

BASE DE DATOS DE ALMACENES Y FLUJOS DE CARBONO EN HUMEDALES DE AGUA DULCE DE MÉXICO

DATABASE FOR CARBON STOCKS AND FLUXES IN FRESHWATER WETLANDS IN MEXICO

María Elizabeth Hernández-Alarcón¹, Fernando Paz-Pellat^{2†} y Alejandro Adrián Hernández-Sánchez¹

¹ Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Veracruz, México.

² Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México.

† Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com.

RESUMEN

Los humedales de agua dulce son ecosistemas que juegan un papel importante en el ciclo del carbono, ya que sus suelos pueden almacenar grandes cantidades de carbono. Sin embargo, debido a las condiciones inundadas de los mismos, también son fuente de gases de efecto invernadero como metano, óxido nitroso y bióxido de carbono. Con el objetivo de facilitar estudios de síntesis a nivel nacional, que lleven a un mejor entendimiento de los procesos de captura y flujos de carbono en humedales de agua dulce, se construyó una base de datos de los últimos 10 años, sobre los almacenes de carbono y flujos de carbono, basada en la información que se obtuvo de publicaciones en revistas científicas, memorias de resúmenes en extenso y documentos de tesis.

Palabras clave: *Popal; Tular; selva inundable; metano; turba.*

ABSTRACT

Freshwater wetlands play an important role in the carbon cycle because their soils are capable to store large amount of carbon. However due to the flooding conditions wetland soils are sources of greenhouse gases such as methane, nitrous oxide and carbon dioxide. In order to facilitate national studies that enhance the understanding of carbon capture and fluxes processes in freshwater wetlands, a data base of carbon stocks and fluxes in coastal and continental freshwater wetlands was built, based in information published in scientific journals, conference proceedings and thesis.

Key words: *Marsh; mire; forested wetland; methane; peat.*

INTRODUCCIÓN

Los humedales son las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres, constituyen áreas de inundación temporal, o permanente, que están sujetas o no a la influencia de la marea. La inundación debe ser lo suficientemente larga para permitir el desarrollo de suelos hídricos y/o al menos periódicamente para mantener una vegetación predominante de hidrófitas, esto es, plantas adaptadas a vivir en condiciones de inundación (Mitsch y Gosselink, 2007).

Los humedales de agua dulce ocurren tanto en la zona costera como en la zona continental y, a pesar de no contar con una amplia extensión en el país, estos ecosistemas juegan un importante papel dentro del ciclo del carbono, ya que pueden almacenar hasta cinco veces más carbono en sus suelos, que los ecosistemas terrestres (Hernández y Moreno-Casasola, 2018). Dicho potencial se debe a la alta productividad de las plantas y a la baja descomposición de materia orgánica que ocurre en los suelos inundados (Adhikari *et al.*, 2009; Hernández, 2010). Sin embargo, en los suelos de estos

humedales se llevan a cabo procesos anaerobios como la metanogénesis, cuyo producto final es el metano (CH₄), considerado un gas con efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 20 veces mayor al del CO₂ y que contribuye con el 20% al calentamiento global (Whiting y Chanton, 2001; IPCC, 2007; Kayranli *et al.*, 2010; Marín-Muñoz *et al.*, 2015; Hernández *et al.*, 2018). De allí la importancia de contar con una base de datos sobre los almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en México.

Con el objetivo de facilitar estudios de síntesis a nivel nacional, que lleven a un mejor entendimiento de los procesos de captura y flujos de carbono en humedales de agua dulce, en este trabajo se construyó una base de datos de los últimos 10 años, sobre los datos de almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce, basada en información que se obtuvo de publicaciones de revistas científicas, memorias de resúmenes en extenso y documentos de tesis.

