

CARACTERIZACIÓN MULTIDISCIPLINARIA DE LA ZONA COSTERA DE SISAL, YUCATÁN

HACIA UNA GESTIÓN INTEGRAL Y
FORTALECIMIENTO DE LA RESILIENCIA



Laboratorio Nacional
de Resiliencia Costera

Joaquín Rodrigo Garza Pérez

Irina Ize Lema

Editores

CARACTERIZACIÓN MULTIDISCIPLINARIA DE LA ZONA COSTERA DE SISAL, YUCATÁN
HACIA UNA GESTIÓN INTEGRAL Y FORTALECIMIENTO DE LA RESILIENCIA

Producido por LANRESC (Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera). Febrero 2017.
D.R. © LANRESC

ISBN 978-607-02-9904-9

Editores: Joaquín Rodrigo Garza Pérez & Irina Ana Rosa Ize Lema.

Fotografías: Sergio Medellín (Portada y pág. 8), Cortesía del USGS (pág. 14), Tonatíuh Mendoza (pág. 89), Rodrigo Garza (pág. 137), Adán Aranda Fragoso (pág. 165).

Cita sugerida: Garza-Pérez J.R. & Ize-Lema I.A.R. 2017. Caracterización Multidisciplinaria de la Zona Costera de Sisal, Yucatán. LANRESC, Yucatán, México.

Diseño gráfico: Gabriela Calero.

Este volumen es un producto del Proyecto LANRESC CONACYT P. 271544 "Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (Primera Consolidación)."

MONITOREO AMBIENTAL DE LARGO PLAZO, HERRAMIENTA PARA EVALUAR LA RESILIENCIA DE SISTEMAS COSTEROS

Xavier Chiappa-Carrara⁽¹⁾, Cecilia Enriquez⁽²⁾, Ismael Mariño-Tapia⁽³⁾, Maribel Badillo⁽¹⁾, Alfredo Gallardo⁽⁴⁾, Carlos Yañez Arenas⁽⁴⁾, Etzaguery Marin-Coria⁽⁵⁾, Leticia Arena⁽⁶⁾, Patricia Guadarrama⁽¹⁾, Korinthya López-Aguilar⁽⁷⁾, Santiago Capella⁽⁷⁾

(1) Laboratorio de Ecología de Zonas Costeras, Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Facultad de Ciencias, UNAM

(2) Laboratorio de Oceanografía y Procesos Costeros, Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Facultad de Ciencias, UNAM

(3) Departamento de Recursos del Mar, CINVESTAV-Mérida

(4) Laboratorio de Conservación de la Biodiversidad, Facultad de Ciencias, UNAM

(5) Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

(6) Laboratorio de Ecogenómica, Facultad de Ciencias, UNAM

(7) Laboratorio de Isótopos Estables, Facultad de Química, UNAM

RESUMEN

Ante cualquier escenario de cambio, los sistemas resilientes tienen la capacidad de restablecer la estructura y funcionamiento característicos de su estado inicial. Gracias a un programa de monitoreo de la ictiofauna que habita en una laguna costera situada en la costa norte de Yucatán, se obtuvieron series de tiempo con la resolución suficiente para mostrar que el sistema es capaz de recuperar la estructura de los ensambles de peces presentes antes de un evento de marea roja que se presentó en el mes de julio de 2008. En este trabajo se analizaron las variaciones en la composición específica mensual del ensamble de especies ícticas presentes en las cercanías de la boca de conexión de la laguna con el mar en el periodo comprendido entre abril de 2008 y marzo de 2009. Se construyeron las series temporales de los índices de distinción taxonómica promedio (Δ^+) y de la variación en la distinción taxonómica (Λ^+) de manera mensual. Dichas series permitieron distinguir taxonómicamente al ensamble de especies que se presentó durante el evento de marea roja, cuya composición difiere del que se presenta en la laguna el resto del año. Este ejemplo constituye una evidencia de la resiliencia de los ecosistemas costeros y de la capacidad que tienen para tolerar los disturbios ambientales que ocurren en la plataforma continental. Dado que la laguna de la Carbonera juega un papel importante para minimizar algunos impactos ecológicos negativos, como son las mortalidades masivas, que

provocan los eventos de marea roja sobre la ictiofauna del litoral yucateco, se propone que sea considerada como una zona núcleo de la Reserva de Ciénagas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán.

Los programas de monitoreo ambiental de largo plazo permiten comprender la manera en la que los ecosistemas cambian con el tiempo. Por ende, obtener series de tiempo de las variables relevantes para conocer las tendencias que siguen los componentes de interés de un sistema forma parte del conjunto de estrategias que permiten identificar los límites de su resiliencia, estabilidad, o cambios de estado. Estos límites ocurren en un amplio intervalo de frecuencias y amplitudes. Por ejemplo, cuando las amplitudes son grandes, las variaciones de ciertos parámetros causadas por agentes externos pueden generar cambios

drásticos en el sistema, aún si su frecuencia es pequeña. La capacidad del sistema de restablecer la estructura y funcionamiento característicos del estado inicial se denomina resiliencia. La estabilidad, en cambio, es la capacidad de un sistema de permanecer “razonablemente igual a sí mismo” cuando ocurren forzamientos con amplitudes chicas a pesar de que sucedan con frecuencias altas (Margalef, 1968). Un cambio de estado se identificaría, en una serie de tiempo, como un comportamiento escalonado en el que no se recuperan los valores de la serie correspondientes al estado anterior. Por lo tanto, no ocurren oscilaciones.

