia de cambios importantes en los pastos marinos, debido principalmente a sus drásticas disminuciones (Giesen *et al.*, 1990).

METODOLOGÍA

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es la Bahía de la Ascensión (figura 1), inmersa en la Reserva de la Biosfe-

ra de Sian Ka'an en la costa del Caribe mexicano, estado de Quintana Roo; su área es de 740 km² y tiene profundidades promedio y máxima 3.5 m y 7m respectivamente (Licea-



Figura 1. Localización de Bahía de la Ascensión, estaciones de muestreo (puntos) y principales sitios de orientación (números).

ga-Correa, 2003), lo que la hace una cuenca somera; tiene un gradiente de salinidad de menores concentraciones en la parte interna (1.2) y mayores en su conexión con el mar (hasta 34.2), cuya magnitud varía durante el año (Arellano-Méndez, 2004). La plataforma arrecifal frente a la Bahía, constituye un arrecife de tipo barrera.

Las actividades económicas que se desarrollan en la Bahía son la pesca y el ecoturismo que realizan los habitantes de la comunidad de Punta Allen.

En el periodo 2000-2001, se realizó trabajo de campo en una red de 525 estaciones (figura 1) para obtener los Grandes Grupos Morfofuncionales (GGMF) (corales duros, octocorales, esponjas, pastos marinos, macro algas) presentes en cada estación y con su análisis generar las semillas para la clasificación supervisada (figura 2) de la imagen Landsat TM del 21 de abril de 2000 (Liceaga-Correa, 2003).

MATERIALES

Imágenes Landsat TM del 19 de diciembre de 1986 y 10 de abril de 1993, (path=19, row=46), base de datos de estaciones de muestreo (figura 1), con referencia geográfica

y descripción de GGMF presentes, y mapa de hábitats benthicos de Bahía de la Ascensión del año 2000 (figura 2).

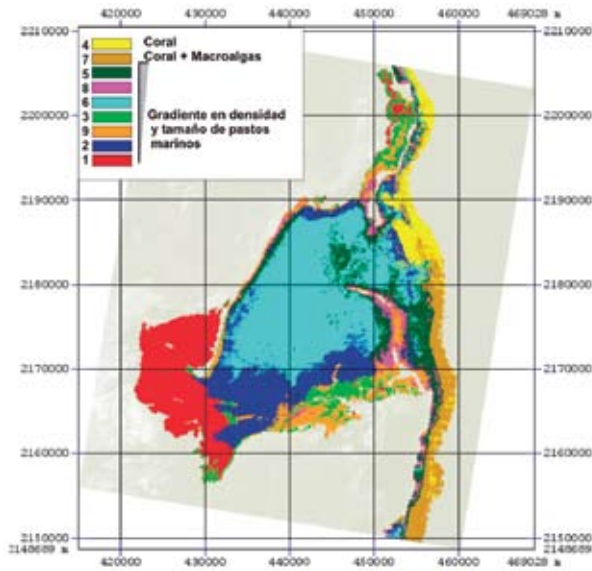


Figura 2. Mapa de las hábitats bénticos de la Bahía de la Ascensión en el año 2000, tomado de Liceaga *et al.*, 2003.

MÉTODOS

Se realizaron correcciones radiométricas (geométrica, atmosférica y de la columna de agua) y geométricas a las imágenes satelitales, de 1986 y 1993, y se crearon mascarar para la parte terrestre y marina. Las imágenes así obtenidas fueron corregidas con respecto a la imagen del 2000. Para clasificarlas de manera supervisada se analizaron las firmas espectrales en las estaciones de la figura 1 con el propósito de identificar aquellas estaciones que en el correspondiente año de estudio, 1986 o 1993, ya se encontraban en la clase de la cual eran postulantes. Posteriormente cada imagen fue clasificada usando el método de máxima verosimilitud (Schowengerdt, 1997) e integrada a un sistema de información geográfica. La detección de los cambios se realizó por clases y se compararon estadísticamente las diferencias entre mapas y entre clases. Para

mostrar que estas diferencias son significativas, se realizó una tabulación cruzada entre mapas (IDRISI, Clark University) con base en la medida de correlación de Cramer's χ^2 (0 no correlación, 1 perfecta correlación) y la distribución Chi-cuadrada, así como por el coeficiente *Kappa* (IDRISI, Clark University); para evaluar las diferencias entre hábitats se utilizó únicamente el coeficiente *Kappa*.

Se identificaron y documentaron los huracanes que han impactado la Bahía de la Ascensión en el periodo 1986-2000. Considerando que la bahía es un ecosistema no impactado por las actividades humanas (Herrera-Silveira, 2006) se reconoció a los huracanes como los causantes de los cambios observados en los hábitats bénticos de la bahía. Por último se documentan algunos de los efectos del cambio climático sobre los pastos marinos

RESULTADOS

CARACTERIZACIÓN, DE MANERA RETROACTIVA, DE LOS HÁBITATS BÉNTICOS DE LA BAHÍA DE LA ASCENSIÓN EN LOS AÑOS 1986 Y 1993

En ambos años, 1986 y 1993, se identificaron nueve hábitats bénticos, a nivel de Grandes Grupos Morfofuncionales, (figura 3) en la bahía; en términos generales su distribución es la siguiente: en la boca de la bahía (interacción de la bahía con el mar abierto) prevalecen los corales, hacia el interior los pastos marinos (*Halodule wrightii*, *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme* y *Ruppia maritima*), y las macroalgas. Además se reafirma, comparando con el año 2000 (figura 1), que en la boca de la bahía se encuentra la mayor variabilidad de hábitats. Además estos hábi-

tats han permanecido en el tiempo y sus cambios se refieren a cambios en su cobertura.

DETECCIÓN DE LOS CAMBIOS ESPACIALES, ENTRE 1986, 1993 Y 2000, DE LOS HÁBITATS BÉNTICOS DE LA BAHÍA

En la tabla 1 se tiene la comparación entre cada par de mapas; se observa que en el periodo 1986-2000, y a partir de 1986, cada 7 años hubo cambios significativos en la cobertura de los hábitats bénticos de la bahía, aun cuando los mapas son parecidos en un poco más del 50%. Si además consideramos la correlación entre los mapas de 1986 y 2000, entonces que en el periodo de estudio hubo un disturbio entre 1986 y 1993 durante el cual hubo pérdida de cobertura de los pastos ma-

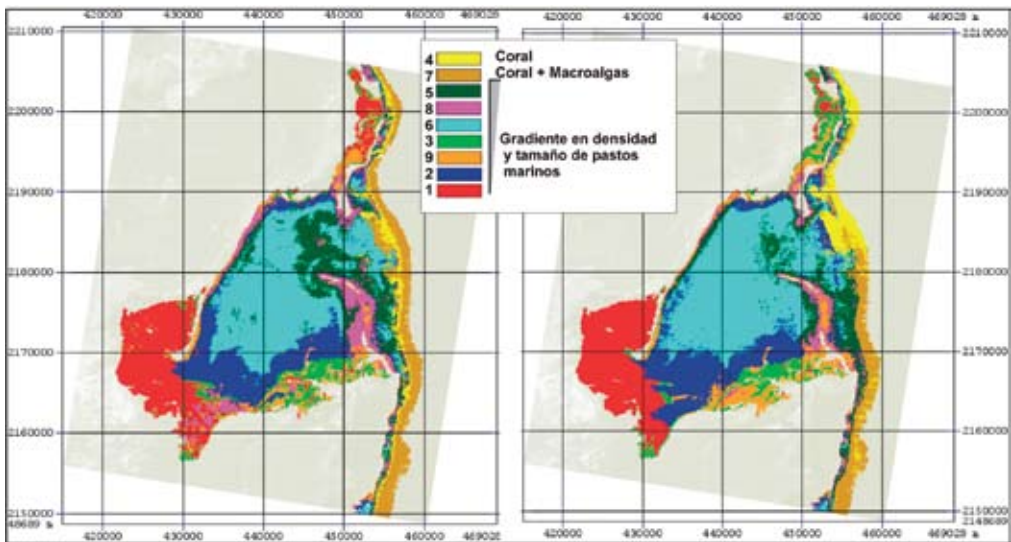


Figura 3. Caracterización de los hábitats bénticos de Bahía de la Ascensión en los años 1986 y 1993.

rinós, los cuales fueron restituidos en el año 2000 (figura 3).

Los resultados de la tabla 2 muestran que comparando los mapas de 1993 y 2000 hubo diferencias marcadas en los hábitats 3, 5 y 8; entre los mapas de 1986 1993, en los hábitats 3, 4, 5 y 9; mientras que entre los mapas 1986 y 2000 existe una correlación entre hábitats.

En consecuencia a la escala espacial (1:100 000) que se obtiene con las imágenes Landsat-TM (30m pixel) se detectan cambios en las coberturas de los hábitats bénticos. En la figura 4 se tienen en gris todos los cambios que se dan en el espacio, por periodo de estudio, sin identificar los cambios por cada uno de los hábitats; se comprueba entonces que los mayores cambios se dan en la boca de la bahía.

La tabla 3 muestra las áreas de los hábitats en cada año de estudio, 1986,1993 y 2000, y el porcentaje de cambio de estos hábitats entre años consecutivos de estudio.

La pregunta que surge ahora es **¿Qué ha provocado estos cambios?**

Tratando de contestarla tenemos lo siguiente: los ecosistemas costeros de las regiones tropicales, están expuestos a eventos naturales y antrópicos que provocan cambios no solo en la cobertura de sus hábitats sino también en las funciones y procesos del ecosistema. Tomando en cuenta que bahía de la Ascensión está inmersa en un área protegida, las actividades económicas se desarrollan bajo normas dispuestas en el plan de manejo, medidas que son acatadas por los pescadores bajo la vigilan-

Tabla 1. Comparación de mapas de los hábitats bénticos, a través de la tabulación cruzada entre el Mapa_1 y Mapa_2.

Mapa_1	Mapa_2	KAPPA global	Cramer's V	p
2000	1993	0.6007	0.6170	< .001
1993	1986	0.5981	0.6245	< .001
2000	1986	0.9508	0.9424	< .000

Tabla 2. Comparación por comunidad béntica, usando el coeficiente KAPPA.

Comunidad	KAPPA		
	2000-1993	1993-1986	2000-1986
1	0.7500	0.8966	0.9999
2	0.6105	0.5487	0.9925
3	0.2492	0.3700	0.9900
4	0.7078	0.4835	0.9971
5	0.3262	0.3869	0.9777
6	0.8257	0.6257	0.8887
7	0.6494	0.8909	0.9986
8	0.3568	0.5930	0.9484
9	0.7052	0.3219	0.9877

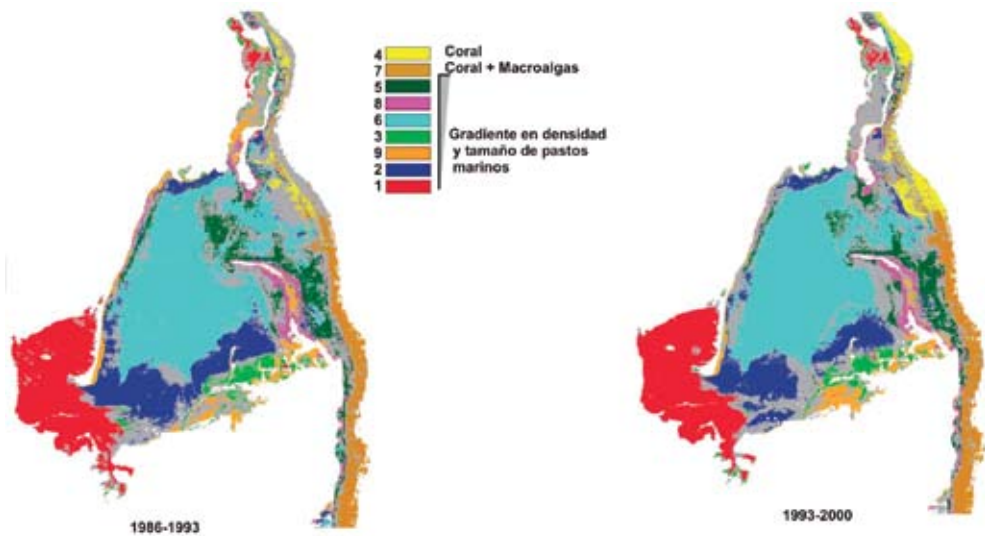


Figura 4. En gris todos los cambios que se dan en el espacio por periodo de estudio.

Tabla 3. Áreas y porcentaje de los cambios por hábitat de bahía de la Ascensión. El signo positivo en “% de cambio” significa ganancia de hábitat y los negativos pérdida.					
Hábitat	Área en1986 (km²)	Área en1993 (km²)	Área en 2000 (km²)	% de cambio 1986-1993	% de cambio 1993-2000
1	152.26	129.24	143.29	15.12	10.87
2	113.85	124.82	109.36	-9.64	-12.39
3	40.82	47.86	59.91	-17.23	25.20
4	27.07	44.22	28.63	-63.36	-35.25
5	103.01	85.86	97.05	16.65	13.04
6	224.66	262.44	204.89	-16.82	-21.93
7	83.64	58.88	73.05	29.64	24.06
8	50.43	26.82	42.08	46.82	56.91
9	50.36	66.06	27.98	-31.17	-57.65

cia organizada de la cooperativa de pescadores. Esto ha permitido no solo una pesquería saludable (Sosa-Cordero *et al.*, 2008) sino un ecosistema en buen estado de conservación (Herrera-Silveira, 2006). Se formula entonces la hipótesis de este trabajo: los huracanes de gran intensidad que sacuden las costas de Quintana Roo, modifican la cobertura de los hábitats bénticos de Bahía de la Ascensión y sus cambios son perceptibles a escala espacial amplia (1:100 000).

HURACANES Y SUS EFECTOS SOBRE LOS PASTOS MARINOS

En la cuenca tropical de ciclones del Atlántico, formada por el Océano Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México, se ha observado desde 1995 un incremento en la frecuencia de huracanes más intensos categorías tres, cuatro y cinco, que es el máximo nivel en la escala Saffir-Simpson (NOAA, 2009). Sin embargo, sigue siendo confuso si el aumento de la temperatura global afectará la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos.

El impacto directo de la acción de los huracanes sobre las praderas de pastos marinos incluye la erosión por la acción de las olas, el oscurecimiento causado por los sedimentos en suspensión, y la asfixia provocada por la deposición del sedimento (Patriquin, 1975; Birch y Birch, 1984; Wanless *et al.*, 1988; Clarke y Kirkman, 1989; Talbot *et al.*, 1990). Un incremento en el régimen de disturbios causados por los huracanes pueden llevar a una disminución en la distribución de la especie clímax y un aumento en la abundancia de especies colonizadoras y de especies sucesionales dentro de la comunidad de los pastos marinos (Williams y Dennison, 1990). La

recolonización de muchas especies de pastos marinos someros se realiza primero por ramificación vegetativa, las poblaciones de especies clímax, tales como *Thalassia testudinum*, puede llevarle muchos años en recuperarse de una tormenta (Patriquin, 1975; Williams y Dennison, 1990; van Tussenbroek, 1994).

Un efecto adicional en el incremento de la frecuencia y la intensidad de los huracanes sería un aumento en la precipitación y la descarga de los ríos provocando como resultado cambios en la circulación de los estuarios, la estratificación vertical, y la descarga de sedimentos en suspensión (Dyer, 1995). Los huracanes, los ciclones y otras tormentas causan disturbios que ha dado lugar al declive de los pastos marinos en muchas partes del mundo (Short y Willie-Echeverria, 1996).

HURACANES QUE HAN SACUDIDO BAHÍA DE ASCENSIÓN Y SU IMPACTO EN LOS HÁBITATS BÉNTICOS

En la figura 5 se muestra la trayectoria de los huracanes que sacudieron las costas del Caribe mexicano en el periodo 1986-2000, a su paso por bahía de la Ascensión, y en la tabla 4 la clasificación de los huracanes de acuerdo a la escala Saffir-Simpson.

Es importante hacer notar que en su trayectoria un huracán pasa la mayoría de las veces por diferentes categorías, así el huracán Gilberto tuvo categoría 5 a su paso por la bahía mientras que el huracán Katrina pasó como una depresión tropical. Por otra parte, a través del conocimiento empírico de pescadores sabemos que huracanes como Gilberto y Wilma en 2005, han sido los más agresivos por las secuelas que dejaron sobre el fondo marino.

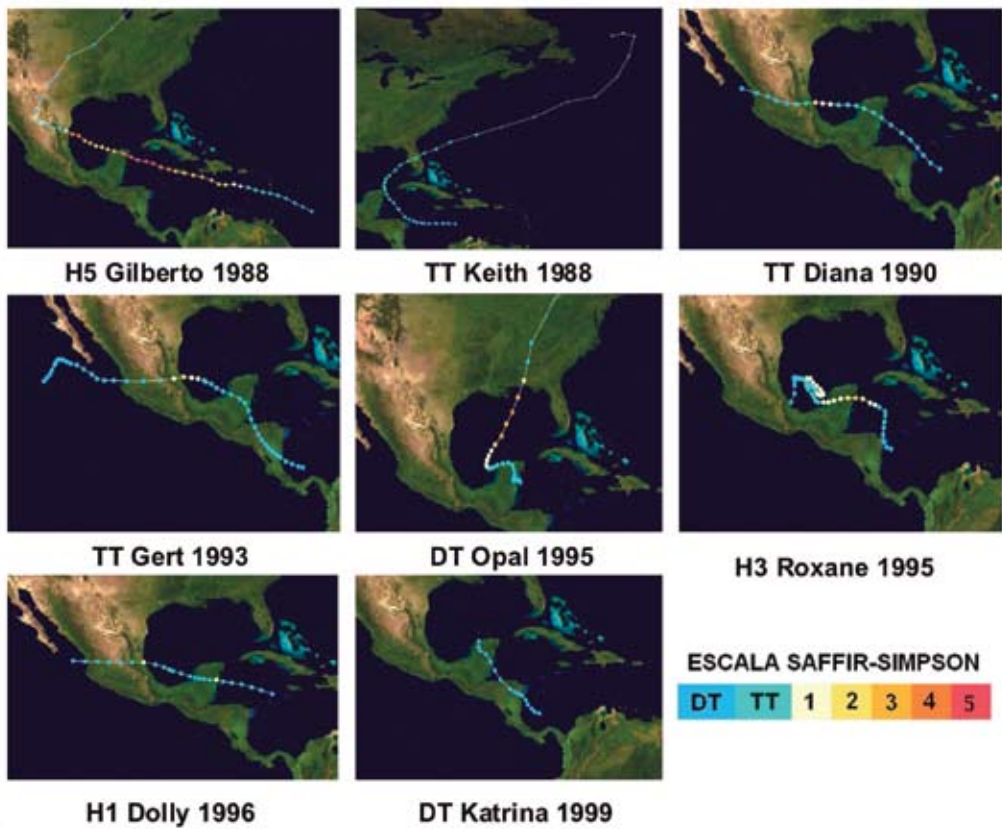


Figura 5. Trayectoria de huracanes a su paso por bahía de la Ascensión en el periodo 1986-2000. Para cada huracán se incluye su categoría, nombre y el año en que irrumpió. Imágenes tomadas de http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Gilbert.

Tabla 4. Clasificación de los huracanes de acuerdo a la escala Saffir- Simpson.

Clave	Categoría	Velocidad (km/h)
DT	Depresión tropical	0-62
TT	Tormenta Tropical	63-117
H1	Huracán, categoría 1	118-153
H2	Huracán, categoría 2	154-177
H3	Huracán, categoría 3	178-209
H4	Huracán, categoría 4	210-249
H5	Huracán, categoría 5	> 250

En el periodo 1986-1993 pasaron por la Bahía cuatro huracanes, uno con categoría cinco y tres como tormentas tropicales, y en el periodo 1993-2000 dos huracanes, categorías uno y dos, y dos depresiones tropicales. Con el propósito de entender los cambios que tuvieron los hábitats bénticos en ambos periodos, analizaremos los hábitats de colonias de corales blandos (4), praderas de *Thalassia* (5), colonias de corales blandos y macroalgas (7) y praderas de pastos marinos (8), y su posible relación con los huracanes. La principal razón de escoger estas cuatro es su situación geográfica, en donde la dinámica del agua marina es mayor.

Colonias de corales blandos y colonias de corales blandos y macroalgas

Estos hábitats quedaron separados por la cobertura de macroalgas que cada uno de ellos tiene, aproximadamente 15% y 43% respectivamente. En 1986 se detectaron corales a lo largo de toda la boca de la bahía; a manera de escudo coral y macroalgas, y hacia el interior coral con menor cobertura de macroalgas. En 1993, la distribución cambió, al norte coral y hacia el sur coral y macroalga. Este límite quedó determinado por la geomorfología de la boca de la bahía, hacia el norte el intercambio de agua marina es libre y la profundidad mayor a 3.5m, mientras que hacia el sur “Cayo Culebras”, y la baja profundidad, menor a 2m, ponen una barrera al libre flujo de las aguas marinas. Esto podría interpretarse como sigue: bajo la hipótesis de que una depresión o tormenta tropical no modifican la cobertura de los hábitats de corales, el huracán Gilberto “limpió” de macroalgas estas hábitats en sitios donde el agua marina no encuentra obstáculo y la profundidad es mayor a 3.5m. La inversa

también es cierta; a saber, si las aguas marinas encuentran un obstáculo y/o la profundidad es menor a 2m, las macroalgas encuentran un ambiente propicio para su crecimiento.

Praderas de pastos marinos

Hacia el interior y detrás de los corales se encuentran amplias praderas de pastos marinos (*H. wrightii*, *T. testudinum*, *S. filiforme* y *R. maritima*), cuya distribución también tiene que ver con la geomorfología de la boca de la bahía. En la entrada de agua marina sin obstáculo se perdieron grandes praderas de pastos marinos, mientras que aquellas donde si se tiene obstáculo estas praderas quedaron protegidas; esto con el paso del huracán Gilberto.

Praderas de *Thalassia testudinum*

Por su distribución podríamos inducir que las praderas de *T. testudinum* están protegidos por los pastos marinos, ya que éstos crecen a su alrededor, en profundidades mayores a los 3.5m y hasta los 7m. El huracán Gilberto, arrasó una importante cobertura de estas praderas inclusive en aquellos sitios protegidos por “Cayo Culebras”.

De manera general podríamos decir que a cinco años del huracán Gilberto se encontraron importantes diferencias en la cobertura de estos hábitats bénticos de la Bahía.

Por los cambios ocurridos entre 1993 y el 2000 se observa que las praderas de *T. testudinum* y de pastos marinos se recuperaron ampliamente, mientras que los corales no, inclusive al norte empieza a crecer la cobertura de corales y macroalgas que por su posición podría ser causa de las actividades de pesca que ahí se desarrollan. Respecto a los huracanes en el periodo podríamos decir, que Roxana y

Dolly, a dos y tres años de Gilberto, respectivamente, pudieron o no haber impactado los hábitats bénticos de la bahía, pero su efecto al año 2000 no fue perceptible.

CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS SOBRE LOS PASTOS MARINOS

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático usa el término cambio climático para referirse a cambios en el clima atribuidos directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima. Entre los cambios más críticos está el aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) proveniente del uso de combustibles fósiles (y la deforestación) que ha provocado la intensificación del fenómeno y el consecuente aumento de la temperatura global, efecto invernadero, que ha traído consecuencias como el derretimiento de los hielos polares y el aumento del nivel de los océanos, entre otros. Los sitios donde se pueden observar de manera muy marcada estos cambios son las zonas costeras, desde las playas, hasta ríos, bahías y estuarios (cuerpos de agua someros).

Uno de los principales componentes a revisar son los productores primarios, principalmente las praderas de pastos marinos las cuales se encuentran en casi todas, si no es que en todas, las zonas costeras del mundo. Cambios en el nivel del mar (Titus, 1990; Kenworthy y Haunert, 1991), salinidad (Morrison *et al.*, 1998), temperatura (Zimmerman *et al.*, 1989), dióxido de carbono atmosférico (Amthor, 1995), y radiación UV (Worrest, 1989; Smith *et al.*, 1992) pueden alterar su

distribución, productividad y composición de este hábitat. Un cambio potencial en la distribución y estructura de los hábitats de pastos marinos pueden producir profundas implicaciones en la biota local y regional, en la geomorfología de la línea de costa y en los ciclos biogeoquímicos.

En este trabajo se documentan tres factores ambientales, temperatura, nivel medio del mar y reducción de la luz, asociados al cambio climático, relacionados con la estructura y función de los pastos marinos.

Incremento en la temperatura

La vegetación acuática sumergida está compuesta por pastos marinos y diversas especies de algas unidas a sus hojas, así como macroalgas que crecen intermitentemente entre las plantas, y el fitoplancton que crece en la columna de agua (Sand-Jensen y Borum, 1991). La eutrofización de la zona costera, mediante el deterioro de la calidad del agua y del sedimento, propicia que las plantas de pastos marinos sean a menudo excluidas por varias formas algales (Cambridge *et al.*, 1986; Neckles *et al.*, 1993; den Hartog, 1994; Short *et al.*, 1995). La magnitud y extensión de estas algas competitivas, pueden depender enormemente de la temperatura del agua (Neckles *et al.*, 1993), lo que sugiere que el declive de praderas de pastos marinos podría acelerarse con el calentamiento del agua del mar. Las algas epífitas afectan la productividad de los pastos marinos, pues limitan la disponibilidad de luz y carbono en la superficie de las hojas (Sand-Jensen, 1977; Sand-Jensen y Revsbech, 1987). También la distribución y abundancia de los pastos marinos se ve alterada por el incremento en la temperatura, a través de efectos directos en su florecimiento (de Cock, 1981;

McMillan, 1982; Durako y Moffler, 1987) y durante la germinación de las semillas (Harrison, 1982; Phillips *et al.*, 1983). Así, un efecto de largo plazo del cambio global puede acelerar una pérdida de hábitat de los pastos marinos en ambientes estuarinos someros, caso de la bahía de la Ascensión.

Elevación del nivel medio del mar

Variaciones del nivel de los océanos son detectadas a través de medidas del nivel del mar, obtenidas por los satélites altimétricos como Topex/Poseidón o Jason. Éstas medidas son estables y varían como máximo 0.5 mm en un año. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), reporta que el nivel del mar ha ascendido globalmente de 10-25 cm en los pasados 100 años y este aumento puede estar relacionado con el incremento de la temperatura media del planeta. La proyección para este siglo se encuentra en el rango de 15 a 95 cm y su “mejor estimación” es de 50 cm, lo que representa un incremento significativo. En México, Sánchez-Santillán *et al.* (2005) examinaron seis puertos del Golfo de México y calcularon la tasa anual promedio, del incremento del nivel del mar, en 0.29 cm/año en el periodo 1961-1990.

Dos fenómenos primarios que aceleraran el incremento del nivel del mar, y en consecuencia alteraciones en la marea, son la expansión térmica de las aguas oceánicas (Titus, 1990), y el derretimiento de la capa de hielo en los polos (Mitchell, 1991; Schneider, 1994). Cambios en la magnitud del rango mareal dependen de la geomorfología costera, no obstante, incrementos en el nivel del mar aumentarían las corrientes maréales, particularmente en áreas de flujo de marea restringido. Cuando

el incremento en la marea alta es mayor que el aumento en la marea baja las elevaciones del nivel del mar se verán incrementadas. Este incremento puede restringir la profundidad a la cual las plantas pueden crecer debido a estrés por la limitación de la luz (Dring y Lüning, 1994; Koch y Beer, 1996). El efecto total de mayores rangos de marea provocaría un desarraigo del borde profundo y por tanto una pérdida de área de los pastos marinos.

Por otra parte, el aumento del nivel del mar puede incrementar el movimiento del agua en la costa y en las áreas estuarinas, modificando la velocidad de la corriente y los patrones de flujo de circulación (Fonseca *et al.*, 1983; Worcester, 1995). El aumento de las corrientes intermareales podrían en algún momento, aumentar el flujo de agua a las praderas de pastos marinos que están siendo alcanzadas por el crecimiento de las algas marinas en un sistema eutrófico. Este incremento podría dar lugar a la reducción de la biomasa macroalgal dentro de estas praderas, teniendo un impacto positivo en la salud de las praderas mismas de pastos marinos.

Incremento de la profundidad y reducción de la luz

El impacto directo más grande de un aumento del nivel del mar es el aumento de la profundidad del agua y la reducción consiguiente de la disponibilidad de la luz en el fondo. El hábitat de los pastos marinos de cualquier sitio, experimentará una reducción en su distribución y su productividad, la estructura de las praderas será alterada, y sus valores funcionales se verán reducidos (Zimmerman y Livingston, 1976; Bay, 1984; Averza y Almodovar, 1986; Dennison y Alberte, 1986; Dawes y Tomasko, 1988; Orth y Moore, 1988; Duarte, 1991).

Cualquier reducción en la cantidad de luz que alcanza los hábitats de pastos marinos, como un resultado de la elevación del nivel del mar, disminuirá la productividad total y alterará la estructura de la pradera de pastos marinos de ese hábitat (Short *et al.*, 1995), resultando en una pérdida de la función de ese hábitat. Una reducción en el alcance de la luz al sustrato puede provocar una variación en la composición de especies por un aumento en el crecimiento de especies que poseen un

menor requerimiento de luz (Pulich, 1985). El impacto global del incremento de la profundidad del agua puede variar entre localidades, dependiendo de la topografía local donde crecen los pastos marinos. Sin embargo, la proyección del incremento de 50 cm en la profundidad del agua puede reducir la disponibilidad de la luz en 50% (Short, 1980), lo que podría causar una reducción del 30 al 40% en el crecimiento de los pastos marinos (Short y Neckles, 1999).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La complejidad de los ecosistemas costeros ha sido una preocupación constante en la investigación científica, disciplinas como la biología, ecología, geografía, geología, oceanografía, geoquímica y geofísica son algunas de las ciencias que han aportado las bases para entender los procesos que ahí se originan. En el afán de hacer compatible este conocimiento, tecnologías recientes como la percepción remota y geoestadística ponen este conocimiento en un mismo formato espacial (mapa) para integrarse en un Sistema de Información Geográfica (SIG), y con su interacción “ir construyendo” y entendiendo las condiciones ambientales de un ecosistema. El análisis retrospectivo es también una capacidad inherente a estas tecnologías, dándonos la posibilidad de obtener una aproximación de las condiciones de la bahía en 1986 y 1993, a escala amplia, siendo 1986 el año en que fue decretada la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an. Los mapas obtenidos en este trabajo son los únicos que dan una aproximación holística de la realidad ecológica de los hábitats bénticos (pastos marinos, corales y macroal-

gas) de la Bahía de la Ascensión para los años 1986 y 1993.

La entrada de agua marina a la bahía ingresa de dos maneras; por la boca (entrada libre del agua marina) de la bahía, creando el área hidrológicamente más dinámica, con profundidades entre 4 y 7 m, y la segunda a partir de “Cayo Culebras” y hacia el sur de la bahía, hasta Punta Hualastoc, con profundidades menores a los 2m. En la boca de la bahía es en donde se dan los mayores cambios después del paso de un huracán; así en el periodo de estudio, los hábitats bénticos permanecieron, siendo el tamaño de sus coberturas los cambios detectados en el tiempo. En el periodo 1986-1993 estos cambios se atribuyeron al huracán Gilberto, que impactó la bahía en 1988; a cinco años de este huracán la cobertura de los hábitats se vieron claramente disminuidas, principalmente aquellas que se encuentran detrás de los corales y más cercanos a la boca de la bahía, en donde la dinámica es mayor. Las colonias de corales incrementaron la cobertura de macroalgas, hacia el sur de Cayo Culebras, mientras que hacia el

norte no, manteniéndose áreas de corales con mucha menor cobertura de macroalgas. Los pastos marinos estructuralmente diferentes fueron afectados de diferente manera *Thalassia testudinum* aparece más perturbada que *Syringodium filiforme*. Siete años después, en el periodo 1993-2000, se tiene una recuperación de los pastos marinos, mientras que los corales incrementaron su cobertura de macroalgas hacia el norte, arriba de la boca, en donde el impacto pesquero es importante. Los impactos de los huracanes Roxana en 1995 y Dolly en 1996 no fueron perceptibles en el 2000, a 5 y 4 años respectivamente.