MATERIALES Y MÉTODOS

Métodos para estimar el almacén de carbono en biomasa de humedales

Para determinar el almacén de carbono en la biomasa, primero es necesario establecer la cantidad de biomasa por área y el contenido de carbono en ella. Para los humedales arbóreos, se mide el diámetro a la altura de pecho en parcelas de un área determinada. Se aplican ecuaciones alométricas de acuerdo con la especie y se calcula la biomasa (materia seca en g m⁻²). Para los humedales herbáceos, en campo se cosecha la biomasa área en parcelas de 1 m x 1 m, la biomasa se seca, se pesa y se calcula la biomasa (g m⁻²). Para conocer el contenido de carbono en los tejidos de las diferentes especies de humedales, se toman muestras de biomasa aérea, se secan a 60 °C y se les analiza el contenido de carbono con un analizador de carbono (Hernández *et al.*, 2016).

Para determinar la biomasa de raíces, se toman núcleos de suelo a 30 cm de profundidad y 15 cm de diámetro, las raíces contenidas en el suelo se lavan con abundante agua hasta eliminar el suelo, se secan, se pesan y se calcula la biomasa en g m⁻², considerando al área del núcleo de suelo. Con los datos anteriores se calculan los almacenes de carbono, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Almacén de carbono en biomasa aérea} = C * PBA$$

donde:

PBA= Productividad de biomasa aérea, en Mg ha⁻¹

C= Proporción de carbono en la biomasa aérea

$$\text{Almacén de carbono en raíces} = C * PR$$

donde:

PR= Productividad de raíces, en Mg ha⁻¹

C= Proporción de carbono en raíces

La concentración de carbono orgánico para cada humedal, se ajusta con la densidad aparente para estimar la densidad de carbono (Kg m⁻²) en cada horizonte, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad de carbono} = CO * DA * PH$$

donde:

CO= Contenido de carbono orgánico en el horizonte o capa de suelo, en g Kg⁻¹

DA= Densidad aparente en el horizonte, en Kg m⁻³

PH= Profundidad del horizonte, en m

Almacén de carbono en el suelo en Mg ha⁻¹ = \sum Densidad de carbono en cada horizonte Kg m⁻² * 10

\sum = Sumatoria

10= Factor de conversión de Kg m⁻² a Mg ha⁻¹ (10000/1000)

Método para determinar los flujos verticales de carbono en humedales de agua dulce

La emisión de metano, bióxido de carbono y óxido nítrico, en humedales de agua dulce, ha sido ampliamente medida a nivel internacional mediante el método de la cámara cerrada (Altor y Mitsch, 2006; Hernández y Mitsch, 2006; Kayranli *et al.*, 2010) y, más recientemente, por el método de covarianza de vórtices (Beringer *et al.*, 2013). En México, para los humedales de agua dulce, solo se encontraron datos de flujo medidos por el método de la cámara cerrada (Marín-Muñiz *et al.*, 2015; Hernández *et al.*, 2015; Rojas-Oropeza *et al.*, 2016). Esta técnica consiste en colocar una cámara enterrada en el suelo, la cual se cierra al momento de medir la emisión de los gases. En la tapa de la cámara debe haber un septo de goma y un termómetro. Con ayuda de una jeringa, a través del septo de goma, se toman muestras del gas contenido en la cámara, a diferentes intervalos, a partir de que ésta se cierra. Las muestras se colocan en viales herméticamente cerrados y la concentración de gases se determina por cromatografía de gases.

Búsqueda de datos

Se realizó una búsqueda de bibliografía sobre estudios de almacenes y flujos de carbono en humedales

de agua dulce en México. La búsqueda se hizo en bases de datos de artículos científicos y tesis en español, utilizando como palabras clave, carbono y humedales, en buscadores como Scielo, base de datos de tesis - UNAM, Instituto de Ecología, A.C., Google Académico y publicaciones del Programa Mexicano del Carbono. Así mismo, se realizó una búsqueda de artículos en inglés, utilizando las palabras clave carbon wetlands Mexico en el metabuscador de Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica CONRICyT. Es importante mencionar, que de los resultados obtenidos se excluyeron los trabajos relacionados con manglares y otros humedales salobres, ya que el objetivo de esta síntesis fue centrarse en humedales de agua dulce, costeros y continentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sólo se encontraron datos para almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en cuatro estados del sureste mexicano: Chiapas, Tabasco, Yucatán y Veracruz (Figura 1). Sólo para el estado de Veracruz se registraron datos sobre almacenes de carbono en humedales de agua dulce costeros y continentales; para los estados restantes, sólo se encontraron datos de humedales de agua dulce costeros.