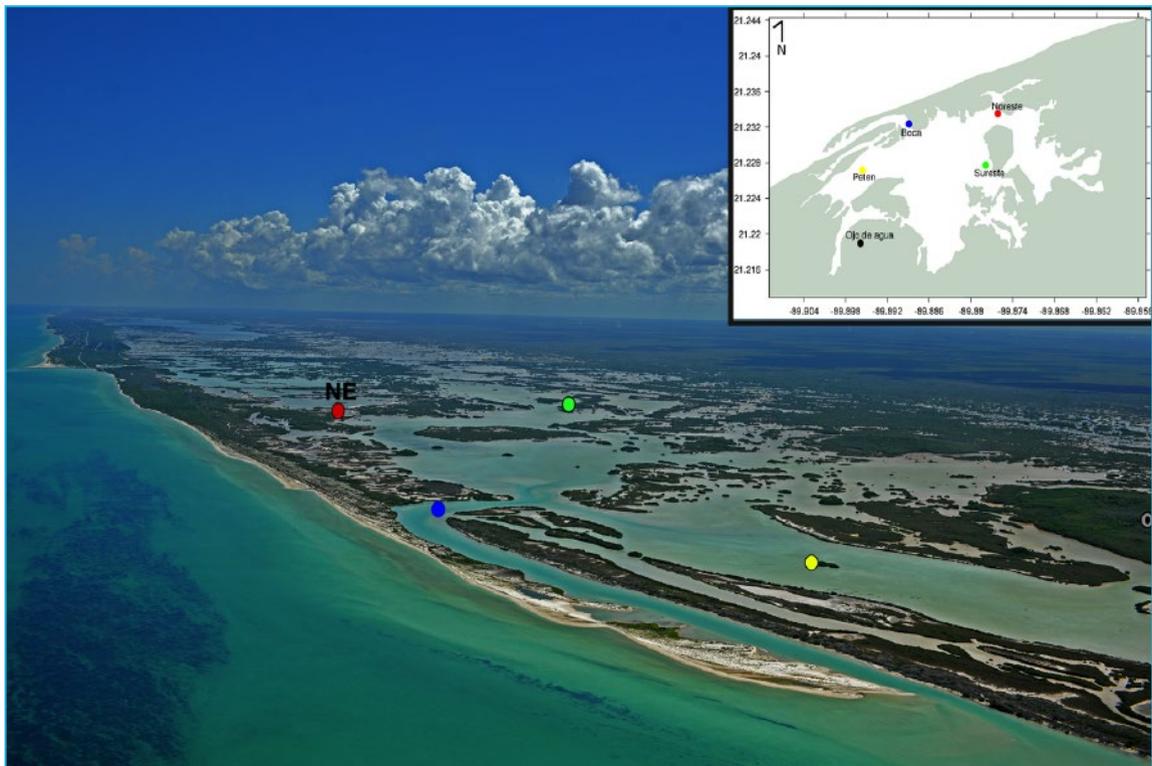


Figura 1. Laguna La Carbonera. Se muestran los sitios de mediciones continuas de temperatura, salinidad y nivel de agua con CTDs.

Los grupos de trabajo de Ecología de Zonas Costeras, de Oceanografía y Procesos Costeros y de Química, adscritos a la Unidad Académica de la UNAM en Yucatán y al CINVESTAV-Mérida, han estudiado con un enfoque multianual y multidisciplinario la laguna de la Carbonera, que forma parte del sistema de humedales costeros presente en la costa noroccidental de Yucatán. Esta laguna se encuentra conectada de forma permanente al mar por una estrecha boca que se formó con el paso del huracán Gilberto en 1988. La laguna tiene una longitud de ≈ 4.1 km en la sección paralela a la línea de costa y de ≈ 3.5 km en la parte más ancha, perpendicular a la costa (Figura 1). Es un cuerpo de agua somero, con profundidades que oscilan entre 0.1 y 1.5 m por lo que es altamente influenciado por el clima atmosférico local. La temperatura de la columna de agua tiene una amplitud de variación anual de $\approx 5-8$ °C, con valores mínimos de $\approx 18-20$ °C entre diciembre y febrero y los máximos de $\approx 28-35$ °C, entre junio y octubre (Bonilla-Gómez *et al.* 2013, Marin-Coria & Enriquez 2016). En cuanto a la salinidad, Jerónimo *et al.* (2012) encontraron que el sistema presenta una alta variabilidad estacional, con valores mínimos promedio de ≈ 20 observados en la época de lluvias y máximos situados en ≈ 40 que ocurren en la época cálida y seca. Más recientemente se ha observado que las variaciones de salinidad en este sistema ocurren tanto espacialmente como temporalmente: por un lado existe la presencia de agua dulce con salinidad menor a 5 en los sitios de descarga de agua subterránea, que no presentan variaciones estacionales de salinidad pero que tienen incrementos súbitos de sal en momentos eventuales de intrusión de agua de la laguna hacia el acuífero. El resto de la laguna está altamente influenciado por los intercambios de calor y de

agua con la atmósfera y con el mar; dependiendo de cada localidad, las variaciones temporales de salinidad son distintas entre sí, con valores promedio entre 20 y 37 en la región central y marina y entre 40 y 80 en la región oriental de la laguna (Marin-Coria & Enriquez 2016). El régimen hidrológico está determinado por el aporte de agua marina y, en menor grado, por las variaciones estacionales en el flujo de los afloramientos de agua subterránea, la precipitación y las escorrentías provenientes de la sabana yucateca y del manglar que bordean al sistema. Se han descrito procesos de mezcla entre el agua dulce y el agua de mar en el subsuelo que, en forma de cuña salina, tienen una influencia notable tierra adentro (Carbajal 2009).

