

## ESTRUCTURA Y SECUESTRO DE CARBONO EN MANGLARES URBANOS, FUNDAMENTOS PARA SU CONSERVACIÓN EN ISLA DEL CARMEN, CAMPECHE, MÉXICO

## STRUCTURE AND CARBON SEQUESTRATION IN URBAN MANGROVES, FUNDAMENTALS FOR CONSERVATION IN ISLA DEL CARMEN CAMPECHE, MEXICO

 JOSÉ HERNÁNDEZ-NAVA<sup>1\*</sup>,  ALINA EUGENIA PASCUAL-BARRERA<sup>1</sup>,  
 ARTURO ZALDÍVAR-JIMÉNEZ<sup>2</sup>,  ROSELA PÉREZ-CEBALLOS<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Internacional Iberoamericana de México, Campeche, México.

<sup>2</sup> ATEC Asesoría Técnica y Estudios Costeros S.C.P., Mérida, Yucatán, México.

<sup>3</sup> Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Estación El Carmen, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

<sup>4</sup> Investigadora por México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Ciudad de México, México.

\*Autor de correspondencia: [jhernandez60@yahoo.com](mailto:jhernandez60@yahoo.com)

### Resumen:

**Antecedentes:** En la península de Yucatán, algunas zonas del manglar han sido rellenadas con escombros y basura, donde posteriormente se establecieron zonas habitacionales.

**Preguntas:** ¿Puede usarse el conocimiento de la estructura forestal y el almacén de carbono para establecer la línea base para la conservación de los manglares urbanos?

**Especies de estudio:** *Rhizophora mangle* L., *Laguncularia racemosa* Gaertn f., *Avicennia germinans* L. y *Conocarpus erectus* L.

**Sitio y años de estudio:** Isla del Carmen, Campeche, año 2017.

**Métodos:** Se establecieron unidades de muestreo para evaluar la vegetación y medir el carbono aéreo y subterráneo en dos zonas de manglar, la primera fue rellenada con escombros y otra sin cambios del suelo.

**Resultados:** La zona rellenada con escombros presentó un área basal de 25.4 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, donde *A. germinans* fue la especie dominante con 675 árboles ha<sup>-1</sup>, con promedios de 5.5 m en altura y 13.4 cm de diámetro. La otra zona sin cambios del suelo presentó un área basal de 27.8 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, siendo también *A. germinans* la especie más abundante con 731 árboles ha<sup>-1</sup>, pero su altura fue más baja (5.0 m) y su diámetro a la altura del pecho mayor (15.2 cm) que en la otra zona. El carbono total almacenado en la segunda zona (383 Mg C ha<sup>-1</sup>) fue mayor que en la primera (321 Mg C ha<sup>-1</sup>).

**Conclusiones:** El valor ecológico de la vegetación y la captura de carbono contribuye en el fortalecimiento de medidas de conservación y protección del manglar ante las invasiones urbanas.

**Palabras clave:** Desarrollo urbano, estructura forestal, carbono azul, Laguna de Términos.

### Abstract:

**Background:** In the Yucatan Peninsula, some mangrove areas were filled with rubble and residential areas were latter developed.

**Questions:** Can the knowledge of the forest structure and carbon storage be used to establish a baseline for urban mangrove conservation?

**Study species:** *Rhizophora mangle* L., *Laguncularia racemosa* Gaertn f., *Avicennia germinans* L. y *Conocarpus erectus* L.

**Location and study year:** Isla del Carmen, Campeche, 2017.

### Methods:

Sampling units were established for assessing vegetation structure and measuring above-ground and below-ground carbon stock in two mangrove zone; the first one was filled with rubble and the second without land use changes.

**Results:** The site filled with rubble had a basal area of 25.4 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, where *A. germinans* was the dominant species with stand density of 675 trees ha<sup>-1</sup>, with average height of 5.5 m and average diameter at breast height of 13.4 ± 1.6 cm. The site without land use changes had a basal area of 27.8 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> and *A. germinans* was also the most abundant species with 731 trees ha<sup>-1</sup>, but individuals were smaller (5.0 m tall) and with greater diameter at breast height (15.2 cm), as compared with the other site. The estimated total carbon stored in the second site (383 Mg C ha<sup>-1</sup>) was higher than in the first one (321 Mg C ha<sup>-1</sup>).

**Conclusions:** The ecological value of carbon sequestration and forest structure contributed to strengthening the conservation and protection measures against invasions of urban mangroves.

**Key Words:** urban development, forest structure, blue carbon, Laguna de Terminos.

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution License CCBY-NC (4.0) internacional.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Los manglares son un humedal costero con vegetación adaptada a desarrollarse en suelos inundados, salados y anóxicos (Kathiresan & Bingham 2001). Son uno de los ecosistemas más productivos e importantes por los bienes y servicios ecosistémicos que proveen a las comunidades costeras (Barbier 2000), como la regulación (control de inundaciones, tormentas y erosión, prevención de la intrusión de agua salada) y hábitat para la biodiversidad. Además, brindan servicio de aprovisionamiento (madera, leña y carbón vegetal) y culturales (recreación, estética, y no uso) (Barbier 2016).

Los manglares están condicionados principalmente por el hidropériodo (la frecuencia, el nivel y la duración de las inundaciones), por la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Twilley & Rivera-Monroy 2005) y por las variaciones de salinidad, temperatura, potencial de óxido-reducción y concentración de sulfuro, que actúan como reguladores del crecimiento (Lewis *et al.* 2015). Por otra parte, se reconoce que los manglares almacenan más carbono que otros ecosistemas, principalmente en el suelo. Se han registrado valores promedio entre 241 Mg C ha<sup>-1</sup> en los bosques tropicales y 408 Mg C ha<sup>-1</sup> en pantanos de turba (Alongi 2014). Sin embargo, no todos los manglares almacenan carbono de igual forma. Los manglares estuarinos presentan un almacén de carbono superior a 1,074 Mg C ha<sup>-1</sup> (Donato *et al.* 2012), en contraste con los sistemas cársticos que almacenan 663 Mg C ha<sup>-1</sup> (Kauffman *et al.* 2013). En México se ha estimado un valor promedio general de 434 Mg C ha<sup>-1</sup> para los almacenes de carbono, donde los manglares del Golfo de México almacenan 244 Mg C ha<sup>-1</sup> y los de la Península de Yucatán hasta 353 Mg C ha<sup>-1</sup> (Herrera-Silveira *et al.* 2020).

Actualmente los manglares están siendo amenazados por la acelerada urbanización, dando como resultado la fragmentación, la degradación y la pérdida de estos ecosistemas (Naylor *et al.* 2021). La pérdida de manglares en áreas urbanas hace más vulnerable a las ciudades costeras al aumento del nivel del mar y las tormentas tropicales, así como la pérdida de playas por erosión y la drástica reducción de los recursos pesqueros que sustentan a una parte importante de la población (Baltz & Yáñez-Arancibia 2013). En México se pueden localizar manglares urbanos en las principales ciudades costeras del Golfo de México, el Caribe y el Pacífico (Yáñez-Arancibia *et al.* 2014, Kumagai *et al.* 2020).