Se concluye entonces que si los efectos del cambio climático aumentarán la frecuencia e intensidad de los huracanes, la principal consecuencia, de acuerdo a los resultados de este estudio, sería la disminución de las coberturas

de los pastos marinos dejando inalterable su composición y distribución, ya que éstos dependen de la geomorfología e hidroquímica de la bahía. Mientras que el incremento en la temperatura, la elevación del nivel medio del mar y la reducción de la luz, modifican la cobertura, estructura, biomasa y función de los pastos marinos. Otros estudios relacionados con el tema son los efectos directos e indirectos del cambio de clima global sobre los pastos marinos, tales como su metabolismo y el mantenimiento positivo en el balance del carbono (Evans *et al.*, 1986; Marsh *et al.*, 1986; Bulthuis, 1987; Zimmerman *et al.*, 1989) o la alteración de los patrones de circulación y modificaciones de la velocidad de las corrientes (Conover, 1968; Fonseca y Kenworthy, 1987; Short, 1987).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el CONACYT, proyecto número 90221. Queremos dar las gracias a la Biól. Guadalupe Mexicano-Cín-

tora por su apoyo en la recopilación de información.

LITERATURA CITADA

- Amthor, J.S., 1995. Terrestrial higher-plant response to increasing atmospheric (CO₂) in relation to the global carbon cycle. *Global Change Biol.*, 1: 243-274.
- Arellano-Méndez, L.U., 2004. Análisis espacio-temporal de las variables hidrológicas: Detección de heterogeneidad a gran escala temporal. Tesis de Maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN), Unidad Mérida, Yucatán, México.
- Hartog, C. den, 1970. The seagrasses of the world. North Holland Publishing Co., Amsterdam-London, 298 p.
- Averza, A.A., y L.R. Almodovar, 1986. *Halodule wrightii* Aschers (marine phanerogamous, potamogetonaceae), in the Cueva Island, Puerto Rico part 3. *Science*, 13: 21-32.
- Bay, D., 1984. A field study of the growth dynamics and productivity of *Posidonia oceanica* in Calvi Bay, Corsica, France. *Aquat. Bot.*, 20: 43-64.

- Birch, W.R., y M. Birch, 1984. Succession and pattern of tropical intertidal seagrasses in Cockle Bay, Queensland Australia: A decade of observations. *Aquat. Bot.*, 19: 343-367.
- Bulthuis, D.A., 1987. Effects of temperature on photosynthesis and growth of seagrasses. *Aquat. Bot.*, 27: 27-40.
- Cambridge, M.L., A.W. Chiffings, C. Brittan, L. Moore, y A.J. McComb, 1986. The loss of seagrass in Cockburn Sound, Western Australia. II. Possible causes of seagrass decline. *Aquat. Bot.*, 24: 269-285.
- Christensen, N., A.M. Bartuska, J.H. Brown, S. Carpenter, C. D'Antonio, R. Francis, J.F. Franklin, J.A. MacMahon, R.F. Noss, D.J. Parsons, C.H. Peterson, M.G. Turner, y R. G. Woodmansee, 1996. The report of the Ecological Society of America committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications*, 6: 665-691.
- Clarke, S.M., y H. Kirkman, 1989. Seagrass dynamics. p. 304-344. In: A.W.D. Larkum, A.J. McComb, and S.A. Shepherd, (eds.). *Biology of Seagrasses*, Elsevier, Amsterdam.
- Conover, J.T., 1968. The importance of natural diffusion gradients and transport of substrate to benthic marine metabolism. *Bot. Mar.*, 11: 1-19.
- Dawes, C.J., y D.A. Tomasko, 1988. Depth distribution of *Thalassia testudinum* in two meadows on the west coast of Florida; a difference in effect of light availability. *Mar. Ecol.*, 9: 123-130.
- de Cock, A.W.A.M., 1981. Influence of temperature and variations in temperature on flowering in *Zostera marina* under laboratory conditions. *Aquat. Bot.*, 10: 125-132.
- den Hartog, C., 1994. Suffocation of a littoral *Zostera* bed by *Enteromorpha radiata*. *Aquat. Bot.*, 47: 21-28.
- Dennison, W.C., y R.S. Alberte, 1986. Photoadaptation and growth of *Zostera marina* (eelgrass) transplants along a depth gradient. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 98: 265-282.
- Dring, M.J., y K. Lüning, 1994. Influence of spring-neap tide cycles on the light available for photosynthesis by benthic marine plants. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 104: 131-137.
- Duarte, C.M., 1991. Seagrass depth limits. *Aquat. Bot.*, 40: 363-377.
- Durako, M.J., y M.D. Moffler, 1987. Factors affecting the reproductive ecology of *Thalassia testudinum* hydrocharitaceae. *Aquat. Bot.*, 27: 79-96.
- Dyer, K.R., 1995. Response of estuaries to climate change. p. 85-110. In: D. Eisma (ed.), *Climate Change: Impact on Coastal Habitation*. CRC Press, Boca Raton.
- Evans, A.S., K.L. Webb, y P.A. Penhale, 1986. Photosynthetic temperature acclimation in two coexisting seagrasses *Zostera marina* and *Ruppia maritima*. *Aquat. Bot.*, 24: 185-198.
- Fonseca, M.S., y W.J. Kenworthy, 1987. Effects of current on photosynthesis and distribution of seagrass. *Aquat. Bot.*, 27: 59-78.
- Fonseca, M.S., J.C. Zieman, G.W. Thayer, y J.S. Fisher, 1983. The role of current velocity in structuring eelgrass *Zostera marina* meadows. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 17: 367-380.
- Giesen, W.B.J.T., M.M. van Katwijk, y C. den Hartog, 1990. Eelgrass condition and turbidity in the Dutch Wadden Sea. *Aquat. Botany*, 37: 71-85.
- Harrison, P.G., 1982. Seasonal and year-to-year variations in mixed intertidal populations of *Zostera japonica* and *Ruppia maritima*. *Aquat. Bot.*, 14: 357-372.
- Hemminga, M., y C. M. Duarte, 2000. *Seagrass Ecology*. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press.
- Herrera-Silveira, J.A., 2006. Lagunas Costeras de Yucatán (SE, México): Investigación, Diagnóstico y Manejo. *Ecotrópicos*, 19(2): 94-108.
- Kenworthy, W.J., y D. Haunert, 1991. Results and recommendations of a workshop convened to examine the capability of water quality criteria, standards and monitoring programs to protect seagrasses from deteriorating water

- transparency. NOAA's Coastal Ocean Program, Estuarine Habitat Studies, NOAA Workshop Report, 151 p.
- Klima, E.F., G.A. Matthews, y F.J. Patella, 1986. Synopsis of the Tortugas pink shrimp fishery, 1960-1983, and the impact of the Tortuga sanctuary. *N. Am. J. Fish. Manage*, 6: 301-310.
- Koch, E.W., 1996. Hydrodynamics of shallow *Thalassia testudinum* beds in Florida, USA. p. 105-110. *In*: J. Kuo, R.C. Phillips, D.I Walker, and Kirkman (eds.). Seagrass Biology: Proceedings of an International Workshop. Rottneest Island, Western Australia, 25-29 January 1996. Sciences UW, Nedlands, Western Australia.
- Koch, E.W., y S. Beer, 1996. Tides, light and the distribution of *Zostera marina* in Long Island Sound, us. *Aquat. Bot.*, 53: 97-107.
- Komatsu, T., 1996. Influence of a *Zostera* bed on the spatial distribution of water flow over a broad geographic area. p. 111-116. *In*: J. Kuo, R.C. Phillips, D.I. Walker, and H. Kirkman (eds.). Seagrass Biology: Proceedings of an International Workshop, Rottneest Island, Western Australia, 25-29 January 1996. Sciences UWA, Nedlands, Western Australia.
- Larkum, A.W.D., G. Roberts, J. Kuo, y S. Strother, 1989. Gaseous movement in seagrasses. p. 686-722. *In*: A.W.D. Larkum, A.J. McComb and S.A. Shepherd (eds.). Biology of Seagrasses. Elsevier Pub Co, Amsterdam.
- Lefebvre, L.W., y J.A. Powell, 1990. Manatee grazing impacts on seagrasses in Hobe Sound and Jupiter Sound in southeast Florida during the winter of 1988-1989. National Technical Information Service, #PB90-271883, Springfield, VA. 36 p.
- Liceaga-Correa, M.A., 2003. Reporte Final. Caracterización Ecológica, Actual y Retrospectiva, de los Hábitats Bénticos y su Relación con la Pesquería de la Langosta *Panulirus argus*. Bahía de la Ascensión, Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an. Proyecto SISIERRA 20000706005.
- Marsh Jr. J.A., W.C. Dennison, y R.S. Alberte. 1986. Effects of temperature on photosynthesis and respiration in eelgrass (*Zostera marina* L.). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 101: 257-267.
- McMillan, C., 1982. Reproductive physiology of tropical seagrasses. *Aquat. Bot.*, 14: 245-258.
- Mitchell, J.M.m 1991. Carbon Dioxide and Future Climate. Weatherwise, August-September, pp. 17-23.
- Morison, J., M. Seele, y R. Andersen, 1998. Hydrography of the upper Arctic Ocean measured from the nuclear submarine USS Pargo. *Deep-Sea Res.*, 45: 15-38.
- Neckles, H.A., R.L. Wetzel, y R.J. Orth., 1993. Relative effects of nutrient enrichment and grazing on epiphyte-macrophyte (*Zostera marina* L.) dynamics. *Oecologia*, 93, 285-295.
- NOAA, 2009. The Saffir-Simpson Hurricane Scale (en línea). National Weather Service. National Hurricane Center. www.nhc.noaa.gov/aboutsshs.shtml [Consulta: mayo de 2009].
- Orth, R.J., y K.A. Moore, 1988. Distribution of *Zostera marina* L. and *Ruppia maritima* L. sensu lato along depth gradients in the lower Chesapeake Bay, us. *Aquat. Bot.*, 32, 291-305.
- Patriquin, D.G., 1975. Migration of blowouts in seagrass beds at Barbados and Carriacou, West Indies and its ecological and geological implications. *Aquat. Bot.*, 1: 163-189.
- Phillips, R.C., W.S. Grant, y C.P. McRoy, 1983. Reproductive strategies of eelgrass *Zostera marina*. *Aquat. Bot.*, 16, 1-20.
- Pulich Jr., W.M., 1985. Seasonal growth dynamics of *Ruppia maritima* and *Halodule wrightii* in southern Texas and evaluation of sediment fertility status. *Aquat. Bot.*, 23: 53-66.
- Randall, J.E., 1965. Grazing effect on seagrasses by herbivorous reef fishes in the West Indies. *Ecology*, 46:255-260.
- Robble, M.B., y J.C. Zieman, 1984. Diel variation in the fish fauna of a tropical seagrass feeding ground. *Bulletin of Marine Science*, 34: 335-345.

- Sánchez-Santillán, N., R. Garduño L., y P. Negrete, 2005. Análisis del nivel del mar en seis puertos del Golfo de México a través de un método alternativo. *Contactos*, 57: 21-27.
- Sand-Jensen, K., 1977. Effect of epiphytes on eelgrass photosynthesis. *Aquat. Bot.*, 3: 55-63.
- Sand-Jensen, K., y J. Borum, 1991. Interactions among phytoplankton, periphyton, and macrophytes in temperate freshwaters and estuaries. *Aquat. Bot.*, 41: 137-175.
- Sand-Jensen, K., y N.P. Revsbech, 1987. Photosynthesis and light adaptation in epiphyte-macrophyte associations measured by oxygen microelectrodes. *Limnol. Oceanogr.*, 32: 452-457.
- Schneider, S.H., 1994. Detecting climatic change signals: Are there any fingerprints? *Science*, 263: 341-347.
- Schowengerdt, R.A., 1997. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing, 2nd ed. San Diego, CA: Academic Press.
- Short, F.T., 1980. A simulation model of the seagrass production system. p. 275-295. In: R.C. Phillips, and C.P. McRoy (eds.). *Handbook of Seagrass Biology: An Ecosystem Perspective*. Garland STPM Press, New York.
- Short, F.T., 1987. Effects of sediment nutrients on seagrasses: Literature review and mesocosm experiment. *Aquat. Bot.*, 27: 41-57.
- Short, F.T., y S. Wyllie-Echeverria, 1996. Natural and human-induced disturbance of seagrasses. *Environ. Conservation*, 23(1): 17-27.
- Short, F.T. y C.A. Short, 1984. The seagrass filter: Purification of estuarine and coastal water. p. 395-413. In: V.S. Kennedy (ed.). *The Estuary as a Filter*. Academic Press, Orlando.
- Short, F.T., y H.A. Neckles, 1999. The effects of global climate change on seagrasses. *Aquatic Botany*, 63: 169-196.
- Short, F.T., D.M. Burdick, y J.E. Kaldy, 1995. Mesocosm experiments quantify the effects of eutrophication on eelgrass, *Zostera marina* L. *Limnol. Oceanogr.*, 40: 740-749.
- Smith, R.C., B.B. Prezelin, K.S. Baker, R.R. Bidigare, N.P. Boucher, T. Coley, D. Karentz, S. MacIntyre, H. Matlick, D. Menzies, M. Ondrusek, Z. Wan, y K.J. Waters, 1992. Ozone depletion: Ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters. *Science*, 255: 952-959.
- Sosa-Cordero E., M.L.A. Liceaga-Correa, y J.C. Seijo, 2008. The Punta Allen lobster fishery: current status and recent trends. p. 149-162. In: FAO Fisheries. *Case studies in fisheries self-governance*. Technical paper 504.
- Stoner, A.W., 1983. Distributional ecology of amphipods and tanaidaceans associated with three seagrass species. *J. Crust. Biol.*, 3: 505-518.
- Talbot, M.M.B., W.T. Knoop, y G.C. Bate, 1990. The dynamics of estuarine macrophytes in relation to flood/siltation cycles. *Bot. Mar.*, 33: 159-164.
- Thayer, G.W., y A.J. Chester, 1989. Distribution and abundance of fishes among basin and channel habitats in Florida Bay. *Bull. Mar. Sci.*, 44: 200-219.
- Titus, J.G., 1990. Strategies for adapting to the greenhouse effect. *APA J., Summer*, 1990: 311-323.
- van Tussenbroek, B.I., 1994. The impact of Hurricane Gilbert on the vegetative development of *Thalassia testudinum* in Puerto Morelos Coral Reef Lagoon Mexico: A retrospective study. *Bot. Mar.*, 37: 421-428.
- Wanless, H.R., L.P. Tedesco, y K.M. Tyrrell, 1988. Production of subtidal tubular and surficial tempestites by Hurricane Kate, Caicos Platform British West Indies. *J. Sediment. Petrol.*, 58: 739-750.
- Ward, L.G., W.M. Kemp, y W.R. Boynton, 1984. The influence of waves and seagrass communities on suspended particulates in an estuarine embayment. *Mar. Geol.*, 59: 85-103.
- Williams, S.L., y W.C. Dennison. 1990. Light availability and diurnal growth of a green

- macroalga *Caulerpa cupressoides* and a seagrass *Halophila decipiens*. *Mar. Biol.*, 106: 437-444.
- Worcester, S.E., 1995. Effects of eelgrass beds on advection and turbulent mixing in low current and low shoot density environments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 126: 223-232.
- Worrest, R.C., 1989. What are the effects of UV-B radiation on marine organisms? p. 269-278. *In*: T. Schneider (ed.). *Atmospheric Ozone Research and its Policy Implications*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Zimmerman, M.S., y R.J. Livingston, 1976. Seasonality and physicochemical ranges of benthic macrophytes from a North Florida estuary Apalachee Bay US. *Contrib. Mar. Sci.*, 20: 33-45.
- Zimmerman, R.C., R.D. Smith, y R.S. Alberte, 1989. Thermal acclimation and whole-plant carbon balance in *Zostera marina* L. (eelgrass). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 130: 93-109.

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. p. 229-248. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Arrecifes de coral y cambio climático: vulnerabilidad de la zona costera del estado de Quintana Roo

P. Blanchon, R. Iglesias-Prieto, E. Jordán Dahlgren y S. Richards

RESUMEN

A la fecha se reconocen tres efectos principales del Cambio Climático Global en la comunidad coralina: el incremento de la temperatura de las aguas superficiales del mar, la acidificación de las aguas marinas y el incremento en el nivel medio del mar. El impacto de estos efectos es múltiple y con sinergias complejas. El calentamiento del mar es responsable de diversos impactos en la comunidad coralina y a la fecha en el Caribe Mexicano, y todo el Gran Caribe, el de mayor severidad son las enfermedades emergentes en corales de coral y otros organismos de la comunidad coralina. La significativa reducción del tamaño poblacional de las especies clave más importantes (*Acropora palmata*, *A. cervicornis*, *M. annularis* y *M. faveolata*) por epizootias bacterianas es un claro ejemplo de este tipo de impactos. Lo cual aunado a eventos de blanqueamiento y un incremento en la ciclogénesis, resulta en diversas formas de estrés que limitan el buen desarrollo de la comunidad coralina. Situación que a corto/mediano plazo se verá aún más agravada por incrementos en el nivel del mar, pues habrá un mayor deterioro de la calidad ambiental para la comunidad coralina por inundación de la zona costera, escurrimientos y erosión de playas más intensa. A mediano/largo plazo se considera que los impactos serán mucho más severos para toda la zona costera, incluyendo el arrecife coralino. Esta amenazas al potencial de la comunidad coralina para mantener y construir arrecifes coralinos, implica una amenaza también a la economía de la región, pues la gran mayoría de los servicios que se ofrecen en los litorales son derivados directa e indirectamente de la presencia funcional del arrecife coralino. Razón adicional por la cual es fundamental moderar significativamente los otros impactos directos e indirectos que el desarrollo genera en sus áreas de influencia.

Palabras clave: comunidades coralinas, cambio climático, Caribe Mexicano

INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral son las estructuras biogénicas mas grandes del planeta y los depósitos de biodiversidad mas importantes del ambiente marino. Los sistemas arrecifales florecen en las aguas oligotróficas someras de los océanos tropicales. La productividad de estos ecosistemas es entre dos y tres ordenes de magnitud mayor que la registrada en las aguas oceánicas que los rodea (Muscatine y Weis, 1992). En las costas caribeñas del estado de Quintana Roo, los arrecifes de coral son uno de los ecosistema costeros mas conspicuos. La mayor parte de la costa del estado se encuentra protegida por estructuras arrecifales que van desde arrecifes bordeantes y de barrera, hasta formaciones con estructuras similares a atolones (Jordán Dahlgren y Rodríguez-Martínez, 2003). Estos ecosistemas forman parte de lo que se conoce como el arrecife Mesoamericano, el cual se extiende desde la zona norte del estado de Quintana Roo en México hasta las islas de la bahía en Honduras. En el estado de Quintana Roo, los arrecifes de coral además de ser un gran reservorio de biodiversidad y de sostener una industria pesquera significativa, proveen servicios naturales que forman

la base de una industria turística de gran envergadura. Dicha industria representa una de las fuentes mas importantes de divisas y es receptora de una fracción importante de la inversión extranjera directa que se realiza en nuestro país, por lo que tiene un valor estratégico para la economía nacional.

Es importante señalar que la mayoría de la infraestructura hotelera que se presenta en la tabla 1 se encuentra localizada directamente sobre la franja costera y por lo tanto presentan una alta vulnerabilidad durante la temporada de tormentas y huracanes. Pese a que los arrecifes de coral proveen múltiples servicios naturales que sostienen la industria turística de la zona, como la claridad de las aguas, la belleza natural de las comunidades coralinas y el aporte de sedimentos calcáreos a las playas, por simplicidad, utilizaremos solamente la protección de la zona costera durante eventos meteorológicos extremos para ejemplificar el valor potencia de dichos servicios naturales así como la vulnerabilidad de la zona costera a los efectos negativos del cambio climático global (CCG) tendría sobre los arrecifes de coral. En la figura 1 se ilustra como el arrecife coralino

Tabla 1. Datos comparativos de la capacidad hotelera y de los ingresos por actividades turísticas de los cuatro principales destinos del estado de Quintana Roo. Secretaria de Turismo del estado de Quintana Roo(2005). Los ingresos se presentan como millones de dólares americanos.

Destino	No. de hoteles	No. de habitaciones	Ingresos Enero-Marzo	Ingresos Anualizados
Cancún	146	27,750	572.23	2288.92
Riviera Maya	354	24,010	417.6	1670.4
Cozumel	52	3,800	154.96	619.84
Isla Mujeres	52	1,070	15.65	62.6
Total	772	60,459	1,160	4,642

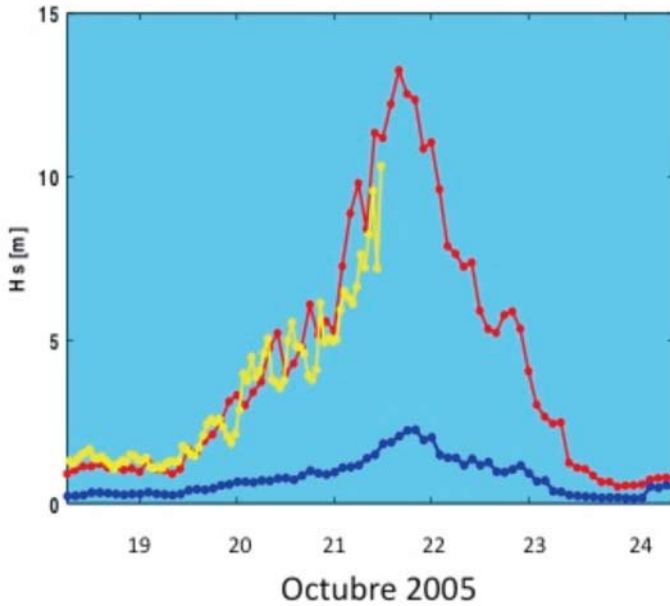


Figura 1. Registros de las alturas significantes de las olas en la parte externa del arrecife frente a Puerto Morelos (líneas roja y amarilla), y en el interior de la laguna arrecifal (línea azul) durante el huracán Wilma en 2005 (Iglesias-Prieto *et al.*, en preparación).

fue capaz de atenuar la energía del oleaje de tormenta en 99% durante el huracán Wilma en 2005.

A la fecha se reconocen tres efectos principales del Cambio Climático Global (CCG) capaces de afectar severamente a la comunidad coralina y por lo tanto disminuir tanto la calidad de los servicios naturales que dicha comunidad coralina ofrece a la sociedad: el incremento de la temperatura de las aguas superficiales del mar, la acidificación de las aguas marinas y el incremento en el nivel medio del mar. La magnitud y el sentido del impacto que provoca cada uno de estos efectos en las comunidades coralinas es variable, pero interdependiente. El impacto potencial de estos tres efectos se puede resumir de la siguiente manera:

- a) El incremento de la temperatura de las aguas superficiales de mares tropicales y subtropicales han sido positivamente relacionados con tres tipos de eventos: Blanqueamiento de corales (Hoegh-Guldberg, 1999), emergencia de enfermedades probablemente patogénicas o no (Harvell *et al.*, 1998); e incrementos en la frecuencia e intensidad de ciclones (Webster *et al.*, 2005). Cada uno de estos eventos pueden por sí mismos conducir a mortalidades masivas (Heron *et al.*, 2008), no obstante, comúnmente son eventos concurrentes.
- b) La acidificación del océano, resultado de cambios en el sistema buffer por el exceso de CO_2 , resulta en un incremento gradual en el costo energético que corales y otros organismos calcificadores realizan para

mantener las tasas de calcificación necesarias (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). En principio, en la medida que se va reduciendo el pH el costo metabólico puede ser tan elevado que comprometa otras funciones vitales, como podría ser la producción de gónadas o resistir la invasión de patógenos.

- c) El incremento del nivel medio del mar probablemente afectará más a las comunidades coralinas por su efecto en el deterioro de la calidad del ambiente, que por efectos directos de un tirante de agua mayor. Lo que se debe a que aún modestos incrementos de nivel de mar causarán cambios radicales en los procesos de erosión-deposición de las costas, amén de aumentar la vulnerabilidad de las mismas al impacto de ciclones y tormentas de alta intensidad. Considerando además el efecto de inundaciones progresivas, resultará en un cambio en la dinámica de los procesos costeros que impactará negativamente la calidad de las aguas apropiadas para el desarrollo de la biota coralina (ICCP, 2007).

Un arrecife solamente puede ser construido si las tasas de calcificación son mayores que las tasas de erosión por periodos prolongados de tiempo (Mallela y Perry, 2007). Todos aquellos procesos que limitan la calcificación de

los corales, o bien cualquier evento que resulte en la disminución de la cobertura coralina pueden comprometer seriamente el balance de carbonato de un sistema arrecifal con la consecuente pérdida de biodiversidad y servicios a la sociedad. Para corales y la biota coralina moderna el cambio ambiental resultante tiende a ser negativo en casi todos los casos, porque se trata de un sistema muy finamente sincronizado al contexto ambiental predominante durante los últimos cientos de miles de años (Pandolfi y Jackson, 2006). El aspecto principal del impacto del CCG es que los efectos son diversos y pueden ser concurrentes, resultando en forzamiento externos de intensidad variable para la comunidad coralina, tanto en tiempo como en espacio. Por ende, separar efectos del cambio global, como el incremento en el nivel o en la temperatura del océano, de los impactos locales, como eutrofización y contaminación es difícil porque sus efectos no son independientes. Sin embargo, en este momento el conocimiento adquirido, señala que a corto plazo los efectos más pronunciados del CCG para la comunidad coralina están directa o indirectamente ligados al incremento en la temperatura del mar en el caso del blanqueamiento de coral y el incremento en la prevalencia de las enfermedades en la biota coralina.

CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL BLANQUEAMIENTO DE CORALES Y ACIDIFICACIÓN DEL OCÉANO

Durante más de 200 millones de años los corales pétreos han dominado las aguas someras de los océanos tropicales, formando enormes estructuras carbonatadas conocidas como arrecifes de coral. Estas estructuras geo-

lógicas se originan a partir de la acumulación milenaria de esqueletos de coral y de otros organismos calcáreos. El éxito de los corales como formadores de arrecifes es el resultado de la relación simbiótica que mantienen con

algas unicelulares del grupo de los dinoflagelados (Stanley, 2003). Las algas proporcionan al animal alimento obtenido a partir de la fotosíntesis, mientras que los productos de deshecho del metabolismo del animal son utilizados por las algas como nutrimentos (Muscattine y Weis, 1992). Este eficiente mecanismo de reciclamiento confiere a los corales formadores de arrecifes una ventaja metabólica que les permite crecer a lo largo de toda la zona eufótica (Iglesias-Prieto *et al.*, 2004). y depositar carbonato de calcio a una tasa superior a la tasa de erosión y por lo tanto formar arrecifes.

Durante los últimos 20 años se ha presentado en todos los mares tropicales del planeta un fenómeno conocido como blanqueamiento de coral. Este fenómeno se caracteriza por una pérdida de coloración de los corales principalmente debida a una reducción en el número de algas simbiotes presentes en sus tejidos (Smith *et al.*, 2005). En condiciones normales las algas simbiotes tienen densidades cercanas al millón de células por centímetro cuadrado de coral. El blanqueamiento se presenta cuando debido a las reducciones en el número de algas simbiotes es posible observar el esqueleto blanco de los corales a través de sus tejidos transparentes. Desde un punto de vista biológico, el blanqueamiento de coral es la ruptura de la relación simbiótica entre los dinoflagelados y sus hospederos (Iglesias-Prieto *et al.*, 1992). Aunque el blanqueamiento de coral puede ser iniciado cuando los corales son expuestos a condiciones ambientales extremas de temperatura, salinidad y radiación solar. Los eventos de blanqueamiento de coral que se han presentado a escala global durante los últimos años están relacionados con la presencia de temperatu-

ras superficiales del agua anómalamente altas. Pese a que blanqueamientos de coral esporádicos y restringidos geográficamente han sido observados desde la década de los años 50, a partir de 1982 se ha detectado un incremento en la severidad, frecuencia y alcance geográfico de dichos eventos (Hoegh-Guldberg, 1999; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). Durante 1998, el año más caliente en el registro climatológico, se reportaron eventos masivos de blanqueamiento de coral en prácticamente todas las zonas coralinas del planeta. Dependiendo de la intensidad y duración de las condiciones de alta temperatura, el blanqueamiento de coral puede ser un fenómeno reversible con limitadas consecuencias negativas en la fecundidad y en la tasa de calcificación de los corales (Hoegh-Guldberg, 1999), o bien resultar en eventos de mortalidad masiva de corales. En este sentido, durante el evento de 1998 se considera que se perdieron aproximadamente 16% de los corales a escala planetaria.

La relación entre los eventos de blanqueamiento de coral y la presencia de temperaturas del agua elevadas es preocupante si tomamos en consideración que como resultado del CCG, las temperaturas del océano continuarán incrementándose y que solamente se requiere de una elevación de 1.5 °C durante un período de 3 a 4 semanas por arriba de la media de verano para iniciar el blanqueamiento de coral (Hoegh-Guldberg, 1999). Pese a que en la actualidad existe un debate sobre los mecanismos moleculares responsables del blanqueamiento de coral, también existe un consenso indicando que uno de los primeros blancos del estrés térmico es la función fotosintética de las algas simbiotes de coral (*cf* Smith *et al.*, 2005). Una vez que se inactiva la fotosín-

tesis de las algas, el esparcimiento múltiple de la radiación solar en las superficies altamente reflectantes del esqueleto de coral produce un incremento exponencial en la cantidad de radiación absorbida y a la formación de especies reactivas de oxígeno capaces de producir mortalidades masivas (Enríquez *et al.*, 2005).

Las mortalidades masivas de coral pueden tener consecuencias catastróficas ya que producen una transición de fase de una comunidad dominada por corales a una comunidad dominada por macroalgas (Huges *et al.*, 2007; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). Dicho cambio de fase se puede traducir desde el punto de vista de la estructura del arrecife en un cambio de un sistema con acreción neta (crecimiento arrecifal) a un estado de disolución neta con la concomitante pérdida de servicios arrecifales.

Como resultado de las actividades humanas, la concentración atmosférica de CO_2 en la actualidad excede los 380 ppm, esto es 80 ppm por arriba de todos los registros históricos en un período de por lo menos 740 000 años (Petit *et al.*, 1999). Aproximadamente 25% de las emisiones de CO_2 son capturadas por el océano en donde reacciona con el agua produciendo ácido carbónico el cual termina por limitar la disponibilidad de carbonato a los sistemas biológicos. Existen numerosos experimentos que indican que incrementos en la concentración de CO_2 a niveles que duplican las concentraciones preindustriales resultan en disminuciones en las tasas de calcificación de los corales formadores de arrecifes de hasta 40% (*cf* Kleypas y Langdon, 2006). Bajo estas condiciones es posible predecir que como efecto neto de la acidificación del océano la mayoría de los arrecifes de coral pasarán de un estado de calcificación neta a un estado de di-

solución. Estas predicciones son consistentes con las observaciones de que los arrecifes modernos solo se presentan en zonas del océano en donde el estado de saturación de la aragonita es superior a 3.3 (Kleypas *et al.*, 1999). Cuando los valores de saturación de aragonita se encuentran por debajo de este valor crítico, es posible observar un desacoplamiento entre la calcificación de los corales y las tasas de acreción del arrecife. Este tipo de condiciones se pueden observar en la parte sur de la península de Baja California en donde los corales son capaces de calcificar con tasas similares a las medidas en otras partes del Pacífico pero no se mantiene un balance positivo de acreción a nivel comunitario y por lo tanto no se presentan verdaderas plataformas calcáreas (Iglesias-Prieto *et al.*, en preparación)

Análisis recientes de las tendencias temporales en las tasas de calcificación de los corales a lo largo de la Gran Barrera Australiana indican disminuciones de hasta 20% en las tasas de calcificación durante los últimos 20 años (Cooper *et al.*, 2008; De'ath *et al.*, 2009). Aunque estas reducciones son mayores que las esperadas por un efecto de la temperatura es aun temprano para asignarlas de manera inequívoca a cambios en el pH del océano. En la costa de Quintana Roo no se han observado variaciones en la tasa de calcificación de los principales constructores arrecifales asociados a la acidificación del océano (Carricart-Ganivet *et al.*, en revisión). Los efectos sinérgicos de la exposición a temperaturas elevadas y reducciones en el pH del mar aún no están claramente descritos y son en la actualidad un tema de investigación muy activo. Antonny *et al.* (2008), reportaron que la exposición a altas temperaturas en ambientes ácidos exacerbó el blanqueamiento de coral lo que pro-

bablemente indique que en el futuro cercano estos efectos combinados comprometan la capacidad de los corales de construir arreci-

fes con consecuencias catastróficas para estos ecosistemas.

EL CALENTAMIENTO DE LOS MARES TROPICALES Y LAS ENFERMEDADES EMERGENTES EN CORALES Y LA BIOTA CORALINA

En esta sección se entiende por enfermedades emergentes (EE), a aquellas enfermedades que independientemente del agente causal y de que sean novedosas o no, son capaces de tener un importante efecto poblacional. En este sentido se utiliza el término enfermedad en su sentido más genérico: la aparición de signos de disfunción fisiológica que pueda o no causar mortalidad, independientemente de la causa que provoca la afección. En particular se analiza la relación potencial entre los efectos del incremento de la temperatura a través de la relación entre anomalías térmicas y las (EE de aquí en adelante), sin abordar el problema del blanqueamiento térmico que por su relevancia es discutido en detalle en otra sección.