De acuerdo con Jerónimo *et al.* (2012), esta laguna se puede dividir en cuatro zonas con características hidrológicas distintivas: la zona cercana a la boca con mayor influencia marina; la zona de mezcla al oeste de la boca, donde se establece un gradiente halino producto del encuentro del agua dulce de origen subterráneo con la marina que ingresa por la boca; la zona de dominio de agua dulce hacia el sur, influenciada por el aporte permanente de agua del acuífero que emana por un ojo de agua localizado en un petén; y la zona al este de la boca, controlada por las mareas, en la que predominan condiciones hiperhalinas debido a la elevada evaporación. Estas características permiten la existencia de una gran variedad de micro-hábitats y estructuras ambientales en las que proliferan los estadios larvales y juveniles de especies de peces dulcea-cuícolas, estuarinos típicos de estos estuarios tropicales, así como exponentes del componente marino (Vega-Cendejas 2004; Vega-Cendejas & Hernández de Santillana 2004; Arceo-Carranza & Vega-Cendejas 2009).

El programa de monitoreo de largo plazo de la ictiofauna que habita en las distintas porciones de esta laguna, los estudios de la hidrodinámica e hidroquímica, han permitido describir el funcionamiento lagunar. El diseño de este programa permitió obtener la resolución temporal suficiente para evaluar la capacidad del sistema para recuperar la estructura de los ensambles de peces presentes antes, durante y después de un evento de marea roja que se presentó en el mes de julio de 2008, caracterizado por Enriquez *et al.* (2010). Este ejemplo constituye una evidencia de la resiliencia del sistema y su capacidad para tolerar fuertes disturbios ambientales que se generan en la plataforma continental, como el que se describe a continuación.

En el borde oriental de la plataforma continental yucateca durante la primavera y el verano afloran pulsos de la Masa de Agua Subsuperficial del Caribe (CSUW, por sus siglas en inglés) (Cochrane 1966; Ruiz-Rentería 1979; Merino 1992, 1997; Sahl *et al.* 1997; Reyes-Mendoza *et al.* 2015). Estas aguas son de baja temperatura (los límites máximos se sitúan entre $\approx 22-26$ °C), alto contenido de nutrientes y se encuentran entre los 150 y 250 m de profundidad en el mar Caribe (Merino 1997). Al emerger por el margen continental, las corrientes superficiales locales mueven la masa de agua de la surgencia hacia el oeste, la cual se deposita sobre la somera plataforma continental. Al ser considerablemente más densa que el agua de la plataforma (≈ 10 °C menos), se genera una columna estratificada con dos capas divididas por una fuerte termoclina (Figura 2). Por ello, el agua de surgencia rara vez llega hasta la superficie y se dispersa por el fondo en la zona eufótica bañando gran parte de la plataforma de Yucatán (desde Cabo Catoche, hacia el O-NO), alcanzando en ocasiones las

zonas costeras del oeste de Yucatán (Enriquez *et al.* 2013). Gracias a los eventos de surgencia aumentan las concentraciones de nutrientes que favorecen los altos niveles de producción biológica observados en la región de Cabo Catoche.

Ciertas condiciones hidrodinámicas (Enriquez *et al.* 2010; Reyes-Mendoza *et al.* 2016), geoquímicas (Álvarez-Góngora & Herrera-Silveira 2006) y biológicas (O'Carroll 1987) que ocurren en las cercanías de Cabo Catoche favorecen florecimientos masivos de algas unicelulares, conocidos como mareas rojas, cuyos efectos se han documentado hasta las costas de la Reserva de la Biosfera de Celestún. En el litoral de Yucatán, por lo descrito anteriormente, es natural la posibilidad de que se generen eventos de marea roja durante la primavera y verano. Se sabe que estos eventos ocurrían ocasionalmente cada 5 a 7 años. Sin embargo, como en todo el mundo, el desarrollo de estos fenómenos se ha incrementado y, actualmente, es común que se presenten uno o varios eventos cada año. Se han reconocido tres grandes eventos de marea roja que ocurrieron en Yucatán en 2001, 2003 y 2008 (Arcos-Serrano & Matías-Ramírez 2003; Enriquez *et al.* 2010) y que han sido atribuidos directa o indirectamente a las actividades humanas que provocan la eutrofización de las aguas costeras (Hallegraeff 1992; Pitcher & Calder 2000; Aranda-Cirerol *et al.* 2010). Durante estos florecimientos se ha reportado la presencia de especies como *Nitzschia longissima* y *Cylindrotheca closterium*, cuyas abundancias se incrementan varios órdenes de magnitud en relación con los valores que se observan en condiciones normales. Si bien estas diatomeas no son tóxicas, provocan la mortandad de la fauna marina debido a la disminución de las concentraciones de oxígeno disuelto, que llegan a