En el Golfo de México, se localiza el Área de Protección de Flora y Fauna de Laguna de Términos (APFFLT), que contiene 107,880 ha de manglar que es de los más representativos del Golfo de México y el Caribe. Dentro del APFFLT se localiza Isla del Carmen, donde se distribuyen 5,600 ha de manglar, de las cuales el 45 % tiene algún grado de degradación ocasionado por factores naturales (frentes polares, tormentas tropicales y huracanes) y antrópicos, específicamente por el aumento del crecimiento urbano (Pérez-Ceballos *et al.* 2010).

Isla del Carmen, es la región insular más poblada de México. Se ubica en la región adyacente a la Sonda de Campeche, donde se extrae la mayor parte del petróleo del país y en la que se encuentra Ciudad del Carmen. Habitan 184,300 personas, lo que corresponde a una alta densidad en la población, llevando a un desarrollo urbano descontrolado (Martínez-Beberaje *et al.* 2019). La industrialización de la Isla del Carmen por el petróleo ha generado la formación de asentamientos humanos informales en diferentes áreas, principalmente dentro o colindantes con remanentes de manglar, los cuales han sido definidos como humedales urbanos (Zedler & Leach 1998). El proceso para invadir los manglares en Ciudad del Carmen ha sido deforestar, rellenar con basura y escombros (piedra y tierra) para después instalar una vivienda rústica (con techo de lámina, piso de tierra y sin servicios), con la esperanza de que luego se regularice su posesión y se provean servicios de alumbrado, pavimentación y agua potable, entre otros.

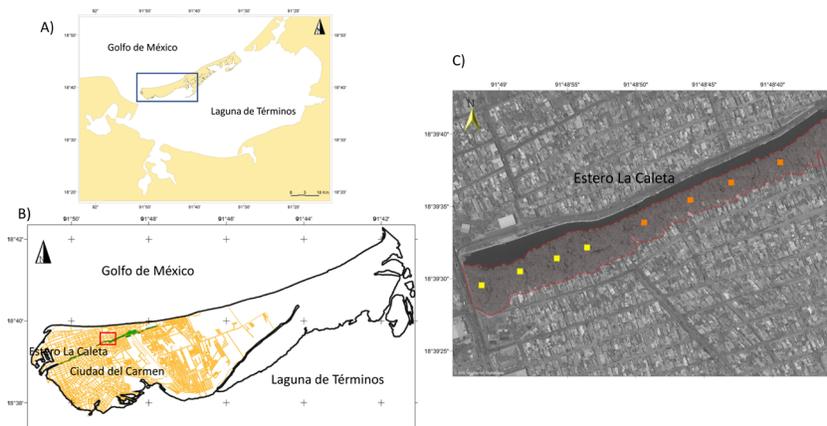
Este incremento de la urbanización informal en áreas de manglar es una de las principales causas de la pérdida de cobertura de este ecosistema en Isla del Carmen. Además, los habitantes que se establecen en estas áreas de manglar se vuelven más vulnerables a embates meteorológicos, poniendo en riesgo su vida (Escudero *et al.* 2014). La urbanización de la costa tiene consecuencias en la degradación del paisaje, la alteración de procesos naturales de flujos de nutrientes y energía, la degradación de hábitats y la pérdida de biodiversidad, cuyas consecuencias alteran funciones ecosistémicas que se asocian a conflictos ambientales y sociales (Sekovski *et al.* 2011). Una estrategia para la conservación de los manglares urbanos consiste en la adaptación basada en ecosistemas, la cual es definida como “la utilización de la biodiversidad y los servicios del ecosistema, como parte de una estrategia más amplia de adaptación, para ayudar a las poblaciones humanas a contrarrestar los efectos adversos del cambio climático” (Lhumeau & Cordero 2012).

Dentro de Ciudad del Carmen se localiza el Estero La Caleta, donde los manglares representan uno de los últimos relictos de este ecosistema en la zona urbana. Estos manglares urbanos han estado sometidos a una intensa presión por la tala clandestina y relleno para el establecimiento de viviendas (Villalobos-Zapata *et al.* 1999). El deterioro de los manglares está provocando la pérdida de los beneficios ambientales para la ciudad, poniéndola en una situación de riesgo y alta vulnerabilidad a la contaminación (Celis-Hernandez *et al.* 2020). Sin embargo, aún se pueden encontrar pequeñas zonas que no presentan afectaciones.

Para lograr que las comunidades locales valoren el recurso del manglar y apoyen activamente su conservación, es necesario aplicar vigilancia y la normatividad correspondiente. Asimismo, se requiere promover el conocimiento de los bienes y servicios que los manglares brindan a las poblaciones locales. Por otra parte, los manglares forman parte de los objetos de conservación en el programa de cambio climático del APFFLT; por lo que, conservar y mantener saludables los manglares es una prioridad para la adaptación y mitigación ante el cambio climático (CONANP & PNUD 2020). Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue contrastar el almacén de carbono aéreo y subterráneo del humedal urbano La Caleta en dos zonas con diferente grado de impacto mediante la modificación del suelo. En una zona se encontró evidencias de relleno de escombros y basura, mientras que en la otra no se registró modificación del suelo. Sobre esta base, se propone que el almacén de carbono puede ser una herramienta para destacar la importancia ecológica de los manglares y, con ello, establecer la línea de base para su conservación.

## Materiales y Métodos

**Área de estudio.** Es un manglar urbano, llamado el Estero La Caleta, se ubica dentro de Cd. del Carmen, Campeche, hacia el norte-noroeste de la Isla del Carmen (Figura 1). Se localiza entre las coordenadas 18° 39' 29.10" N, 91° 49' 2.00" W y 18° 39' 39.45" N, 91° 48' 36.92" W.



**Figura 1.** A) Localización de la Cd. del Carmen dentro del sistema de Laguna de Términos (polígono azul), B) Ubicación del Estero La Caleta en Cd. del Carmen, C) Delimitación del área de manglar en estudio (polígono en color rojo), los cuadros en color amarillo representan los sitios de muestreo en la zona 1 y los de color naranja los sitios de la zona 2.

El Estero La Caleta es un cuerpo de agua natural paralelo a la línea de costa, con una longitud total de 7.5 km y ancho variable entre 70 y 3 m. Su profundidad promedio es de 1.5 m. Colinda con 21 áreas urbanas, algunas de ellas formadas como asentamientos irregulares (IMPLAN 2009). Presenta diversos aportes de agua de escurrimientos dulceacuícolas de la isla, provenientes de zonas urbanas y drenaje pluvial. Por otra parte, recibe un aporte de agua marina que ingresa por mareas diurnas y semidiurnas a la Laguna de Términos a través de la boca del Carmen (IMPLAN 2012). Las mareas tienen un intervalo medio de 0.4 a 0.7 m. El clima es húmedo y tropical, con precipitación media anual de 1,100-2,000 mm y temperatura media entre 17 y 35 °C (Ruiz-Marín *et al.* 2014).