En las últimas décadas la incidencia de EE se ha multiplicado en los ecosistemas arrecifal coralinos y su efecto directo e indirecto ha sido severo como demuestran los siguientes ejemplos: En la década de los ochenta del pasado siglo, la enfermedad conocida como "banda blanca" (Gladfelter, 1982) causó mortalidades masivas en los enormes campos de *Acropora palmata* y *A. cervicornis* que caracterizaban a los arrecifes de toda la región biogeográfica del Caribe. Hoy en día, quedan pocos ejemplos de esos exuberantes campos, a la vez que diversas EE siguen afectando a los reclutas de estas especies. Ecológicamen-

te el efecto ha sido catastrófico porque estas especies de rápido crecimiento y eficiente distribución clonal son las que mantienen una elevada heterogeneidad espacial en las zonas someras del arrecife; con todos los beneficios ecológicos que esto implica. Pero además, son constructores arrecifales primarios (Blanchon y Shaw, 1995) y por ende, uno de los principales agentes de recuperación de áreas arrecifales impactadas por huracanes.

Otro tipo de catástrofe ecológica para la comunidad coralina fue causado por una enfermedad novedosa que causó mortalidades masivas del erizo *Diadema antillarum*, en la gran mayoría de los arrecifes coralinos de la región biogeográfica del Caribe; fenómeno que inició también a principios de los ochenta (Lessios, 1984). La consecuencia inmediata de esta mortalidad masiva fue la pérdida del herbívoro más importante en las zonas someras de los arrecifes caribeños; lo que a su vez ocasiono un crecimiento algal descontrolado capaz de cubrir corales e impedir eventos de reclutamiento. El resultado para muchos arrecifes, aunque no para todos, fue una sustitución temporal de corales por algas como elementos dominantes de la estructura comunitaria (Hughes, 1994).

Las consecuencias ecológicas a mediano y largo plazo de estos dos eventos causados por EE aún se están ponderando en términos

de su capacidad de provocar cambios de fase semi-estables (Hughes *et al.*, 2007). Este tipo de epizootias pan-caribeñas, extensas y letales, son un fenómeno reciente, probablemente determinado en mucho por el estrés térmico acumulado y puntualmente por anomalías térmicas. El registro fósil de los últimos cientos de miles de años, señala claramente que *Acropora palmata* y *A. cervicornis* han sido corales dominantes y principales formadores de los arrecifes caribeños (Greenstein *et al.*, 1998). La evidencia fósil indica también hiatos en los registros, que podrían indicar efectos de antiguas epizootias; pero si acaso lo fueron, esa misma evidencia indica que se trata de fenómenos locales y no pan-caribeños como ha sucedido en la actualidad (Aronson *et al.* 1998).

Si bien los ejemplos anteriores muestran el potencial catastrófico que pueden tener las EE, en su momento, no se relacionó su emergencia con el calentamiento del mar. Más aún, estos ejemplos parecerían mostrar efectos directos cuando en realidad los impactos observados resultan de complejas interrelaciones sinérgicas, que a su vez son inducidas por múltiples efectos del CCG y del desarrollo humano en la zona costera. Por ejemplo, el caso del enorme impacto de la mortalidad masiva de *Diadema antillarum*, se da porque los otros herbívoros naturales, principalmente peces han sido diezmados por sobrepesca. En el caso particular de Jamaica, particularmente afectado por este evento, se sumó el efecto del impacto generado por el huracán Allen que destruyó en mucho la elevada heterogeneidad espacial de las zonas arrecifales someras (Hughes *et al.*, 2007).

Hoy en día, se postula que la relación primaria entre el incremento de temperatura del

mar y la creciente incidencia de EE en corales (y biota coralina en general) resulta de diversos efectos fisiológicos y ecológicos, que afecta tanto a hospederos como a patógenos potenciales. El efecto principal del estrés térmico en los hospederos es complejo y postula que reduce su capacidad de enfrentar con éxito interacciones ecológicas y los efectos de otros factores de forzamiento ambiental e incluso haciéndolos más susceptibles de ser infectados y de disminuir su capacidad de combatir exitosamente infecciones (Harvell *et al.*, 2007; Lesser *et al.*, 2007). Situación más problemática aún, porque aguas con temperaturas más cálidas favorecen: a) el desarrollo poblacional de patógenos bacterianos y quizás de virus también (Daszak *et al.*, 2001; Harvell *et al.*, 1999); b) la expansión en la distribución de patógenos potenciales y la invasión de nuevos ambientes (Banin *et al.*, 2000); c) el potencial cambio en el tipo de interacción mutualista entre las bacterias y el hospedero a una de patogénesis (Lesser *et al.*, 2007); y d) la producción de toxinas en algunos *Vibrios* cuando la temperatura rebasa determinados umbrales (Ben Haim *et al.*, 2001).

Se ha propuesto que existe una relación entre la cobertura de los corales, el aumento en la temperatura del agua y el nivel de prevalencia de enfermedades. (Bruno *et al.*, 2003), implicando que la transmisión es denso-dependiente y apuntando hacia un agente infeccioso. Tal puede haber sido el caso de la enfermedad de la banda blanca en Acropóridos y de la mortalidad de *Diadema antillarum*, en el Gran Caribe, pero en ambos casos no fue posible aislar a un patógeno responsable. Sin embargo, a finales de los setentas y principios de los ochentas, además de mortalidades masivas por supuestos agentes infecciosos, se dan

también severos eventos de blanqueamiento térmico. Y a partir de entonces se ha ido registrando un constante incremento de signos y síndromes que corresponden al criterio de EE.

De hecho, estas inferencias históricas sólo se refieren al género *Acropora* pero en las últimas décadas se ha observado un variado conjunto de EE, la mayoría letales, que afectan a los corales escleractinios de arrecies en todos los mares tropicales del mundo, y desafortunadamente en mayor medida a los que son constructores clave. Weil *et al.* (2006) y Harvell *et al.* (2007) enlistan estos síndromes y enfermedades, así como sus hospederos y posibles agentes causantes (tabla 1). Entre las EE enfermedades que han satisfecho el postulado de Koch, en laboratorio, se encuentran patógenos primarios como bacterias, algunas cosmopolitas, pero también hongos de origen terrestre como *Aspergillus sydowii*, que ataca a gorgonáceos. Entre las bacterias, las del género *Vibrio* son particularmente agresivas, pero también se han encontrado bacterias comunes en tiburones e incluso humanos y otras recientemente descritas que a la fecha solamente se han aislado de corales enfermos (tabla 1). Dado que el postulado de Koch se comprueba condiciones de laboratorio, queda la duda de en algunos casos se trate de patógenos oportunistas en lugar de primarios. Más aún, porque prácticamente en todos estos casos de enfermedades infecciosas el origen de los patógenos, los mecanismos de infección y los vectores potenciales, son aún desconocidos.

Kushmaro y Kramarsky-Winter (2005), postulan que en la capa mucosa que produce el coral sobre su epitelio externo, se encuentra una compleja comunidad bacteriana que aprovecha los mucopolisacáridos del mucus como

fuente de energía. Pero también postulan que esas comunidades bacterianas son diferentes de la que existe en las aguas que circundan al coral y que funcionan como una barrera a la invasión por otras bacterias no comensales; algunas incluso producen antibióticos específicos. En corales que han sufrido un evento de blanqueamiento térmico, se ha observado un cambio significativo en la composición de la comunidad bacteriana asociada al mucus del coral, siendo particularmente evidente la incorporación de especies de *Vibrio* que existen en las aguas adyacentes al coral, pero que no eran parte de la comunidad bacteriana comensal original (Ritchie y Smith, 2005; D. Bourne com.pers.). Por lo que se considera que el incremento en la temperatura del mar puede provocar un desequilibrio funcional entre el coral y su comunidad bacteriana, cambiando la relación de comensal a patógeno, si los efectos del estrés térmico alteran la señalización entre los diferentes componentes del holobionte.

Por otro lado, en Australia se han registrado casos de muertes masivas de Acropóridos por un síndrome blanco, para el cual no ha sido posible identificar un patógeno probable (Ainsworth *et al.*, 2008). Utilizando técnicas histológicas y técnicas moleculares estos autores muestran que no hay indicio de bacterias alóctonas en las áreas de tejidos sanos o enfermas de estos corales, en cambio, encuentran signos de apoptosis en las células del coral, pero no se puede explicar el origen de esta respuesta radical. Si efectivamente la mortalidad observada es causada por este fenómeno, debe existir un disparador del fenómeno, algo que lo mantenga hasta destruir todo el tejido del coral y algo que permita la comunicación del fenómeno entre colonias. Pero

algo así también puede ser explicado por un estrés ambiental severo, como incremento de la temperatura del mar; aunque no excluye la posibilidad de ataques virales y sus secuelas.

En contraste con lo anterior, Sussman *et al.* (2008) postulan que un síndrome blanco similar que también causa una extensa mortalidad de acropóridos en las Islas Marshall, es causada por un patógeno infeccioso, que tiene una elevada afinidad genética con *Vibrio coralliticus*. Este es un planteamiento interesante pues anteriormente Ben-Haim *et al.* (2001) postulan que cuando en arrecifes del Mar Rojo la temperatura del mar aumenta por encima de los 30° centígrados, *Vibrio coralliticus* produce una toxina que destruye la pared celular de las zooxantelas, en el coral *Oculina patagónica* y con ello causa la muerte del coral por lo que se ha denominado blanqueamiento bacteriano, sin embargo, observaciones posteriores cuestionan esta hipótesis, por lo que su validez requiere de confirmación.

Lo anterior muestra que existe evidencia a la fecha de que tanto el animal como las zooxantelas pueden ser el blanco de patógenos, en mucho por el incremento de temperatura. El síndrome de la banda amarilla, otro síndrome letal cuya virulencia ha sido asociada con temperaturas elevadas (Cervino *et al.*, 2004) está causando severos impactos en comunidades corallinas del Caribe e Indo-Pacífico, es aparentemente causada por un consorcio de especies de *Vibrio* (Cervino *et al.*, 2008) que atacan a las zooxantelas. Dado que el síndrome se caracteriza por una banda de decoloración, blanqueamiento y eventualmente muerte del tejido; quizás exista un mecanismo de ataque similar a lo propuesto por Ben-Haim *et al.* (2001). En particular es interesante el efecto directo sobre las zooxantelas dado lo que se conoce de la relación positiva entre anomalías térmicas y blanqueamiento masivos (Hoegh-Guldberg, 1999).

LAS ENFERMEDADES DE CORAL EN LOS ARRECIFES MEXICANOS Y EL GRAN CARIBE

El Gran Caribe se ha denominado como “hot spot” de enfermedades de coral por la elevada prevalencia y diversidad de EE. Se ha observado que, al menos en términos de la apariencia de los signos, algunas EE son capaces de afectar corales de diferentes especies, géneros e incluso familias (tabla 2). Por otro lado, algunas especies son afectadas por muchos síndromes. Desafortunadamente, entre estas especies se incluyen aquellas que en el presente son las más importantes en conformar y mantener la estructura del arrecife, como son especies del género *Montastraea*, *Diploria* y *Colpophyllia*,

además del caso antes mencionado de las especies del género *Acropora* (tabla 2). En términos generales, de las aproximadamente 60 especies de corales que colonizan los arrecifes del Gran Caribe, más del 70% son afectadas por alguna enfermedad o síndrome, entre ellas las especies clave (aproximadamente 15).

En los arrecifes del Caribe Mexicano y del Golfo de México el panorama anteriormente descrito es el mismo que para el Gran Caribe, con grandes mortalidades de *Acropora palmata* y *A. cervicornis* (Jordán-Dahlgren, 1992; Rodríguez *et al.*, 2001). Y hoy en día la pro-

Tabla 2. Enfermedades y síndromes más comúnmente encontrados afectando corales Escleractinios y Octocorales en el Caribe e Indo-Pacífico. Modificado de Weil *et al.*, 2006 y Harvell *et al.*, 2007.

	Patógeno	Grupo	Hospedero Escleractinio	Hospedero Octocoral
Caribe				
Enfermedad				
Banda Blanca I	Bacteria Gram (-)	Bacteria	2	
Banda Blanca II	<i>Vibrio carchariae</i>	Bacteria	2	
Parches Necróticos	<i>Serratia marcescens</i>	Bacteria	1	
Plaga Blanca I	gram - bacterium	Bacteria	12	
Plaga Blanca II	<i>Aurantimonas coralicida</i>	Bacteria	41	
Aspergilosis	<i>Aspergillus sydowii</i>	Hongo		10
Síndrome				
Banda Amarilla	Consortio: <i>Vibrio</i>	Consortio	11	
Banda Negra	Consortio: <i>Phormidium corallyticum</i> , <i>Desulfovibrio</i> , <i>Beggiatoa</i> sp.	Consortio	19	6
Banda Oscura	NI		8	
Banda Roja?	Consortio: <i>Ocellularia</i> y otras causas	Consortio	13	1
Manchas Oscuras *	<i>Vibrio</i> ?, otros	Bacteria	10	
Ciliados	<i>Halofolliculina</i> sp	Ciliado	25	
Tumor	Alga endozoica, otros	Alga	7	5
Indo-Pacífico - Mediterráneo				
Enfermedad				
Blanqueamiento Bacteriano*	<i>V. shiloi</i> & <i>V. coralliilyticus</i>	Bacteria	1	
Plaga Blanca	<i>Thalassomonas loyona</i>	Bacteria	1	
Puntos Blancos Ulcerativos en <i>Porites</i>	<i>Vibrio</i> sp	Bacteria	3	
Trematodiasis en <i>Porites</i>	<i>Podocotyloides stenometra</i>	Tremátodo	4	
Síndrome				
Banda Amarilla	Consortio: <i>Vibrio</i>	Consortio	5	
Banda de Erosión al Esqueleto	<i>Halofolliculina corallasia</i>	Ciliado	31	
Banda Café	Ciliado?	Ciliado?	16	
Banda Negra	Consortio: Cyanobacterias?	Consortio?	29	3
Necrosis Negra	NI			1
Síndrome Blanco	<i>Vibrio</i>	Bacteria	17	
*Ver Texto				

liferación del síndrome letal de la banda amarilla está causando estragos en las poblaciones de *Montastraea annularis* y *M. faveolata* (Jordán-Dahlgren *et al.*, 2005) tanto en el Golfo de México como en el Caribe mexicano. Una estimación, entre censos separados por más de 20 años, muestra una pérdida de más del 60% en la abundancia de constructores arrecifales clave, a lo largo de todo el sistema arrecifal del Caribe mexicano, atribuible tanto a la banda blanca como al síndrome de la banda amarilla (Jordán-Dahlgren, 1992; Harvell *et al.*, 2007).

Aparentemente aún no han sido detectados signos que pudieran relacionarse con enfermedades de coral en las comunidades coralinas del Pacífico mexicano (com. pers. H. Reyes). Sin embargo, de ser ese el caso, es probable que esta situación no perdure, pues como se ha explicado anteriormente existen numerosos casos de EE en los arrecifes del Indo-Pacífico. Más aún, se han observado áreas de mortalidad masiva en campos de corales uniespecíficos, sin haber presenciado el evento que lo causó, pero el patrón espacial resultante no excluye la posibilidad de que haya sido causado por enfermedades.

FUTUROS ESCENARIOS DEL INCREMENTO EN EL NIVEL DEL MAR Y SU IMPACTO A LO LARGO DE LAS COSTAS DE QUINTANA ROO

Cambios relativos en el nivel del mar son el resultado de cambios en la temperatura oceánica (Expansión térmica), volumen de las capas de hielo (casquetes polares, glaciares de montaña) y cambios en la forma y nivel de la tierra (neotectonismo o ajuste glacio-isostático). Cambios en los primeros dos parámetros producen a su vez cambios eustáticos en el nivel del mar. Algunas reconstrucciones realizadas muestran que el calentamiento del océano y el derretimiento de las capas de hielo contribuyeron en promedio ~20 cm en el incremento del nivel del mar en el siglo XX (Church y White, 2006). La tasa de incremento promedio durante ese siglo fue ~1.7 mm/año, pero este incrementó desde 1993 a ~3 mm/yr (figura 2A). Esta tasa de incremento, sin embargo ignora variaciones decadales las cuales muestran incrementos de más de 5.31 mm/año (Holgate 2007).

Predicciones de cuanto y de que tan rápido podrá incrementarse el nivel del mar eustático durante el siglo XXI se ha realizado teniendo en cuenta datos históricos al igual que proyecciones de calentamiento (IPCC 4AR). No asumiendo cambios en la tendencia actual Church y White (2006) estimaron un incremento de 31 ± 3 cm para el 2100 a una tasa de ~3 mm/año. Similarmente, la IPCC 4AR predijo de 18 a 59 cm para el 2100 a una tasa 2.0 mm a 6.5 mm/año (Meehl *et al.*, 2007), los cuales son similares a las estimaciones previas realizadas en el TAR (figura 2B).

Estas predicciones en gran parte no han cambiado para nada desde las estimaciones previas realizadas por el IPCC, las cuales han subestimado un incremento actual del nivel del mar en 19 años desde el primer reporte realizado por el IPCC (figura 3A). Redirigiendo estas deficiencias, Rahmstorf (2007)

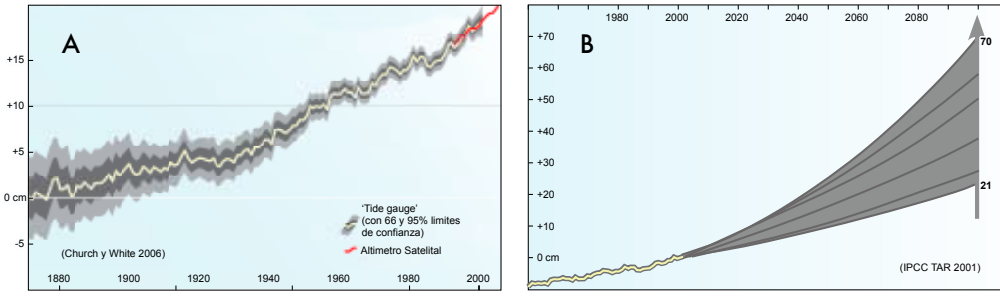


Figura 2. Incremento pasado y futuro en el nivel del mar. A) Incremento en el nivel del mar en el siglo XX. B) IPCC 4AR escenarios para 1990-2100 (basado en 2001 IPCC TAR).

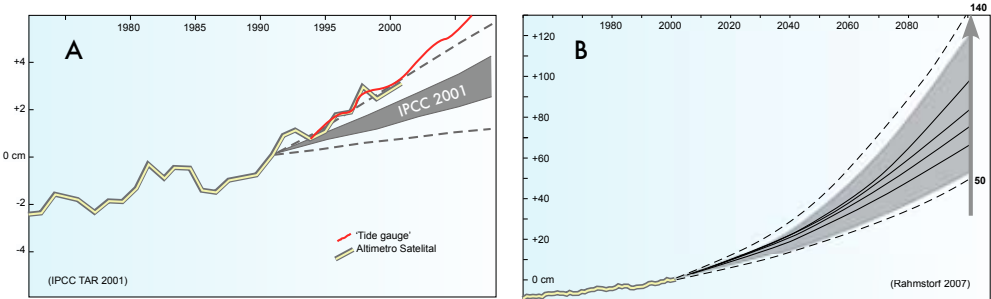


Figura 3. Futuro incremento del nivel del mar. A) Comparación de varios escenarios de cambios en el nivel del mar de 2001 IPCC (comenzando en 1990) y datos observados. B) Incremento del nivel del mar proyectado por el calentamiento de 1.4 a 5.8°C (Rahmstorf, 2007).

predijo un incremento de 50 a 140 cm (e.g. 5.6 mm a 15.6 mm/año) por calentamiento de 1.4 a 5.8°C, basado en un modelo semi-empírico de nivel del mar global y temperatura para el intervalo de tiempo de 1880-2000 (figura 3B).

Todas estas predicciones ignoran la rápida pérdida potencial de hielo de los casquetes continentales como resultado del futuro calentamiento, en gran parte debido a las

incertidumbres del comportamiento de los modelos de las capas de hielo. Recientes intentos por atender este potencial han sido realizadas por Pfeffer *et al.* (2008) quienes argumentaron que la tasa máxima a la cual el hielo podría perderse de Groenlandia y de los casquetes de hielo de la Antártica podría dar un incremento de 0.8 a 2.0 m para el 2100 (9 a 22 mm/año).

De los análisis anteriores, está claro que las predicciones más realistas del incremento del nivel del mar para el 2100 varían de ~50 cm a 150 cm en la ausencia de la inestabilidad adicional las capas de hielo, y tanto como 2 m, si esta inestabilidad aumenta. Como tal, los modelos simples muestran inundaciones

de +0.5 m y +1.5 m para el 2100 en la costa norte de Quintana Roo, así como también “el peor escenario” de +6 m, para mostrar el impacto potencial más allá del 2100. Así, se evaluó la respuesta y vulnerabilidad de sistemas sedimentarios costeros para predecir estos incrementos.

PREDICCIÓN DE LA INUNDACIÓN COSTERA DE QUINTANA ROO BAJO FUTUROS ESCENARIOS DEL INCREMENTO EN EL NIVEL DEL MAR

Al sur de Tulum y norte de Playa del Carmen, la costa oriental de Quintana Roo consiste de una baja pendiente en la llanura costera compuesta de los humedales, playas de duna-retrocedidas, lagunas costeras y arrecifes bordeantes (Jordan-Dahlgren y Rodríguez-Martínez, 2003). En contraste con la costa rocosa entre estas áreas, la estructura y forma de ésta es controlada casi completamente por la dinámica sedimentaria de estos ecosistemas. Cualquier predicción del futuro impacto del incremento del nivel del mar en estos sistemas requiere un análisis detallado de su elevación y respuesta sedimentaria. La elevación puede usarse para dar una simple estimación del máximo potencial de inundación y la respuesta sedimentaria es necesaria para proporcionar la reacción costera más realista de tal incremento.

Predecir la simple inundación de áreas costeras por el futuro incremento del nivel del mar requiere datos topográficos de alta resolución. Los datos topográficos más confiables para el área consisten de datos de altimetría de la misión topográfica de radar del Transbordador Nasa/JPL (SRTM). Estos datos no proporcionan una verdadera medida de la to-

pografía porque el radar detecta la altura de la vegetación y, en densa cobertura, poco o ningún signo puede asignarse a la tierra desnuda (Farr *et al.*, 2007). La compensación en altura entre la vegetación y el nivel del suelo desnudo tiene que ser corregido localmente. Las grandes áreas no vegetadas como por ejemplo a lo largo de las grandes carreteras, sin embargo, pueden dar valores exactos sub-métricos de la elevación.

Para corregir los errores de la vegetación, aplicamos un ajuste arbitrario pero empíricamente basado en la elevación a un modelo digital de elevación (DEM) para el norte de Quintana Roo. Este DEM ajustado fue construido usando una B-tira bicúbica para interpolar entre los píxeles (90 m) y un filtro gaussiano de 250 m para alisar el ruido que la vegetación retorna. Para hacer cálculos de la inundación, el DEM es construido sin alisamiento gaussiano, como en la predicción de +0.5 metros, o con el filtro de 125 metros para los casos de +1.5 y +6 metros. Esto tiene la ventaja de demostrar más inundación dentro de áreas bajas, las cuales faltarían si se utilizara altos valores de alisamiento (figura 4).

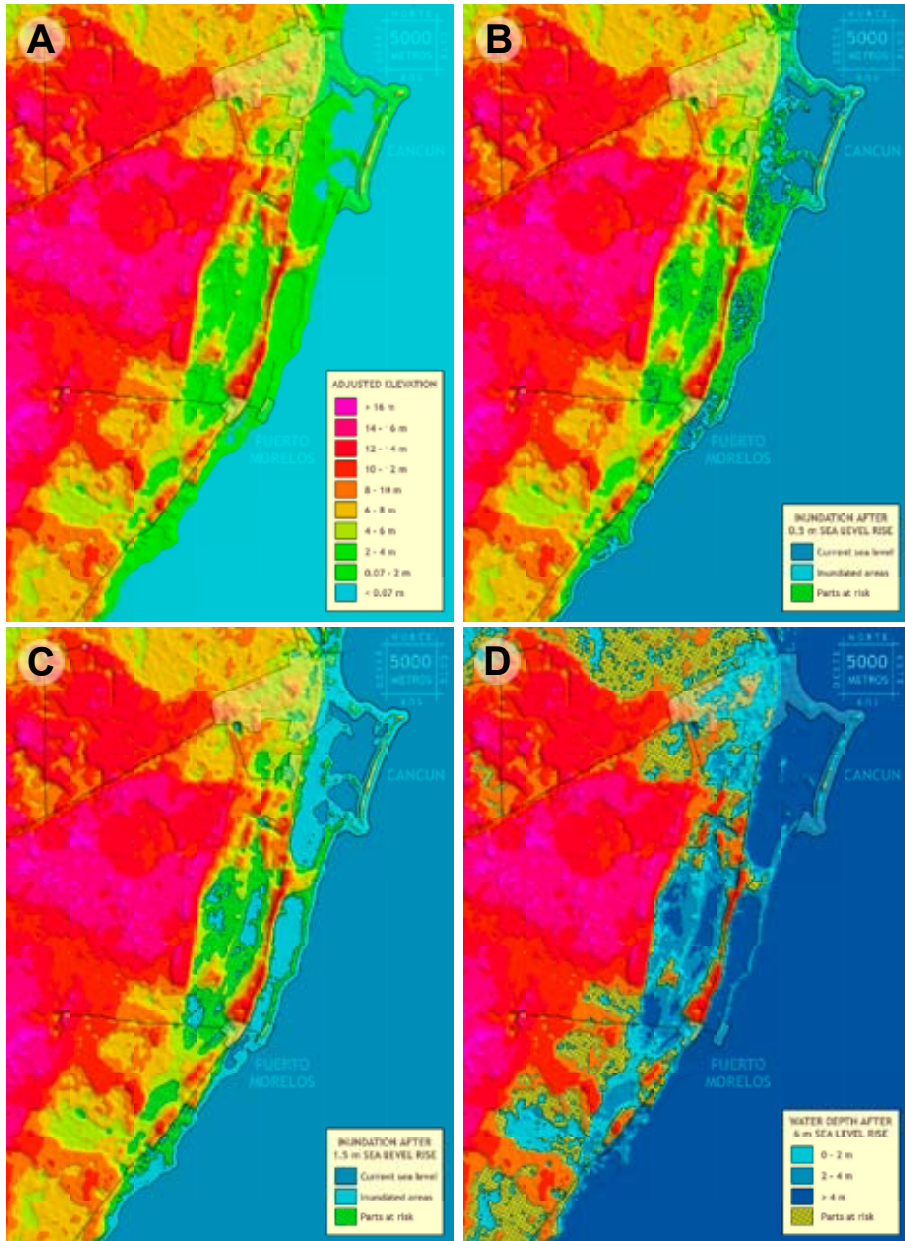


Figura 4. Modelos de inundación para el norte Quintana Roo bajo varios futuro escenarios predichos de levantamiento del nivel del mar. A) modelo de elevación Digital (DEM) basado en datos de altimetría ajustada a la vegetación SRTM. B) DEM mostrando una inundación de +0.5 m que representa la proyección mínima del incremento del nivel del mar para el 2100 en ausencia de la inestabilidad de la capas de hielo. C) DEM mostrando una inundación de +1.5 m que representa la proyección del máximo incremento del nivel del mar para el 2100 en ausencia de de la inestabilidad de la capas de hielo. D) DEM mostrando una inundación de +6 m que representa el “peor escenario” del nivel mas alto del Mar para el 2100 como el resultado del colapso de las capas de hielo.

Los diversos panoramas de que el incremento de las inundaciones causan cada vez más una significativa alteración de las costas y terrenos bajos Hinterland. La inundación de +0.5 m causa serios retrocesos de la playa y parcial inundación del humedal parálisis. La inundación de +1.5 m aumenta el retroceso de la playa y causa completa pérdida de la playa en algunas áreas. También inunda to-

talmente los humedales e inunda parcialmente las áreas bajas del Hinterland Pleistoceno. Finalmente, la inundación de +6 m causa la completa pérdida de la playa y del humedal en todas las áreas y restablece la costa a lo largo del Hinterland Pleistoceno, la cual es significativamente inundada. La inundación también se extiende en áreas bajas del terreno más viejo de Hinterland.

VULNERABILIDAD DE LOS SISTEMAS COSTEROS CON RESPECTO AL FUTURO ESCENARIO DEL INCREMENTO EN EL NIVEL DEL MAR

La vulnerabilidad de cualquier sistema es una función de la sensibilidad de ese sistema para cambiar, es decir, su grado de respuesta, y el grado al cual él puede adaptar o absorber ese cambio. Los sistemas costeros naturales a lo largo de la costa de Quintana Roo tienen la capacidad de absorber o de adaptarse con el incremento en el nivel del mar, como han hecho durante los últimos miles de años en respuesta al incremento gradual durante el Holoceno tardío. Su respuesta al futuro incremento en el nivel del mar no será simplemente inundación, como se proyectó anteriormente, sino una reorganización de la dinámica física de los materiales sedimentarios (Pilkey y Cooper, 1994). La relación entre el incremento en el nivel del mar y el retiro de la línea de costa, sin embargo, es poco conocida. El retiro a largo plazo en sistemas abiertos de playas de duna, por ejemplo, es controlado por el suministro de arena, el gradiente costero y el incremento del nivel del mar. Y en el caso más simple, el retiro de playas desprotegidas y no consolidadas se puede predecir usando la regla de Bruun (figura. 5).

No obstante la regla de Bruun asume un simple incremento bajo condiciones fairweather y no incluye los procesos como las tormentas, que cambian la profundidad de encierro (h adentro de la ecuación). Tampoco considera la estabilización de dunas y áreas posteriores a la playa por la vegetación o el interior de dunas por cementación meteórica (McLaren y Gardner, 2000). Consecuentemente, la regla de Bruun es generalmente inadecuada para predecir el retiro de la playa a lo largo de la costa de Quintana Roo donde las playas son extensivamente estabilizadas por la vegetación y cementos.

Un gran porcentaje de las playas a lo largo de la costa también son protegidas por los sistemas franja lagunar arrecifal. La respuesta de estos sistemas al incremento del nivel del mar es más difícil de predecir. Por ejemplo los ciclones tropicales los cuales en algunas partes a lo largo de la zona costa causan erosión severa y retiro, pueden causar avance de la línea de costa a lo largo de las playas protegidas por arrecifes dependiendo de la pista de tormenta específica y de las condiciones meteorológicas.

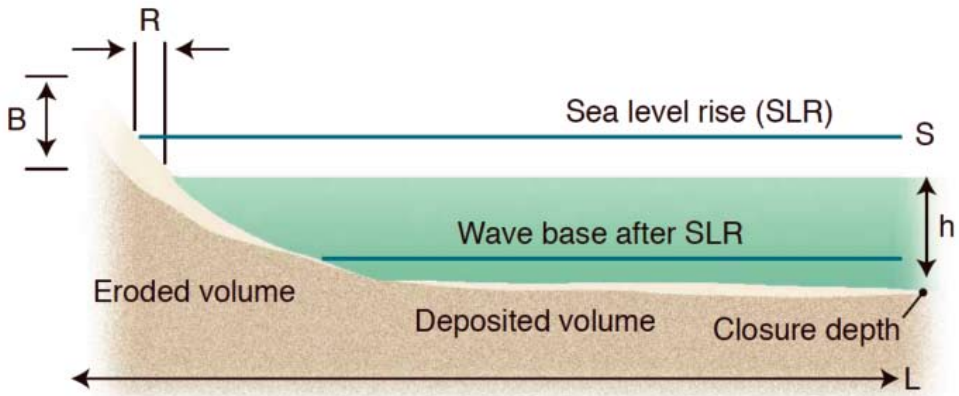


Figura 5. Retiro de la playa predicho usando la Regla de Bruun. Proporción del retiro, $R = (L/B + \text{el } h)S = (1/\tan \phi)S$, donde S es valor del incremento del nivel del mar, L es longitud de perfil a profundidad del cierre h (base de perfil en el cual el intercambio del sedimento es despreciable), ϕ es el ángulo de la pendiente del perfil, y B es altura de la duna (Bruun 1962).

cas. En un caso reciente, un gran huracán de categoría 5 (Wilma 2005) causó avance a escala decimétrica de la línea de costa a lo largo de las playas protegidas por arrecifes como resultado de la movilización del sedimento lagunar (Blanchon en la preparación).