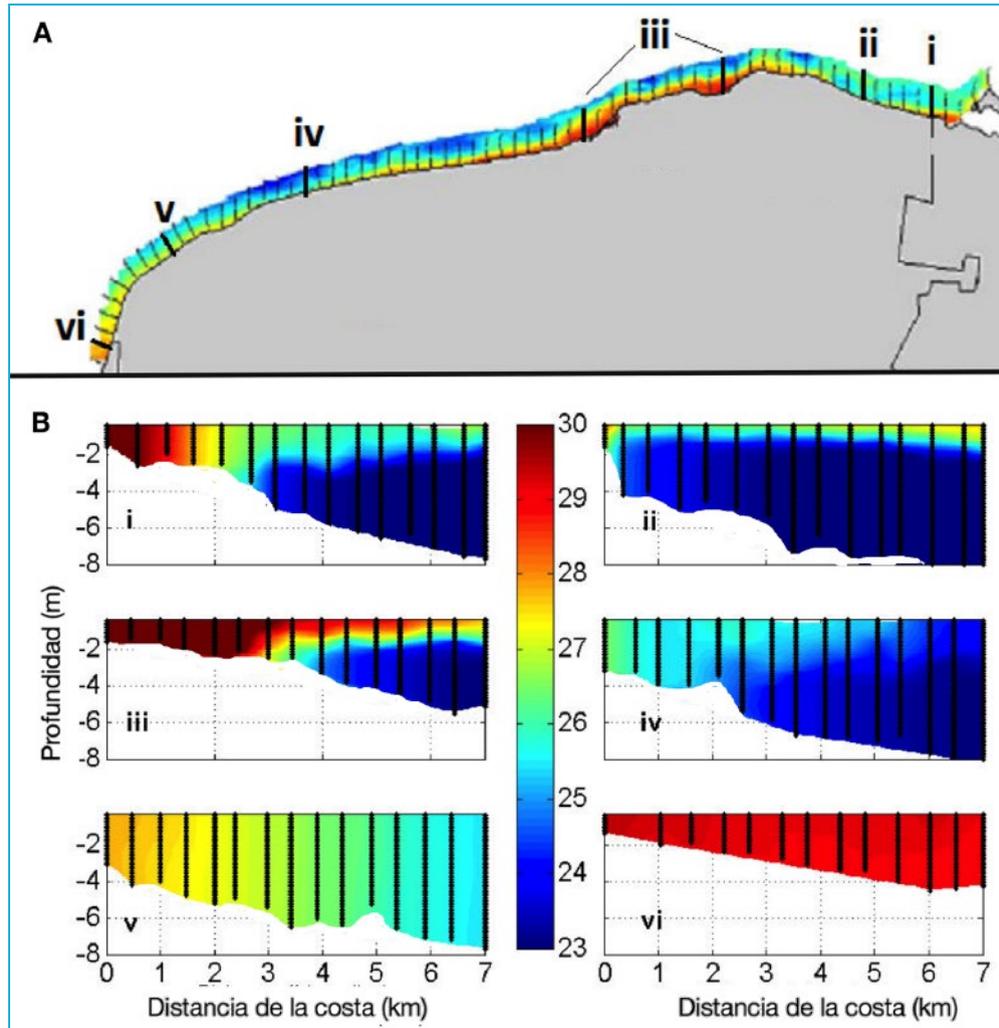


Figura 2. (A) Distribución de la temperatura superficial del mar durante julio del 2006 a lo largo de la costa de Yucatán. (B) Transectos de temperatura desde la costa hasta 10 km mar adentro correspondientes a los sitios indicados en el mapa.

niveles $\leq 1 \text{ mg.l}^{-1}$, como producto de la oxidación de grandes cantidades de materia orgánica que se degrada una vez que las algas mueren (Arcos-Serrano & Matías-Ramírez 2003). Asimismo, se ha reportado la presencia de *Pseudo-nitzschia delicatissima* y de dinoflagelados como *Karenia brevis*, *Gymnodinium catenatum* y *Heterosigma akashiwo*, que son especies conocidas por su potencial tóxico (Troccoli-Ghinaglia et al. 2004).

Si bien la geología kárstica de la Península de Yucatán limita la presencia de ríos superficiales, favorece en cambio la generación de fracturas y galerías a través de las cuales fluye uno de los acuíferos más importantes del país. En la región norte del litoral de la península se ha reconocido la presencia de importantes descargas submarinas de agua subterránea que emanan a través de fuentes tanto puntuales como difusas

(Herrera-Silveira *et al.* 2004 ; Valle-Levinson *et al.* 2011; Vera-Manrique *et al.* 2012). La mezcla genera una masa de agua reconocible por sus características físicas de temperatura, salinidad y altas concentraciones de nutrientes, que se propaga sobre la plataforma de Yucatán hasta el golfo de México.

La laguna de la Carbonera es una de varias lagunas costeras que se establecen detrás de una isla de barrera discontinua a lo largo de la costa norte de la Península de Yucatán que se encuentran rodeadas de vastas extensiones de manglares costeros. En estas lagunas someras, ocurren cambios drásticos en las condiciones hidrográficas en distintas escalas espaciales y temporales. Los efectos negativos que esta inestabilidad del ambiente podría tener sobre la biota se compensan, ya sea a nivel individual o poblacional, por el uso nictémero o estacional que hacen de estos hábitats varias especies para las cuales estas zonas tienen un gran valor, puesto que constituyen lugares propicios para la alimentación, el crecimiento o la reproducción. Además, las lagunas costeras sirven como sitios en los que varias especies se refugian cuando ocurren condiciones adversas en el mar costero adyacente, como cambios abruptos en temperatura, salinidad, o cuando disminuye la concentración de oxígeno disuelto (Hanekom *et al.* 1989; Whitfield 1995; Collard & Lugo-Fernández 1999; Ward *et al.* 2001). Dentro de este conjunto de situaciones adversas se encuentra la proliferación de algas nocivas y, en este capítulo, se muestra la capacidad de resiliencia de la laguna de la Carbonera.

Ecoutin *et al.* (2005) señalan que la extensión de la influencia marina en una laguna costera o estuario está relacionada con el tamaño de la boca y la duración de la conexión entre estos ambientes, misma que determina la

composición de especies. El intercambio entre las lagunas y el mar, aunado a las características de las descargas de agua del acuífero de la zona de Yucatán, crea una dinámica compleja en las propiedades termohalinas de los sistemas y esto tiene implicaciones en la estructura de las comunidades biológicas presentes (Wolanski 1992; Chiappa-Carrara *et al.* 2003; Jerónimo *et al.* 2012). Asimismo, existe una correspondencia estadística entre las características hidrológicas y la distribución de la materia orgánica en los sedimentos del sistema lagunar que puede ser asociada tanto a las fuentes de origen como a los procesos de transporte (Camarena-Fernández 2011).

