



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD
ECOLOGÍA

**Almacén de carbono en un humedal continental del estado de
Michoacán, México**

TESIS

(POR ARTÍCULO CIENTÍFICO)

**Almacén de carbono en un humedal continental del estado de
Michoacán, México**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

SALLY SUSANA PAREDES GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. ROBERTO ANTONIO LINDIG CISNEROS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

COMITÉ TUTOR: DRA. PATRICIA MORENO CASASOLA

RED DE ECOLOGÍA FUNCIONAL, INSTITUTO DE ECOLOGÍA A.C

DR. ERICK DE LA BARRERA MONTPELLIER

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

MORELIA, MICHOACÁN. JULIO, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD
ECOLOGÍA

**Almacén de carbono en un humedal continental del estado de
Michoacán, México**

TESIS

(POR ARTÍCULO CIENTÍFICO)

**Almacén de carbono en un humedal continental del estado de
Michoacán, México**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

SALLY SUSANA PAREDES GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. ROBERTO ANTONIO LINDIG CISNEROS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

COMITÉ TUTOR: DRA. PATRICIA MORENO CASASOLA

RED DE ECOLOGÍA FUNCIONAL, INSTITUTO DE ECOLOGÍA A.C

DR. ERICK DE LA BARRERA MONTPELLIER

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

MORELIA, MICHOACÁN. JULIO, 2019

OFICIO CPCB/719/2019

Asunto: Oficio de Jurado para Examen de Grado.

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar, UNAM308136142
Presente

Por medio de la presente me permito informar a usted, que el Subcomité de Ecología y Manejo Integral de Ecosistemas del Posgrado en Ciencias Biológicas, en su sesión ordinaria del día **13 de mayo de 2019**, aprobó el siguiente jurado para la presentación del examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (ECOLOGÍA)**, a la alumna **PAREDES GARCÍA SALLY SUSANA**, con número de cuenta **308136142**, por la modalidad de graduación de tesis por artículo científico titulado: **Almacén de carbono en un humedal continental del estado de Michoacán, México**, que es producto del proyecto realizado en la maestría que lleva por título, **"Almacén de carbono en un humedal continental del estado de Michoacán"**, ambos realizados bajo la dirección del Dr. Roberto Antonio Lindig Cisneros, quedando integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dr. Felipe Francisco García Oliva
Vocal: Dr. Carlos Antonio Anaya Merchant
Secretario: Dr. Erick de la Barrera Montpellier
Suplente: Dr. Fermín Pascual Ramírez
Suplente: Dra. Patricia Moreno Casasola Barceló.

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., a 13 de junio de 2019

DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA
COORDINADOR DEL PROGRAMA



AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Agradezco al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por su apoyo académico y administrativo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el otorgamiento de la beca para el financiamiento de mis estudios de Posgrado.

A mi asesor el Dr. Roberto Lindig Cisneros, a los miembros de mi comité la Dra. Patricia Moreno Casasola y el Dr. Erick de la Barrera por la confianza, asesoramiento y apoyo para la realización de este proyecto. A los miembros del jurado, el Dr. Felipe García Oliva, el Dr. Carlos Anaya Merchant y el Dr. Fermín Pascual Ramírez por sus valiosa revisión y comentarios.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mi familia, mi madre, mi padre por su apoyo y cariño, a mi hermanito Carlo por tu cariño incondicional, eres lo mejor que me pudo pasar.

A mis amigos entrañables, Mina, Jorge, Diana, Pita y Omar por su apoyo, cariño, consejos, risas, lágrimas y muchos momentos compartidos. A Karlita y Deysi por su amistad y darme asilo. Los llevo siempre en mi corazón.

A Alex, mi amigo y compañero, por su apoyo y cariño incondicional.

A mis compañeras del laboratorio Verónica y Marina por su apoyo en campo y en laboratorio.