La vegetación dominante en la Isla del Carmen es manglar, con árboles entre 5 y 10 m de altura, de tipo cuenca y franja considerando la topografía y la inundación (Lugo & Snedaker 1974). La densidad de árboles reportada para los

manglares de la Laguna de Términos es 1,670 árboles  $\text{ha}^{-1}$  en manglares de cuenca y 3,095 árboles  $\text{ha}^{-1}$  en manglares de franja (Coronado-Molina *et al.* 2012). El Estero La Caleta forma parte de un ecosistema de manglar con presencia de *Rhizophora mangle* L. (mangle rojo), *Avicennia germinans* L. (mangle negro), *Laguncularia racemosa* Gaertn f. (mangle blanco) y *Conocarpus erectus* L. (mangle botoncillo). Otras especies de la flora asociada son *Coccoloba uvifera* L. (uva de playa) y *Sabal mexicana* Mart. (palma de guano), y especies exóticas como *Cocos nucifera* L. (coco) y *Terminalia catappa* L. (almendro). También hay frutales introducidos, como plátano y variedades de mango. La fauna asociada al manglar de La Caleta contiene varias especies enlistadas en alguna categoría de riesgo en la NOM-059 (SEMARNAT 2010), como *Ardea herodias* L. (garza azul), *Crocodylus moreletti* Duméril y Bibron (cocodrilo de pantano), *Iguana iguanas* (iguana verde) y *Boa constrictor* L. (boa). El Estero La Caleta se ha convertido en un manglar relicto afectado por la presión que genera la zona urbana de Ciudad del Carmen.

*Estructura forestal.* Para la determinación de la composición y estructura forestal se establecieron dos zonas de acuerdo con la presencia de material de relleno en el suelo, como piedras y escombros. En una zona no se encontró evidencia de relleno, mientras que en la otra se evidenció el relleno y la modificación del terreno. El área total del manglar estudiado fue de 6.7 ha. En cada zona, cuatro sitios de manglar fueron establecidos (Figura 1) y dentro de cada uno se establecieron tres unidades de muestreo de  $10 \times 10$  m ( $100 \text{ m}^2$ ) distribuidas en forma perpendicular a la línea de costa, dando un total de 24 unidades ( $2,400 \text{ m}^2$ ) para ambas zonas. Los muestreos fueron realizados en los meses de julio y agosto del año 2017.

Los datos de vegetación y estructura del manglar fueron la especie y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de todos los árboles, siempre que  $\text{DAP} \geq 2.5$  cm (Cottam & Curtis 1956, Cintrón & Novelli 1984). Para la especie *R. mangle* el DAP se midió a 0.30 m desde la última raíz aérea. También se registró la altura máxima de los árboles (m). En cada unidad se calculó la densidad (árbol  $\text{ha}^{-1}$ ), el área basal ( $\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) y el valor de importancia (Cintrón & Novelli 1984, Dahdouh-Guebas & Koedam 2006). El promedio y el error estándar para todas las variables de la estructura forestal fueron calculados por sitio y, posteriormente, por zona. Se realizaron gráficas de frecuencia de tallas del DAP (cm) para cada zona de manglar.

*Estimación del almacén de carbono aéreo.* La cuantificación del carbono de los árboles vivos se determinó mediante la estimación de la biomasa (en kg) de cada árbol a partir de la ecuación de Day *et al.* (1987) para las especies *R. mangle*, *A. germinans* y *L. racemosa* para los manglares de Laguna de Términos (tabla 1). Para el caso de *C. erectus* se utilizó la ecuación  $Y = 10,097.06 \times (\text{DAP}/100)^{2.33}$  propuesta por Abohassan *et al.* (2010), que también estima la biomasa (Y, en kg) en función del diámetro a la altura de pecho (DAP, en cm). La biomasa estimada de cada árbol se multiplicó por un factor de 0.46 y, posteriormente, se sumó el carbono de cada árbol dentro de cada parcela ( $\text{m}^2$ ) para determinar el contenido de carbono total aéreo. Los valores están reportados en  $\text{Mg C ha}^{-1}$  (Kauffman & Donato 2012, Howard *et al.* 2014).

*Estimación del carbono en el suelo.* Las muestras de sedimento se colectaron con un nucleador semicircular de acero inoxidable de 6.3 cm de diámetro y 100 cm de largo. Dos núcleos de suelo fueron colectados en cada sitio (16 núcleos en total) hasta una profundidad de un metro. Cada núcleo fue separado en segmentos de 0-15, 15-30, 30-50 y 50-100 cm. Las variables que se determinaron para cada segmento fue la densidad aparente, materia orgánica y carbono orgánico.

La densidad aparente se calculó mediante el método propuesto por Chen & Twilley (1999), donde las muestras se colocaron en una estufa a  $70^\circ\text{C}$  para su secado hasta alcanzar un peso constante (aproximadamente 72 horas). Las muestras secas se pesaron en una balanza y se calculó la densidad aparente dividiendo el peso seco entre el volumen de la muestra.

La materia orgánica (MO) se determinó por el método de ignición (Ouyang & Lee 2020). Las muestras fueron molidas y se colocaron en una estufa a  $70^\circ\text{C}$  durante 1 hora para eliminar la humedad y adquirir un peso constante. Una alícuota de 0.5 gr de muestra fue colocada en la mufla para calcinarla a  $550^\circ\text{C}$  durante 4 horas, provocando la oxidación de la materia orgánica, emitiendo  $\text{CO}_2$  y ceniza (Heiri *et al.* 2001). El porcentaje de MO se calculó mediante la diferencia de pesos antes y después de la calcinación.

La determinación del porcentaje de carbono orgánico del suelo se calculó utilizando la ecuación  $\text{Corg (\%)} = (0.415 \times \text{MO}) + 2.89$  (Kauffman *et al.* 2011, Ouyang & Lee 2020). El carbono total del suelo fue determinado mediante la suma del carbono orgánico encontrado en cada segmento de cada núcleo (Kauffman *et al.* 2013, Howard *et al.* 2014).

## Resultados

**Caracterización de la vegetación.** La zona sin evidencia de relleno en el suelo presentó un área basal de  $25.4 \pm 5.6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ . La especie de mangle *A. germinans* fue la que tuvo mayor densidad, con una media de  $675 \pm 142 \text{ árboles ha}^{-1}$  y altura promedio de  $5.5 \pm 0.7 \text{ m}$ , mientras que el DAP promedio fue de  $13.4 \pm 1.6 \text{ cm}$ . Por otra parte, en la zona donde el suelo fue rellenado presentó mayor desarrollo de la estructura de la vegetación, con un total de área basal de  $27.8 \pm 4.6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ . En esta zona, la especie que tuvo mayor densidad de individuos también fue *A. germinans*, con una media de  $731 \pm 132 \text{ árboles ha}^{-1}$ , los que tenían una altura promedio de  $5.0 \pm 0.3 \text{ m}$  y un DAP promedio de  $15.2 \pm 1.2 \text{ cm}$  (Tabla 2).

La distribución de las tallas se presentó en relación con el DAP (Figura 2). En la zona 1, el mayor número de individuos presentó una talla de 10-15 cm de DAP con  $400 \pm 84 \text{ árboles ha}^{-1}$ , y un menor número de individuos mayor a 20 cm en DAP y con  $278 \pm 64 \text{ árboles ha}^{-1}$ . En cuanto a la distribución de tallas, en la zona donde el suelo fue rellenado se presentó el mayor número de individuos con talla mayor 20 cm de DAP y densidad de  $400 \pm 100 \text{ árboles ha}^{-1}$ , en contraste con la talla menor de 5 cm y con densidad de  $180 \pm 37 \text{ árboles ha}^{-1}$ .

**Tabla 1.** Coeficientes de regresión para estimar la biomasa arbórea de cada especie de manglar. La ecuación  $Y = A + B \log_e X$  para la estimación de la biomasa (Y, en kg) de cada árbol según la especie se registró el diámetro a la altura de pecho (X, DAP en cm), donde A y B son constantes (Day *et al.* 1987).