Para mostrar que el carácter permanente de la boca de conexión con el mar juega un papel fundamental para que este sistema funcione como hábitat crítico y, en ciertas circunstancias, organismos que no se encuentran asociados con las condiciones estuarinas que predominan en este sistema encuentren protección ante las condiciones adversas que provocan las mareas rojas, se analizó el material biológico que proviene de los muestreos periódicos que se han realizado desde el año 2007 a la fecha. La capacidad de resiliencia ecológica del sistema, se resalta al analizar las variaciones en la composición específica mensual del ensamble de especies ícticas presentes en las cercanías de la boca de conexión de la laguna con el mar, en el periodo comprendido entre abril de 2008 y marzo de 2009. Los ejemplares de referencia están depositados en la Colección Ictiológica Regional de la UNAM, registrada con la clave YUC-PEC-239-01-11 ante la Semarnat (Gallardo-Torres *et al.* 2016). Además, este esfuerzo ha permitido generar inventarios detallados de la biodiversidad de algunos grupos taxonómicos presentes en la costa

norte de Yucatán (Badillo-Alemán *et al.* 2014; Gallardo-Torres *et al.* 2014).

La variación temporal de la riqueza de especies (S) se estudió calculando los coeficientes de Sørensen para obtener los valores de similitud con base en las presencias y ausencias de las especies ícticas registradas a lo largo de la serie de tiempo (Figura 3). Para comparar estadísticamente esta serie temporal se obtuvieron los índices mensuales de distinción taxonómica promedio (Δ^+) y de variación en la distinción taxonómica (Λ^+). A partir de las propiedades estadísticas de los valores de Δ^+ y Λ^+ mostradas por Clarke y Warwick (1998) fue posible calcular los promedios, varianzas y los intervalos de confianza ($IC_{95\%}$) de las estimaciones.

La progresión temporal de la serie, descrita detalladamente por Chiappa-Carrara *et al.* (2012), muestra que existen conjuntos de especies de peces que pueden ser definidos como

ensambles, característicos del cuerpo lagunar. Algunos están formados por especies que residen de forma permanente en el sistema y otros por aquellas especies cuya presencia ocurre en distintos momentos del año en concordancia con las principales épocas climáticas reconocidas en la región. En general, los valores de los índices Δ^+ y Λ^+ se encontraron dentro de los límites del intervalo de confianza ($IC_{95\%}$), mostrando así la regularidad en la composición de dichos ensambles (Figura 4). La excepción corresponde al muestreo de julio de 2008, durante el cual los valores obtenidos se encontraron por arriba de los límites de confianza calculados para la serie. Por lo tanto, los valores de Δ^+ y Λ^+ permiten distinguir taxonómicamente un nuevo ensamble de especies que se presentó durante el evento de marea roja, cuya composición difiere del que se presenta en la laguna el resto del año.

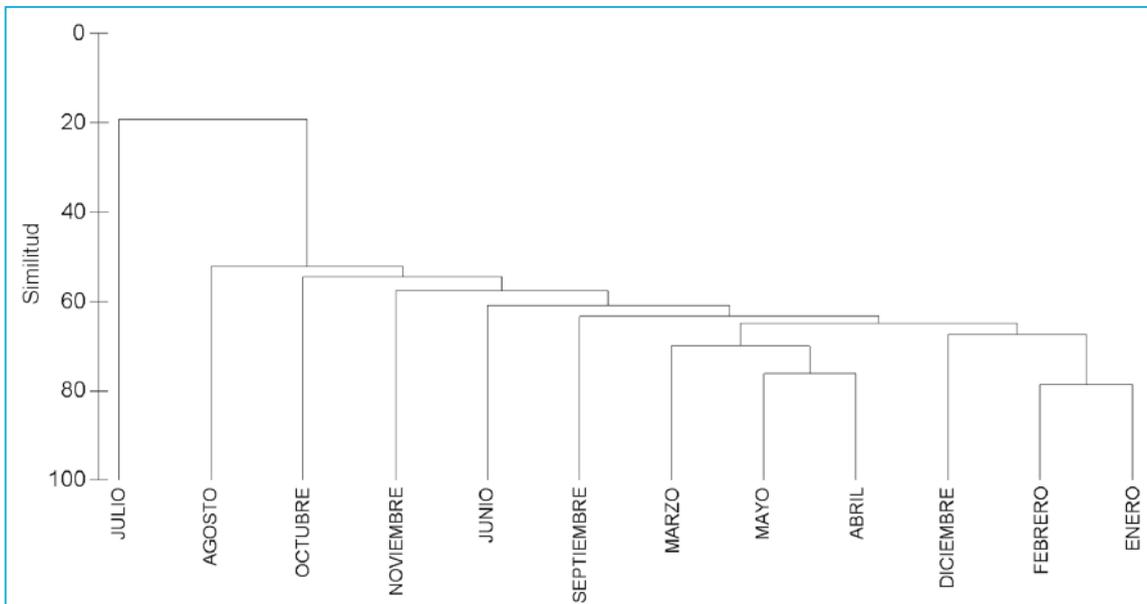


Figura 3. Valores del índice de similitud de Sørensen calculados a partir de la matriz taxonómica de presencia/ausencia mensual de las especies de peces capturadas en la laguna de la Carbonera, Yucatán.