Figura 1. Sitios con datos sobre almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce.

El tipo de publicaciones que se encontraron fueron, como literatura indizada, siete artículos para el estado de Veracruz (Campos-Cascaredo *et al.*, 2011; Infante-Mata *et al.*, 2012, Marín-Muñiz *et al.*, 2014 y 2015; Moreno-Casasola *et al.*, 2017; Vázquez-González *et al.*, 2017; Hernández y Moreno-Casasola, 2018); uno para Tabasco (Kauffman *et al.*, 2016); uno para Chiapas (Adame *et al.*, 2015) y, uno para Yucatán (Adame *et al.*, 2013). Dentro de la literatura gris, se encontraron cinco capítulos de libro y dos artículos, todos con datos sobre almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en Veracruz (Figura 2). Se encontraron dos tesis de Doctorado, una con datos de almacenes y flujos de

carbono como emisiones de gases (Marín-Muñiz, 2013) y otra con datos de flujos de carbono (como caída de hojarasca) en selvas inundables de Veracruz. También para Veracruz (Infante-Mata, 2011), se encontró una tesis de licenciatura sobre los almacenes de carbono en suelos de potreros inundables y humedales arbóreos (Salazar-Landero, 2013) y una tesis de licenciatura, en donde se comparan los almacenes de carbono en humedales costeros y continentales de Veracruz (Cruz-Zamora, 2018). Se hallaron dos resúmenes en congresos con datos de flujos de gases para humedales de Tabasco y Veracruz (Rojas-Oropeza *et al.*, 2016; Hernández *et al.*, 2018).