Especie	A	B
<i>Avicennia germinans</i>	-1.5852	2.3023
<i>Laguncularia racemosa</i>	-1.5919	2.1924
<i>Rhizophora mangle</i>	-1.5605	2.5072

**Tabla 2.** Variables de la estructura forestal por cada zona. Las especies registradas fueron:

Zona	Especie	DAP (cm)	Altura (m)	Densidad (árboles ha <sup>-1</sup> )	Área Basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Valor de importancia
<b>Zona 1</b>	<b>Ag</b>	$13.4 \pm 1.6$	$5.5 \pm 0.7$	$675 \pm 142$	$9.9 \pm 1.9$	$44.1 \pm 4.8$
	<b>Lr</b>	$13.8 \pm 0.3$	$6.1 \pm 0.4$	$525 \pm 51$	$9.4 \pm 1.7$	$39.1 \pm 1.6$
	<b>Rm</b>	$19 \pm 7.1$	$8.2 \pm 0.4$	$233 \pm 88$	$8.1 \pm 3.1$	$20.7 \pm 4.7$
	<b>Ce</b>	$7 \pm 1.1$	$5.0 \pm 0.2$	$100 \pm 10$	$0.4 \pm 0.1$	$5 \pm 1.0$
	<b>Total</b>	$14.4 \pm 1.9$	$6.3 \pm 0.5$	$1400 \pm 162$	$25.4 \pm 5.6$	
<b>Zona 2</b>	<b>Ag</b>	$15.2 \pm 1.2$	$5.0 \pm 0.3$	$731 \pm 132$	$18.3 \pm 4.3$	$62.8 \pm 7.1$
	<b>Lr</b>	$13.2 \pm 0.7$	$4.3 \pm 0.7$	$350 \pm 50$	$5.6 \pm 1.0$	$28.3 \pm 5.2$
	<b>Rm</b>	$9.5 \pm 0.4$	$3 \pm 0.2$	$100 \pm 5$	$0.7 \pm 0.2$	$10 \pm 1.4$
	<b>Ce</b>	$19.1 \pm 1.7$	$6.2 \pm 0.6$	$288 \pm 37$	$10.4 \pm 2.0$	$27.0 \pm 6.0$
	<b>Total</b>	$12.1 \pm 3.6$	$4.9 \pm 0.3$	$1162 \pm 147$	$27.8 \pm 4.6$	

*Avicennia germinans* (Ag), *Conocarpus erectus* (Ce), *Laguncularia racemosa* (Lr) y *Rhizophora mangle* (Rm). Los datos indican el promedio  $\pm$  error estándar para cada especie. En el caso de la fila total representa el promedio de cada zona.

*Caracterización del suelo.* La densidad aparente del suelo fue estadísticamente significativa entre zonas. La mayor densidad se registró en la zona donde el suelo fue rellenado con  $0.64 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$  con respecto a la zona sin evidencias de alteración del suelo con  $0.31 \pm 0.05 \text{ g cm}^{-3}$  ( $P = 0.0001$ ). La densidad aparente en el suelo del manglar en esta última zona fue menor en la profundidad de 0-15 cm, con una media de  $0.10 \text{ g cm}^{-3}$ , y mayor en la profundidad de 50-100 cm, con  $0.51 \text{ g cm}^{-3}$ . En contraste, en la zona donde el suelo fue rellenado, la densidad aparente fue menor en la profundidad de 50-100 cm, con una media de  $0.57 \text{ g cm}^{-3}$ , y mayor en la profundidad de 30-50 cm, con  $0.70 \text{ g cm}^{-3}$  (Figura 3, 1A-1B).

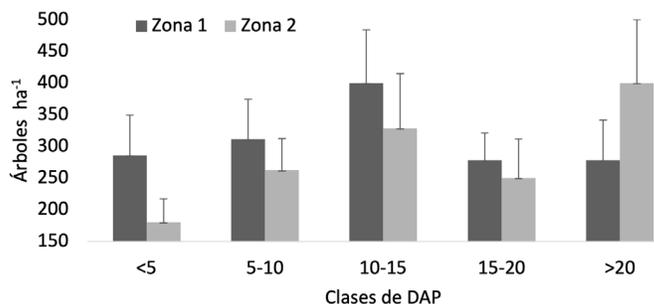


Figura 2. Distribución de las clases de DAP de los árboles en cada una de las zonas de manglar. Se presenta la media y el error estándar.

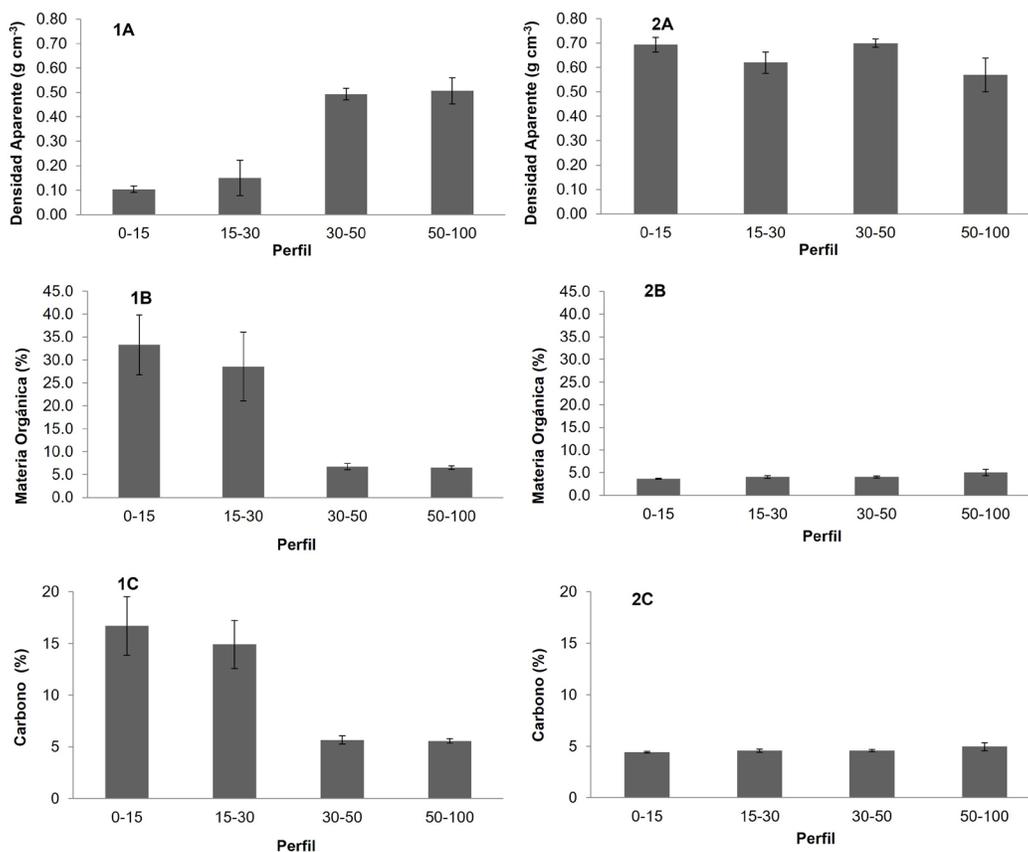


Figura 3. Densidad aparente (1A-1B), materia orgánica (2A-2B) y carbono del suelo (1C-2C) por cada profundidad y zonas de manglar. Se presenta la media y el error estándar. El número identifica la zona: 1 es la zona 1 y 2 es la zona 2; y las letras identifican a las variables.