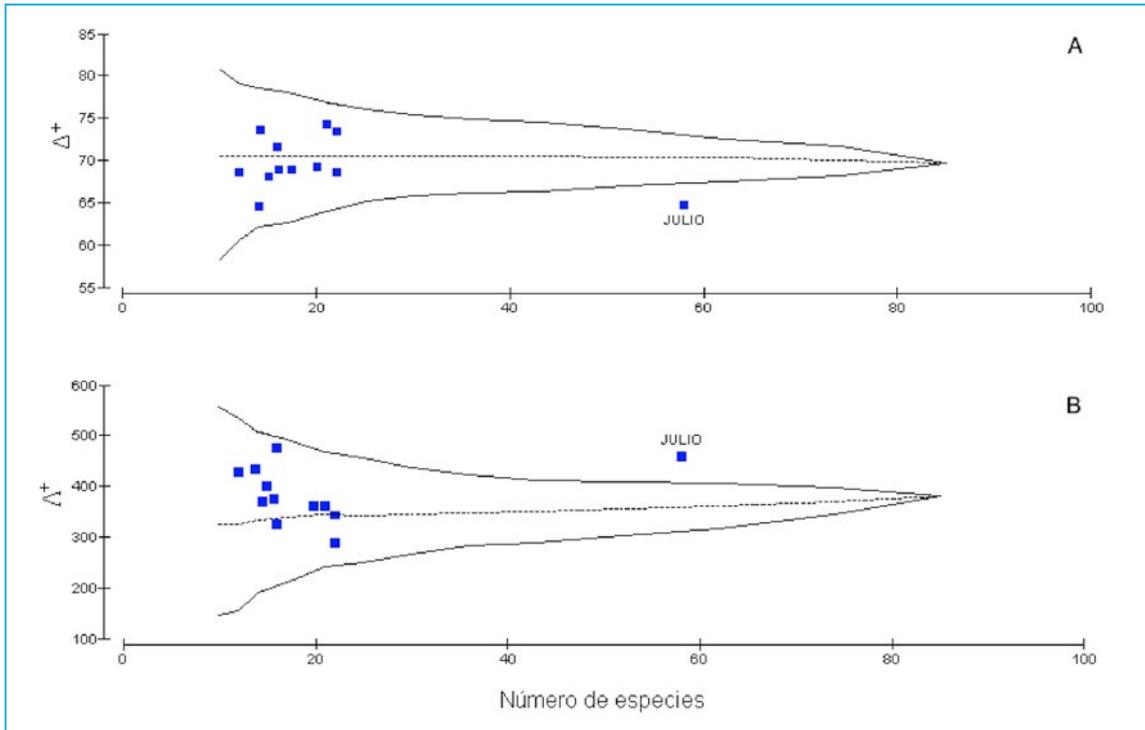


Figura 4. (A) Índice de distinción taxonómica promedio (Δ^+) y (B) variación en la distinción taxonómica (Λ^+) de las especies de peces capturadas en la laguna de la Carbonera, Yucatán. Las líneas (--) denotan los intervalos de confianza ($IC_{95\%}$) de las estimaciones.

El incremento en la riqueza de especies modificó la estructura y las funciones ecológicas del ensamble que suele encontrarse en aguas cercanas a la boca de conexión del sistema lagunar con el mar. En esta región del sistema lagunar, la salinidad y la temperatura no difieren significativamente de las condiciones que se presentan en la franja costera por lo que no existen restricciones fisiológicas para que las especies típicamente marinas puedan ocupar este hábitat. Sin embargo, durante el muestreo de julio 2008, se registró la presencia de un gran número de especies reconocidas como “arrecifales”. Es importante considerar que las formaciones rocosas más cercanas al área de estudio se encuentran a decenas de kilómetros del sistema lagunar de

la Carbonera (Jordán-Dahlgren & Rodríguez-Martínez 2003). Si bien el papel de los estuarios como hábitats en los que organismos estuarinos encuentran protección ante las condiciones adversas que provocan los florecimientos de algas tóxicas o nocivas ha sido descrito por Lamberth *et al.* (2010), nuestros resultados indican que la habilidad para encontrar refugio en un ambiente estuarino no se limita a las especies “estuarino-dependientes”.

Las observaciones sobre la distribución horizontal de los peces capturados en julio de 2008 permiten suponer que el ensamble formado por las especies residentes de la laguna (como *F. polymus*, *F. persimilis*, *S. timucu*, *M. colei* y *E. harengulus*), que son indicadoras del ambiente de

mezcla y tienen capacidades osmorreguladoras para distribuirse a lo largo de todo el gradiente, fue desplazado hacia la parte interna del sistema, zona en la que se presentan valores de salinidad más bajos que aquellos observados en la franja litoral marina, debidos a las condiciones de mezcla con el agua dulce proveniente de los manantiales presentes en la laguna.

Una vez que el evento de marea roja terminó, se restablecieron las condiciones típicas del ambiente costero y, a partir del mes de agosto, tanto el número y la composición de especies, así como las características del ensamble (S , Δ^+ y Λ^+) de los peces presentes en la boca de la laguna de la Carbonera, no presentaron diferencias significativas con respecto a los valores típicos, que caracterizan al sistema la mayor parte del año (Figuras 3 y 4).

La posición geográfica y la variedad de hábitats que posee el ambiente lagunar de la Carbonera hacen de éste un sitio que puede ser utilizado como refugio por un gran número de especies de la ictiofauna que habita en el litoral norte de la Península de Yucatán ante escenarios adversos que ocurren en el ambiente marino. La progresión temporal de los índices usados para describir la composición faunística de los peces que habitan el cuerpo lagunar permite inferir la capacidad de resiliencia del sistema. Es importante señalar que la resolución necesaria para registrar los cambios de estado del sistema se debe al programa de monitoreo ambiental de largo plazo que se ha implementado en el Laboratorio de Ecología de Zonas Costeras. Este programa ha mostrado ser una herramienta indispensable para evaluar las fluctuaciones de las funciones ecológicas del sistema ante perturbaciones ambientales como la derivada de las condiciones impuestas por el evento de marea roja.

La laguna de la Carbonera forma parte de la Reserva de Ciénagas y Manglares de Yucatán, cuyo decreto de creación se publicó en el Diario Oficial del Estado de Yucatán (2010) con el objetivo de proteger el ecosistema costero, dominado por extensiones de manglares en buen estado de conservación. El sistema se caracteriza por tener valores elevados de producción biológica que sostiene a una gran cantidad de consumidores enlazados por cadenas alimentarias complejas. Además de ser una zona de protección, crecimiento y desarrollo de peces, crustáceos y moluscos, reptiles, anfibios y pequeños mamíferos, esta laguna es utilizada como zona de alimentación y reproducción de aves migratorias y residentes. El éxito de anidación de algunas de estas especies, particularmente de aquellas que se alimentan de peces, está relacionado con la hidrología y con la disponibilidad de las presas, pues de estos factores depende el éxito de forrajeo (Frederick *et al.* 2009). Por lo tanto, la resiliencia del sistema para mantener la composición y abundancia de los ensambles de peces tiene repercusiones en otros componentes de las tramas tróficas.