Índice

Resumen en español	1
Abstract	2
1. Introducción general	3
1.1 <i>Características de los humedales</i>	3
1.2 <i>Tipos de humedales</i>	3
1.3 <i>Hidrología de los humedales</i>	4
1.4 <i>Consecuencias de los suelos inundados</i>	5
1.5 <i>Carbono, descomposición y almacenes de C</i>	6
2. Almacén de carbono en un humedal continental del estado de Michoacán, México	1
2.1 Resumen	2
2.2 Introducción	4
2.3 Métodos	7
2.3.1 <i>Área de estudio</i>	9
2.3.2 <i>Muestreo en campo</i>	9
2.3.3 <i>Análisis de laboratorio</i>	18
2.3.4.1 <i>Almacén de carbono en sustrato</i>	18
2.3.4.2 <i>Carbono orgánico en biomasa aérea</i>	20
2.3.5 <i>Imágenes satelitales</i>	20
2.4 Resultados	21
2.5 Discusión	27
2.6 Conclusiones	32
2.7 Agradecimientos	33
2.8 Referencias	34
3. Discusión general y conclusiones	40
4. Referencias	43

Indice de cuadros y figuras

Figura 1. a) Humedal mejor conservado al oriente del Lago Cuitzeo, b) se encuentra dividido en tres porciones, por la carretera Federal 43 y la autopista Morelia, Salamanca y un bordo de 2,500 ha para uso agropecuario; c) el lago se encuentra en mayor proporción en Michoacán, pero también abarca un área menor de Guanajuato, México.	27
Figura 2. Área total y área dañada por incendios del humedal este del Lago Cuitzeo desde el año 2003 hasta 2017, Michoacán de Ocampo.....	30
Figura 3. a) Área incendiada de 186 ha en octubre de 2010 y b) área abarcada por <i>P. australis</i> en noviembre de 2017.	31
Figura 3. Descripción morfológica del perfil de suelo del humedal	33
Cuadro 1. Densidad aparente, concentración de carbono, materia orgánica del sustrato y área del humedal.	34
Cuadro 2. Promedio y desviación estándar de la biomasa aérea y estimación de carbono almacenado en la biomasa de cada una de las especies dominantes.....	35

Resumen en español

Los humedales son ecosistemas intermedios entre el medio terrestre y el medio acuático, distinguidos por suelos saturados de agua dulce o salobre, que propicia la aparición y dominancia de procesos anaerobios y biota conformada principalmente por plantas vasculares con adaptaciones al medio como las macrófitas. En México, el lago Cuitzeo es el segundo más grande por superficie del país con humedales asociados en diferentes grados de conservación. En la periferia del lago se presentan diferentes tipos de disturbios provocados por actividades humanas como el cambio de uso de suelo e incendios que pueden alterar su conservación y funcionamiento. El objetivo de este trabajo fue caracterizar el humedal en mejor estado de conservación en cuanto a su dinámica espacial, su estructura vegetal y cantidad de carbono que almacena en la biomasa aérea y subterránea. Los resultados muestran que la superficie del humedal se conforma de un sustrato flotante de materia orgánica acumulada en diferentes grados de descomposición, con cuatro especies vegetales dominantes, *Typha dominguensis*, *Typha latifolia*, *Schoenoplectus americanus* y *Phragmites australis*. Se estimó la biomasa vegetal aérea de $173.1 \pm 61.1 \text{ kg/ha}^{-1}$, que almacena $70.4 \pm 25.4 \text{ kg-C ha}^{-1}$, y el sustrato del humedal contiene $168 \pm 10 \text{ Mg C ha}^{-1}$. *P. australis* ha aumentado su superficie casi un 10 % del área total del humedal desde 2010 a 2017 y se identificaron dos incendios severos en diferentes años, el más grave en 2016 que cubrió 242 ha de 535 ha pertenecientes al humedal. Por lo que es un sitio que brinda servicios ecosistémicos importantes, pero se encuentra bajo diferentes presiones que pueden alterar su grado de conservación.