La MO fue estadísticamente significativa entre zonas (Figura 3, 1B-2B). La mayor cantidad de MO se presentó en la zona sin evidencias de alteración del suelo, con  $18.8 \pm 5.22$  % ( $P = 0.01$ ), respecto a la zona donde el suelo fue rellenado, con  $4.21 \pm 0.21$  % (Tabla 3). Por otra parte, la MO en la primera zona fue menor en la profundidad de 50-100 cm, con 6.47 %, y mayor en la profundidad de 0-15 cm, con 33.30 %. En la segunda zona, la MO fue menor en la profundidad de 0-15 cm, con 3.70 %, y mayor en la profundidad de 50-100, con 5.03 %.

*Carbono aéreo y subterráneo.* No se encontraron diferencias significativas entre zonas respecto al carbono aéreo total. Los valores de carbono aéreo fueron de  $76 \pm 16$  Mg C ha<sup>-1</sup> y  $91 \pm 14$  Mg C ha<sup>-1</sup> para la zona sin y con alteración del suelo, respectivamente. Sin embargo, se encontraron diferencias entre zonas para tres especies de mangle (Tabla 2;  $P = 0.02$ ). El carbono aéreo fue mayor en la zona con el suelo alterado, con  $84.2 \pm 11$  Mg C ha<sup>-1</sup>, y la especie que más contribuyó al carbono aéreo fue *A. germinans*, con  $59.6 \pm 7.47$  Mg C ha<sup>-1</sup>. En contraste, en la zona donde el suelo no fue perturbado fue *R. mangle* la especie que mayor carbono registró, con  $52.4 \pm 5.50$  Mg C ha<sup>-1</sup> (Tabla 3).

Respecto al porcentaje de carbono orgánico en el suelo, se encontraron diferencias significativas entre zonas ( $P = 0.01$ ). El carbono orgánico en el suelo fue mayor en la zona sin evidencias de perturbación del suelo, con  $10.7 \pm 2.16$  %, que en la zona donde el suelo fue rellenado, con  $4.63 \pm 0.21$  % (Tabla 3). Además, en la primera de esas zonas se observó un decremento de la concentración de carbono con respecto a la profundidad, mientras que la segunda zona la concentración de carbono fue menor al 5 % en todas las profundidades (Figura 3, 1C-2C).

Respecto al carbono subterráneo, éste fue mayor en la zona con el suelo rellenado, con  $292 \pm 14$  Mg C ha<sup>-1</sup>, en comparación con la zona donde el suelo no presentaba evidencias de relleno, con  $245 \pm 5$  Mg C ha<sup>-1</sup> ( $P = 0.03$ ). Por último, el carbono total almacenado en la zona con suelo rellenado fue mayor que en la zona donde el suelo no estaba alterado ( $P = 0.006$ ; Tabla 3).

**Tabla 3.** Características del suelo y valores de carbono aéreo, subterráneo y total estimado para cada una de las zonas. Se presenta el promedio  $\pm$  el error estándar, así como el resultado del análisis de varianza. Las negritas indican diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ).

Componente	Zona 1	Zona 2	Valor F	P
<b>Suelo</b>				
Densidad del suelo (g cm <sup>-3</sup> )	0.31 $\pm$ 0.05	0.64 $\pm$ 0.02	26.27	<b>0.0001</b>
Materia orgánica (%)	18.8 $\pm$ 5.22	4.21 $\pm$ 0.21	7.83	<b>0.010</b>
Carbono orgánico (%)	10.7 $\pm$ 2.16	4.63 $\pm$ 0.21	7.83	<b>0.01</b>
Carbono Aéreo (Mg C ha <sup>-1</sup> )	60.4 $\pm$ 10.0	84.2 $\pm$ 11	2.34	0.13
<i>Avicennia germinans</i>	28.6 $\pm$ 7.13	59.6 $\pm$ 7.47	8.97	<b>0.007</b>
<i>Laguncularia racemosa</i>	19.0 $\pm$ 4.08	21.6 $\pm$ 5.34	0.15	0.70
<i>Rhizophora mangle</i>	52.4 $\pm$ 5.50	3.69 $\pm$ 1.21	11.31	<b>0.02</b>
<i>Conocarpus erectus</i>	0.95 $\pm$ 0.20	14.6 $\pm$ 2.30	12.20	<b>0.02</b>
Carbono Subterráneo (Mg C ha <sup>-1</sup> )	245 $\pm$ 5	292 $\pm$ 14	9.71	<b>0.03</b>
Carbono Total (Mg C ha <sup>-1</sup> )	321 $\pm$ 20	383 $\pm$ 15	27.8	<b>0.006</b>

## Discusión

Isla del Carmen ha experimentado en las últimas décadas un crecimiento urbano progresivo, descontrolado y desordenado. Para el año 2010 se registró una población de 169,466 habitantes, incrementándose a 184,300 habitantes para el año 2014, lo que significó una tasa del incremento de la población de 2.12 % año<sup>-1</sup> (Martínez-Beberaje *et al.* 2019). El crecimiento poblacional ha tenido consecuencias negativas sobre las áreas de manglar dentro de la ciudad,

por lo que han disminuido la superficie de estos humedales por las invasiones de las urbanizaciones. Este proceso de invasión a los humedales se asocia directamente con una mayor presión por el cambio de uso de suelo que promueve la pérdida de servicios ecosistémicos (Rivera-De Jesús 2019), como la protección a eventos climáticos extremos (Ouyang *et al.* 2018, Hochard *et al.* 2019), la regulación del microclima y almacenamiento de grandes reservas de carbono (Atwood *et al.* 2017).

En los últimos años, se ha incrementado la atención sobre los manglares por su alta capacidad de almacenar más carbono que las selvas (Alongi 2014). Los manglares de La Caleta almacenan y secuestran carbono con un promedio de  $352 \pm 44 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , el cual fue similar a lo reportado en otros manglares de la Península de Yucatán, con promedios de  $348.9 \pm 21 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (Herrera-Silveira *et al.* 2020). El carbono orgánico fue diferente únicamente en la parte subterránea, ya que el aéreo fue igual en las dos zonas. Sin embargo, los valores del carbono aéreo fueron más altos comparado con los reportados en la reserva de Yum Balam, con  $64 \pm 29$  y  $15 \pm 9 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (Herrera-Silveira *et al.* 2018). Por otra parte, en un estudio realizado en el Pacífico Mexicano, reportaron que el almacén de carbono aéreo en el estero El Sargento varió entre  $54.1$  y  $158.4 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , mientras que en Bahía del Tóbari varió de  $36.1$  a  $65.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (Bautista-Olivas *et al.* 2018). El valor más alto de carbono por especie en ambas zonas fue para *Laguncularia racemosa*, con  $50.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en la zona sin perturbaciones en el suelo y  $65.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en la zona con el suelo rellenado, respectivamente. Los valores de carbono aéreo reportados en estero El Sargento fueron similares a las estimaciones de *L. racemosa*, que fluctuaron entre  $40.7$  y  $134.44 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (Bautista-Olivas *et al.* 2018).