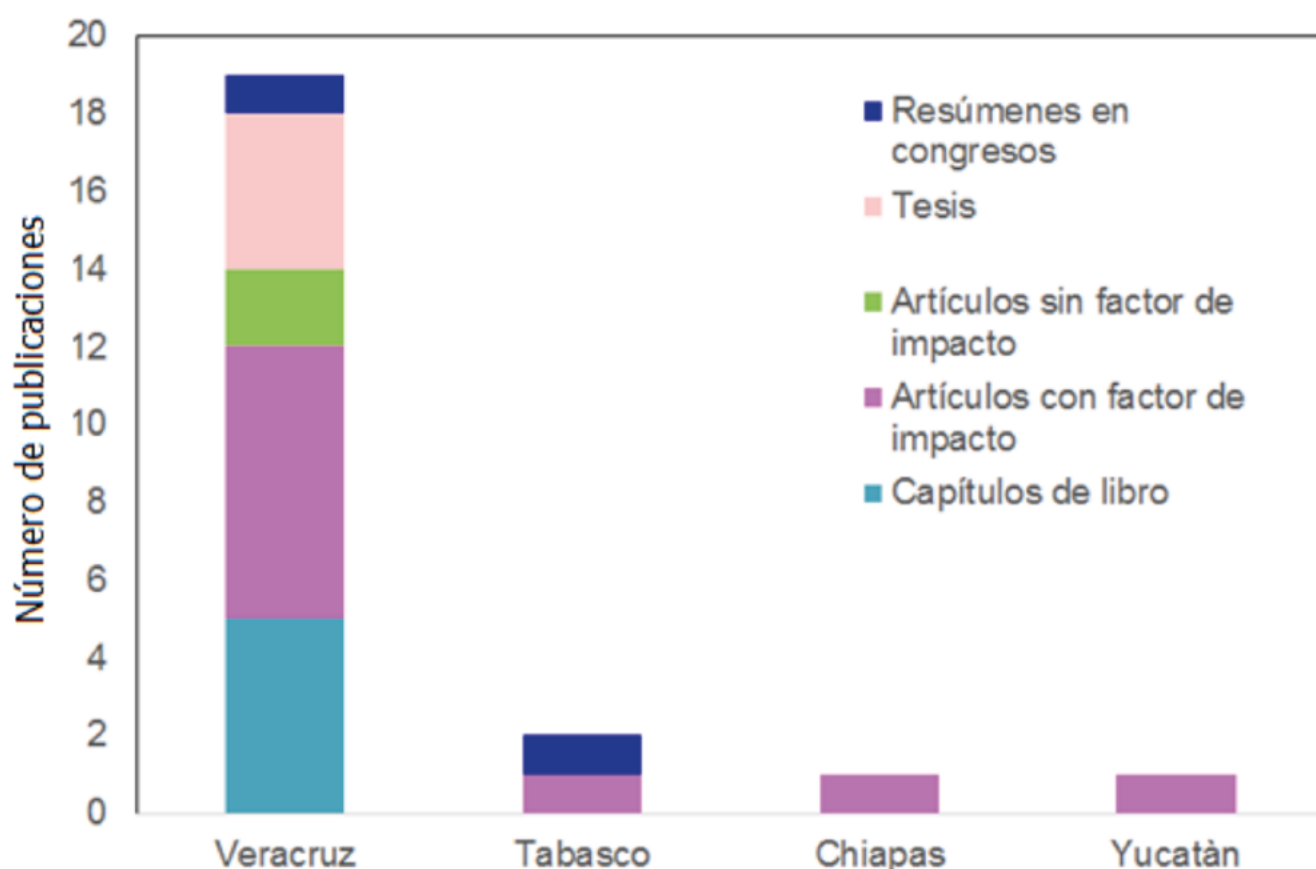


Figura 2. Literatura indizada y literatura gris, sobre almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce, por entidad federativa.

Para los almacenes de carbono en humedales de agua dulce costeros y continentales, se encontraron datos para 12 sitios, en cuatro estados de la República Mexicana

(Cuadro 1). Mientras que, para flujos de carbono, como caída de hojarasca y emisión de gases, se encontraron datos en ocho sitios, sólo en dos estados (Cuadro 2).

Cuadro 1. Sitios con datos de almacenes de carbono en humedales de agua dulce en México.