La erosión de las playas protegidas con arrecifes debida al incremento en el nivel del mar es también posible de ser compensada por la tasa acreción vertical del arrecife. En efecto, el estudio de IPCC establece que el incremento en el nivel del mar es poco probable en afectar a su capacidad de actuar como rompeolas (Meehl *et al.*, 2007) porque se ha demostrado tener capacidad de nivelarse con subidas en nivel del mar de hasta 12-14 mm/año, como fue registrado durante la última glaciación hace 14000 años (Blanchon y Shaw, 1995).

La capacidad de los arrecifes del Caribe para solventar altas tasas de acreción, es sin embargo en la actualidad dudosa, considerando la declinación drástica (80%) de la cubierta coralina debido a enfermedades y al blanqueamiento (Gardner *et al.*, 2003). Si la capacidad de los arrecifes de acrecentar también es reducida en un 80% (*e.g.*, a ~ 3 mm/año), todos los panoramas de incremento en el nivel del mar modelados arriba sumergirán progresivamente la cresta y llevarán a un incremento en la altura de onda, causando así la erosión de playa. Además, la exacerbación de esta erosión será la entrada reducida del sedimento del arrecife en la playa y el sistema lagunar, que contribuyen normalmente hasta el $\sim$ el 30% por volumen del sedimento (Medina, 2008).

CONCLUSIONES

La conservación de los sistemas arrecifales en la costa de Quintana Roo debe ser considerada como una medida prioritaria de mitigación ante los efectos del CCG, ya que los servicios naturales que estos ecosistemas proveen para la economía local es enorme. Solamente la protección de la zona litoral que los arrecifes proveen es fundamental para la preservación de la infraestructura hotelera y por lo tanto para la viabilidad de esta industria.

Como se ha descrito, los incrementos de temperatura y las reducciones en el pH del océano limitan las tasas de calcificación de los corales de manera directa, y en el caso de las EE y de la mortalidad masiva asociada al blan-

queamiento de coral, las reducciones en la cobertura coralina comprometen seriamente la capacidad de estos ecosistemas para mantener un balance positivo de carbonato y por lo tanto de mantener sus servicios ambientales. En este sentido la mejor manera de planear un programa de mitigación de los efectos del CCG en la zona debe contemplar reducciones en las amenazas locales que sufren estos ecosistemas como son la contaminación y degradación de la calidad del agua por el desmedido e incontrolado desarrollo de la zona costera y la sobrepesca (figura 6).

Los sistemas arrecifales lagunares son vulnerables al futuro incremento en el nivel del

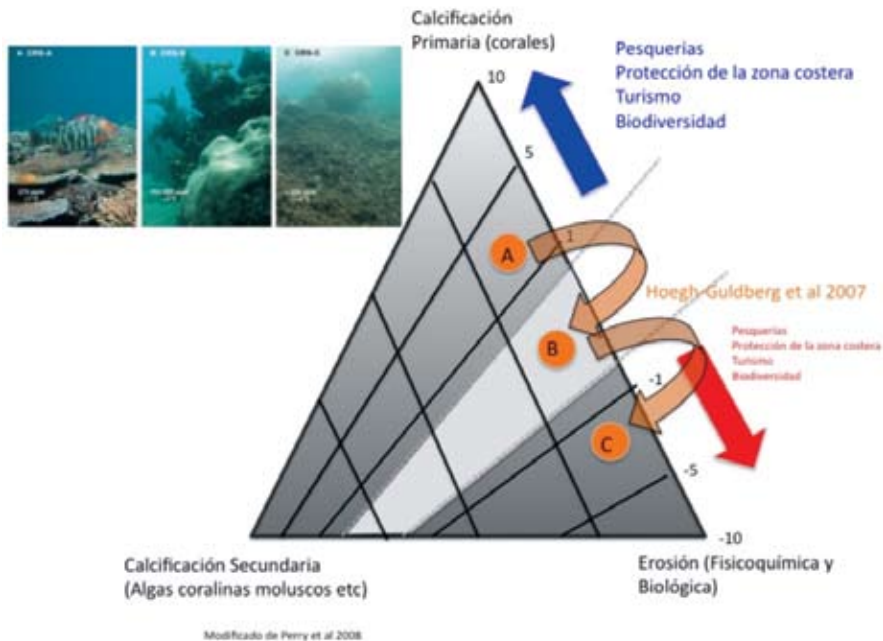


Figura 6. Posible trayectoria de las comunidades coralinas en el contexto del CCG y de la acidificación del océano.

mar, debido a la pobre salud de sus comunidades coralinas. Bajo los tres futuros escenarios del incremento del nivel del mar, los arrecifes a lo largo de la costa de Q. de Roo podrían potencialmente tolerar un incremento de ~5 mm/año con pequeños efectos adversos. Pero incrementos superiores producirían sumersión progresiva de la cresta y retirada de la línea de costa debido al incremento de la energía de la ola.

Las playas desprotegidas ya están experimentando retirada y esta tendencia será exacerbada bajo todos los futuros panoramas del incremento en el nivel del mar. Se espera que incrementos superiores a 5 mm/año, resulten en pérdida de la playa e inundación de los humedales en varias áreas, y un severo retiro en todos los otros.

LITERATURA CITADA

- Ainsworth T. D., *et al.*, 2008. *Mar Biol.* 151:19–29.
- Anthony, K. R. N., *et al.*, 2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105: 17442–17446.
- Aronson R.B., *et al.*, 1998. *Coral Reefs*, 17(3): 223–230.
- Banin E. T., *et al.*, 2000. *Applied and Environmental Microbiology*, 66: 3031–3036.
- Ben-Haim Y., *et al.*, 2001. *Environmental Microbiology* 1(3): 223–229.
- Blanchon, P., y J. Shaw, 1995. *Geology* 23(1): 4–8. (1995)
- Bruno, J.F., *et al.*, 2003 *Ecology Letters* 6:1,056–1,061.
- Bruun, 1962, ASCE J. *Waterways and Harb. Div.* 88, 117.
- Bythell J., y Sheppard, 1993, *C Mar Pollut Bull* 26:296–297.
- Cervino, J.M. *et al.*, 2004. *Applied and Environmental Microbiology*, 70 (11): 6855–6864.
- Cervino, J.M., *et al.*, 2008. *Journal of Applied Microbiology*, 105 (5):1658–1671.
- Church y White, 2006, *Geophysical Research Letters*, 33, L01602.
- T. F. Cooper, G. De'ath, K. E. Fabricius, y J. M. Lough, 2008. *Global Change Biology*, 14: 529.
- Daszak P., *et al.*, 2001. *Acta Tropica* 78:103–116.
- De'ath, G., *et al.*, 2009. *Science*, 323: 116–119 DOI: 10.1126/science.1165283
- S. Enríquez, E. R. Méndez, y R. Iglesias-Prieto, 2005. *Limnology and Oceanography*, 50: 1025.
- Farr *et al.*, 2007. *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Gardner *et al.*, 2003 *Science* 301, 958.
- Gladfelter WB., 1982. *Bull Mar Sci*, 32:639–643.
- Greenstein B. J., *et al.*, 1998. *Coral Reef* 17(3): 249–261.
- Harvell, C.D., *et al.*, 2002. *Science*, 285:1,505–1,510.
- Harvell, C.D., *et al.*, 2007. *Oceanography*, 20(1):58–81.
- Heron S., *et al.*, 2008. p.152. In: C. Wilkinson and D. Souter (eds.). Status of Caribbean coral reefs after bleaching and hurricanes in 2005. . Global Coral Reef Monitoring Network, and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville.
- Hoegh-Guldberg O., 1999. *Mar. Freshwater Res.*, 50: 839–866.
- Hoegh-Guldberg, O., *et al.*, 2007. *Science* 318 (5857): 1737–1742. (2007)

- Holgate, 2007. *Geophysical Research Letters*, 34, L01602, DOI: 10.1029/2006GL028492. (2007)
- Holgate y P.L. Woodworth, 2004. *Geophysical Research Letters*, 31, L07305, DOI: 10.1029/2004GL019626.
- Hughes, T., 1994. *Science*, 265:1,547-1,551. (1994).
- Hughes, T.P., *et al.*, 2007. *Current Biology*, 17:1-6.
- Iglesias-Prieto R., *et al.*, 1992. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89, 10302.
- Iglesias-Prieto, R., *et al.*, 2004. *Proceedings of the Royal Society of London B*. 271, 1757.
- Jordán, E., 1992. *DE Bull Mar Sci.*, 51: 104–117.
- Jordán-Dahlgren E., *et al.*, 2005. *Diseases of Aquatic Organisms*, 63 (1): 3-12.
- Jordan-Dahlgren, E., y Rodriguez-Martinez, 2003. p. 131 In: Latin American Coral Reefs, Elsevier Science BV.
- Kleypas, J. W., *et al.*, 1999. *Am. Zool.* 39 146.
- Kleypas, J. W., y C. Langdon, 2006. *Coast. Estuar. Stud.*, 61, 73.
- Kushmaro, A., y E. Kramarsky-Winter, 2005. p. 231-242. In E. Rosenberg and Y. Loya (eds.) Coral Health and Disease. Springer-Verlag.
- Lesser, M.P., *et al.*, 2007. *Jour. Exp. Mar. Biol. and Ecol.*, 346: 36–44.
- Lessios, H.A., *et al.*, 1984. *Science* 226:335–37.
- Loya Y. K., *et al.*, 2001. *Ecol. Lett.*, 4, 122.
- McLaren y Gardner, 2000. *The Holocene*. 10, 757.
- J. Mallela, y C. T. Perry, 2007. Coral Reefs.
- Medina, 2008. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Fribourg, Switzerland.
- Meehl *et al.*, 2007. In IPCC, Climate change 2007: the physical science basis: Cambridge University Press.
- Muscatine, L., y V. M. Weis, 1992. p. 257-271. In: P. G. Falkowski, and A. D. Woodhead (eds.). Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea. Plenum Press, New York.
- Pandolfi J.M., y J. Jackson, 2006. *Ecological Letters*, 9:818-826.
- Petit D. A., *et al.*, 1999. *Nature*, 399, 429.
- Pfeffer *et al.*, 2008. *Science*, 321, 1340.
- Pilkey y Cooper, 1994. *Science*, 303, 1781-1782.
- Rahmstorf, 2007. *Science*, 315, 368–70.
- Ritchie, K.B. y G.W. Smith, 2005. p. 25-264. In: E. Rosenberg and Y. Loya (eds.) Coral Health and Disease. Springer-Verlag
- Rodríguez-Martínez, *et al.*, 2001. *Diseases of Aquatic Organisms*, 47(3): 229-234.
- D. J. Smith, *et al.*, 2005. *Global Change Biology*, 11: 1-11.
- Stanley Jr. G. D., 2003. *Earth-Sci. Rev.*, 60, 195.
- Sussman, M., *et al.*, 2008. *PloS One*, 3(6):1-14
- Webster PJ., *et al.*, 2005. *Science*, 309: 1844-1846.
- Weil, E., *et al.*, 2006. *Diseases of Aquatic Organisms*, 69:1-7.

Zavala-Hidalgo, J., R. de Buen Kalman, R. Romero-Centeno, y F. Hernández Maguey, 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas, p. 249-268. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Tendencias del nivel del mar en la costas mexicanas

*J. Zavala-Hidalgo, R. de Buen Kalman,
R. Romero-Centeno y F. Hernández Maguey*

RESUMEN

Se presentan estimaciones del ciclo anual y tendencias de largo plazo en el nivel del mar para 16 sitios de las costas mexicanas, nueve en el Pacífico y siete en el Golfo de México. Se consideran los promedios mensuales de las series de nivel del mar más largas del país con datos obtenidos por el Servicio Mareográfico Nacional. Para cada sitio se obtiene el ciclo anual, calculando los promedios mensuales y la desviación estándar. Para calcular las tendencias de largo plazo, únicamente se consideran años completos para evitar sesgos por la variación estacional. Los sitios en el Golfo de México muestran un máximo en el nivel del mar durante septiembre-octubre y un mínimo en distintos meses del año. Las tendencias en el golfo son positivas, siendo Cd. Madero el sitio que presenta el mayor incremento por año (9.2 ± 5.1 mm año⁻¹), Alvarado el menor (1.8 ± 2.3 mm año⁻¹). Destaca Veracruz por ser la serie más larga y, por lo tanto, la más robusta (1.9 ± 0.6 mm año⁻¹). Las costas del Pacífico muestran un máximo en distintas épocas del año, observándose en julio en Salina Cruz, Puerto Ángel y Acapulco; de julio a septiembre en Manzanillo, Mazatlán, Topolobampo y Guaymas, y en septiembre en La Paz y Ensenada. En cuanto a las tendencias sobresale Acapulco por ser la única serie con una tendencia negativa para el periodo (2.4 ± 3.2 mm año⁻¹), mientras que la serie con mayor tendencia es Guaymas, (4.2 ± 1.7 mm año⁻¹). Los resultados muestran que las tendencias y variaciones en el nivel del mar son distintas para cada región debido a procesos oceanográficos y movimientos verticales de la corteza terrestre, por lo que es necesario fortalecer los estudios regionales y apoyar las mediciones operacionales de nivel del mar.

Palabras clave: nivel del mar, procesos oceanográficos, costas mexicanas

INTRODUCCIÓN

El nivel del mar es una importante variable oceanográfica afectada por el cambio climático. De acuerdo con el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), datos globales indican que en el periodo comprendido entre 1961 y 2003 el nivel del mar aumentó a una tasa promedio de $1.8 \pm 0.5 \text{ mm año}^{-1}$ (Rosenzweig *et al.*, 2007). Estos datos muestran también que en el periodo 1993-2003 la tasa de incremento fue de $3.1 \pm 0.7 \text{ mm año}^{-1}$, aunque no se sabe si el aumento en este período es debido a oscilaciones naturales de escala decadal o si puede ser atribuido al cambio climático. Las proyecciones del IPCC señalan que el nivel del mar seguirá aumentado, lo cual afectará las zonas costeras.

Los cambios en la morfología de las zonas costeras son el resultado de la influencia de muchos procesos, siendo uno de ellos el aumento en el nivel del mar. Entre los procesos más importantes se puede mencionar el balance entre el aporte y la remoción de sedimentos, el transporte litoral de sedimentos, la incidencia de eventos extremos y los movimientos verticales de la corteza terrestre.

Es importante señalar que los cambios en el nivel del mar medidos en una localidad son la respuesta a una gran variedad de fenómenos, entre los que se pueden mencionar la marea; los seiches; las corrientes costeras; los fenómenos meteorológicos de escala sinóptica como nortes y huracanes; los fenómenos oceanográficos de gran escala como el fenómeno de El Niño; variaciones interdecadales como la oscilación decadal del Pacífico; condiciones

oceanográficas que son la respuesta a fenómenos que se originan lejos de la zona de influencia, como las ondas atrapadas a la costa; los tsunamis; los movimientos verticales de la corteza terrestre; los cambios en la presión atmosférica y, por supuesto, la señal del cambio del nivel del mar debida al calentamiento global del planeta.

Los datos de nivel del mar en México muestran tendencias similares a las globales y dichas tendencias son investigadas en este trabajo. Las mediciones del nivel del mar realizadas por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) representan uno de los esfuerzos pioneros y más importantes de monitoreo de variables ambientales en forma operacional en México.

El Servicio Mareográfico Nacional (SMN) es uno de los proyectos más antiguos de la UNAM, contando en su acervo con algunas de las series de datos ambientales más largas que existen en México (con series que datan de 1946). La UNAM inició el monitoreo del nivel del mar en la década de los 40s del siglo pasado para lo cual, además de la instalación de los mareógrafos, se instalaron bancos de nivel en las inmediaciones de las estaciones mareográficas, los cuales han sido fundamentales para la georeferenciación y muchos de ellos han sido utilizados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) para sus labores de cartografía del territorio nacional. Actualmente la UNAM mantiene, en colaboración con otras instituciones, 15 sitios de medición del nivel del mar, los cuales se encuentran en un proceso de modernización utilizando técnicas de telemetría y cómputo

que permiten conocer el estado de esta variable en tiempo real o casi real. Cabe mencionar que el estudio de las tendencias del nivel del

mar en los distintos sitios de monitoreo se ve limitada por la longitud y la continuidad de las series de tiempo.

OBJETIVO

Estimar, mediante el análisis de las series de datos del SMN, el ciclo anual y las tendencias

de largo plazo del nivel del mar en las costas mexicanas.

METODOLOGÍA

Para estimar los cambios de largo plazo en el nivel del mar se requieren series de tiempo largas pues, además de la marea, el nivel del mar se modifica por diversos fenómenos que ocurren en distintas escalas de tiempo, desde los cambios estacionales hasta las variaciones decadales asociadas a oscilaciones en los grandes océanos del planeta. Con base en los datos de la UNAM, disponibles en el sitio de <http://www.mareografico.unam.mx>, se identificaron las series de tiempo que cubren los períodos más largos y se calculó la tendencia considerando únicamente los registros que contienen datos de los doce meses del año. Este criterio es necesario para evitar que exista un sesgo debido a la amplitud de la señal del ciclo anual.

Para calcular las tendencias se siguió el método de mínimos cuadrados y la incertidumbre de la pendiente se calculó al 95% de confianza. La tendencia, es decir, el incremento promedio por año se calculó mediante la ecuación:

$$Tendencia = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

donde x_i son las fechas en que hay observaciones, y_i las observaciones, $\bar{x}$ y $\bar{y}$ son los promedios de x_i y y_i respectivamente.

La incertidumbre en la pendiente se calculó como el producto del error estándar (SE) y el valor crítico (VC) que se obtiene de la distribución *t-Student* con $n-2$ grados de libertad, donde n es el número de observaciones:

$$Incertidumbre = SE \times VC$$

El error estándar se calculó utilizando la ecuación

$$SE = \sqrt{\frac{(y_i - \hat{y})^2}{(n-2) \sum (\bar{x}_i - \bar{x})^2}}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ciclo anual del nivel del mar en los sitios analizados (figura 1) se presenta en las gráficas de la figura 2, las cuales muestran los promedios mensuales referidos al cero de la regla del mareógrafo, que no corresponde con el nivel medio del mar. Las barras indican $\pm$ una desviación estándar y la línea horizontal marca el valor promedio del período analizado en cada sitio. El análisis de las tendencias en el nivel del mar para los distintos sitios se muestra en las gráficas de la figura 3. En estas gráficas los promedios mensuales se indican con líneas negras delgadas, los promedios corridos de doce meses (o menos si no existen los datos de algunos meses) se muestran con una línea gruesa y los promedios de los años en que existen datos completos se indican

con puntos negros. Estos últimos son los que se utilizaron para estimar la tendencia en el período y su incertidumbre.

En las tablas 1 y 2 se resumen las tendencias del nivel del mar para los sitios analizados en el Golfo de México y el Pacífico mexicano respectivamente. Se incluye el período de muestreo y el número de años considerado en el cálculo.

Los datos de la tabla 1 muestran tendencias bastante disímiles para el Golfo de México, ya que van de 1.8 ± 2.3 mm año⁻¹ en Alvarado, Ver., hasta 9.2 ± 5.1 mm año⁻¹ en Cd. Madero, Tamps., aunque debe tenerse en cuenta que las series de datos con las que se realizaron estas estimaciones no corresponden a los mismos períodos.

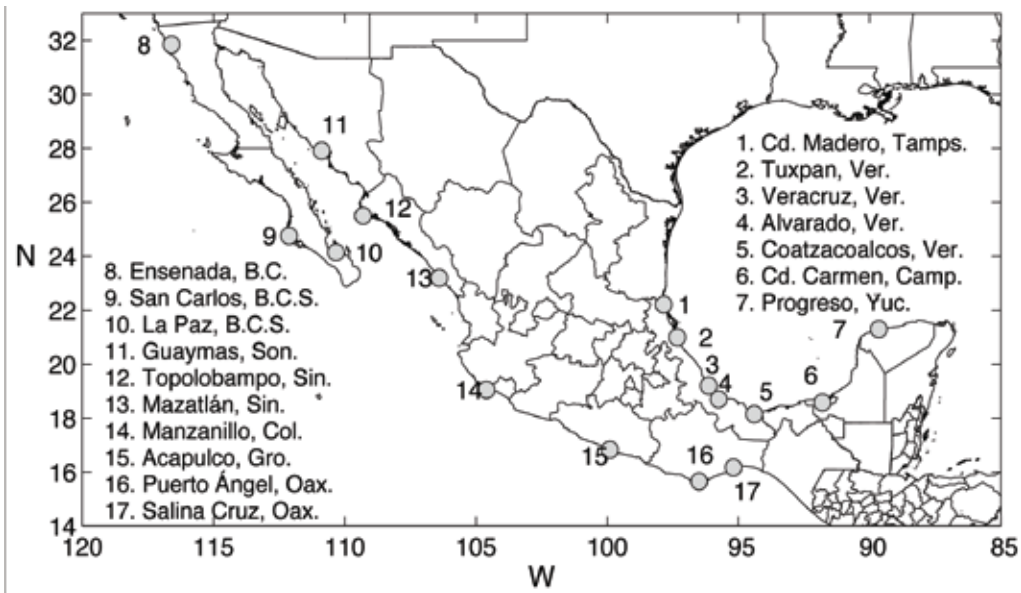


Figura 1. Localización de los sitios de las estaciones mareográficas consideradas en este estudio.

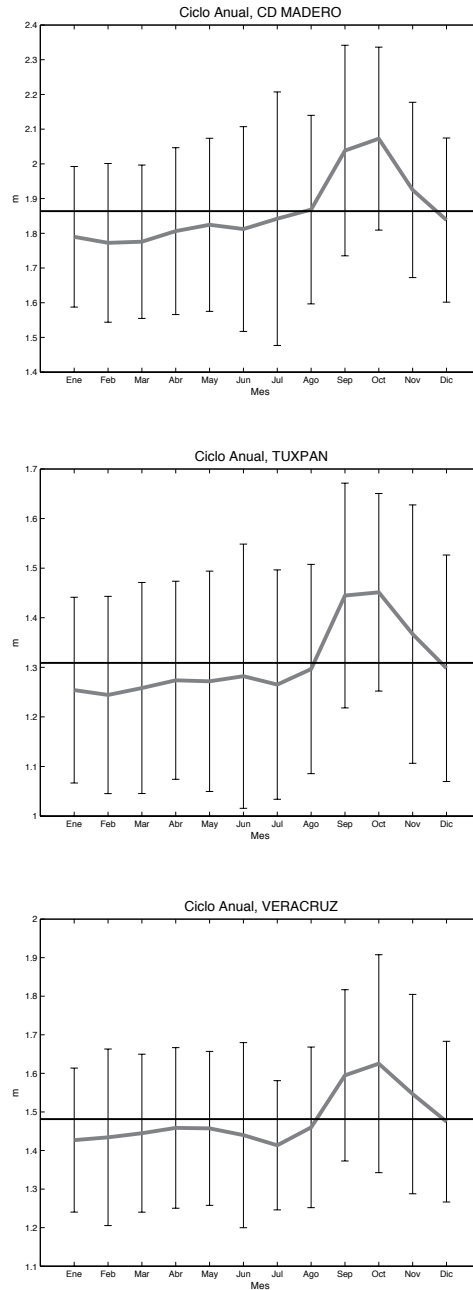


Figura 2. Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estándar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

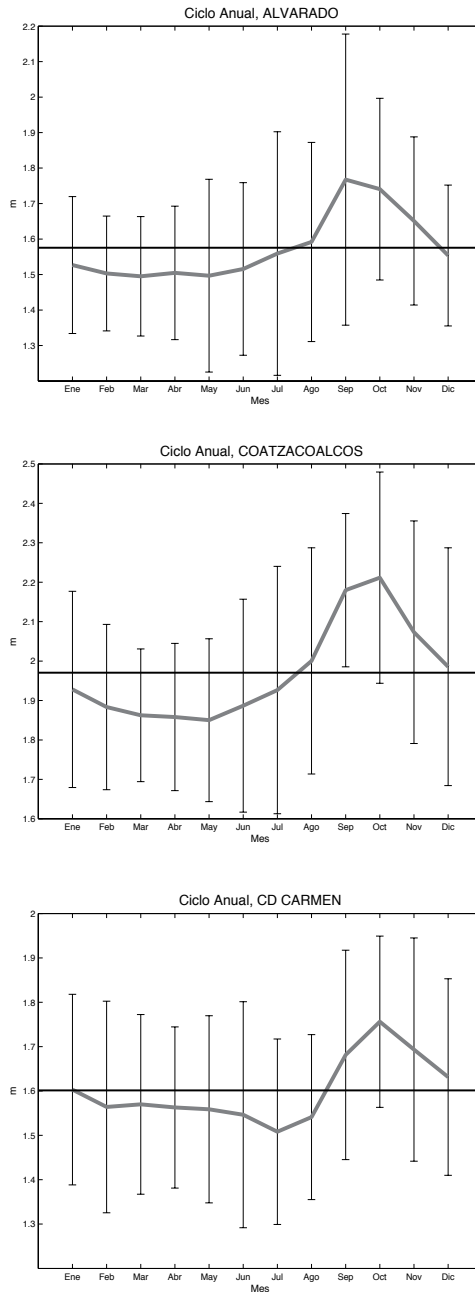


Figura 2 (continuación). Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estándar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

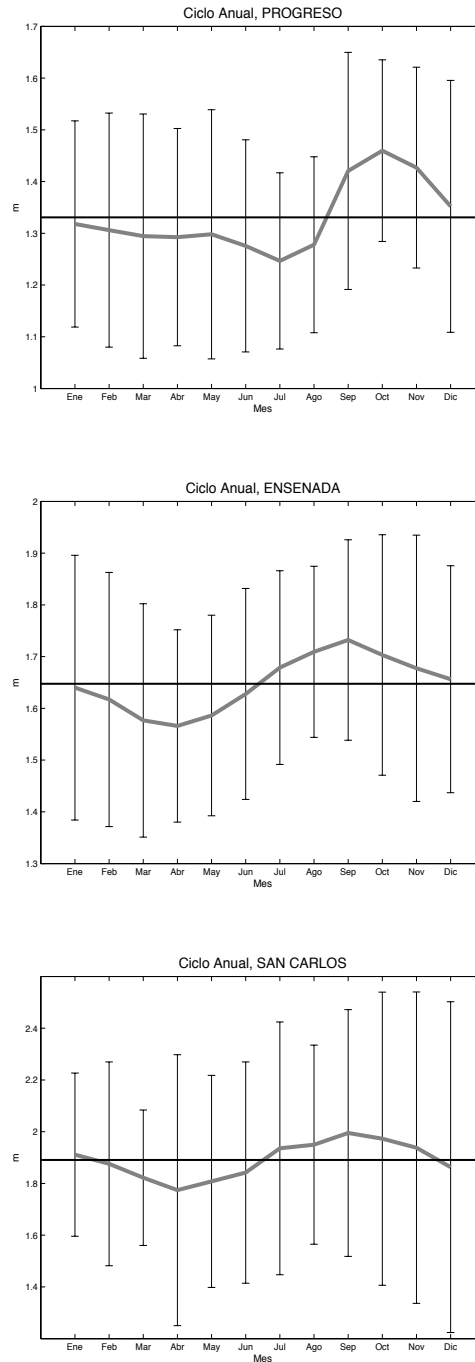


Figura 2 (continuación). Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estándar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

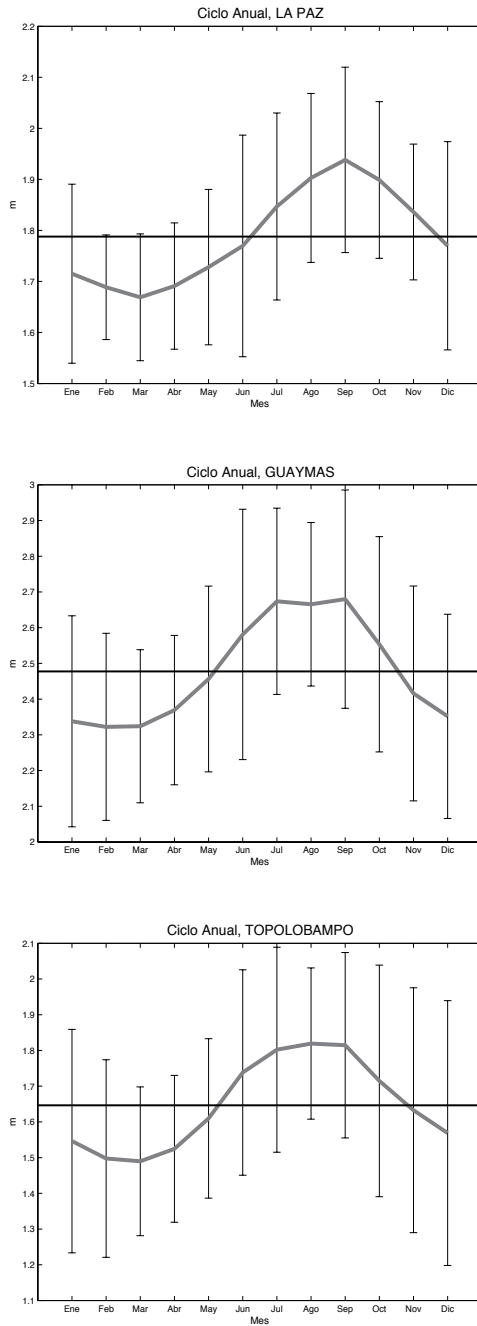


Figura 2 (continuación). Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estándar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

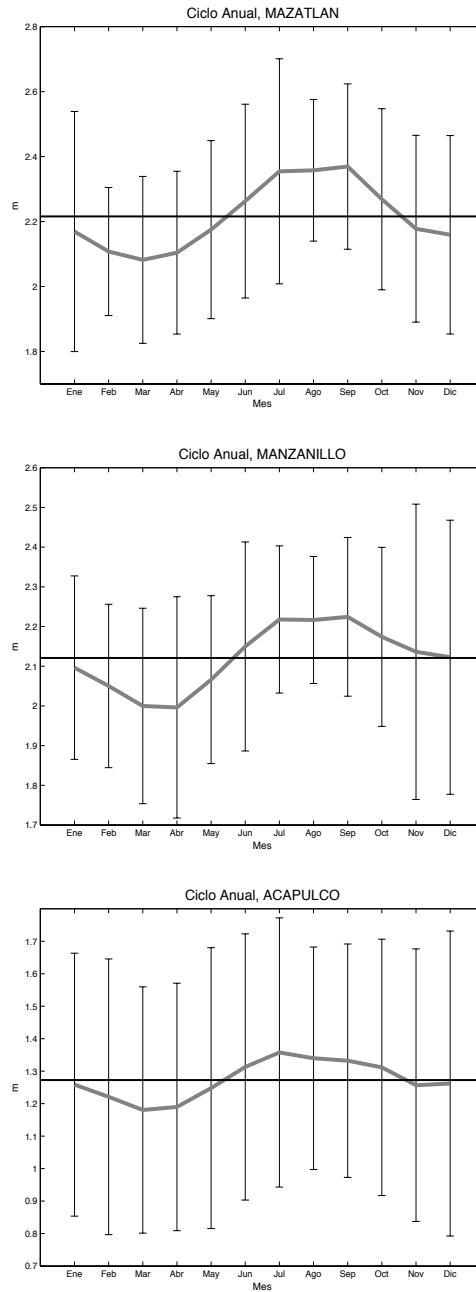


Figura 2 (continuación). Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estándar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

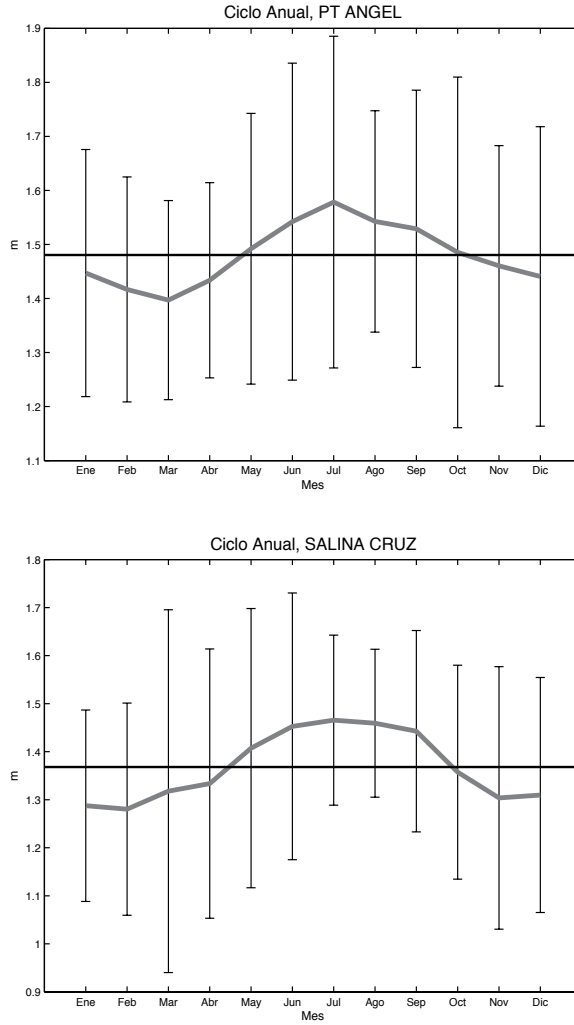


Figura 2 (continuación). Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estándar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