La densidad aparente del suelo en la zona 2 evidenció el impacto antrópico en el suelo. Además, existió una relación inversa entre la densidad aparente de los sedimentos y el contenido de materia orgánica. Los valores de densidad aparente en la zona sin modificación del terreno fueron similares a los reportados por Gnanamoorthy *et al.* (2019) como valores normales para suelos de manglar ( $0.47 \text{ g cm}^{-3}$ ) y también respecto a otros manglares de Isla del Carmen, que oscilan entre  $0.23$  y  $0.62 \text{ g cm}^{-3}$  (Echeverría-Ávila *et al.* 2019). La densidad aparente de la zona con el suelo perturbado tuvo valores altos que fueron similares a manglares que han sido rellenados con material de dragado en el norte de la Península de Yucatán (Pérez-Ceballos *et al.* 2017). Sin embargo, el porcentaje de carbono orgánico fue mayor en la zona donde el suelo no estaba alterado, pero los almacenes de carbono subterráneos no fueron mayores al de la zona con suelo rellenado, como se esperaba. Esto fue debido, a que se empleó la densidad aparente en la obtención del almacén de carbono, la cual fue mayor en la zona donde se rellenó con escombros. Por lo anterior, recomendamos no considerar piedras gruesas contenidas en el suelo para la cuantificación de la densidad aparente, ya que puede aumentar significativamente el peso y llevar a sobreestimar el almacén de carbono en los manglares urbanos que han sido rellenados con escombros.

Teniendo en cuenta la alta contribución de los manglares al secuestro de carbono, así como la posibilidad de convertirse en emisores de gases efecto invernadero por deforestación, es importante considerarlos en las estrategias de conservación y restauración. Esto porque la tala de estos ecosistemas disminuye la biomasa, liberando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ), lo que hace que los manglares reviertan su capacidad de captura de carbono y se transformen en emisores de gases de efecto invernadero (Troxler *et al.* 2015). Además, el almacenamiento de carbono en los manglares de La Caleta es similar a los reportados en otras partes de la Península de Yucatán; por lo que, deben ser prioritarios para la conservación (Adame *et al.* 2015), debiéndose también frenar su urbanización y procurar su restauración como medida de soluciones naturales de mitigación del cambio climático (Mazor *et al.* 2021).

Para fortalecer la conservación y la restauración del manglar urbano La Caleta, lo cual aún es posible de realizar, es necesario promoverlos en conjunto con beneficios ecosistémicos que proveen hacia los desarrollos urbanos, lo cual sería un incentivo para esas acciones. Además, en estos programas se deben considerar la adaptación basada en ecosistemas, que integra el manejo sostenible, la conservación y la restauración para proveer servicios que permitan aumentar la resiliencia y reducir la vulnerabilidad de ecosistemas y personas ante el cambio climático. En este sentido, los manglares juegan un papel muy importante en la adaptación basada en ecosistemas porque, dado los servicios ambientales que proveen, su restauración contribuirá a mejorar y/o mantener la salud ecosistémica, generando beneficios a mediano y largo plazo y favoreciendo el aumento de resiliencia territorial frente a los eventos ambientales actuales y futuros, como el aumento en el nivel medio del mar, el incremento de la precipitación y una

mayor frecuencia e intensidad de huracanes asociadas con el avance del cambio climático. La conservación de los manglares urbanos de Ciudad del Carmen debe considerarse desde la perspectiva de la protección hábitats intactos y la restauración de hábitats degradados para ser más efectiva, ya que resultados óptimos de conservación requieren tanto restauración como protección (Possingham *et al.* 2015).

Los resultados de este trabajo brindan información importante sobre los manglares urbanos en el APFFLT, que han sido poco estudiados y valorados. Estos ecosistemas se encuentran en la Isla del Carmen y juegan un papel importante como protección ante los eventos hidrometeorológicos. Por otra parte, este estudio contribuye con información básica para el fortalecimiento de la estrategia de manejo del APFFLT que apunta a la recuperación y restauración de sus manglares urbanos (Zaldívar-Jiménez *et al.* 2017, Pérez-Ceballos *et al.* 2020). El estudio fortalece los conocimientos para el desarrollo de proyectos de recuperación y restauración de los manglares urbanos afectados por las actividades humanas y en proceso de desaparición. Por lo tanto, para conservar y restaurar los manglares urbanos es necesario establecer una estrategia que inicia con la caracterización del humedal para generar la línea de base de monitoreo. Por otra parte, frenar las invasiones antrópicas sobre los humedales urbanos también implica actualizar el Programa Director Urbano del Municipio de Carmen, alineado a la estrategia de conservación del Programa de Manejo del APFFLT. Por último, es necesario la participación social, con el propósito de tener una sociedad informada, consiente y participativa, conciliando las diferentes percepciones entre lo ambiental, social y económico.

### Agradecimientos

Agradecemos a la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas por las facilidades dentro del área protegida que permitió realizar esta investigación. A la Universidad Autónoma del Carmen por el apoyo con sus académicos en especial el M en C. Luis Enrique Amador del Ángel (Q.E.P.D) y Esthela Endañu Huerta. La organización ATEC Asesoría Técnica y Estudios Costeros S.C.P y Laboratorio de Hidrología y Biogeoquímica de Humedales Costeros del ICML UNAM Estación El Carmen, por el apoyo en la colecta y análisis de muestras de suelo.

### Literatura citada

- Abohassan AS, Tewfik AI-Wakeeñ 2010. Effect of thinning on the above ground biomass of (*Conocarpus erectus L.*) trees in the western region of Saudi Arabia. *Journal of King Abdulaziz University-meteorology, Environment and Arid Land Agriculture Sciences* **21**: 3-17. DOI: <https://doi.org/10.4197/MET.21-1>
- Adame MF, Hermoso V, Perhans K, Lovelock CE, Herrera-Silveira JA. 2015. Selecting cost-effective areas for restoration of ecosystem services. *Conservation Biology* **29**: 493-502. DOI: <https://doi.org/10.1111/cobi.12391>
- Alongi DM. 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Sciences* **6**: 95-219. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Atwood T, Connolly R, Almahasheer H, Carnell P, Duarte C, Ewers Lewis C, Irigoien X, Kelleway J, Lavery P, Macreadie P, Serrano O, Sanders C, Santos I, Steven A, Lovelock C. 2017. Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses. *Nature Climate Change* **7**: 523-528. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate3326>
- Baltz DM, Yáñez-Arancibia A. 2013. Ecosystem-based management of coastal fisheries in the Gulf of Mexico: environmental and anthropogenic impacts and essential habitat protection. In: Day JW, Yáñez-Arancibia A, eds. *The Gulf of Mexico Origin, Waters, and Biota*. Volume 4, *Ecosystem-Based Management*. Texas USA: Harte Institute for Gulf of Mexico Studies. Texas A & M University Press. College Station, TX. pp. 337-370. ISBN: 9781603447652
- Barbier EB. 2000. Valuing the environment as input: Review of applications to mangrove-fishery linkages. *Ecological Economics* **35**: 47-61. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00167-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00167-1)
- Barbier EB. 2016. The protective service of mangrove ecosystems: A review of valuation methods. *Marine Pollution Bulletin*, **109**: 676-681. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.033>