Los resultados de algunos trabajos recientes (De Dios Arcos 2014) y otros en curso permiten inferir que las capturas que realizan los adultos de aves como *Phalacrocorax brasilianus*, *Egretta rufescens*, *Cochlearius cochlearius*, *Ardea alba* y *Platalea ajaja* para alimentar a sus crías es selectiva con respecto a las especies ícticas que deprendan y, en algunos casos, al sexo de los individuos consumidos para maximizar la calidad del alimento y así obtener los componentes alimentarios que satisfacen los requerimientos calóricos y nutricionales tanto de padres como de crías.

Considerando la información que se ha generado a través del programa de monitoreo, es

posible decir que el plan de manejo de la Reserva de Ciénagas y Manglares de Yucatán debe incluir a la laguna de la Carbonera como una zona núcleo que probó jugar un papel importante para minimizar algunos impactos ecológicos negativos, como son las mortalidades masivas que provocan los eventos de marea roja sobre la fauna del litoral yucateco. Además alberga a poblaciones de varias especies endémicas características de estos ecosistemas costeros y aporta individuos a los stocks pesqueros de la región.

REFERENCIAS

- Álvarez-Góngora C, Herrera-Silveira JA (2006) Variations of phytoplankton community structure related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. *Mar. Pollut. Bull.* 52: 48-60.
- Aranda-Cirerol N, Comín F, Herrera-Silveira J (2010) Nitrogen and phosphorus budgets for the Yucatán littoral: An approach for groundwater management. *Environ. Monit. Assess.* 172: 493-505.
- Arceo-Carranza D, Vega-Cendejas ME (2009) Spatial and temporal characterization of fish assemblages in a tropical coastal system influenced by freshwater inputs: northwestern Yucatan Peninsula. *Rev. Biol. Trop.* 57: 89-103.
- Arcos-Serrano ME, Matías-Ramírez LG (2003) Informe técnico del fenómeno de marea roja correspondiente a la visita realizada al estado de Yucatán del 12 al 14 de agosto de 2003. Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), Informe Técnico núm. DI/RQ-RH-08102003. 18 pp.
- Badillo-Alemán M, López F, Gallardo-Torres A, Chiappa-Carrara X (2014) Catálogo de Aves de la Costa Norte de Yucatán. Universidad Nacional Autónoma de México, 174 p. ISBN 978-607-9060-14-5
- Bonilla-Gómez JL, Badillo M, López K, Gallardo A, Galindo C, Arceo D, Chiappa-Carrara X (2013) Environmental influences on the abundance of dominant fishes in a very shallow tropical coastal lagoon in Northwestern Yucatan Peninsula, Mexico. *Marine Science Research and Development* 3(1): 2-12
<http://dx.doi.org/10.4172/2155-9910.1000118>
- Camarena Fernández M (2011) Estudio de la variación espacio-temporal de la composición de la materia orgánica, por medio de la especiación de esteroides en la Bocana en la Costa Norte de Yucatán. Tesis de maestría, UNAM
- Carbajal N (2009) Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. CQ063. México D. F.
- Chiappa-Carrara X, Sanvicente-Añorve L, Monreal-Gómez A, Salas de León D (2003) Ichthyoplankton distribution as an indicator of hydrodynamic conditions of a lagoon system in the Mexican Caribbean. *Journal of Plankton Research.* 25: 687-696.