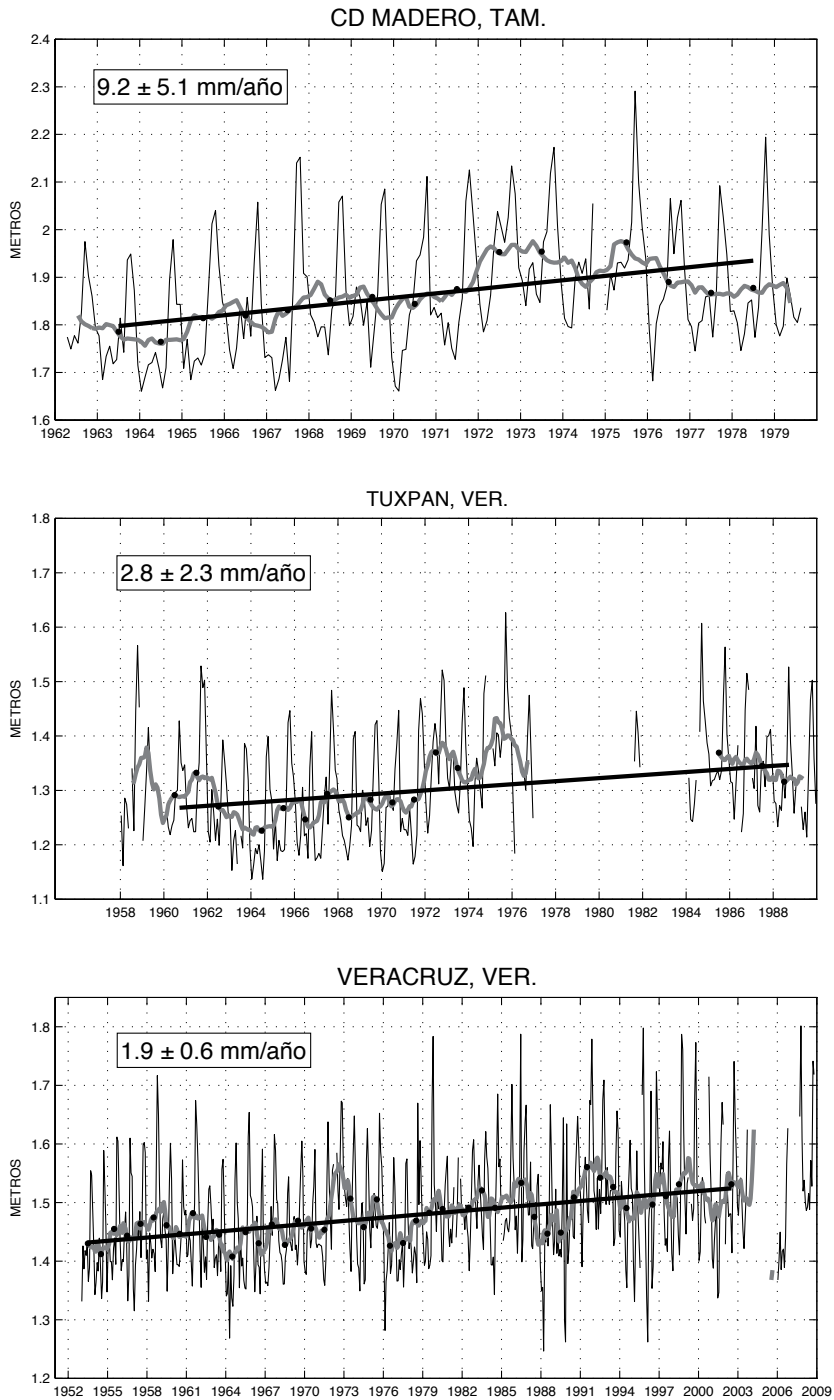


Figura 3. Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

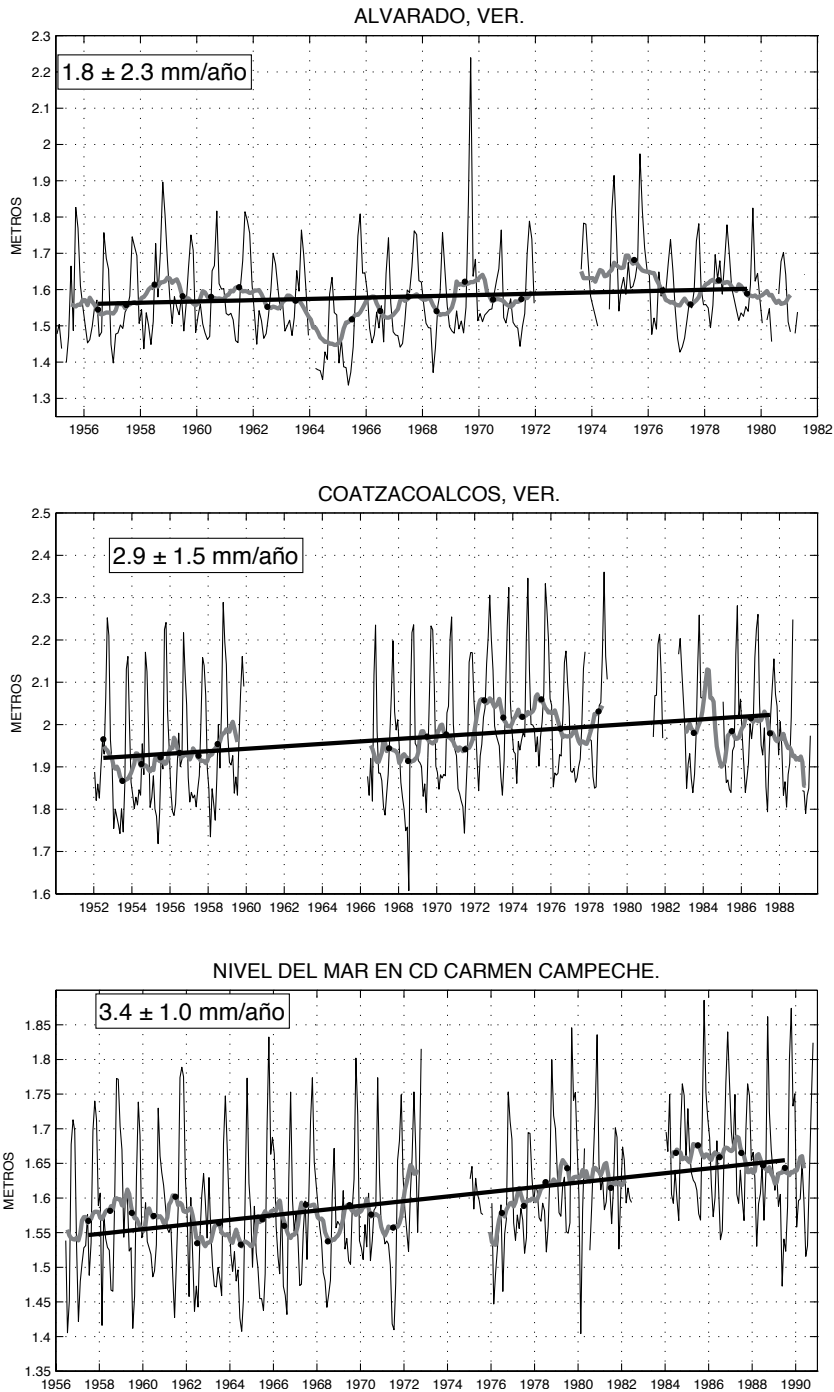


Figura 3 (continuación). Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

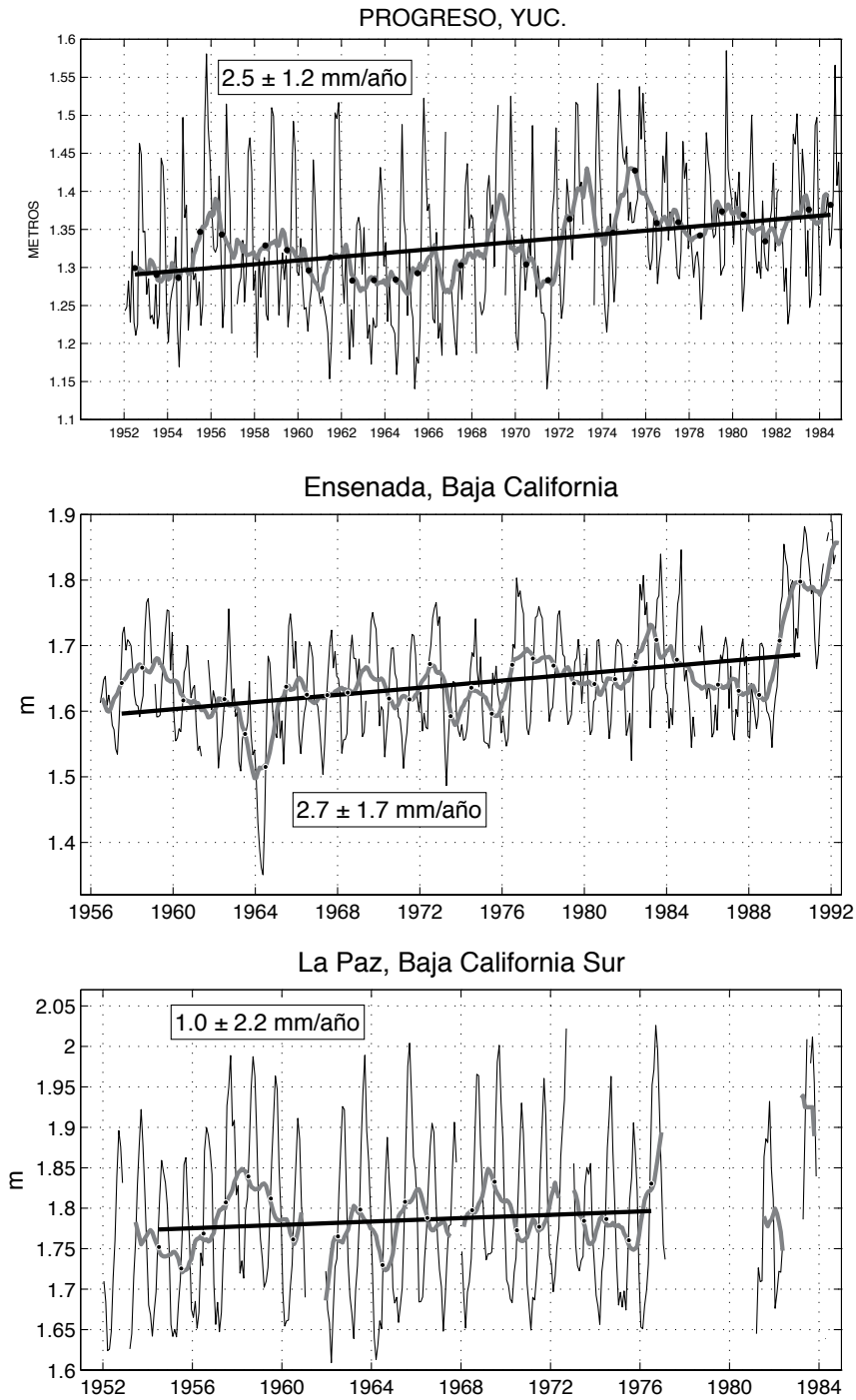


Figura 3 (continuación). Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

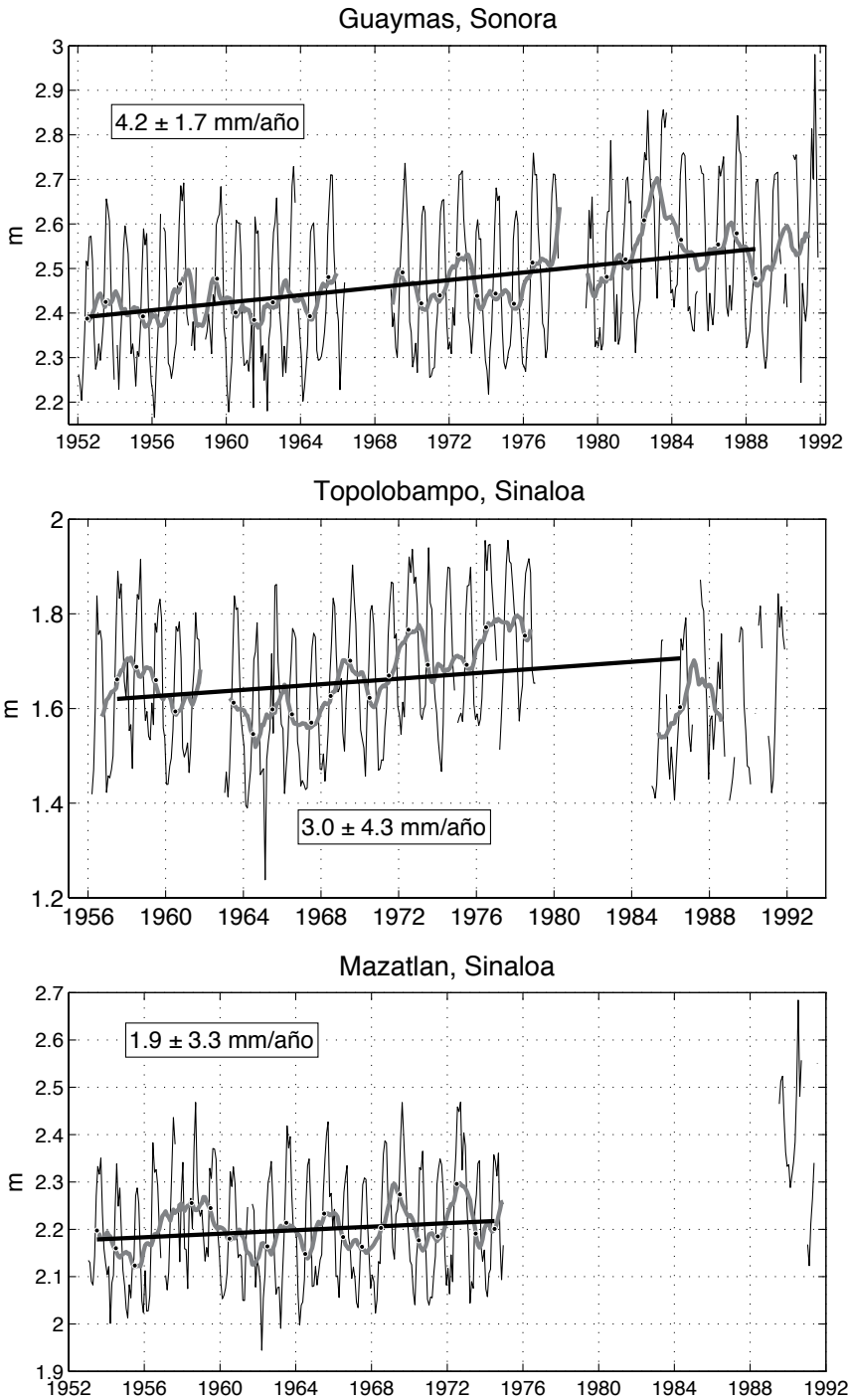


Figura 3 (continuación). Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

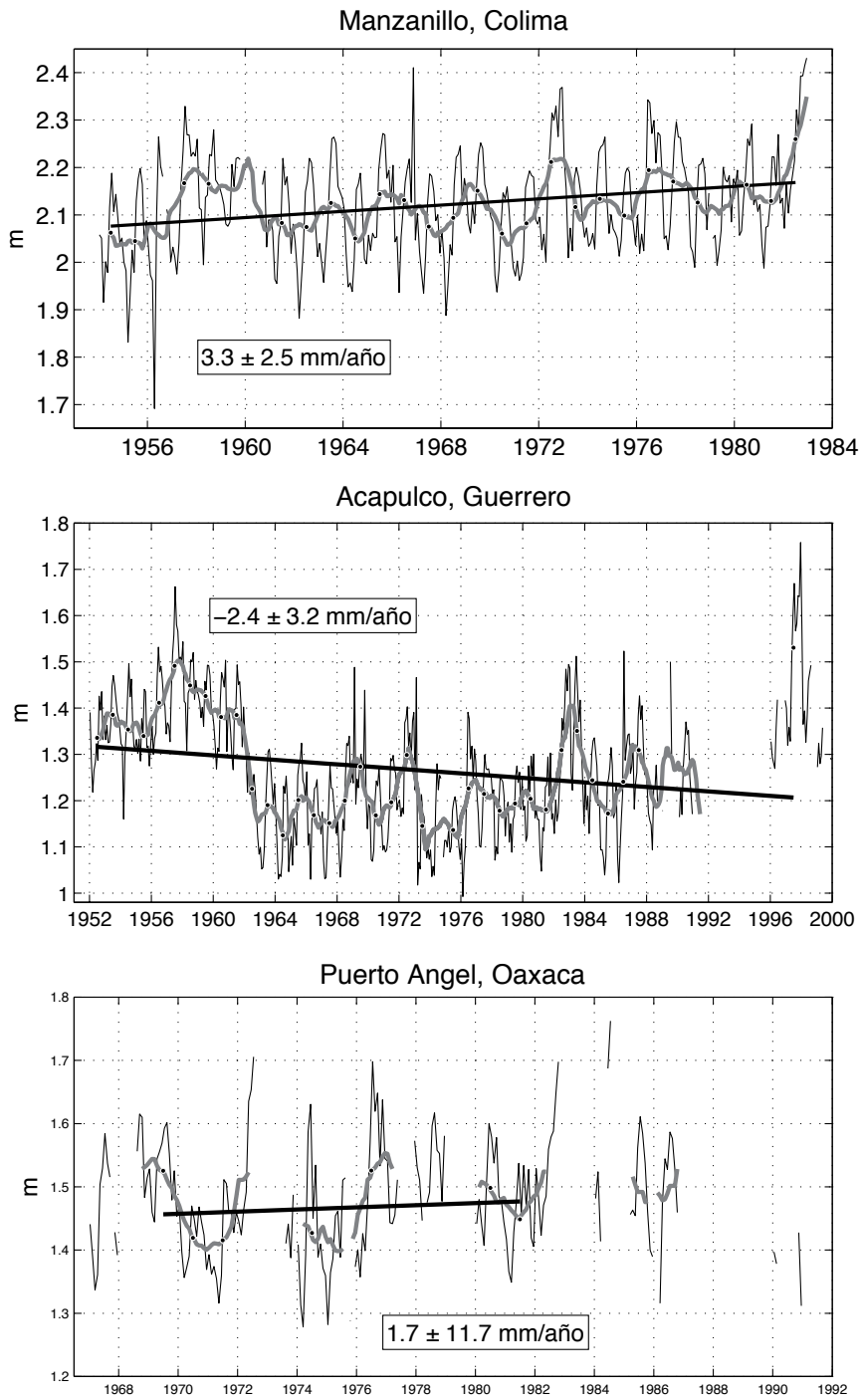


Figura 3 (continuación). Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

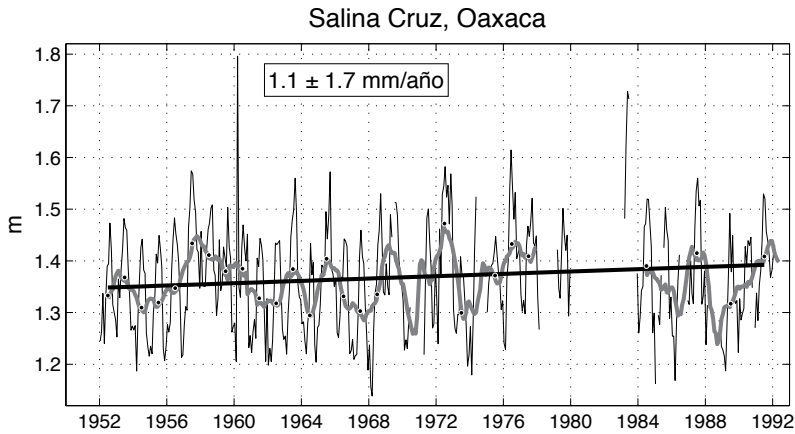


Figura 3 (continuación). Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

Tabla 1. Tendencias del nivel del mar para los sitios analizados en el Golfo de México. Se indica también el período en el cual hay datos disponibles.			
Sitio	Tendencia (mm año⁻¹)	Período	No. de años en el cálculo
Alvarado, Ver.	1.9 ± 2.3	1955-1981	19
Cd. del Carmen, Camp.	3.4 ± 1.0	1956-1990	26
Cd. Madero, Tamps.	9.2 ± 5.1	1962-1979	15
Coatzacoalcos, Ver.	2.9 ± 1.5	1952-1988	22
Progreso, Yuc.	2.5 ± 1.2	1952-1984	27
Veracruz, Ver.	1.9 ± 0.6	1952-2003	16
Tuxpan, Ver.	2.8 ± 2.3	1958-1989	43

Tabla 2. Tendencias del nivel del mar para los sitios analizados en el Pacífico. Se indica también el período en el cual hay datos disponibles.			
Sitio	Tendencia (mm año⁻¹)	Período	No. de años en el cálculo
Acapulco, Gro.	-2.4 ± 3.2	1952-1999	36
Ensenada, B.C.	2.7 ± 1.7	1956-1992	30
La Paz, B.C.S.	1.0 ± 2.2	1952-1991	20
Manzanillo, Col.	3.3 ± 2.5	1954-1988	25
Mazatlán, Sin.	1.9 ± 3.3	1953-1992	19
Puerto Angel, Oax.	1.7 ± 11.7	1967-1990	7
Salina Cruz, Oax.	1.1 ± 1.7	1952-1992	26
San Carlos, B.C.S.	16.1 ± 13.2	1968-1987	8
Topolobampo, Sin.	3.0 ± 4.3	1952-1992	19
Guaymas, Son.	4.2 ± 1.7	1951-1991	25

CICLO ESTACIONAL

Las estaciones analizadas muestran un claro ciclo estacional, tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico y el Golfo de California. En el Golfo de México se ha encontrado que las variaciones en el nivel del mar en escala estacional están asociadas al cambio en la circulación costera, con niveles máximos en las costas mexicanas durante septiembre y octubre y mínimos en distintos meses del año, observándose principalmente en mayo y julio. También hay una contribución de las variaciones de la presión atmosférica al cambio en el nivel del mar y otra asociada a los cambios en la temperatura superficial del mar (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003).

En las costas del Pacífico mexicano se ha encontrado que existe una onda costera de Kelvin estacional que tiene asociada una elevación del nivel del mar (Ripa, 1997), que alcanza un máximo en el mes de julio en los sitios del sur, como es el caso de Puerto Ángel, Salina Cruz y Acapulco. Más al norte, en Manzanillo, Mazatlán, Topolobampo y Guaymas, se observan dos máximos, uno en julio y el otro en septiembre, probablemente producto del aumento de la temperatura en la región. En La Paz, en el sur del Golfo de California, y en las costas del Pacífico de la península de Baja California se observa un máximo en septiembre, probablemente asociado con el cambio en la temperatura en las capas superficiales. En el Golfo de California puede contribuir el cambio en la dirección del viento, el cual apila agua en el norte del Golfo durante el verano contribuyendo a la elevación del nivel del mar.

TENDENCIAS EN EL GOLFO DE MÉXICO

Es notorio que en los siete sitios analizados en el Golfo de México se encontró una tendencia de aumento en el nivel del mar. Las series de tiempo muestran variaciones interanuales y de escala decadal que, para ser separadas del cambio producido por el calentamiento global del planeta, es deseable tener series más largas, de varias décadas. Es importante notar que la tendencia de aumento en el nivel del mar en Veracruz, de 1.9 mm año^{-1} , es muy similar a la reportada por el IPCC para el océano mundial lo que sugiere que, en principio, no ha habido movimientos verticales de la corteza terrestre importantes en la región lo cual hace que el sitio sea una buena referencia para comparar con las variaciones en otros sitios.

Los resultados muestran una menor tendencia en Veracruz y Alvarado, con $1.9 \pm 0.6 \text{ mm año}^{-1}$ y $1.8 \pm 2.3 \text{ mm año}^{-1}$ respectivamente. Progreso muestra una tendencia de $2.5 \pm 1.2 \text{ mm año}^{-1}$ y le siguen Cd. del Carmen, Camp., Coatzacoalcos, Ver., y Tuxpan, Ver., con tendencias entre 2.8 y 3.4 mm año^{-1} , mientras que en Cd. Madero, Tamps. la tendencia es mucho mayor con un valor de $9.2 \pm 5.1 \text{ mm año}^{-1}$.

TENDENCIAS EN EL PACÍFICO

En las estaciones del Pacífico mexicano sobresale la tendencia negativa en Acapulco. En las gráficas de la serie de Acapulco es notable el salto en el año de 1962 debido a un movimiento de la corteza terrestre provocado por un doble sismo, el cual fue documentado por

Ortiz *et al.* (2000). Este evento provocó una elevación de la corteza terrestre de 22 cm, con una disminución relativa del nivel medio del mar. En las tendencias previas y posteriores a este evento, se observa un aumento en el nivel medio del mar que se interrumpe con el evento sísmico.

En todas las demás estaciones se observan tendencias positivas en el nivel medio del mar. En el sur de México, en Puerto Ángel y en Salina Cruz, se observan tendencias de 1.7 ± 11.7 mm año⁻¹ y de 1.1 ± 1.7 mm año⁻¹ respectivamente.

En Mazatlán hay un período, entre 1953 y 1975, en que se interrumpió el muestreo y vuelve a haber registros hasta 1989 y 1990. Es notable que entre un período y otro hay un

aparente incremento en el nivel del mar que no parece corresponder con la tendencia observada en el primer período. Se sabe que el sitio de muestreo se modificó, pero habrá que revisar la fecha en que se realizó el cambio y si éste puede ser la causa de dicho incremento.

En Manzanillo, Col. se encontró una tendencia de 3.3 ± 2.5 mm año⁻¹ mientras que en Topolobampo, Sin., se obtuvo una tendencia de 3.0 ± 4.3 mm año⁻¹. En Guaymas, Son., se encontró una tendencia más alta, de 4.2 ± 1.7 mm año⁻¹. En Ensenada, que es una de las series más largas, se encontró una tendencia de 2.7 ± 1.7 mm año⁻¹. La serie de tiempo de San Carlos, BCS., es muy corta y por lo tanto las tendencias encontradas no son significativas.

CONCLUSIONES

Las series de datos del Servicio Mareográfico de la UNAM muestran tendencias de un aumento en el nivel del mar en todos los sitios analizados excepto en Acapulco, Gro., en donde se observa una tendencia negativa. En el Golfo de México los incrementos menores se observan en la región central, en Veracruz y Alvarado, mientras que hacia el sur se observan valores más altos en Cd. del Carmen e intermedios en Progreso. El valor más alto se obtuvo en Cd. Madero, Tamps.

En el Pacífico sobresale la estación de Acapulco que es el único sitio que presenta una tendencia negativa en la elevación del nivel medio del mar. Esta tendencia se debe al movimiento de la corteza terrestre provocado por los sismos de 1962, previamente documentados. Las tendencias en La Paz, Puerto Ángel y Salina Cruz, son las menores y la mayor se

encontró en Guaymas, Son.; Mazanillo, Mazatlán, Topolobampo y Ensenada muestran tendencias intermedias. La tendencia en San Carlos no es significativa debido a que tiene una incertidumbre muy grande porque su serie es muy corta.

Las tendencias obtenidas en el nivel medio del mar muestran que estas varían regionalmente y que su incertidumbre es del mismo orden que la señal, observándose que en las series más cortas la incertidumbre llega a ser mayor que la señal que se está buscando estimar. Las diferencias en las tendencias se deben, entre otras causas, a movimientos verticales regionales de la corteza terrestre y a fenómenos oceanográficos. Es muy importante continuar con las mediciones de esta variable en los sitios en donde se tienen las series de tiempo más largas para poder mejorar las es-

timaciones en las tendencias de largo plazo y reducir la incertidumbre. En los sitios analizados se están rehabilitando las estaciones mareográficas, por lo que habrá que dar seguimiento a los datos que se vayan generando

para actualizar estas tendencias, las cuales fueron calculadas con datos de mediciones que, en la mayoría de los casos, se interrumpieron en las décadas de los ochentas o noventas.

AGRADECIMIENTOS

Se usaron datos del Servicio Mareográfico Nacional operado por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Este trabajo se realizó con

el apoyo de los proyectos Inter-American Institute for Global Change Research CRN II# 2048 y PAPIIT IN 120408.

LITERATURA CITADA

- Ortiz, M., S. K. Singh, V. Kostoglodov, y J. Pacheco, 2000. Source areas of the Acapulco-San Marcos, Mexico earthquakes of 1962 (M 7.1; 7.0) and 1957 (M 7.7), as constrained by tsunami and uplift records. *Geofis. Int.*, 39(4): 337-348.
- Ripa, P., 1997. Toward a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27(5): 597-614.
- Rosenzweig, C., G. Casassa, D.J. Karoly, A. Imeson, C. Liu, A. Menzel, S. Rawlins, T.L. Root, B. Seguin, P. Tryjanowski, 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. p. 79-131. In: M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds.). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Zavala-Hidalgo, J., S. L. Morey, y J. J. O'Brien, 2003. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *J. Geophys. Res.*, 108(C12), 3389, doi:10.1029/2003JC001879, 2003.

Gallego-García, A., R. Rodríguez Sobreya, R. Lecuanda, 2010. Variabilidad de la temperatura de la superficie del mar durante el periodo 1996-2008 en cuatro regiones marinas de la Zona Económica Exclusiva de México, p. 269-282. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Variabilidad de la temperatura de la superficie del mar durante el periodo 1996-2008 en cuatro regiones marinas de la Zona Económica Exclusiva de México

A. Gallegos García, R. Rodríguez Sobreya y R. Lecuanda

RESUMEN

El análisis estadístico de secuencias de imágenes satelitales de la temperatura de la superficie del mar (TSM), es una herramienta indispensable para identificar la variabilidad y reconocer la vulnerabilidad al cambio de las condiciones oceanográficas elementales de diversas regiones marinas que pudieran estar asociadas al cambio climático global. Cuatro regiones marinas de los mares mexicanos fueron analizadas y resultó que en todas ellas el ciclo anual de enfriamiento y calentamiento, con mínima TSM en enero o febrero y máxima TSM en julio o agosto, es dominante. La correlación de las anomalías térmicas respecto al año típico 1996-2008 no es significativa con procesos oceánico-meteorológicos de gran escala asociados a cambios globales en el clima como El Niño/Oscilación del Sur. Sin embargo, el cálculo de la tendencia de la TSM en el periodo 1996-2008, de sólo 13 años de extensión, indica que las cuatro regiones marinas se enfriaron en este lapso. Este polémico resultado únicamente se puede abordar y resolver analizando series de tiempo de la TSM más amplias.

Palabras clave: temperatura de la superficie del mar, imágenes satelitales, vulnerabilidad, variabilidad climática, cambio climático global.

INTRODUCCIÓN

La temperatura de la superficie del mar (TSM) es la 'huella térmica' que imprimen diversos procesos mecánicos y termodinámicos que ocurren en la interfase océano-atmósfera. Los flujos verticales de momento (esfuerzo del viento sobre el mar), masa y energía (lluvia, evaporación, radiación solar, emisión infrarroja y conducción turbulenta de calor) determinan los valores de la TSM. El espacio físico donde suceden las interacciones físicas que causan estos flujos verticales es la *capa límite atmosférica*, que se extiende desde la superficie del mar hasta una altura de 1 000 metros, y el estrato superficial del mar o *capa mezclada*, que va desde la superficie del mar hasta una profundidad de aproximadamente 100 m (Curry y Webster, 1999; Gallegos García *et al.*, 2003). La intensidad y rapidez de cambio, la localización geográfica, las dimensiones espaciales, la generación, evolución y disipación de estos flujos verticales son las condiciones que de manera natural y casuística determinan las muy diversas formas y configuraciones de la distribución de la TSM que se observan en toda región marina.

La práctica indica que el análisis de la evolución espacio-temporal de distribuciones específicas de la TSM en los mares mexicanos permite descubrir e identificar una diversidad de formas y estructuras térmicas cuya dinámica parece estar asociada, en muchos casos, a la conformación geográfica local de la cuenca, a su litoral y a los procesos de interacción océano-atmósfera que ahí se den.