- Bautista-Olivas AL, Mendoza-Cariño M, Rodríguez JC, Colado-Amador CE, Robles-Zazueta CA, Meling-López AE. 2018. Above-ground biomass and carbon sequestration in mangroves in the arid area of the northwest of Mexico: Bahía del Tóbari and Estero El Sargento, Sonora. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* **24**: 387-403. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.02.020>
- Celis-Hernandez O, Giron-Garcia MP, Ontiveros-Cuadras JF, Canales-Delgadillo JC, Pérez-Ceballos RY, Ward RD, Merino-Ibarra M. 2020. Environmental risk of trace elements in mangrove ecosystems: An assessment of natural vs oil and urban inputs. *Science of the Total Environment* **730**: 138643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138643>
- Cintrón G, Novelli YS. 1984. Methods for studying mangrove structure. In: Snedaker SC, ed. *The mangrove Ecosystem Research Methods*. Monographs on Oceanographic Methodology, 8. pp. 91-113. ISBN: 978-9231021817
- CONANP-PNUD [Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo]. 2020. Programa de Adaptación al Cambio Climático del Complejo de las ANP Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla-Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos. México: CONANP-PNUD.
- Coronado-Molina C, Alvarez-Guillen H, Day JW, Reyes E, Perez BC, Vera-Herrera F, Twilley R. 2012. Litterfall dynamics in carbonate and deltaic mangrove ecosystems in the Gulf of Mexico. *Wetlands Ecology and Management* **20**: 123-136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11273-012-9249-3>
- Cottam G, Curtis J.T. 1956. The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology* **37**: 451-460. DOI: <https://doi.org/10.2307/1930167>
- Chen R, Twilley R. 1999. A Simulation Model of Organic Matter and Nutrient Accumulation in Mangrove Wetland Soils. *Biogeochemistry* **44**: 93-118. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00993000>
- Dahdouh-Guebas F, Koedam N. 2006. Empirical estimate of the reliability of the use of the Point-Centred Quarter Method (PCQM): solutions to ambiguous field situations and description of the PCQM+ protocol. *Forest Ecology and Management* **228**: 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.076>
- Day JW, Conner WH, Ley-Lou CF, Day RH, Machado-Navarro A. 1987. The productivity and composition of mangrove forests, Laguna de Términos. Mexico. *Aquatic Botany* **27**: 267-284. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(87\)90046-5](https://doi.org/10.1016/0304-3770(87)90046-5)
- Donato DC, Kauffman JB, Mackenzie RA, Ainsworthb A, Pfliegerc AZ. 2012. Whole-island carbon stocks in the tropical Pacific: Implications for mangrove conservation and upland restoration. *Journal of Environmental Management* **97**: 89-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.12.004>
- Echeverría-Ávila S, Pérez-Ceballos R, Zaldívar-Jiménez A, Canales-Delgadillo J, Brito-Pérez R, Merino-Ibarra M, Vovides A. 2019. Natural regeneration of degraded mangrove sites in response to hydrological restoration. *Madera y Bosques* **25**: e2511754. DOI: <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2019.2511754>
- Escudero M, Silva R, Mendoza E. 2014. Beach erosion driven by natural and human activity at Isla del Carmen Barrier Island, Mexico. *Journal of Coastal Research* **71**: 62-74. DOI: <https://doi.org/10.2112/SI71-008.1>
- Gnanamoorthy P, Selvam V, Ramasubramanian R, Chakraborty S, Debburman P, Karipot A. 2019. Soil organic carbon stock in natural and restored mangrove forests in Pichavaram south-east coast of India. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences* **48**: 801-808.
- Heiri O, Lotter AF, Lemcke G. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology* **25**: 101-110. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Herrera-Silveira JA, Mendoza-Martínez J, Pérez-Martínez O, Solís-Gamboa S, García-Trasviña A, Pech E, Caamal JP, Rosette M. 2018. Almacenes De Carbono En Manglar Y Pastos Marinos Del Área De Protección De Flora Y Fauna Reserva De Yum Balam. Informe Técnico Final. PMC-CINVESTAV-CEMDA. <https://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2018/09/Almacenes-de-Carbono-Azul-Yum-Balam-2018.pdf> (accessed April 12, 2022).
- Herrera-Silveira JA, Pech-Cardenas MA, Morales-Ojeda SM, Cinco-Castro S, Camacho-Rico A, Caamal-Sosa JP, Mendoza-Martinez JE, Pech-Poot EY, Montero J, Teutli-Hernandez C. 2020. Blue carbon of Mexico, carbon stocks and fluxes: a systematic review. *PeerJ* **8**: e8790. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.8790>

- Hochard JP, Hamilton S, Barbier EB. 2019. Mangroves shelter coastal economic activity from cyclones. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **116**: 12232-12237. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1820067116>
- Howard J, Hoyt S, Isensee K, Pidgeon E, Telszewski M. 2014. Coastal blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses. Arlington, Virginia, USA: Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. <https://www.cifor.org/knowledge/publication/5095/> (accessed April 12, 2022).
- IMPLAN [Instituto Municipal de Planeación]. 2009. Programa Director Urbano del Centro de Población de Cd. del Carmen, Campeche. Tomo II: Pronóstico, estrategias, normatividad e implementación. [http://www.carmen.gob.mx/transparencia/web/Ayuntamiento/2012/ob23/desarrollo\\_urbano/pla%20de%20desarrollo%20urbano.pdf](http://www.carmen.gob.mx/transparencia/web/Ayuntamiento/2012/ob23/desarrollo_urbano/pla%20de%20desarrollo%20urbano.pdf) (accessed April 12, 2022).
- IMPLAN [Instituto Municipal de Planeación]. 2012. Programa parcial de mejoramiento urbano de la zona del Arroyo La Caleta. Campeche, México: H. Ayuntamiento del Municipio de Cd. del Carmen. [http://www.implancarmen.org/pdf/PPMUZAC/Tabla\\_UsosdeSuelo.pdf](http://www.implancarmen.org/pdf/PPMUZAC/Tabla_UsosdeSuelo.pdf) (accessed April 12, 2022).
- Kathiresan K, Bingham BL. 2001. Biology of mangroves and mangrove Ecosystems. *Advances in Marine Biology* **40**: 81-251. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(01\)40003-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(01)40003-4).
- Kauffman JB, Donato DC. 2012. Protocols for the Measurement, Monitoring, and Reporting of Structure, Biomass and Carbon Stocks in mangrove Forests. Working Paper 86. Bogor, Indonesia: Center for International Forest Research. DOI: <https://doi.org/10.17528/cifor/003749>
- Kauffman BJ, Donato DC, Adame MF. 2013. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. Documento de trabajo 117. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR). DOI: <https://doi.org/10.17528/cifor/004386>
- Kauffman JB, Heider C, Cole TG, Dwire KA, Donato DC. 2011. Ecosystem carbon stocks of micronesian mangrove forests. *Wetlands* **31**: 343-352. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0148-9>
- Kumagai JA, Costa MT, Ezcurra E, Aburto-Oropeza O. 2020. Prioritizing mangrove conservation across Mexico to facilitate 2020 NDC ambition. *Ambio* **49**: 1992-2002 DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01334-8>.
- Lewis RR, Milbrandt EC, Brown B, Krauss K.W, Rovai AS, Beever JW, Flynn LL. 2015. Stress in mangrove forests: Early detection and preemptive rehabilitation are essential for future successful worldwide mangrove forest management. *Marine Pollution Bulletin* **109**: 764-771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.006>
- Lhumeau A, Cordero D. 2012. Adaptación basada en Ecosistemas: una respuesta al cambio climático. Quito, Ecuador: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales (UICN). 17 pp.
- Lugo AE, Snedaker SC. 1974. The ecology of mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics* **5**: 39-64. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.es.05.110174.000351>
- Ruiz-Marín A, Canedo-López Y, Zavala-Loría J, Reyes R, Anguebes-Franceschi F, Quiroz VC. 2014. Variation on the fluxes of nutrients in an urban lagoon by seasonal effects and human activities. *Hydrology: Current Research* **5**: 1-8. DOI: 10.4172/2157-7587.1000170
- Martínez-Beberaje R, Solano-Palacios E, Frutos-Cortes M, Nuñez-Lara E. 2018. Vulnerabilidad socioambiental en la región de la Laguna de Términos ante la variabilidad climática: el caso del Municipio de Carmen, Campeche. In: Cadena-Roa J, Aguilar-Robledo M, Vázquez-Salguero D. eds. *Las ciencias sociales y la agenda nacional. Reflexiones y propuestas desde las Ciencias Sociales*. México: Consejo Mexicano de Ciencias Sociales. ISBN: 978-607-98224-0-8.
- Mazor T, Friess DA, Todd PA, Huang D, Nguyen NTH, Saunders MI, Runtung RK, Lowe RJ, Cartwright P, Gilmour, JP, Lovelock CE. 2021. Large conservation opportunities exist in >90% of tropic-subtropic coastal habitats adjacent to cities. *One Earth* **4**: 7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.06.010>.
- Naylor LA, Hugh-Kippen N, MacArthur M, Hansom JD, Vovides AG, Zaldivar-Jiménez A, Pérez-Ceballos R. 2021. Urban Estuaries and Coasts. In: Douglas I, Anderson PML, Goode D, Houck MC, Maddox D, Nagendra H, Yok TP. eds. *The Routledge Handbook of Urban Ecology* Routledge. e-ISBN: 9780429506758. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429506758>