| Sitio | Tipo de humedal de agua dulce | Especies dominantes | Entidad federativa | Referencia |
|--------------------------------|---|--|--------------------|--|
| Punta Gorda | Humedal herbáceo costero | <i>Typha dominguensis</i> | Yucatán | Adame <i>et al.</i> , 2013 |
| Vigía Chico | Humedal herbáceo costero | <i>Cladium jamaicense</i> | Yucatán | |
| La encrucijada-Bajo estuario | Humedal herbáceo costero | <i>Typha dominguensis</i> | Chiapas | Adame <i>et al.</i> , 2015 |
| Centla | Pastizal Inundable-costero | | Tabasco | Kauffman <i>et al.</i> , 2016 |
| Estero Dulce | Humedal herbáceo, Selva inundable y Pastizal inundable costeros | <i>Thalia geniculata</i> , <i>Cyperus Gigantus</i> y <i>Pachira acuática</i> | Veracruz | Campos-Cascaredo <i>et al.</i> , 2011, Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2014 y Hernández <i>et al.</i> , 2015 |
| Laguna Chica | Humedal herbáceo y Selva inundable costeros | <i>Cyperus gigantus</i> , <i>Typha dominguensis</i> , <i>Pachira acuática</i> , <i>Hipocreatea celestratoides</i> | Veracruz | Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2014 |
| Santander | Humedal herbáceo y Selva inundable costeros | <i>Typha dominguensis</i> , <i>Ficus insipida</i> Willd., <i>Tabebuia rosea</i> | Veracruz | Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2014 |
| Boquilla de Oro | Humedal herbáceo, Selva inundable costeros y pastizal inundable | <i>Pontederia cordata</i> , <i>Typha dominguensis</i> , <i>Acrosticum sp</i> <i>Ficus insipida</i> <i>Pleuranthodendron lindenii</i> | Veracruz | Campos-Cascaredo <i>et al.</i> , 2011, Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2014 y Hernández <i>et al.</i> , 2015 |
| La Mancha | Humedal herbáceo y Selva inundable costeros | <i>Anona grabra</i> <i>Sagittaria lancifolia</i> <i>Typha dominguensis</i> <i>Attalaea butyraceae</i> , <i>Roystonea dunlapiana</i> (palma de agua o yagua) | Veracruz | Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2014 |
| Jamapa | Palmar y Selva inundable costeros | y <i>Scheelea liebmanni</i> (coyol o palma real). <i>Dendrosicus latifolius</i> , <i>Pachira aquatica</i> , <i>Ficus trigonata</i> y <i>Ficus insipida</i> | Veracruz | Salazar-Landero, 2013 |
| Río Blanco | Humedal herbáceo y Selva inundable costeros | <i>Pachira aquatica</i> <i>Hippocratea volubilis</i> <i>Annona glabra</i> , <i>Thalia geniculata</i> <i>Leersia ligularis</i> , <i>Pontederia sagittata</i> | Veracruz | Moreno-Casasola <i>et al.</i> , 2017, Vázquez-González <i>et al.</i> , 2017 |
| Santuario del Bosque de Niebla | Humedal herbáceo continental | <i>Typha domingensis</i> | Veracruz | Cruz-Zamora, 2018 |
| Molinos de San Roque | Humedal herbáceo continental | <i>Typha dominguensis</i> | Veracruz | Cruz-Zamora, 2018 |

Cuadro 2. Sitios con datos de flujos de carbono como como caída de hojarasca* y emisión de gases⁺ en humedales de agua dulce en México.

| Sitio | Tipo de humedal de agua dulce | Especies dominantes | Entidad federativa | Referencia |
|--|--|---|--------------------|--|
| Lagunas de Chaschoc-Emiliano Zapata ⁺ | Humedal tropical, ribereño al río Usumacinta | No específica-selva mediana y baja; con actividad agrícola, ganadera y urbana | Tabasco | Rojas-Oropeza <i>et al.</i> , 2016 |
| Estero Dulce ^{*+} | Humedal herbáceo, Selva inundable y potrero inundable costeros | <i>Thalia geniculata</i> , <i>Cyperus Gigantus</i> y <i>Pachira acuática</i> <i>Echinochloa pyramidalis</i> | Veracruz | Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2015 y Hernández <i>et al.</i> , 2015, Infante <i>et al.</i> , 2012 |
| Laguna Chica ^{*+} | Humedal herbáceo y Selva inundable costeros | <i>Pachira acuática</i> , <i>Hipocreatea</i> , <i>celestratoides</i> | Veracruz | Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2015, Infante <i>et al.</i> , 2012 |
| Boquilla de Oro ⁺ | Humedal herbáceo y Selva inundable costeros | <i>Pontederia cordata</i> , <i>Typha dominguensis</i> , <i>Acrosticum sp</i> <i>Ficus insipida</i> <i>Pleuranthodendron lindenii</i> | Veracruz | Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2015 y Hernández <i>et al.</i> , 2015 |
| La Mancha [*] | Humedal herbáceo y Selva inundable costeros | <i>Anona grabra</i> <i>Ficus insipida</i> | Veracruz | Infante <i>et al.</i> , 2012 |
| Jamapa [*] | Palmar y Selva inundable costeros | <i>Attalaea butyraceae</i> , <i>Roystonea dunlapiana</i> (palma de agua o yagua) y <i>Scheelea liebmannii</i> (coyol o palma real). <i>Dendrosicus latifolius</i> , <i>Pachira aquatica</i> , <i>Ficus trigonata</i> y <i>Ficus insipida</i> | Veracruz | Infante <i>et al.</i> , 2012 |
| Santuario del Bosque de Niebla ⁺ | Humedal herbáceo continental | <i>Typha domingensis</i> | Veracruz | Cruz-Zamora, 2018 |
| Molinos de San Roque ⁺ | Humedal herbáceo continental | <i>Typha dominguensis</i> | Veracruz | Cruz-Zamora, 2018 |