En otros casos la variabilidad de la TSM parece estar ligada al cambio de las estaciones del año y a procesos oceánicos y meteorológicos de regularidad anual o de mayor duración (interanuales), ligados a condiciones geográficas regionales. Por esta razón, el análisis de secuencias de imágenes satelitales de la TSM se convierte en una herramienta importante para estudiar cambios significativos en las condiciones oceanográficas que pudieran tener una correspondencia con procesos físicos de interacción océano-atmósfera cuya escala espacio-temporal esté más ligada al cambio climático global.

OBJETIVOS

El objetivo de esta colaboración es presentar los primeros resultados de un estudio que se lleva a cabo con datos de la TSM en cada una de las cuatro regiones marinas de la Zona Económica Exclusiva de México (ZEE) elegidas, descritas más adelante. El análisis realizado es

necesariamente de carácter estadístico, en un intento por identificar fluctuaciones térmicas distintas a las del ciclo anual, que es la variación dominante en las series de tiempo de registros de la TSM.

METODOLOGÍA Y ÁREAS DE ESTUDIO

La TSM es una variable ambiental que se mide de muy diversas maneras, desde la más directa y sencilla, como lo es con un termómetro de mercurio, hasta la más compleja, con radiómetros que miden la intensidad de la emisión de radiación electromagnética infrarroja, que está determinada por el estado de agitación molecular de la superficie del agua de mar en contacto directo con el aire. Los datos que de manera exclusiva se utilizan en el presente estudio corresponden a la TSM que registran los radiómetros instalados en los satélites artificiales de órbita polar de la serie NOAA (www.oso.noaa.gov/poes) y cubren el periodo de enero de 1996 a diciembre de 2008.

Cada satélite pasa con regularidad por la misma zona geográfica cada 12 horas aproximadamente y mide la radiación electromagnética emitida por la superficie de la Tierra a lo largo de una franja de 800 km de ancho (Maul, 1985). Con estos registros se construyen las imágenes de satélite de la TSM. Las imágenes se someten a una secuencia de procedimientos cuyo propósito es producir una *imagen compuesta*, que es una representación visual de la temperatura de la superficie del

mar de un área geográfica predeterminada, promediada en tiempo. A los valores de temperatura se les asocia una escala cromática. A este producto se le denomina *'imagen satelital'* de la TSM y puede ser un promedio mensual, quincenal o semanal, según la extensión temporal utilizada en la elaboración de estas imágenes cromáticas en cuestión. En este estudio las imágenes utilizadas son *medias mensuales*.

La frecuencia con la que se reciben imágenes de los pasos satelitales consecutivos sobre una región geográfica específica es, idealmente, de dos imágenes diarias por satélite. Por ejemplo, con tres satélites en operación simultáneas se recibirían seis imágenes por día. Sin embargo en la operación todo sistema de adquisición de imágenes existen deficiencias técnicas y administrativas inevitables. Así, el sistema de adquisición de imágenes en el que se apoyó el presente trabajo tuvo omisiones tales que no permitieron registrar los pasos satelitales del año 2004, de manera que de 1996 a 2008, se tienen 12 años de medias mensuales. Asimismo, por las mismas razones, no se capturaron los registros de algunos meses en otros años, como se indica en la tabla 1.

Tabla 1. Meses del periodo 1996-2008 en los que no se capturaron registros satelitales de la TSM.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1996	abr, nov	abr, jun, ago, nov	abr, ago, nov	abr, ago, nov
1998	oct	oct	oct	oct
2000	oct	oct	oct	oct
2001	sep	sep	sep	sep
2002	sep, oct, nov	sep, oct, nov	sep, oct, nov	sep, oct, nov
2003	nov	nov	nov	nov
2005	feb, oct	feb, oct	feb, oct	feb, oct

Para contribuir a un mejor entendimiento de los alcances y limitaciones de los productos estadísticos derivados del análisis de las imágenes satelitales de la temperatura del mar (TSM) que aquí se presentan, es necesario conocer sus características elementales (BITS-MEX, <http://tsunami.icmyl.unam.mx>). Éstas son las siguientes:

- Resolución espacial (tamaño del píxel): 1.5 km².
- Resolución temporal: un mes (cada imagen es un promedio mensual ponderado por píxel).
- Las regiones consideradas son regiones costeras cuya ubicación geográfica la relacionamos con poblaciones limítrofes.
- Las coordenadas que se muestran en cada imagen son geográficas en una proyección Mercator.
- Las imágenes corresponden al periodo de enero de 1996 a diciembre de 2008.

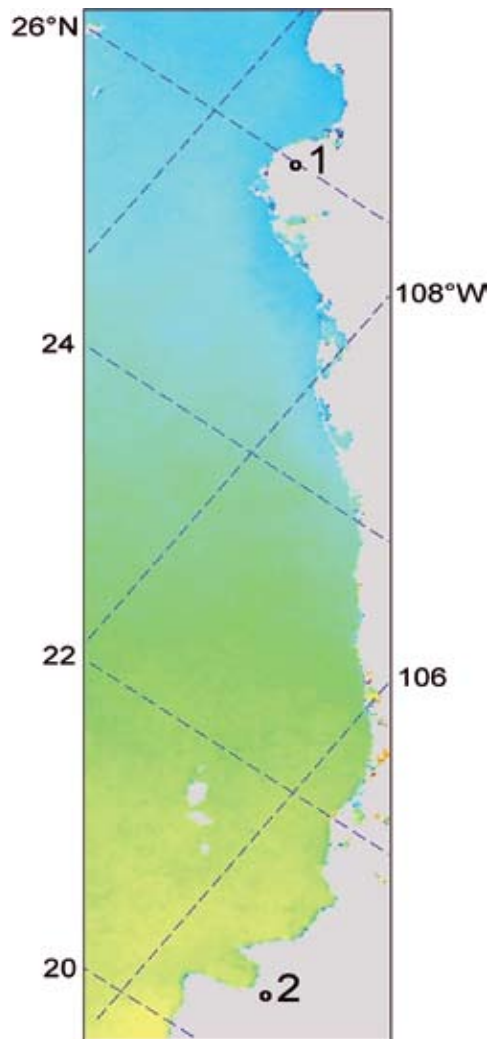


Figura 1. Zona costera del noreste del Pacífico tropical mexicano, desde Los Mochis, Sinaloa (sitio 1) hasta Puerto Vallarta, Jalisco (sitio 2).

LAS CUATRO REGIONES MARINAS ELEGIDAS PARA LOS ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD

Se eligieron cuatro zonas de estudio para identificar en las secuencias de imágenes de la TSM correspondientes, posibles variaciones térmicas de escala regional que pueden ser in-

dicio de su vulnerabilidad al cambio climático global. A continuación se expone una breve descripción de cada una de ellas.

REGIÓN MARINA 1: NORESTE DEL PACÍFICO TROPICAL MEXICANO

Esta región marina tiene una extensión superficial de mar de 125 000 km² y se localiza en la zona de transición entre la alberca caliente del Pacífico mexicano y la boca del Golfo de California. Es conocido que en la alberca caliente del Pacífico mexicano se genera una porción importante de los huracanes que durante el verano y el otoño impactan las costas de Baja California y los estados del noroeste de México (figura 1).

REGIÓN MARINA 2: SUR DEL GOLFO DE MÉXICO

Esta región marina tiene una extensión superficial de mar de 25 000 km² y se localiza en la zona sur de la Sonda de Campeche, cuyo litoral son las costas de los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche. La industria petrolera de México realiza en esta zona la mayor parte de sus actividades de extracción marina (figura 2).

REGIÓN MARINA 3: PLATAFORMA DE YUCATÁN

Esta región marina tiene una extensión de superficie de mar de 41 000 km² y se caracteriza por las surgencias estacionales a lo largo de la costa. Colinda al este con la Corriente de Yucatán y al norte con la zona en donde se forman giros anticiclónicos que de ella se desprenden con una regularidad aproximadamente anual (figura 3).

REGIÓN MARINA 4: CARIBE MEXICANO

Esta región marina tiene una extensión superficial de mar de 53 000 km² y se localiza en la región oceánica donde se origina la Corriente de Yucatán. Esta zona recibe año con año los embates de las tormentas tropicales de verano y de otoño que frecuentemente se transforman en huracanes y algunos de intensidad extrema (figura 4).

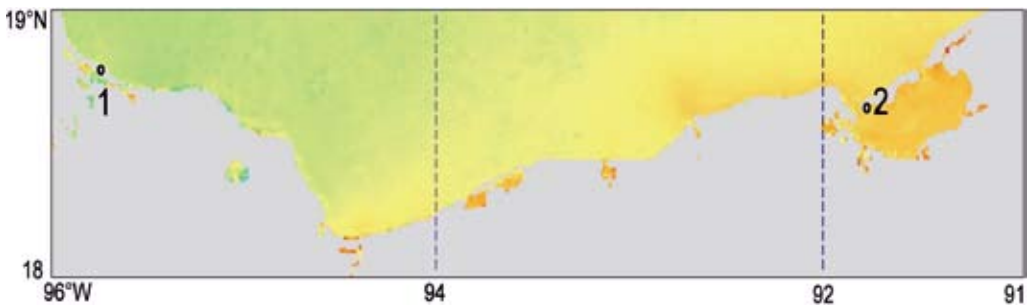


Figura 2. Zona costera del sur del Golfo de México, desde Alvarado, Veracruz (sitio 1) hasta Ciudad del Carmen, Campeche (sitio 2).

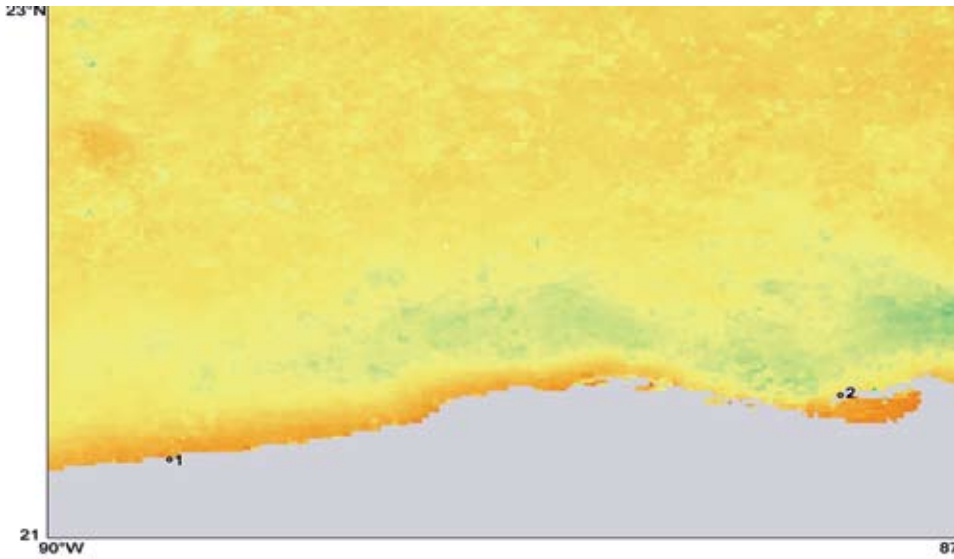


Figura 3. Zona costera del litoral norte de la península de Yucatán, desde Puerto Progreso (sitio 1) hasta Holbox, Yucatán (sitio 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cada una de las regiones marinas elegidas se manejaron, procesaron y ordenaron las imágenes *medias mensuales* correspondientes al periodo que va de enero de 1996 a diciembre de 2008. El análisis de esta secuencia de 144 imágenes *medias mensuales* hizo evidente el ciclo anual de la señal térmica: enfriamiento de otoño a invierno y calentamiento de primavera a verano, en las cuatro regiones. Las máximas temperaturas se registraron en julio o agosto y las mínimas en enero o febrero.

Para cada una de las cuatro regiones marinas elegidas se obtuvieron los valores promedio-espacial de la TSM así como los valores máximo y mínimo, el rango y la desviación estándar, de cada mes y por cada zona. Estos valores son representativos de cada región y su variabilidad refleja con razonable certidumbre los cambios naturales de la TSM, tanto en

tiempo como en espacio. El resumen de estos procedimientos estadísticos se plasma en el 'año típico', cuyo 'enero típico' es el promedio de todos los eneros del periodo 1996-2008, cuyo 'febrero típico' es el promedio de todos los febreros de ese mismo periodo, y así sucesivamente, hasta el 'diciembre típico'. En las figuras 5 a la 8, se presentan los *años típicos* de cada una de las cuatro regiones elegidas.

La diferencia de la TSM de cada año con respecto al año típico es otro aspecto interesante en el estudio de la variabilidad de la TSM. Estas diferencias se conocen como anomalías de la TSM respecto al 'año típico' y están relacionadas con la probable regularidad estacional de los procesos de interacción océano-atmósfera a escala regional. El análisis de estas anomalías no produjo resultados que permitieran establecer de manera clara y significativa una

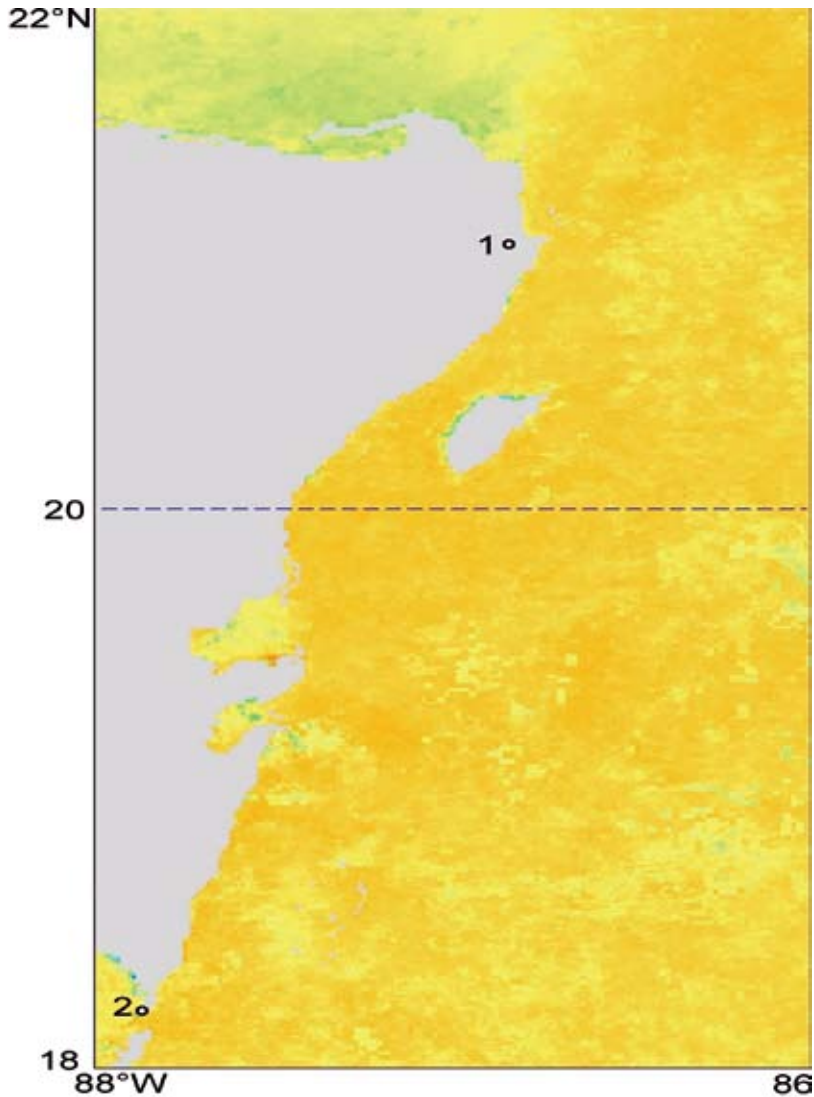


Figura 4. Zona costera del litoral del Caribe Mexicano, desde Cancun (sitio 1) hasta Xcalak, Quintana Roo (sitio 2).

correlación de las variaciones anuales y estacionales observadas con procesos oceánicos y meteorológicos de mayor escala espacio-temporal, como El Niño y la Oscilación del Sur, cuya variabilidad está asociada al cambio climático global.

En contraste, un análisis de regresión lineal que se efectuó con el propósito de identificar tendencias en la variabilidad de la TSM de cada región marina elegida produjo resultados interesantes. En efecto, se calcularon regresiones lineales de cada 'mes típico' del periodo de estudio (1996-2008) y los resultados se muestran en la tabla 2.

Año típico 1996-2008 del noreste del Pacífico tropical mexicano

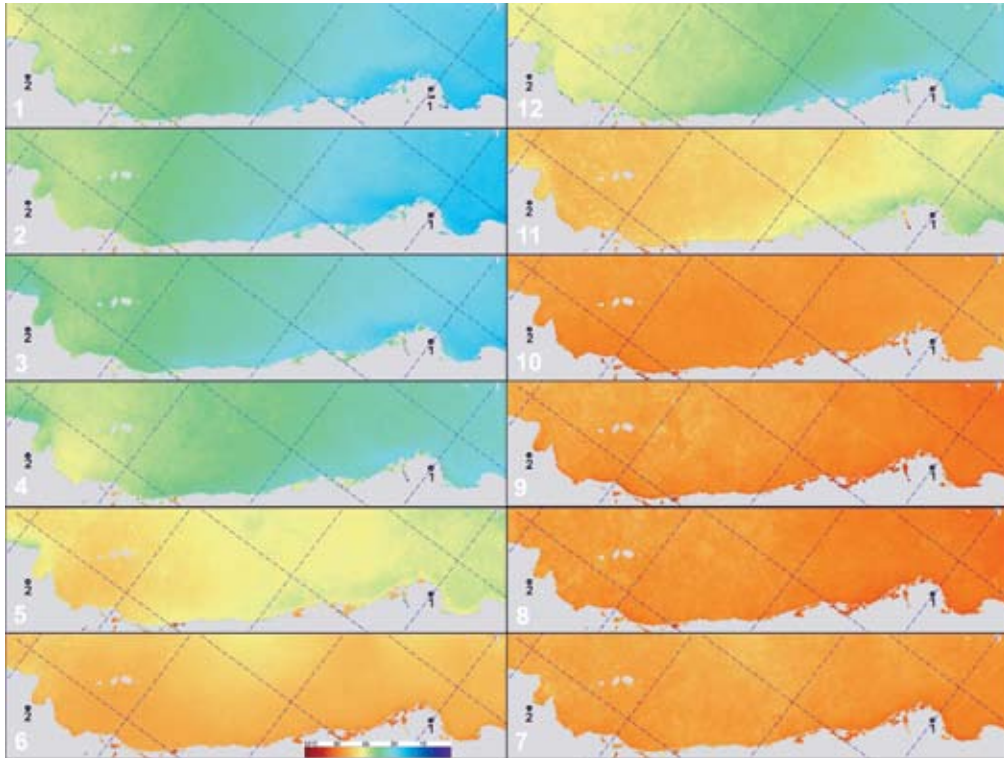


Figura 5. La TSM de los meses típicos del periodo 1996-2008 en la región marina del noreste del Pacífico mexicano, desde Los Mochis, Sinaloa (sitio 1) hasta Puerto Vallarta, Jalisco (sitio 2).

La numeración del 1 al 12 indica los meses del año —de enero a diciembre— y el arreglo de las imágenes es cíclico para que mejor se visualice el patrón de calentamiento-enfriamiento del agua superficial que provoca el cambio en la intensidad de la radiación solar a lo largo del año.

Año típico 1996-2008 del sur del Golfo de México

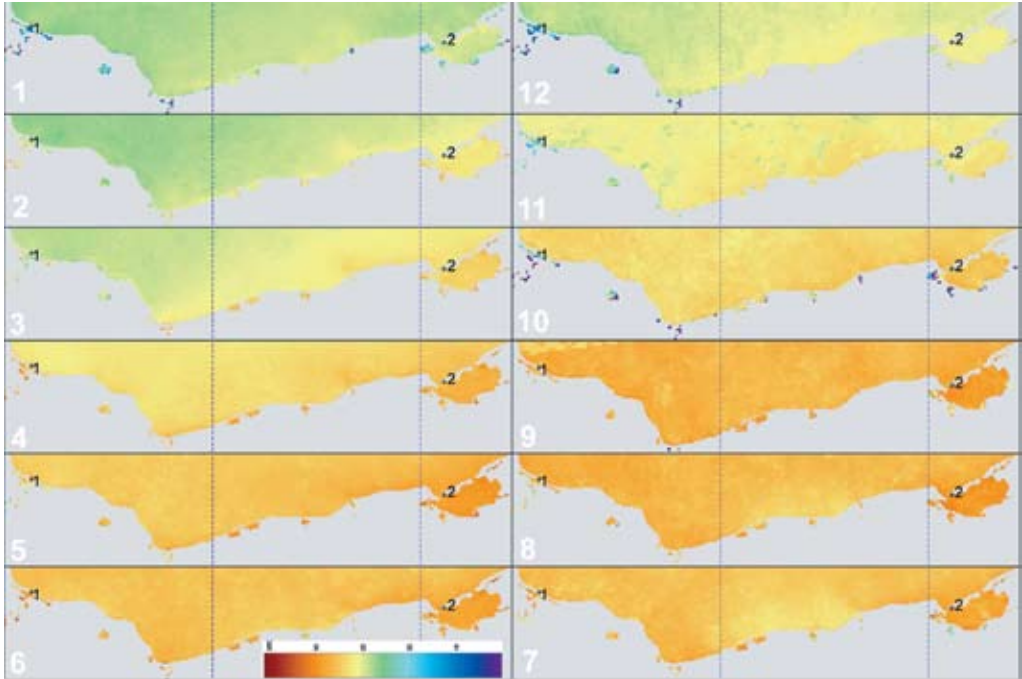


Figura 6. La TSM de los meses típicos del periodo 1996-2008 en la región marina del sur del Golfo de México, desde Alvarado, Veracruz (sitio 1) hasta Ciudad del Carmen, Campeche (sitio 2). La numeración del 1 al 12 indica los meses del año de —enero a diciembre— y el arreglo de las imágenes es cíclico para que mejor se visualice el patrón de calentamiento-enfriamiento del agua superficial que provoca el cambio en la intensidad de la radiación solar a lo largo del año.

Año típico 1996-2008 de la plataforma de Yucatán

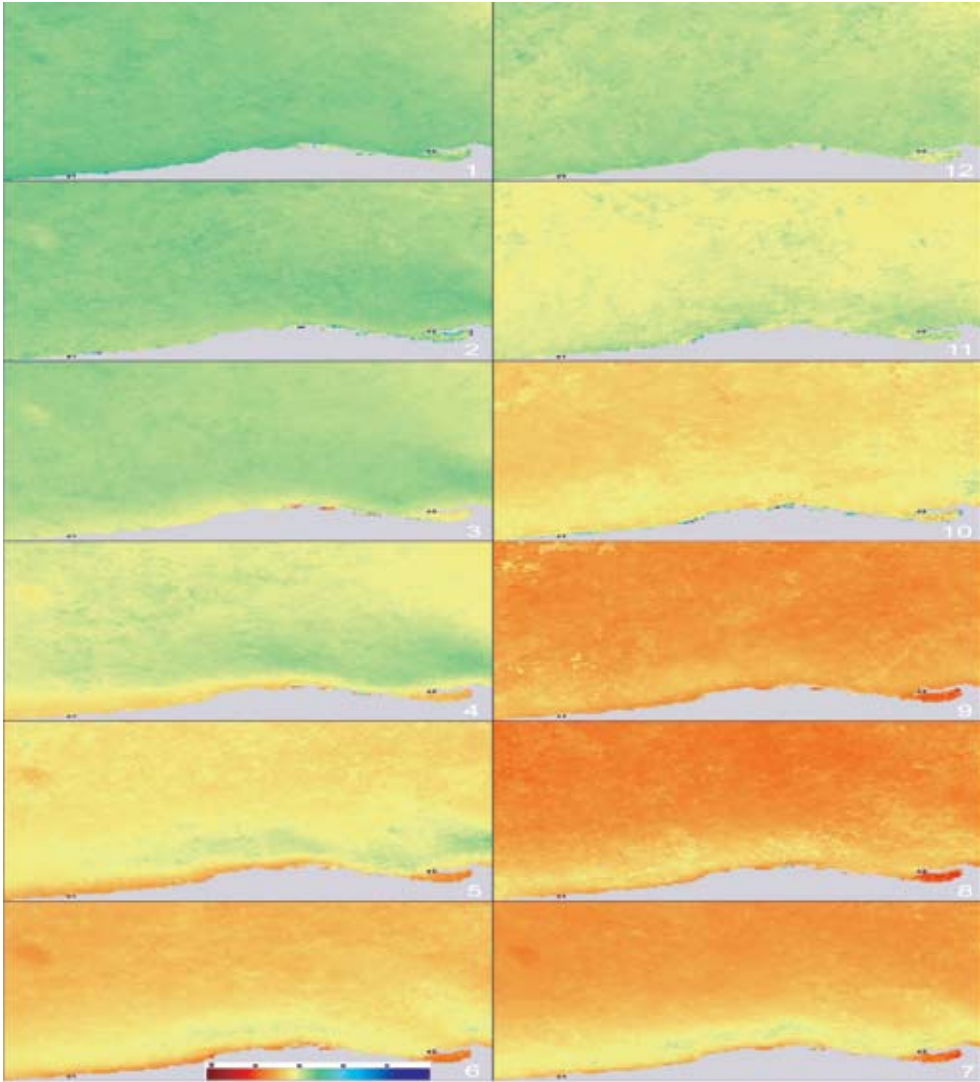


Figura 7. La TSM de los meses típicos del periodo 1996-2008 en la región marina del litoral norte de la península de Yucatán, desde Puerto Progreso (sitio 1) hasta Holbox, Yucatán (sitio 2).

La numeración del 1 al 12 indica los meses del año de —enero a diciembre— y el arreglo de las imágenes es cíclico para que mejor se visualice el patrón de calentamiento-enfriamiento del agua superficial que provoca el cambio en la intensidad de la radiación solar a lo largo del año.

Año típico 1996-2008 del Caribe mexicano

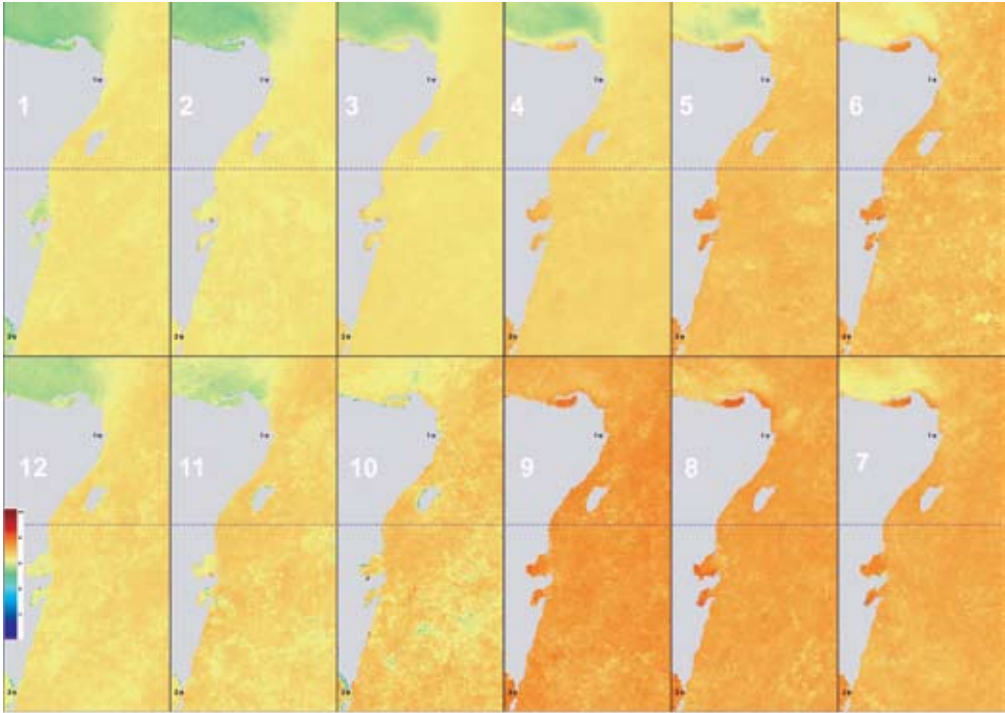


Figura 8. La TSM de los meses típicos del periodo 1996-2008 en la región marina del litoral del Caribe mexicano, desde Cancun (sitio 1) hasta Xcalak, Quintana Roo (sitio 2). La numeración del 1 al 12 indica los meses del año —de enero a diciembre— y el arreglo de las imágenes es cíclico para que mejor se visualice el patrón de calentamiento-enfriamiento del agua superficial que provoca el cambio en la intensidad de la radiación solar a lo largo del año.

Tabla 2. Tendencias de cada mes del año típico, para cada zona. Unidades en °C/año.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Enero	-0.2558	-0.0783	-0.0621	-0.0510
Febrero	-0.2019	-0.0354	-0.0271	-0.0587
Marzo	-0.1782	0.0330 *	0.0245 *	-0.0198
Abril	-0.0310	-0.0027	-0.0982	-0.0739
Mayo	-0.0725	-0.0238	-0.0674	-0.0311
Junio	-0.1149	-0.1473	-0.0570	-0.1131
Julio	-0.2052	-0.1065	-0.0679	-0.0538
Agosto	-0.2002	-0.0705	-0.1386	-0.0721
Septiembre	-0.1174	-0.3693	-0.1498	-0.0815
Octubre	-0.1132	-0.2369	-0.2954	-0.2814
Noviembre	-0.1295	-0.2375	-0.1903	-0.1550
Diciembre	-0.1549	-0.0577	-0.0669	-0.0614

* únicos meses con tendencia positiva.

Es notable que a excepción de marzo de las zonas 2 y 3, el resto de los meses en las cuatro zonas resultan con tendencias negativas. Esto significa que los eneros, febreros,... etcétera, *son cada año más fríos* porque la TSM tiende a disminuir linealmente. Es decir, en cada una

de las cuatro zonas, en el periodo 1996-2008, la TSM desciende. Este resultado debe ponderarse con cuidado porque aparentemente se contrapone al reconocido ‘calentamiento global’ y conduce a la controversia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los productos que aquí se presentan permiten concluir que la TSM es una variable ambiental adecuada para identificar variaciones en las condiciones oceánicas regionales y locales de escala anual, interanual y decadal. Sin embargo, la información a la que se tiene acceso sólo cubre un periodo de 13 años, todavía muy corto para identificar la persistencia de las variaciones decadales. Así, sólo es posible detectar variaciones anuales a interanuales. Hay que seguir acumulando registros satelitales de la TSM de manera permanente y realizar estos

mismos análisis en series de tiempo más largas, de 30 años o más, para poder detectar en ellas las variaciones térmicas de escala decadal asociadas al cambio climático con mayor certidumbre estadística.

La señal térmica dominante en las series de tiempo de la TSM es el ciclo anual. Esto permite establecer un ‘estado base’ que, en principio, sirve como referencia para identificar variaciones de la TSM distintas a las del ciclo anual (Márquez García, 2003). El estado base más viable es entonces el ‘año típico’ de todo

el periodo: de enero de 1996 a diciembre de 2008, que son 13 años de extensión pero, en este caso, con 12 años de datos.

Las anomalías respecto al 'año típico' permiten, en principio, develar variaciones interanuales que pudieran tener correspondencia con variaciones estacionales irregulares. Sin embargo su análisis no arrojó resultados estadísticamente significativos. En contraste, el análisis de tendencia de la variación de la TSM en las cuatro zonas resultó que ésta es negativa, es decir, que las cuatro zonas se enfrían. Esta aparente contradicción con el "calentamiento global" actual no tiene una explicación de tipo causa-efecto evidente. Se puede especular que el cambio climático provoca una tenue intensificación de los vientos que soplan, o que induce un aumento paulatino en la nubosidad sobre estas regiones o que cambia la dirección de las corrientes marinas superficiales a lo largo de las costas de México. Lo cierto es que el periodo de 13 años es muy corto con relación a la variabilidad climática

que se quiere identificar, razón por la que no se puede afirmar que las regiones marinas que se discuten en este trabajo se están enfriando, aun cuando los cálculos numéricos así lo sugieran. Sin embargo, en este caso el análisis de la tendencia de la TSM resultó inevitablemente polémico.

Es evidente la necesidad de extender el periodo de registro de las imágenes satelitales de la TSM y trabajar sobre series de tiempo considerablemente más largas. Conforme se extienda el periodo de registro las series de tiempo de la TSM serán más largas y se podrán calcular, de manera recurrente, todos los estadísticos apropiados para descubrir en ellos las tendencias y las anomalías térmicas con respecto a sus '*estados base*'. Así, de manera más categórica será posible mostrar que los análisis de la variabilidad la TSM en cada una de las regiones bajo estudio son una herramienta adecuada y efectiva para medir su potencial vulnerabilidad al cambio climático global.