- Ouyang X, Lee SY. 2020. Improved estimates on global carbon stock and carbon pools in tidal wetlands. *Nature Communication* **11**: 317. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14120-2>
- Ouyang X, Lee SY, Connolly RM, Kainz M. J. 2018. Spatially-explicit valuation of coastal wetlands for cyclone mitigation in Australia and China. *Scientific Reports* **4**: 3035. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21217-z>
- Pérez-Ceballos R, Echeverría-Avila S, Zaldívar-Jimenez A, Zaldívar-Jimenez T, Herrera-Silveira JA. 2017. Contribution of microtopography and hydroperiod to the natural regeneration of *Avicennia germinans* in a restored mangrove forest. *Ciencias Marinas* **43**: 55-67. DOI: <https://doi.org/10.7773/cm.v43i1.2683>
- Pérez-Ceballos R, Zaldívar-Jiménez A, Canales-Delgadillo J, López-Adame H, López-Portillo J, Merino-Ibarra M. 2020. Determining hydrological flow paths to enhance restoration in impaired mangrove wetlands. *Plos One* **15**: e0227665. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227665>
- Pérez-Ceballos R, Zaldívar-Jiménez A, Herrera-Silveira JA, Teutli-Hernández C, Amador-del Ángel LE, Endañu-Huerta E, Guevara-Carrió E. 2010. Caracterización espacial de los manglares de Isla del Carmen, Campeche, México. Informe Final. Proyecto: Integrated Assessment and Management of the Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem. United Nations Industrial Development Organization, Global Environment Facility, (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Universidad Autónoma del Carmen)
- Possingham HP, Bode M, Klein CJ. 2015. Optimal conservation outcomes require both restoration and protection. *Plos Biology* **13**: e1002052. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002052>
- Rivera-De Jesús W. 2019. Humedales Urbanos en el contexto de Cambio Climático: Prácticas efectivas para su rehabilitación, el caso de la Ciénaga las Cucharillas en Puerto Rico. In: Molina MN, Galvis CF. eds. *Manglares de América*. Guayaquil, Ecuador: Escuela de Ciencias Ambientales, Facultad de Ingeniería, Universidad Espíritu Santo. ISBN: 978-9978-25-142-3 <http://ri.uagro.mx/bitstream/handle/uagro/1205/CapLib2019OctCEB.pdf?sequence=3&isAllowed=y> (accessed April 12, 2022).
- Sekovski I, Newton A, Dennison WC. 2012. Megacities in the coastal zone: Using a driver pressure-state-impact-response framework to address complex environmental problems. *Estuarine and Coastal Marine Science* **96**: 48-59. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2011.07.011>
- SEMARNAT [Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales]. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, 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. *Diario Oficial de la Federación*. 2da Sección, 30 de diciembre de 2010.
- Troxler TG, Barr JG, Fuentes JD, Engel V, Anderson G, Sanchez C, Lagomosino D, Price R, Davis SE. 2015. Component specific dynamics of riverine mangrove CO<sub>2</sub> efflux in the Florida coastal Everglades. *Agricultural and Forest Meteorology* **213**: 273-282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.012>
- Twilley R, Rivera-Monroy V. 2005. Developing performance measures of mangrove wetlands using simulation models of hydrology, nutrient biogeochemistry, and community dynamics. *Journal of Coastal Research* **40**: 79-95.
- Villalobos-Zapata G, Yáñez-Arancibia A, Day JW, Lara-Domínguez AL. 1999. Ecología y manejo de los manglares en la Laguna de Términos, México. In: Yáñez-Arancibia A, Lara-Domínguez AL, eds. *Ecosistemas de Manglar En América Tropical*. Instituto de Ecología A.C. México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MDUSA. pp. 263-276. ISBN: 968 7863-57-9
- Yáñez-Arancibia A, Day JW, Sánchez-Gil P, Day JN, Lane RR, Zárate-Lomelí D, Vásquez AH, Rojas-Galaviz LJ, Ramírez-Gordillo J. 2014. Ecosystem functioning: The basis for restoration and management of a tropical coastal lagoon, Pacific coast of Mexico. *Ecological Engineering* **65**: 88-100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2013.03.007>
- Zaldívar-Jiménez A, Ladrón de Guevara-Porras P, Pérez-Ceballos R, Díaz-Mondragón S, Rosado-Solórzano R. 2017. US-Mexico joint Gulf of Mexico large marine ecosystem based assessment and management: Experience in

community involvement and mangrove wetland restoration in Términos lagoon, Mexico. *Environmental Development* **22**: 206-213 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2017.02.007>

Zedler JB, Leach MK. 1998. Managing urban wetlands for multiple uses: research, restoration, and recreation. *Urban Ecosystems* **2**: 189-204. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009528505009>

---

**Editor de sección:** Ernesto Iván Badano

**Contribución de los autores:** JHN realizó el registro de los datos en campo, la estructuración, análisis y escritura del manuscrito; AEPB apoyó en el diseño de la investigación, la estructuración del manuscrito y revisión del documento; AZJ participó en la estructuración y escritura del manuscrito, el análisis de datos y discusión de los resultados; RPC participó en el análisis y registro de los datos, la estructuración y revisión del documento.