- Chiappa-Carrara X, Gallardo A, Galindo De Santiago C, Loera-Pérez J, Rioja-Nieto R, Badillo M. (2012) Refugios estuarinos: cambios en la estructura de la comunidad de peces en la laguna de la Boca de la Carbonera durante un evento de marea roja. En Sánchez AJ, Chiappa-Carrara X, Brito Pérez R (eds) Recursos Acuáticos Costeros del Sureste. CONCIYTEY - UNAM, 1106 p. ISBN 978-607-9060-08-4
- Clarke KR, Warwick RM (1998) A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *Journal of Applied Ecology* 35: 523-531.
- Cochrane JD (1966) The Yucatan current, upwelling off Northeastern Yucatan, and currents and waters of Western Equatorial Atlantic. *Oceanography of the Gulf of Mexico*. Progress Report TAMU Ref. no. 66-23T, pp. 14-32.
- Collard SB, Lugo-Fernández A (1999) Coastal upwelling and mass mortalities of fishes and invertebrates in the Northeastern Gulf of Mexico during spring and summer 1998. OCS Study MMS 99-0049. U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA, USA, 20 pp. <http://www.gomr.mms.gov/PI/PDFImages/ESPIS/3/3207.pdf>
- De Dios Arcos C (2014) Ecología trófica de un gremio de aves acuáticas durante la temporada de reproducción en la costa de Yucatán. Tesis de maestría, UNAM
- Ecoutin JC, Jean-Marc RE, Simier M, Albaret JJ (2005). Spatial versus temporal patterns in fish assemblages of a tropical estuarine coastal lake: The Ebrie Lagoon (Ivory Coast). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64: 623-635.
- Enriquez C, Mariño-Tapia IJ, Herrera-Silveira JA (2010) Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Continental Shelf Research* 30: 127-137.
- Enriquez C, Mariño-Tapia I, Jerónimo G, Capurro-Filigrasso L (2013) Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research*. 69: 101-109 <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.08.018>.
- Frederick P, Gawlik DE, Ogden JC, Cook MI, Lusk M (2009) The White Ibis and Wood Stork as indicators for restoration of the Everglades ecosystem. *Ecological Indicators* 9S: S83-S95.
- Gallardo-Torres A, Badillo-Alemán M, Rivera Félix V, Rubio Molina J, Galindo De Santiago C, Loera-Pérez J, García-Galano T, Chiappa-Carrara X (2014) Catálogo de Peces de la Costa Norte de Yucatán. Universidad Nacional Autónoma de México - CONCIYTEY, Segunda Edición, 265 p. ISBN 978-607-9060-15-2
- Gallardo-Torres A, Badillo-Alemán M, Gutiérrez-Oliva H, Chiappa-Carrara X (2016) La colección ictiológica regional de referencia (CIRR) de la UMDI-Sisal. En Del Moral-Flores LF, Ramírez-Villalobos AJ, Martínez-Pérez JA, González-Acosta AF (eds). Colecciones Ictiológicas de Latinoamérica. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México & Sociedad Mexicana de Ictiología, México, pp 430-442. ISBN 978-607-02-8066-5
- Hallegraef GM (1992) Harmful algal blooms in the Australian region. *Marine Pollution Bulletin* 25: 186-190.
- Hanekom N, Hutchings L, Joubert PA, Van der Byl PCN (1989) Sea temperature variations in the Tsitsikamma Coastal National Park, South Africa, with notes on the effect of cold conditions on some fish populations. *South African Journal of Marine Science* 8: 145-153.
- Herrera-Silveira JA, Comin FA, Aranda-Cirerol N, Troccoli L, Capurro L (2004) Coastal water quality assessment in the Yucatan Peninsula: management implications. *Ocean and Coastal Management* 47: 625-639.
- Jerónimo G, Gómez-Valdés J, Badillo M, López-Aguilar K, Galindo De Santiago C, Gallardo A, Loera-Pérez, Arroyo-Pedraza L, Chiappa-Carrara X (2012) Variación estacional de temperatura y salinidad en la Boca de la Carbonera, Yucatán, 2009-2010. En Sánchez AJ, Chiappa-Carrara X, Brito Pérez R (eds) Recursos Acuáticos Costeros del Sureste. CONCIYTEY - UNAM, 1106 p. ISBN 978-607-9060-08-4
- Jordán-Dahlgren E, Rodríguez-Martínez RE (2003) The Atlantic Coral Reefs of México. In: Cortés J (ed) *Latin American Coral Reefs*. pp. 131-158, Elsevier.
- Lamberth SJ, Branch GM, Clark BM (2010) Estuarine refugia and fish responses to a large anoxic, hydrogen sulphide, "black tide" event in the adjacent marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 86: 203-215.
- Margalef R (1968) *Perspectives in Ecological Theory*. Univ. of Chicago Press, Illinois
- Marín-Coria E, Enriquez C (2016). Variaciones de temperatura y salinidad en el sistema lagunar La Carbonera, Yucatán, México. *Revista digital E-BIOS*. 4, año 6 núm. 11. ISSN: 2007-5782
- Merino M (1992) Afloramiento en la plataforma de Yucatán. Estructura y fertilización. Tesis doctoral, UNAM.

- Merino M (1997) Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems* 13: 101-121.
- O'Carroll K (1987) Bacteria-red tide link. *Marine Pollution Bulletin* 18: 148.
- Pitcher GC, Calder D (2000) Harmful algal blooms of the southern Benguela current: a review and appraisal of monitoring from 1989 to 1997. *South African Journal of Marine Science* 22: 255-271.
- Reyes-Mendoza, O., Mariño-Tapia, I., Herrera-Silveira, J., Ruiz-Martínez, G., Enriquez, C., Largier, J.L. The Effects of Wind on Upwelling off Cabo Catoche (2016) *Journal of Coastal Research*, 32 (3), pp. 638-650. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-15-00043.1
- Ruiz-Renteria F (1979) Upwelling North of the Yucatan Peninsula. Tesis de maestría, Texas A&M University.
- Sahl LE, Wiesenburg DA, Merrell WJ, (1997) Interactions of mesoscale features with Texas shelf and slope waters. *Continental Shelf Research* 17: 117-136.
- Troccoli-Ghinaglia L, Herrera-Silveira JA, Comín FA (2004) Structural variations of phytoplankton in the coastal seas of Yucatan, Mexico. *Hydrobiologia* 519: 85-102.
- Valle-Levinson A, Marino-Tapia I, Enriquez C, Waterhouse AF (2011) Tidal variability of salinity and velocity fields related to intense point-source submarine groundwater discharges into the coastal ocean. *Limnology and Oceanography* 56: 1213-1224.
- Vega-Cendejas ME (2004) Ictiofauna de la Reserva de la Biosfera Celestún, Yucatán: una contribución al conocimiento de su biodiversidad. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Zoología* 75: 193-206.
- Vega-Cendejas ME, Hernández de Santillana M (2004) Fish community structure and dynamics in a coastal hypersaline lagoon: Rio Lagartos, Yucatan, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 60: 285-299.
- Vera-Manrique, I., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., 2012. Effects of drought and subtidal sea level variability on salt intrusion in a coastal karst aquifer. *Marine and Freshwater Research* (MF11270).
- Ward TM, Hoedt F, McLeay L, Dimmlich WF, Kinloch M, Jackson G, McGarvey R, Rogers PJ, Jones K (2001) Effects of the 1995 and 1998 mass mortality events on the spawning biomass of sardine, *Sardinops sagax*, in South Australian waters. *ICES Journal of Marine Science* 58: 865-875.
- Whitfield AK (1995) Mass mortalities of fish in South African estuaries. *Southern African Journal of Aquatic Sciences* 21: 29-34.
- Wolanski E (1992) Hydrodynamics of mangrove swamps and their coastal waters. *Hydrobiologia* 247: 141-16.



Laboratorio Nacional
de Resiliencia Costera



www.lanresc.mx



Laboratorio Nacional
de Resiliencia Costera