LITERATURA CITADA

- Curry, J.A. y P.J. Webster, 1999. *Thermodynamics of Atmospheres and Oceans*. Academic Press, San Diego. 471 p.
- Gallegos García, A., R. Rodríguez, E. Márquez, y R. Lecuanda, 2003. Temperatura de la superficie de los mares de México. *El Faro, Boletín informativo*, 3(30): 12.
- Márquez García, E., 2003. Cartografía y análisis climatológico de la temperatura de la superficie del mar en el Golfo de California (1996-2001). Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. Ingeniero Topógrafo y Geodesta. Monografía c/CD anexo, 75 p.
- Maul, G.A., 1985. *Introduction to Satellite Oceanography*. Martinus Nijhoff Publishers, Boston. 606 p.

Caetano, E., V. Innocentini, V. Magaña, S. Martins, y B. Méndez, 2010. Cambio climático y el aumento del nivel del mar, p. 283-304. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Cambio climático y el aumento del nivel del mar

E. Caetano, V. Innocentini, V. Magaña, S. Martins y B. Méndez

RESUMEN

Información acerca de la amenaza de mareas de tormenta y de cómo esta amenaza va a cambiar en el futuro es esencial para evaluar el impacto del cambio climático en la costa y formular respuestas de adaptación a los cambios de las condiciones climáticas. A lo largo de la costa mexicana, y principalmente en el Golfo de México, las tormentas de marea son causadas por eventos hidrometeorológicos extremos como los nortes y huracanes. Los fuertes vientos y la caída de presión hacen que los niveles del mar suban en las zonas costeras. En el futuro, la severidad y la frecuencia de eventos de marea de tormenta se incrementará con el aumento del nivel del mar; añadiendo el hecho de que el cambio climático puede también alterar la frecuencia e intensidad de los forzantes meteorológicos. La modelación descrita aquí ha sido desarrollada para estimar el impacto del cambio climático en la actividad marítima ante eventos extremos como tormentas de mareas en las costas mexicanas del Golfo de México. El estudio se concentra en un sólo caso de evento extremo (Huracán Dean), por lo que no es posible evaluar la incertidumbre asociada a los escenarios. Los resultados indican que bajo las condiciones del clima actual, el enfoque de la modelación resulta compatible con los resultados obtenidos directamente por el análisis de datos observados. Bajo condiciones climáticas futuras se encontró que el impacto del aumento de nivel de mar puede ser más severo, particularmente cuando hay interacción constructiva entre la marea generada por tormenta y la marea oceanográfica en un incremento del nivel de mar de 1 metro.

Palabras clave: cambio climático, modelación, aumento del nivel del mar.

INTRODUCCIÓN

Muchos se preguntan si existen señales de cambios en el clima como para afirmar que el cambio climático es real, para proponer qué hacer antes de que sea muy tarde. Para conocer la respuesta a estas interrogantes se requiere establecer las características del cambio climático a escala regional, trabajando en la detección de las tendencias, así como en la atribución, es decir, separar la variabilidad natural del clima de aquellos cambios atribuibles a la actividad humana. Gracias al trabajo de científicos alrededor del mundo, hoy sabemos que el calentamiento del planeta está ocurriendo, pues las temperaturas de superficie sobre continentes y océanos han aumentado y continuará, lo que ha llevado entre otras cosas, a que la cubierta de hielo disminuya, y que el nivel del mar se incremente. Sin embargo, existe cierta incertidumbre sobre en qué medida tales cambios son de origen natural o el resultado del efecto invernadero incrementado por el hombre. Mediante experimentos con modelos del clima se ha mostrado que dichos cambios sólo se pueden explicar si se considera la influencia humana en el clima, resultado de modificaciones en la composición de la atmósfera por emisiones de gases de efecto invernadero y en menor medida, por los cambios en el albedo terrestre, consecuencia de la deforestación, la urbanización e incluso por el efecto que los aerosoles industriales tienen en el balance radiativo del planeta.

Las zonas sujetas a inundación con el aumento del nivel del mar por mareas de tormenta, indican que la penetración de la cuña marina se lleva a cabo con una distribución no uniforme y de manera muy irregular a lo largo

de amplios tramos de la costa. En las zonas de mayor vulnerabilidad la influencia marina se llegará a sentir a 40 y hasta 50 km tierra adentro. Los múltiples resultados obtenidos siguen evidenciando que el calentamiento de la atmósfera está acelerando el deshielo en todo el mundo; y éste asciende a varios cientos de kilómetros cúbicos de agua al año, así, según los estudios, el mar aumentaría 9 metros al derretirse los polos, (proceso que ya se inició). El aumento del nivel del mar producirá no sólo alteraciones en los sistemas de gran productividad biológica, como las lagunas costeras, sino que también provocará un impacto irreversible sobre la rica biodiversidad de algunas zonas de pantanos.

De acuerdo a datos de satélite de proyectos como Topex/Poseidon (<http://sealevel.jpl.nasa.gov/index.html>), los cambios a escala global son del orden de 1 a 2 mm/año. Regionalmente, los cambios experimentados pueden variar por efectos de esfuerzos superficiales del viento asociados con circulaciones casi-permanentes, o incluso movimientos de la geología costera. Los resultados de estaciones mareográficas en la parte sur del Golfo de México indican un aumento promedio en el nivel del mar de alrededor de 1.4 mm/año entre 1966 y 1976 (Salas-de-León *et al.*, 2006) (figura 1).

En algunos puntos específicos, la tendencia observada de la segunda mitad del siglo XX está entre 1.5 y 3 mm/año (figura 2).

De acuerdo a diagnósticos hechos por el Panel Intergubernamental para Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), los aumentos históricos en el nivel del mar a escala

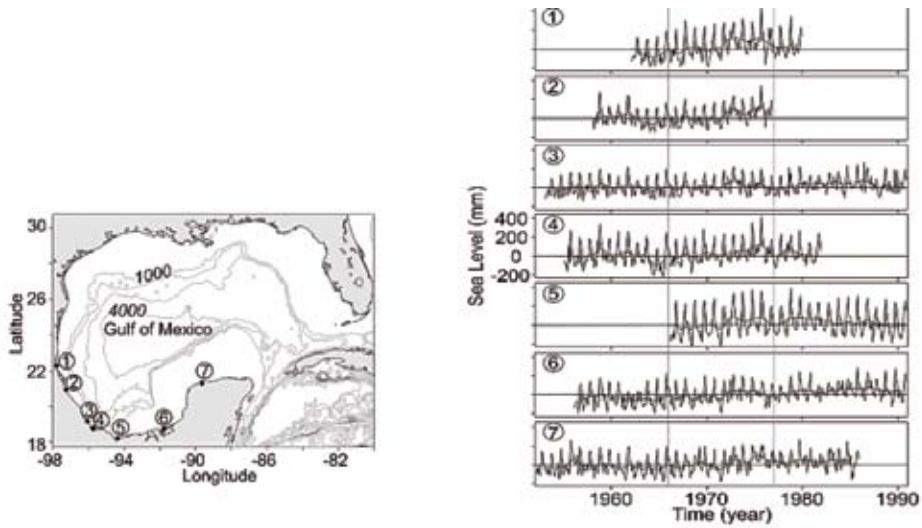


Figura 1. Anomalías mensuales en el nivel medio del mar en los puntos indicados en el mapa de la zona sur del Golfo de México (tomado de Salas-de-León *et al.*, 2006).

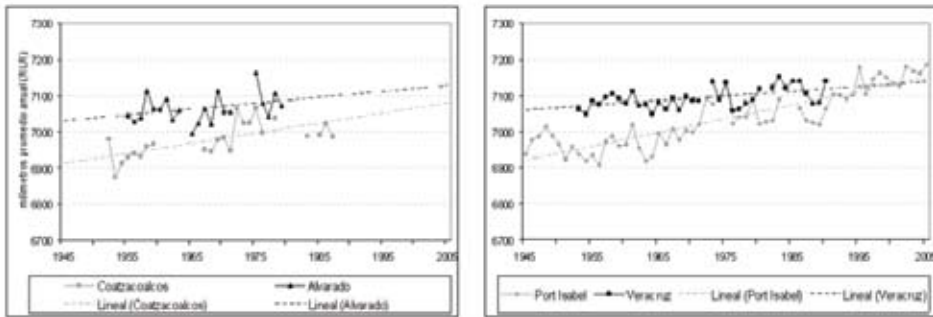


Figura 2. Cambios en el nivel del mar en estaciones mareográficas del Golfo de México (tomado de Salas *et al.*, 2006).

mundial son del orden de $1.7 \pm 0.3\text{mm/año}$ (figura 3). Sin embargo, informes recientes indican que la rapidez de cambio del nivel medio del mar está aumentando por lo que las proyecciones deben ser corregidas a la alza.

Diversos criterios para la selección de sitios de referencia que permitan estimar la velocidad de cambio del nivel medio del mar han sido sugeridos para hacer consistentes los cál-

culos. Así, se requiere que las series, además de ser largas, confiables y sin grandes cambios geológicos de movimiento vertical, deben ser:

- 1) de al menos 60 años de duración
- 2) Alejadas de zonas de colisión entre placas tectónicas
- 3) Con un porcentaje de al menos el 80% de los registros

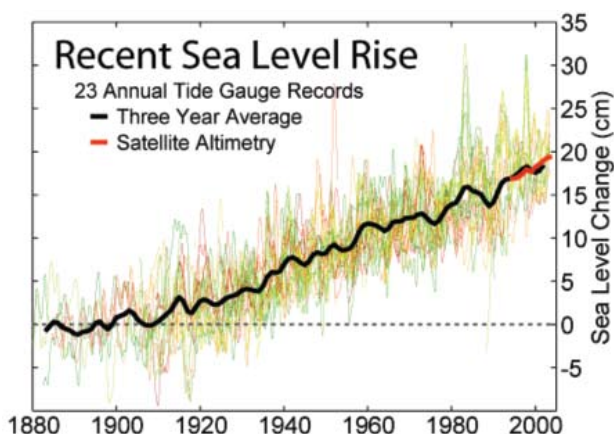


Figura 3. Estimaciones de cambios en el nivel medio del mar presentadas por diversos autores en el tercer informe de evaluación del IPCC.

- 4) Ser coherentes en comportamiento en las bajas frecuencias con estaciones cercanas.
- 5) Alejadas de zonas con un amplio rebote post-glacial.

Dichos criterios se cumplen en la mayoría de las estaciones del sur del Golfo de México por lo que se pueden utilizar de referencia sobre los cambios que en el nivel medio del mar vienen ocurriendo en México.

PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Recientemente, científicos del IPCC revisaron las estimaciones de cambio en el nivel del mar bajo diversos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Se ha concluido que las estimaciones del AR4* fueron menores de lo que recientemente se ha encontrado. De acuerdo a ciertos autores, ciertos procesos no fueron adecuadamente incorporados en la proyecciones, y sobre todo, se ha comenzado a encontrara una mayor aceleración en la velocidad de derretimiento de glaciares y casquetes polares. Pero, ¿cómo se proyecta el nivel medio del mar? Los escenarios de cam-

bio del nivel medio del mar consiste de cuatro elementos principales: expansión térmica, derretimiento de glaciares (excluyendo Groenlandia y las hojas de hielo antárticas), equilibrio total de la superficie de la capa de hielo, y desequilibrio dinámico de la capa de hielo.

Muchas proyecciones de aumento en el nivel del mar varían dependiendo de las suposiciones y el escenario de emisiones elegido. Un ejemplo, si se toma el escenario A1FI - éste es el de mayor calentamiento y por lo tanto define los límites superiores de la gama de proyecciones del nivel del mar. Las “mejo-

* The four assessment, AR4 (Synthesis Report Working Group I, IPCC 2007)

res” estimaciones para este escenario son 28 cm para la extensión termal, 12 cm para los glaciares y -3 cm para el equilibrio total de la capa de hielo superficial. Se agrega a esto un término basado simplemente en la suposición de que el flujo acelerado del hielo observado entre 1993-2003 sigue siendo constante en los años por venir, agrega otros 3 cm hacia el año 2095. En total, esto resulta en 40 cm, con una contribución de la hoja de hielo de cero. (Otro punto fino: Éste es levemente menos

que la estimación central de 43 cm para el panorama de A1FI que fue divulgado en los medios, tomados de bosquejos anteriores del Summary for Policy Makers (Group I, IPCC, 2007)pm, porque esos 43 cm no eran la suma de las mejores estimaciones individuales para los diversos factores que contribuían, pero era el punto mediano de la gama de incertidumbres, que es levemente más alta pues algunas incertidumbres se sesgan hacia valores elevados.)

OBJETIVO GENERAL

En este estudio se pretende examinar la vulnerabilidad de las zonas costeras de la Riviera Maya, Tabasco, Veracruz y Campeche ante a

eventos extremos (huracanes) bajo el cambio climático.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar mapas georeferenciados de los escenarios regionales de incremento del nivel del mar (1m).
- Evaluar el impacto fenómenos hidrometeorológicos extremos (huracanes) y el incremento del nivel del mar (100cm) a nivel regional de debido al cambio climático.

METODOLOGÍA

Los mapas de escenarios georeferenciados fueron elaborados a partir del modelo digital de elevación del US Geological Survey – USGS (<http://www.usgs.gov/>). El modelo digital de elevación USGS tiene una resolución de 90 m. en la horizontal y de 1 metro en la vertical. Es decir, la diferencia de nivel mínima entre celdas vecinas es de 1 metro.

Dos archivos raster (archivo matricial del modelo digital de elevación en formato reque-

rado por sistemas de información geográfica) fueron generados. El primer archivo contiene los datos topográficos recortados para las regiones de estudio y el segundo archivo corresponde a las regiones inundadas debido al incremento de nivel de mar. Este ultimo archivo es un archivo capa con valores cero (área no inundada) y uno (área inundada).

Para examinar los impactos bajo cambio climático (áreas inundadas, intensidad de oleaje)

de eventos extremos en las áreas estudio (Riviera Maya, Veracruz, Tabasco y Campeche) el procedimiento usual es identificar una gran población de eventos extremos del nivel del mar a partir de los registros de mareógrafos a lo largo del tramo de costa de interés y simular numéricamente cada evento con un modelo hidrodinámico. A los resultados de las simulaciones se aplica un análisis del valor extremo con finalidad de generar las funciones densidad de probabilidad y periodos de retorno. El análisis de probabilidad “conjunta” es entonces usado para combinar la marea oceánica con la marea de la tormenta para producir la marea de “tempestad”. Por ende, el impacto del cambio climático en la extensión del área de inundación de las tormentas de marea considera el cambio en la intensidad del viento simulados por los modelos climáticos del IPCC así como los aumentos en el nivel medio del mar.

El procedimiento utilizado en este estudio es más simple, se reduce examinar el evento real de huracán que azotó el Golfo de México (huracán Dean 2007), donde se tomo en cuenta el efecto de oleaje, no considerado usualmente en estos estudios. Los datos de viento en superficie y presión media al nivel de mar utilizados para el estudio son del Proyecto de Reanálisis Regional para Norteamérica del NCAR (Mesinger *et al.*, 2006). Estos datos tienen frecuencia tri-horaria y con resolución espacial de 32 km. El sistema desarrollado por Innocentini (<http://ondas.cptec.inpe.br>) compuesto por los modelos numéricos que simulan la generación de oleaje forzados por los vientos de superficie, acoplado a un modelo hidrodinámico fueron utilizados para generar los escenarios de impacto. El modelo de oleaje WWATCH III

(Tolman, 2002) es la última versión del modelo operativo del NCEP (<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/>), adaptado para la región de estudio (Mesoamerica) en tres dominios anidados con resoluciones espaciales de $1^\circ \times 1^\circ$, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, $0.02^\circ \times 0.02^\circ$. En estudios de ingeniería, el conocimiento operativo de la agitación marítima extrema en aguas costeras (como por ejemplo estuarios, islas, barreras, canales etc) es necesario. El modelo de oleaje SWAN (Holthuijsen *et al.*, 1989) simula de forma realista las características aleatorias de oleaje con crestas de poca amplitud, forzadas por el viento, bajo condiciones donde la batimetría de fondo del océano, el campo de viento, nivel del agua y el campo de corriente son importantes. El SWAN es un modelo de oleaje de tercera generación diseñado para aplicaciones en cuerpos de agua someros o zonas costeras con el propósito de construcción de puertos o instalaciones de plataforma petroleras offshore; desarrollo costero, gestión y climatología de oleaje (hindcasting).

El sistema de modelación MOHID (<http://www.mohid.com>) es un modelo hidrodinámico tridimensional desarrollado por MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) de Lisboa. La filosofía del sistema se basa en el acoplamiento de los procesos físicos y biogeoquímicos en diferentes escalas, con dominios anidados para aplicaciones en sistemas estuarios y cuencas hidrográficas. La integración de los módulos - MOHID Water, MOHID Land y MOHID Soil - permite estudiar el ciclo hidrológico de forma integrada. Una vez que estas herramientas son integradas en un mismo ambiente, su acoplamiento se alcanza fácilmente. El MOHID es capaz de modelar la circulación oceánica resultante de oleaje y mareas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los escenarios de aumento del nivel de mar para 2100 elaborados para AR4 (2007) son de 38 cm para el escenario B1 (un mundo más integrado y más ecológico amigable) y más de 60 cm para el escenario A2 (un mundo dividido caracterizado por un funcionamiento independiente, la autosuficiencia de las naciones; continuo aumento de la población; orientación regional de desarrollo económico; más lento y fragmentado, cambios tecnológicos y mejoras en los ingresos per cápita). En este estudio, como se mencionó antes, los datos de topografía permitieron solamente generar mapas de inundación con escalones de 1 metro. El aumento de 1 metro del nivel de mar inundará áreas de Tabasco, Campeche, Veracruz, Quintana Roo y casi toda la costa del Pacífico (figura 4). La mayor extensión de área inundada será en Tabasco (tabla 1). Resultados similares fueron encontrados por Ortiz-Pérez y Méndez-Linares (1999), pero en su análisis tomaron en cuenta, aun, los procesos de erosión, hundimiento costero y otros.

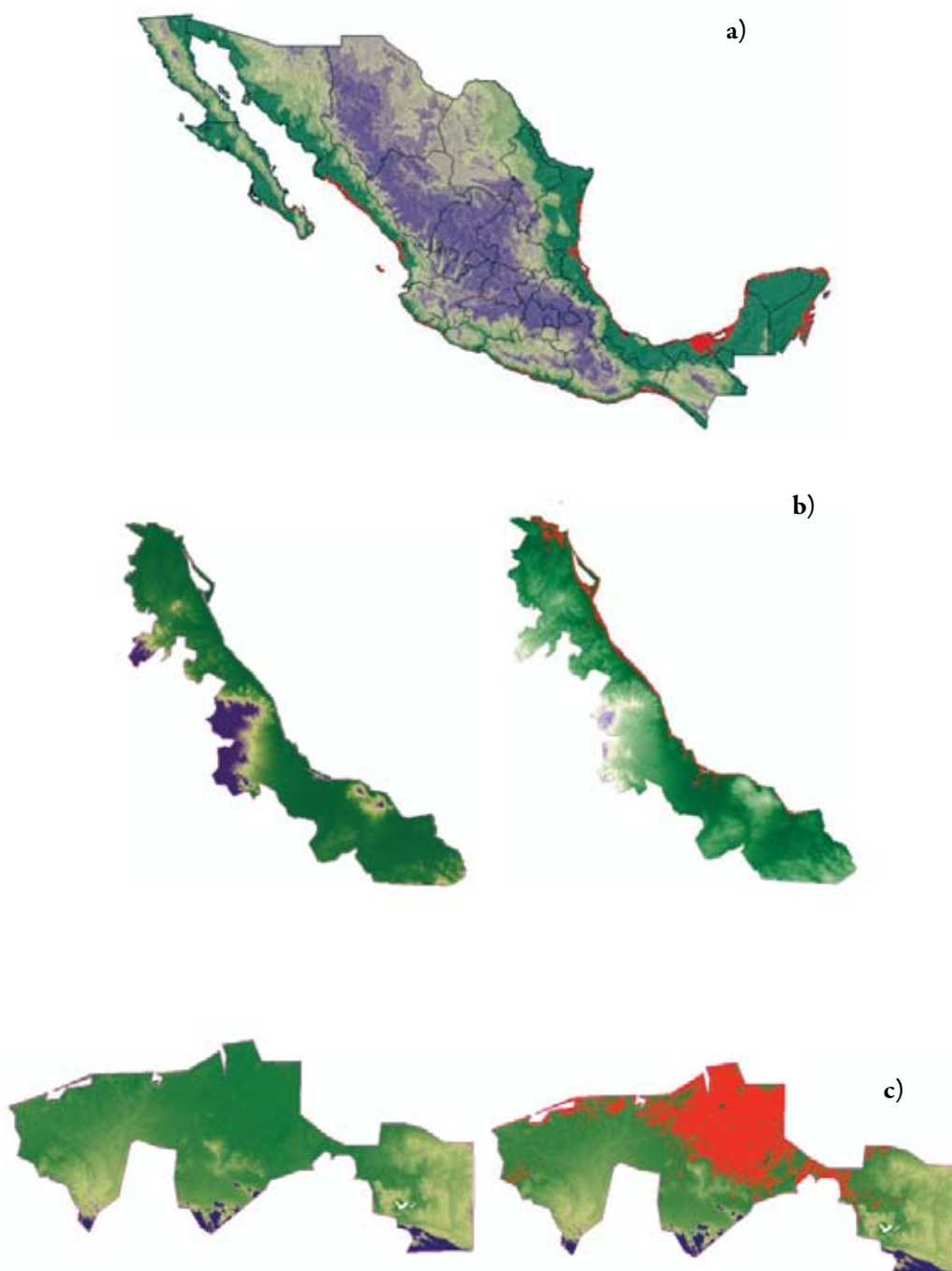
Estos mapas de inundación son proyecciones “estáticas” donde los efectos atmosféricos (huracán) y océano (marea, corrientes etc.) no están considerados.

Para examinar el impacto en las zonas de humedales ante evento extremos se elaboró un estudio de un evento de huracán real que azotó la región del Golfo de México. El objetivo principal es evaluar el aumento de nivel del mar debido a marea de tormenta y los efectos de oleaje que potencialmente podría aumentar las zonas por inundación.

EL HURACÁN DEAN

El evento extremo seleccionado para el estudio de impacto en la región de estudio (Golfo de México) es el huracán Dean que pasó sobre la península de Yucatán y Golfo de México del 21 al 23 de Agosto de 2007 (figura 5), con vientos sostenidos de 260 km/h (categoría 5) en su periodo de máximo desarrollo y, con precipitación intensa. La altura significativa de oleaje alcanzo valores de 4 m en la zona costera de los estados Tabasco y Veracruz (figura 6).

Un aspecto importante, no considerando los estudios de mareas de tormenta generadas por vientos intensos, es la oleaje: En este estudio fue considerado el impacto del oleaje y las simulaciones para el periodo estudiado fueron realizadas con los modelos WWATCH III y SWAM. El procedimiento para simular oleaje es complejo pues primero tiene que generarse el estado básico del mar a escala global (figura 7a) para el periodo largo (01 a 24 de agosto en este análisis) con resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ utilizando datos de reanálisis del NCEP (Kalnay *et al.*, 1996). Este estado básico del mar sirve como condición inicial para la región denominada de Mesoamerica (resolución espacial $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ para la simulación del periodo de 15 a 24 agosto (figura 7b), utilizando como forzantes los vientos a 10 metros de altitud del reanálisis NARR (North American Regional Reanalysis, Mesinger *et al.*, 2006), con frecuencia de trihoraria y resolución espacial de 32 km. Con las salidas de viento en superficie y el espectro de olas horarias del WWATCH III se definen las condiciones ini-



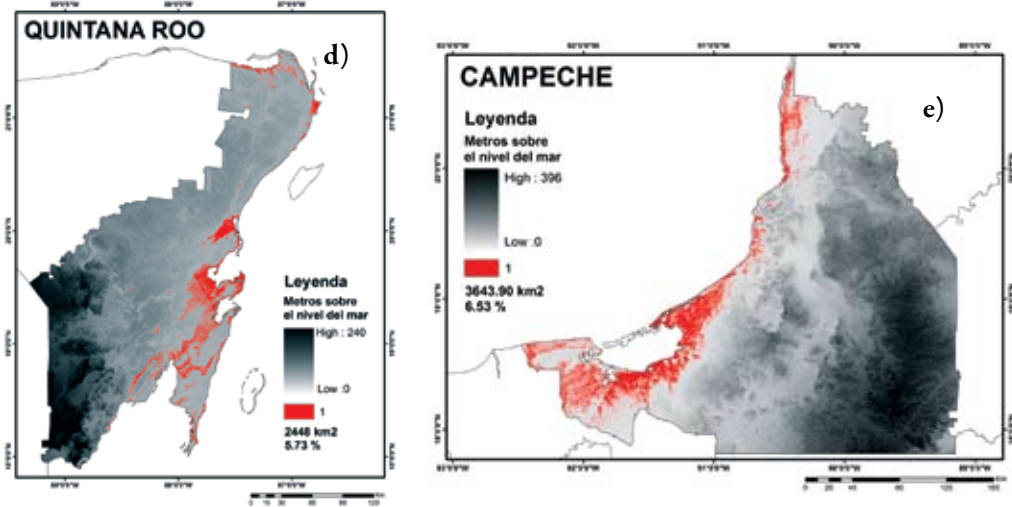


Figura 4. Áreas inundadas (en rojo) con el incremento del nivel de mar de 1 metro; a) República Mexicana; b) Veracruz costa actual y área inundada; c) Tabasco costal actual y área inundada; d) Quintana Roo área inundada; e) Campeche área inundada.

Tabla 1. Porcentaje de área afectada debido al incremento de 1m del nivel del mar.

Estado	Área (km ²)	% de área inundada
Campeche	3 643.9065	6.5
Tabasco	3 065.7528	12.6
Quintana Roo	2 447.982	2.40
Tamaulipas	964.5966	1.2
Veracruz	762.21	1.1

cial y de frontera en el modelo SWAM para el Golfo de México (figura 7c). El periodo de simulación es el mismo del WWATCH III, con resolución espacial de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$.

Las salidas horarias de altura significativa de ola de alta resolución espacial, más el campo de presión atmosférica en superficie, vientos del reanálisis NARR y marea son usados como condición inicial y de frontera para el modelo de hidrodinámico (MOHID) para la región del Golfo de México (figura 7d), con resolución espacial de $5\text{km} \times 5\text{km}$, y periodo de simulación de 15 a 24 de agosto de 2007.

OLEAJE

El huracán Dean tuvo un paso rápido sobre el Golfo de México, pero generó intensa actividad marítima en la parte sur del mismo, donde olas de altura de 4 a 6 metros fueron simuladas en las costas de Veracruz y Caribe mexicano (figura 8).

Adicionado al efecto de oleaje, la “marejada” causada principalmente por los fuertes vientos empuja la superficie del océano. El viento hace que el agua se acumule creando que el nivel del mar se eleve más alto de lo



Figura 5. Trayectoria del huracán Dean (National Hurricane Center)

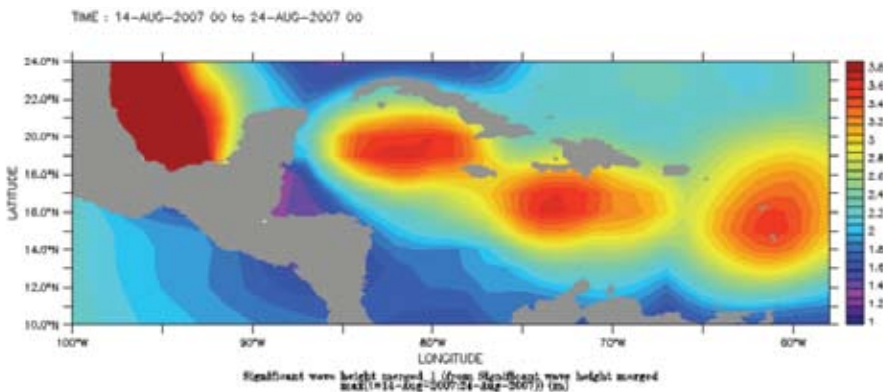


Figura 6. Altura significativa de olas media (m) a partir de datos de altimetría para el periodo entre el 14 y el 24 de agosto, Mar Caribe e Golfo de México. (<http://www.aviso.oceanobs.com>).

normal. El centro de baja presión también tiene un pequeño efecto secundario, así como la batimetría del cuerpo de agua. El efecto combinado de baja presión y el viento persistente sobre la superficie del cuerpo de agua puede generar tormentas de mareas y causar grandes inundaciones en regiones costeras.

MAREAS DE TORMENTA

En zonas donde existe una diferencia significativa entre la marea baja y la alta, las mareas de tormentas son especialmente perjudiciales cuando se producen en el momento de una marea alta. Para el huracán Dean se consideraron dos situaciones de mareas de tormenta:

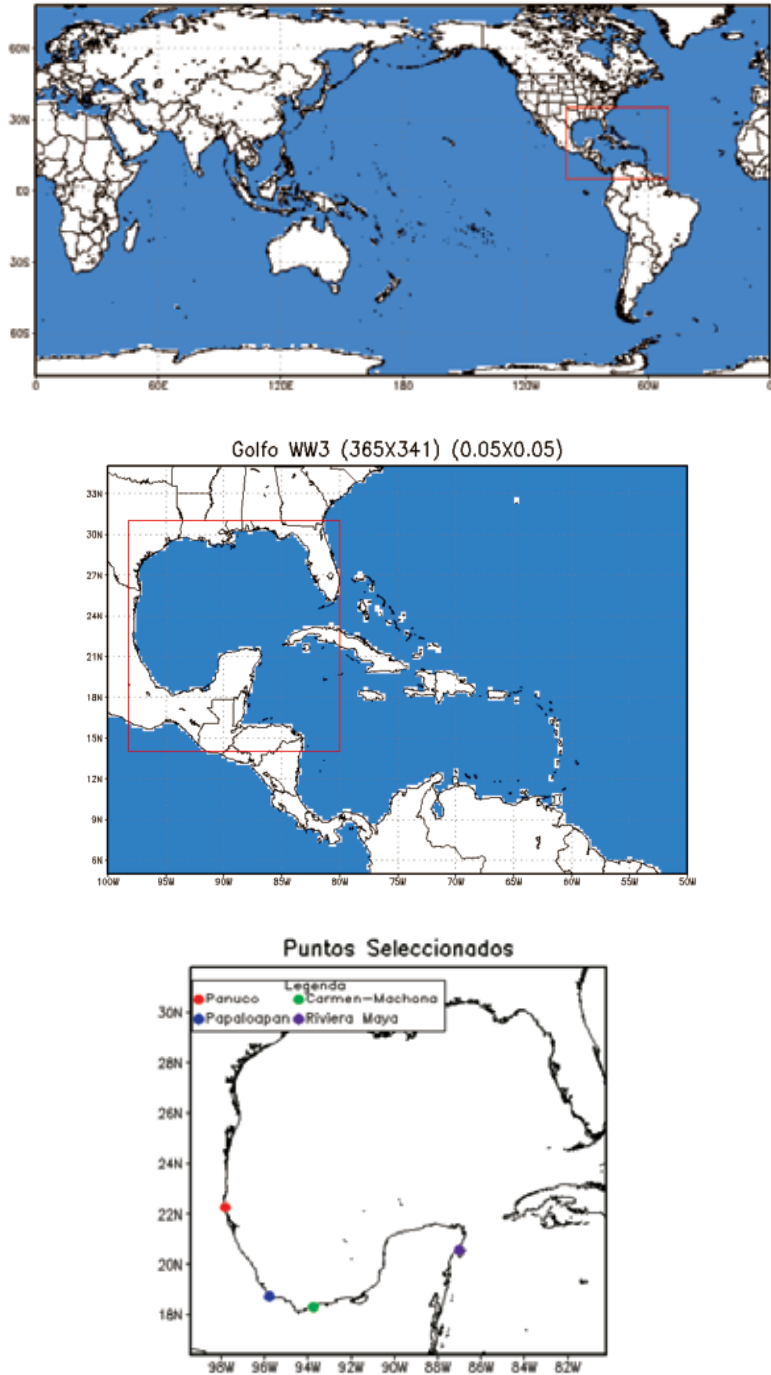


Figura 7. Dominio del modelo WWATCHIII (a) y (b); Dominio del modelo SWAM delimitado por el rectángulo en rojo y; Dominio del modelo MOHID (c). Los puntos en rojo, verde, azul y morado represento los humedales de Panuco, Carmen Machona, Papaloapan y Riviera Maya, respectivamente.