CONCLUSIONES

El número de sitios con datos de almacenes de carbono en humedales de agua dulce es muy bajo y sólo para 4 estados del sureste mexicano. En cuanto a los datos de flujos de carbono en estos ecosistemas, es aún más bajo, con sólo ocho sitios en dos estados del sureste. Por lo anterior, es indispensable que en México se genere conocimiento sobre la capacidad y los factores que afectan el almacenamiento de carbono en los diferentes humedales de agua dulce, costeros y continentales.

SIGUIENTES PASOS

Debido a que los humedales de agua dulce engloban ecosistemas arbóreos y herbáceos, tanto costeros como continentales, se necesita una estrategia intersectorial para lograr un mejor conocimiento de los humedales de agua dulce en México. Una vez delimitada el área de humedales de agua dulce, es necesario establecer campañas de muestreo para evaluar los almacenes de carbono, sobre todo en las zonas pacífico norte, norte, centro noreste y península de Yucatán.

BASE DE DATOS

De acuerdo con la política del Programa Mexicano del Carbono, de libre acceso a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones y, con el fin de apoyar las síntesis nacionales del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y acuáticos, la base de datos de este trabajo está disponible en http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/.

LITERATURA CITADA

- Adame, M., J. Kauffman, I. Medina, J. Gamboa, O. Torres, J. Caamal, M. Reza and J. Herrera-Silveira. 2013. Carbon stock of tropical coastal wetlands within the Karstic landscape of the Mexican Caribbean. PLoS ONE DOI: 10.1371/journal.pone.0056569.
- Adame, M., N. S. Santini, C. Tovilla, A. Vázquez-Lule, L. Castro and M. Guevara. 2015. Carbon stocks and soil sequestration rates of tropical riverine wetlands. Biogeosciences 12:3805-3818.
- Adhikari, S., R. Bajracharya and B. Sitaula. 2009. A review of carbon dynamics and sequestration in wetlands. Journal of Wetlands Ecology 2:42-46.
- Altort, A. and W. J. Mitsch. 2006. Methane flux from created riparian marshes: relationship to intermittent versus continuous inundation and emergent macrophytes. Ecological Engineering 28: 224-234.
- Campos-Cascaredo, A., M. E. Hernández, P. Moreno-Casasola, E. Cejudo-Espinosa, A. Robledo and D. M. Infante-Mata. 2011. Soil water retention and carbon pools in tropical forested wetlands and marshes of the Gulf of Mexico. Hydrological Sciences Journal 56:1388-1406.
- Cruz-Zamora, E. D. 2018. Caracterización fisicoquímica de suelos de humedales naturales y perturbados. Tesis en Ingeniero ambiental. Facultad de Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Álamo Temapache.
- Hernandez, M. E. and W. J. Mitsch. 2006. Influence of hydrologic pulses and vegetation on nitrous oxide emissions from created riparian marshes in Midwestern USA. Wetlands 26 (3) 862-877.
- Hernández, M. E. y P. Moreno-Casasola. 2018. Almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en México. Madera y Bosques 24:1-12.
- Hernández, M. E. 2010. El papel de los suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. Terra Latinoamericana 28:139-147.
- Hernández, M. E., A. Campos, J. L. Marín-Muñiz y P. Moreno-Casasola. 2016. Almacenes de carbono en selvas inundables, manglares, humedales herbáceos y potreros inundables. pp. 121-129. En: Moreno-Casasola, P. (ed.). Servicios Ecosistémicos de las Selvas y Bosques Costeros de Veracruz. INECOL - ITTO - CONAFOR - INECC.