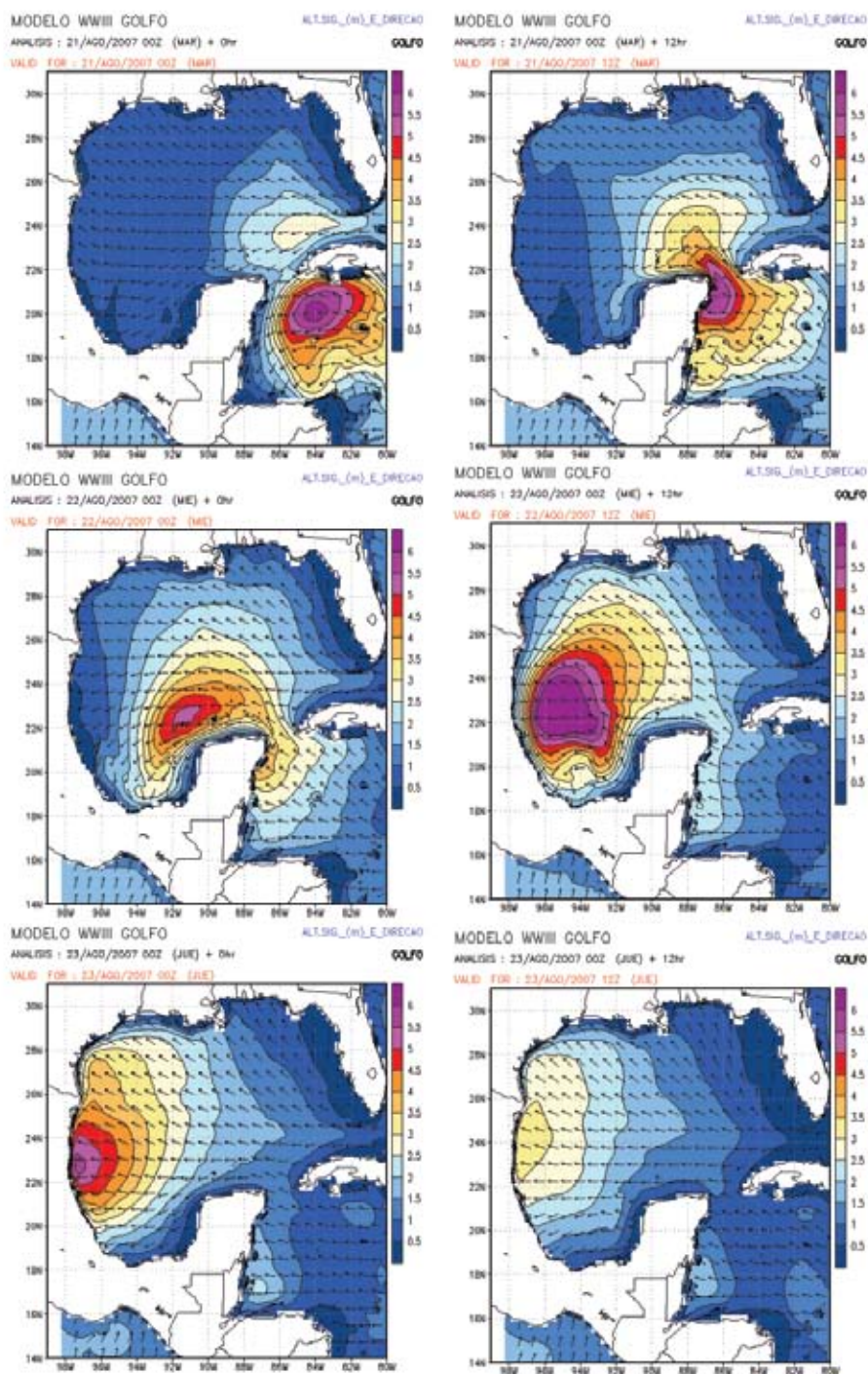


Figura 8. Serie temporal del campo de altura significativa (m) y dirección de olas (vectores) WWATCH III - GOLFO.

la simulación, tomando el nivel de referencia del mar actual (nivel de referencia medio de 0 m) y la simulación con el nivel de referencia del mar futuro (nivel de referencia medio de 1m). Para cada simulación de referencia del nivel del mar se realizaron además simulaciones donde los procesos de marea, oleaje, vientos y presión fueron analizados separadamente para evaluar los impactos individuales de cada proceso. Para los dos niveles de referencia, el impacto solamente del oleaje se considera prácticamente despreciable. El impacto de la marea en el futuro es relevante (figura 9), sin embargo, el impacto relevante, como era de esperar, es causado por los vientos y presión del huracán Dean (figura 10), modulado por el ciclo de mareas (mayor impacto en la fase de marea altas).

Es de esperarse que la amplitud de la marea sea algunos milímetros mayor, para un aumento de 1 metro del nivel del mar, ya que la velocidad de propagación de la onda es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad y la energía es proporcional al cuadrado de la velocidad, por lo que la ganancia de energía cinética se transformaría en potencial, esto es, en amplitud de la marea, en el límite en la costa.

Examinando la estructura espacial de nivel de mar para Dean, los mayores incrementos para el futuro, podrían ocurrir en las costas de Campeche debido al efecto de la marea (figura 11). Cuando todos los forzantes son considerados para condiciones futuras, ocurre un incremento mayor a lo largo de toda la costa mexicana del Golfo.

Como se mencionó anteriormente el forzante dominante en eventos de mareas de tormenta son los vientos y la presión sobre la superficie, sin los forzantes secundarios, y pueden causar interferencia constructiva o destructiva, particularmente en eventos con marea alta. Para este evento los efectos parecen actuar de forma constructiva. Para el escenario futuro la sinergia es más aparente.

Otros factores que también contribuyen para el aumento del nivel del mar cuando los ciclones tropicales impactan la región costera son, por ejemplo, su velocidad de desplazamiento, intensidad, tamaño del radio de vientos máximos y el ángulo de la pista con respecto a línea de la costa, además de las características físicas de la costa y batimetría de la región.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

HURACANES Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

Los huracanes son una preocupación importante para la región costera del Golfo de México (figura 12). Un gran número de personas e importante infraestructura se encuentra en zonas de ocurrencia de tormentas de

marea, vientos huracanados y precipitación. La temporada de huracanes del Atlántico de 2005 fue la más destructiva de la historia. La temporada del 2005 incluyó 26 tormentas con 7 huracanes de categoría 3 o superior. El huracán Wilma causó daños por 1,8 mil millones de dólares en México, principalmente en el estado de Quintana Roo (una de las ma-

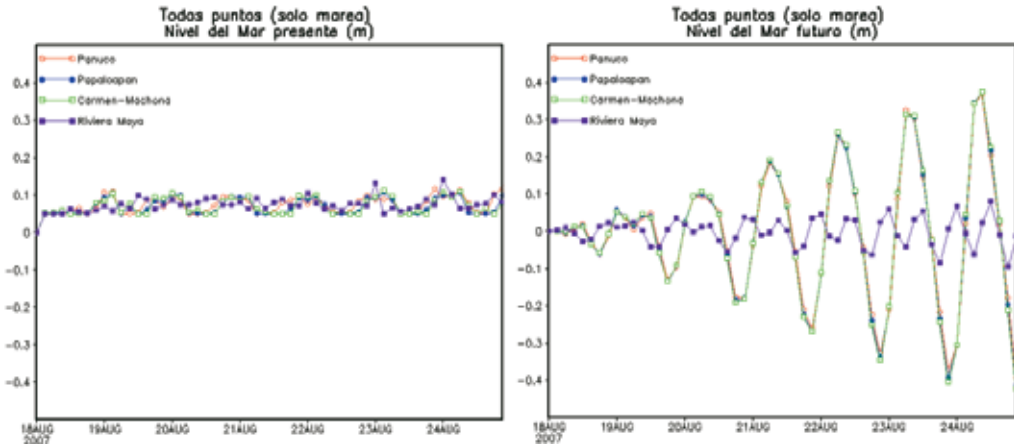


Figura 9. Serie temporal de la marea (m) para tiempo presente y futuro (nivel del mar con incremento de 1 metro).

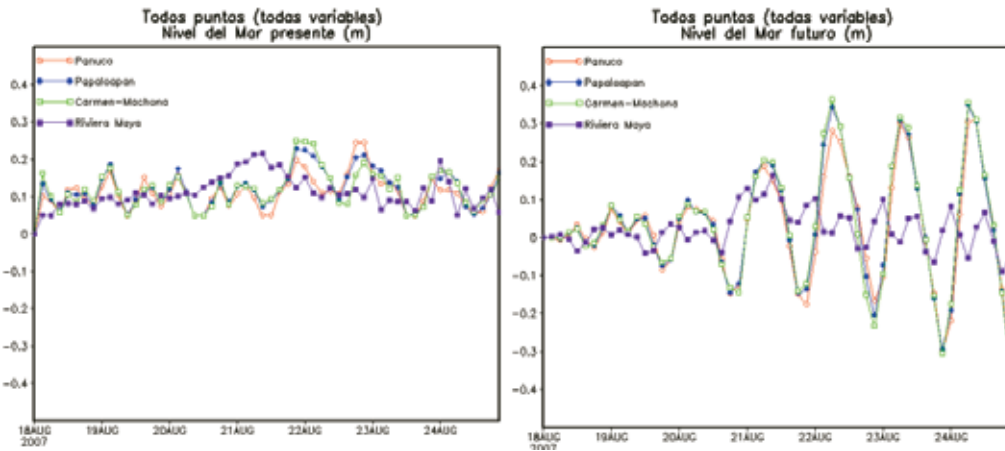


Figura 10. como la figura 9, pero considerando todos los forzantes; marea, oleaje, vientos y presión.

yores pérdidas en la historia de los seguros en América Latina).

El IPCC (2007) define al Cambio Climático como una importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más) y atribuido directa o indirectamente a la ac-

tividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables. De acuerdo con Emanuel (1987), los ciclones tropicales están al mismo nivel que los terremotos como las mayores causas geofísicas de pérdida de vida y propiedad. Por lo tanto, es de interés

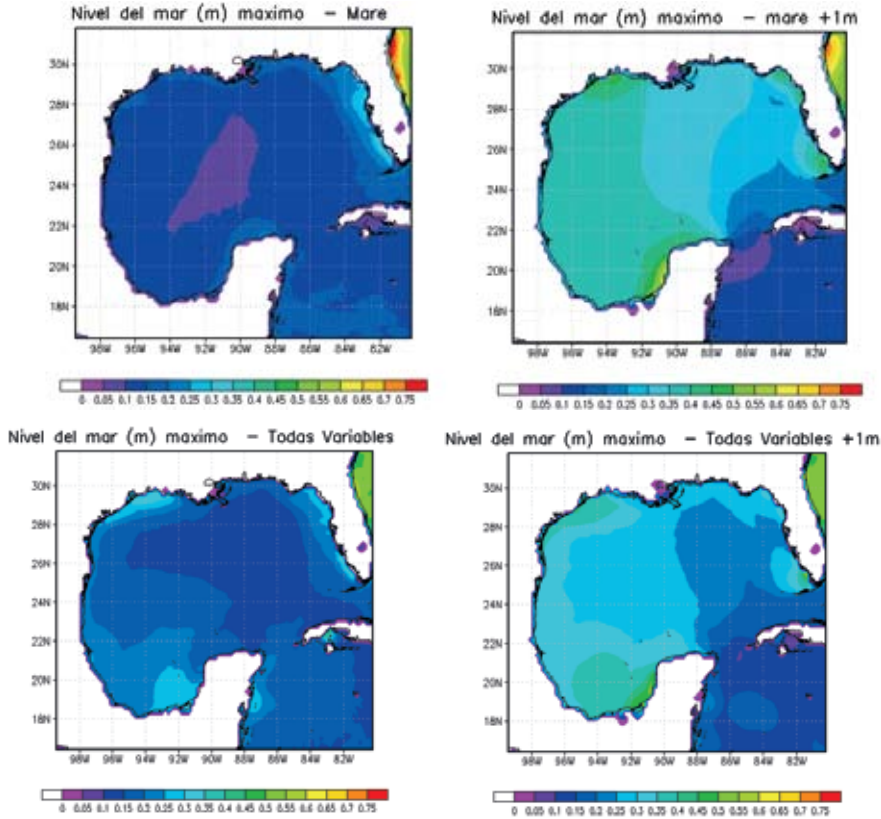


Figura 11. distribución del nivel máximo del mar para presente y futuro para el periodo del evento extremo Dean, donde solamente el efecto de marea es considerado

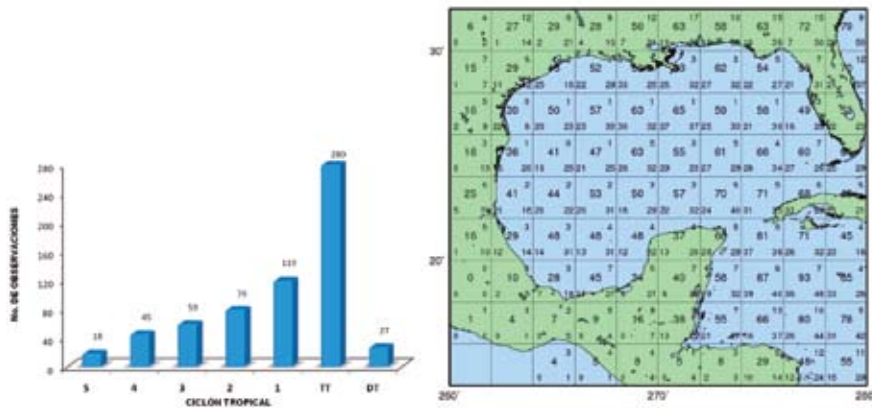


Figura 12. a) Frecuencias de intensidades de ciclones tropicales y; b) distribución espacial por regiones de 2°x2°. El número superior derecho indica el número total de depresiones tropicales; el número inferior derecho indica el número total de tormentas tropicales y el número inferior izquierdo indica el número total de huracanes en el Golfo de México durante el periodo 1851-2007.

científico estimar los cambios en la frecuencia de los ciclones tropicales y la intensidad que resultaría de alteraciones del clima inducidas por el hombre en un periodo corto. Emanuel (1987) considera que la temperatura de la superficie del mar es un factor que interviene en la intensidad de los huracanes y sugiere que los cambios climáticos relacionados con el incremento del dióxido de carbono atmosférico conducirán sustancialmente a un incremento en la intensidad ciclónica tropical.

Según Emanuel *et al.* (2008), un acercamiento sencillo para cuantificar la respuesta de la actividad ciclónica tropical al cambio climático del pasado es usar registros climáticos históricos y de tormentas. Este acercamiento está limitado por la duración relativamente corta y defectuosa de los registros de tormentas tropicales debido a que pudieron haber existido tormentas que no fueron registradas. Sin embargo, este registro ha permitido la detección de influencias climáticas importantes sobre la actividad ciclónica tropical, por ejemplo: el ENSO (El Niño- South Oscillation) en tormentas en el Atlántico Norte y en el oeste del Pacífico Norte. Las variaciones sobre escalas de tiempo se han atribuido a fluctuaciones climáticas naturales tales como la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO).

Simulaciones climáticas de alta resolución espacial realizadas en el Earth Simulator (<http://www.jamstec.go.jp/esc/index2.en.html>) para el periodo (1979-1989) y futuro (2080-2090), para la región de Mesoamérica (figura 13), muestran resultados similar a los observados (figura 13a) pero presenta sesgos de desplazamiento de las trayectorias hacia el norte y reducción en el número de huracanes en el Golfo de México (figura 13b).

En el futuro (figura 13c) indica que habrá menos eventos de huracanes sobre el Golfo de México y en general en el Atlántico Norte. El resultado más relevante de la proyección a futuro, es un incremento en el número de huracanes intensos (categorías 4 y 5), sobre el Atlántico y Golfo de México (figura 14).

Estos resultados concuerdan con un estudio reciente, más completo, realizado por Bender *et al.* (2010) con el modelo operativo de huracán de la National Oceanic and Atmospheric Administration/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA-GFDL) bajo condiciones climáticas actuales y proyectadas a 2081-2100 utilizando un ensamble de 18 miembros de cuatro diferentes modelos climáticos globales. Los principales resultados encontrados fueron:

- Reducción del número ocurrencia de ciclones tropicales (CT) en 28% a futuro (una señal consistente en estudios sobre el cambio climático es que la frecuencia de CT se reduce significativamente),
- Una reducción de 18% en la ocurrencia de huracanes más intensos (categoría 3, 4, 5),
- Aumento de 81% de huracanes de categorías 4 y 5 (un aumento considerable. Pero con la reducción en general del número de huracanes redujo, esto significa que algunos huracanes de categoría 3 se están convirtiendo a categoría 4).

Los autores encontraron aun, un aumento de aproximadamente de 30% en daños y perjuicios debido al calentamiento global. Este impacto sin embargo, es de un valor extremadamente pequeño, tomándose en cuenta que cada 10-15 años ocurre una duplicación de

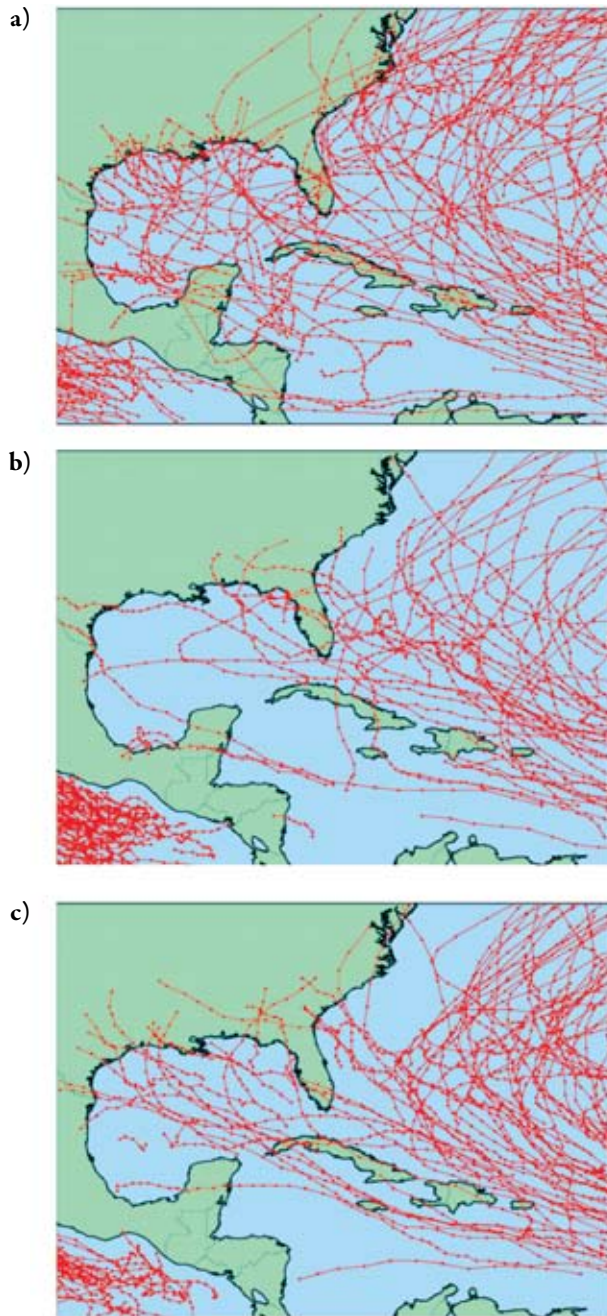


Figura 13. a) Trayectorias de huracanes (1979-1998) de acuerdo al Best Track Data del National Hurricane Center. b) Trayectorias de huracanes para el clima presente (1979-1998) de acuerdo al Earth Simulator. c) Trayectorias de huracanes para el clima futuro (2080-2099) de acuerdo al Earth Simulator.

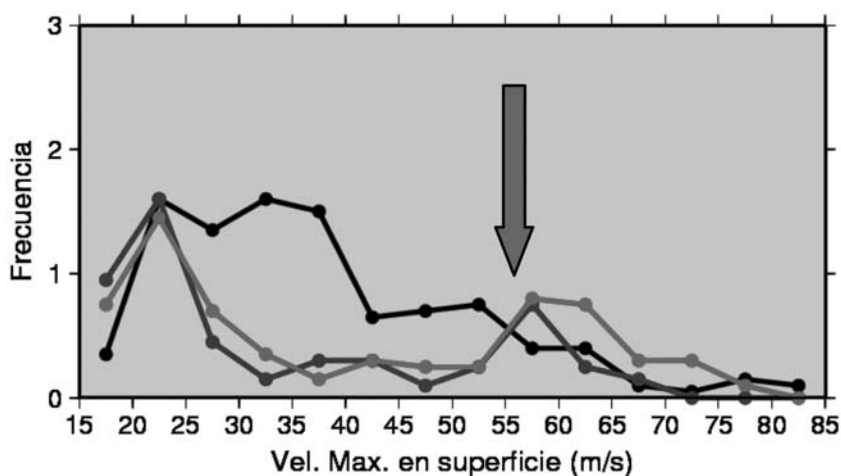


Figura 14. Frecuencia de velocidad máxima sobre el Atlántico Norte observada (Línea negra), clima presente (línea azul) y clima futuro (línea roja) de acuerdo al Earth Simulation. La flecha indica ciclones de categoría 3.

los daños debido al aumento de la población combinado con el aumento de la infraestructura y actividades a lo largo de las costas.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ZONAS COSTERAS

Muchos de los ecosistemas marinos y costeros y comunidades de las zonas costeras en el Golfo de México son sensibles al cambio climático. Los principales efectos del cambio climático en la región son el nivel del mar, cambios en los patrones climáticos posiblemente dando lugar a tormentas e inundaciones más severas, y las anomalías en las precipitaciones (sequías más frecuentes y precipitaciones intensas de corto periodo).

Los resultados presentados aquí ilustran que el enfoque desarrollado en este estudio se aplica a una amplia gama de regiones costeras, y por tanto, ofrece un método potencialmente valioso para evaluación de riesgo de mareas de tormenta en grandes zonas costeras para faci-

litar información a los planificadores sobre la vulnerabilidad relativa a eventos extremos en los diferentes tramos de costa, acerca del nivel del mar presente y futuro.

Otras contribuciones al aumento del riesgo de inundación costera y erosión se estimaron en este estudio. Incluyendo el impacto del viento sobre las olas durante el huracán Dean. El oleaje puede aumentar el nivel máximo del mar en las zonas costeras a través de los procesos de avance y retroceso de las olas. La ocurrencia de olas a un nivel mayor, permite que sus efectos dañinos puedan adentrarse aún más en el continente provocando erosión y daños a la infraestructura portuaria, industriales, turismo y otras.

Considerando los resultados de las simulaciones es posible construir escenarios de áreas afectadas por tormentas de marea y aumento del nivel de mar. De los sitios bajo estudio solamente la Riviera Maya será afectada a futuro directamente por tormenta de marea y el aumento de nivel de mar (figura 15), grandes

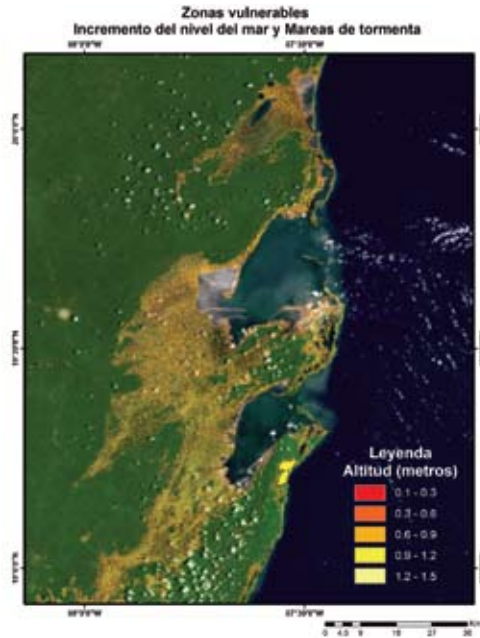


Figura 15. Escenarios a futuro de áreas inundadas en Punta Allen debido a marea de tormenta (aumento del nivel de mar de 30 cm en promedio) y aumento de nivel de mar (escenarios 30, 60, 90 120 cm).

extensiones continentales podrían ser inundadas ante al cambio climático. Otra región donde la afectación proyectada podría ser particularmente severa es la laguna de Término (figura 16). La proyecciones para los sitios de Carmen la Machona, Alvarado y Tampico (no mostrados) muestran que los dos efectos no impactarán directamente estas regiones, sin embargo, la ocurrencias de eventos extremos de precipitación más severos pueden llevar al aumento de escorrentías súbitas de los ríos resultando en inundaciones en la áreas sobre el continente. La salinización de los humedales puede también ser un factor indirecto ante al aumento de nivel del mar y mareas de tormenta.

El AR4 identifica el Golfo de México como uno de las áreas en que se prevé las pérdidas

en el área de los humedales será especialmente grave. Los resultados de este estudio parecen corroborar las conclusiones del IPCC.

Los resultados indican que bajo las condiciones del clima actual, el enfoque de la modelación resulta compatible con los resultados obtenidos directamente por el análisis de datos observados. Bajo condiciones climáticas futuras se encontró que el impacto del aumento de nivel de mar puede ser más severo, particularmente cuando hay interacción constructiva entre la marea generada por tormenta y la marea oceanográfica en un incremento del nivel de mar de 1 metro.

Sin embargo, un estudio más extenso requiere la identificación de una gran población de eventos extremos del nivel del mar a partir de los registros de mareógrafos climatológicos



Figura 16. Áreas inundada debido al aumento de nivel de mar y mareas de tormenta en la región de la Laguna Términos (escenarios 30, 60, 90 120 cm).

de tormentas a lo largo de los tramos de las costas de interés y la simulación de cada evento con un modelo hidrodinámico (McInnes *et al.* 2007). Un análisis de valores extremos permitiría generar la función de densidad de probabilidades y periodos de retorno.

EVENTOS EXTREMOS:

ESCENARIOS Y PREDICTIBILIDAD

Estudios recientes muestran que en un clima más caliente los ciclones tropicales serán más intensos sobre el Atlántico norte (mayor frecuencia de huracanes de categorías 4 y 5), no obstante, sin grandes cambios en la frecuencia de ocurrencia de estos fenómenos (Webster *et al.*, 2005; Holland y Webster, 2007; Mann *et al.*, 2007; Kerry Emanuel *et al.*, 2008; Sugi *et al.*, 2009; Bender *et al.*, 2010).

Por otro lado, los escenarios de cambio climático generados por los modelos del IPCC muestran una tendencia en reproducir patrones de ENOS (El Niño y Oscilación Sur).

Se sabe que las teleconexiones ENOS tienen importantes impactos sociales (escasez de alimentos, propagación de enfermedades por insectos, sequías etc.). Uno de los impactos más fuertes del ENOS es en la actividad de ciclones tropicales en el Océano Atlántico del Norte (Gray, 1984). Los cambios interanuales de la circulación atmosférica a gran escala se superponen a las variaciones locales en la actividad de ciclones tropicales; resultando en reducción de la actividad ciclónica durante los eventos cálidos de El Niño y un aumento de la actividad durante los eventos fríos de La Niña. Esta fuerte señal ha dado lugar a grandes esfuerzos para predecir la actividad de temporada de ciclones tropicales en el Atlántico norte, pero desafortunadamente con poco éxito debido a “la barrera de previsibilidad” (Webster *et al.*, 1992). En sus fases frías y cálidas, el ENOS posee una alta predictibilidad de varios meses de antelación. Sin embargo, a medida que el ENOS se mueve a una zona de transición entre las fases, es posible

el avance en cualquier dirección y, por tanto a una pérdida considerable de la habilidad de predicción. Este periodo de transición ocurre normalmente entre abril y mayo. Por lo tanto, los pronósticos de ciclones tropicales realizados antes de junio no tienen habilidad predictiva.

Recientemente Kim *et al.* (2009) muestran que la previsibilidad de la temporada de ciclones tropicales del Atlántico puede mejorarse, quebrando la fase cálida de El Niño en dos modos independientes: un modo de calentamiento del Pacífico oriental (CPO) y un modo de calentamiento Pacífico central (CPC). El modo CPO es similar al El Niño “clásico”, pero el modo CPC es muy diferente, donde el calentamiento se concentra, solamente en la zona central del Pacífico. El modo CPC no es realmente un fenómeno El Niño, pero es muy probable que haya sido confundido como un evento de El Niño en el pasado. El punto relevante en lo encontrado por Kim *et al.* (2009) es que la actividad de los ciclones tropicales en el Atlántico Norte aumenta durante CPC a un nivel similar al observado durante eventos de la Niña, contrastando con los efectos del

El Niño canónico. Otro aspecto de interés es que CPC tiene un alto grado de predictibilidad mucho antes de la barrera de abril/mayo. Por lo tanto la separación en dos modos calientes permite una mejora en la predicción de la temporada de ciclones tropicales en el Atlántico tropical.

Una de las implicaciones del estudio de Kim *et al.* (2009) resulta de la evidencia del aumento de la frecuencia en las últimas décadas, que en el nuevo modo CPC estaría asociado a la variabilidad natural (oscilación decadal del Pacífico), o a la señal evidente del calentamiento global. Los modelos usados por el IPCC para la construcción del AR-4 no reproducen los principales elementos de la variabilidad interdecadal. Consecuentemente los escenarios a futuro de la frecuencia e intensidad de eventos extremos generados por los modelos actuales pueden estar subestimados y se requieren nuevos estudios con modelos acoplados atmósfera-oceano más refinados para determinar si estas diferencias resultan de cambios en las características de los ciclones en el Atlántico norte.

LITERATURA CITADA

- Bender, M. A., R. Thomas, R. Knutson, E. Tuleya, J. Sirutis, G. A. Vecchi, S. T. Garner, y I. M. Held, 2010. Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic Hurricanes. *Science*, 327: 454-458.
- Climate Change, 2007. The AR4 Synthesis Report Working Group I Report The Physical Science Basis.
- Emanuel, K. A., 1987. The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*, 326: 483-485.
- Emanuel K. A., R. Sundararajan, y J. Williams, 2008. Hurricanes and global warming: results from downscaling IPCC AR4 Simulations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89: 347-367.
- Gray, W. M., 1984. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part II: Forecasting its variability. *Mon. Wea. Rev.*, 112: 1669-1683.

- Holland, G. J., y P. J. Webster, 2007. Heightened tropical cyclone activity in the North Atlantic: Natural variability or climate trend?, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, doi:10.1098/rsta.2007.2083.
- Holthuijsen, L.H., N. Booij, y T.H.C. Herbers, 1989. A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering*, 13, 23-54.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Leetmaa, Reynolds, R. Jenne, y D. Joseph, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437-470.
- Kim Hye-Mi, P. J. Webster y J. A. Curry, 2009. Impact of shifting patterns of Pacific Ocean warming on North Atlantic Tropical Cyclones. *Science*, 325(5936): 77 – 80.
- Mann, M. E., K. An Emanuel, G. J. Holland, y P. J. Webster, 2007. Atlantic Tropical Cyclones Revisited. *EOS*, 88: 349-350
- McInnes, K. L., G. D. Hubbert, I. Macadam y J. G. O'Grady, 2007. Assessing the impact of climate change on storm surges in Southern Australia. Available at http://www.mssanz.org.au/MODSIM07/papers/26_s32/AssessingTheImpact_s32_McInnes_.pdf
- Mesinger F., G. DiMego, E. Kalnay, P. Shafran, W. Ebisuzaki, D. Jovic, J. Woollen, K. Mitchell, E. Rogers, M. Ek, Y. Fan, R. Grumbine, W. Higgins, H. Li, Y. Lin, G. Manikin, D. Parrish, y W. Shi, 2006. North American regional reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87: 343-360.
- Ortiz-Perez, M.A., y A.P. Mendez-Linares, 1999. Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas*, 39: 68-81.
- Salas-de-León D. A., A. Monreal-Gomez, D. Salas-Monreal, M. L. Riveron-Enzastiga, y N. L. Sanchez-Santillan, 2006. Inter-annual sea level variability in the southern Gulf of Mexico (1966-1976). *Geophysical Research Letters*, 33, n.8, L08610.1-L08610.4.
- Sugi, M., H. Murakami, y J. Yoshimura, 2009: A reduction in global tropical cyclone frequency due to global warming. *SOLA*, 5, 164-167, doi:10.2151/sola.2009-042.
- Tolman, H. L., 2002. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 222, 133 p.
- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, y H.R. Chang, 2005. Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warming environment. *Science*, 309: 1844–1846.
- Webster, P. J., y S. Yang, 1992: Monsoon and ENSO: Selectively Interactive Systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 118: 877-926.