- Hernández, M. E., A. Cristóbal, Cruz-Zamora E., Hernández A., Hernández-Sánchez, A. y P. Moreno-Casasola. 2018. Emisiones de gases de efecto invernadero en un gradiente de humedales costeros en Veracruz. Resúmenes de XVII y XXVIII Congreso de Ciencias Ambientales. Zacatecas Zacatecas, 11-15 de junio de 2018.
- Hernández, M. E., J. L. Marín-Muñiz and P. Moreno-Casasola. 2015. Comparing soil carbon pools and carbon gas fluxes in coastal forested wetlands and flooded grasslands in Veracruz, Mexico. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management 11:5-16.
- Infante-Mata, D. 2011. Estructura y dinámica de las selvas inundables de la planicie costera central del Golfo de México. Tesis Doctoral. Doctorado en Ecología y Manejo de Recursos. Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Veracruz.
- Infante-Mata, D. M., P. Moreno-Casasola and C. Madero-Vega. 2012. Litterfall of tropical forested wetlands of Veracruz in the coastal floodplains of the Gulf of Mexico. Aquatic Botany 98:1-11.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Fourth assessment report: synthesis report. Geneva: IPCC, 2007.
- Kauffman, J. B., H. Hernández-Trejo, M. C. Jesús-García, C. Heider and W. M. Contreras. 2016. Carbon stocks of mangroves and losses arising from their conversion to cattle pastures in the Pantanos de Centla, Mexico. *Wetlands Ecol. Manage.* 24:203-216.
- Kayranli, B., M. Scholz, A. Mustaf and A. Hedmark. 2010. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review. *Wetlands* 30:111-124
- Marín-Muñiz, J. L. 2013. Balance neto de carbono en suelos de humedales costeros de agua dulce: implicaciones ecológicas y sociales. Doctorado en Ecología Tropical. Centro de investigaciones tropicales. Universidad Veracruzana. Veracruz, México.
- Marín-Muñiz, J. L., M. E. Hernández and P. Moreno-Casasola. 2014. Comparing soil carbon sequestration in coastal freshwater wetlands with various geomorphic features and plant communities in Veracruz, Mexico. *Plant Soil* 378:189-203.
- Marín-Muñiz, J. L., M. E. Hernández and P. Moreno-Casasola. 2015. Greenhouse gas emissions from coastal freshwater wetlands in Veracruz Mexico: Effect of plant community and seasonal dynamics. *Atmospheric Environment* 107:107-117.
- Mitsch, W. J. and J. Gosselink. 2007. *Wetlands*. 4th ed. John Wiley and Sons Inc. Nueva York 581 p.
- Moreno-Casasola, P., M. E. Hernández and A. Campos. 2017. Hydrology, soil carbon sequestration and water retention along a coastal wetland gradient in Alvarado Lagoon system, Veracruz Mexico. *Journal of Coastal Research* 77:104-115.
- Rojas-Oropeza, M., A. Ponce-Mendoza y N. Cabirol. 2016. Emisión de gases de efecto invernadero y uso de suelo en lagunas de Chastoc (Emiliano Zapata, Tabasco). pp. 267-279. En: Paz, F. y R. Torres (eds.) *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México.
- Salazar-Landero, A. 2013. Secuestro de Carbono en selvas y potreros inundables en las localidades de la Mancha y Jamapa, Veracruz. Tesis de Ingeniero Forestal. Facultad de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Zacapoaxtla.
- Vázquez-González, C., P. Moreno-Casasola, J. L. Fermán-Almada, M. E. Hernández, A. Campos and I. Espejel. 2017. Mangrove and freshwater wetland conservation through carbon offsets: a cost benefit analysis in the Alvarado Lagoon System Mexico. *Environmental Management* 59:274-290.
- Whiting, J. G. and J. P. Chanton. 2001. Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration. *Tellus* 53:521-528.