Abstract

Wetlands are ecosystems intermediate between the terrestrial environment and aquatic environment, distinguished by soils saturated with fresh or brackish water, which causes the appearance and dominance of anaerobic processes and biota composed primarily of vascular plants with environmental adaptations as macrophytes. In Mexico Cuitzeo Lake is the second largest lake in the country, with associated wetlands in many different conservation levels. In the periphery there are different types of disturbances caused by human activities such as the change of land use and fires that can alter their conservation and functioning. The objective of this work was to characterize the wetland in a better conservation state in terms of its spatial dynamic, its vegetal structure and the amount of carbon it stores in aerial and underground biomass. The results show that the surface of the wetland is made up by a floating substrate of organic matter accumulated in different degrees of decomposition, with four dominant plant species, *Typha dominguensis*, *Typha latifolia*, *Schoenoplectus americanus* and *Phragmites australis*. The aerial vegetation biomass was at 173.1 ± 61.1 kg / ha-1 which stores 70.4 ± 25.4 kg-C ha-1, and the wetland substrate contains 168 ± 10 Mg C ha-1. *P australis* has increased its surface area by almost 10% of the total area of the wetland from 2010 to 2017 and two fires were identified in different years, the most serious in 2016 that covered 242 ha of 535 ha belonging to the wetland. So, it is a site that provides important ecosystem services, but is under different pressures that can alter its degree of conservation.

1. Introducción general

1.1 Características de los humedales

Durante cientos de años las culturas humanas han prosperado y progresado gracias al aprovechamiento de los recursos y bienes que los humedales proporcionan (Maltby y Barker, 2009; Keddy, 2010; Mitsch y Gosselink, 2015). Los humedales son ecosistemas intermedios entre el medio terrestre y el medio acuático. Se distinguen por tres principales características: suelos inundados, dominados por procesos anaerobios y biota conformada por plantas vasculares con adaptaciones a entornos edáficos anaerobios (Reddy y DeLaune, 2008; Keddy, 2010; Landgrave y Moreno, 2012; van der Valk, 2012; Smardon, 2014; Mitsch y Gosselink, 2015). Estas características están determinadas principalmente por la cantidad, fuente y duración de la permanencia del agua y el relieve en el que se encuentra el humedal (van der Valk, 2012).

1.2 Tipos de humedales

Con la finalidad de comprender, describir, evaluar y realizar un manejo efectivo de los humedales, se han propuesto diferentes clasificaciones que incluyen los distintos tipos de vegetación y su asociación a diversos escenarios de condiciones ambientales (Keddy, 2010). Durante la década de los 70 se organizó la Convención de Ramsar en Irán, con el objetivo de promover el uso racional y conservación de los humedales mediante la cooperación internacional (Ramsar, 2014). Con el propósito de una identificación rápida y eficiente, a partir de 1990 la Convención de Ramsar aprobó una clasificación en donde se identifican 42 tipos

de humedales agrupados en tres categorías: marinos y costeros, continentales y artificiales (Ramsar, 2012). En el caso de México, la Convención entró en vigor hasta el 4 de noviembre de 1986. Actualmente se reconocen 8,657,057 ha del territorio nacional como sitios Ramsar. Tal es el caso del Lago de Chapala, los humedales del lago de Pátzcuaro, La Mintzita, por mencionar sólo algunos en el occidente de México. Sin embargo, el lago de Cuitzeo en la misma región, a pesar de ser el segundo lago más grande de México, no cuenta con esta denominación (Ramsar, 2014).

1.3 Hidrología de los humedales

Las condiciones fisicoquímicas que distinguen a los humedales de sistemas terrestres y acuáticos están determinadas por la cantidad, fuente y duración de la permanencia del agua (Mitsch y Gosselink, 2015). Por lo tanto, la hidrología de los humedales se define por tres factores: el hidropериодо, que incluye la profundidad, duración y frecuencia con la que el suelo se inunda, la hidrodinámica, determinada por la velocidad y dirección en la que se mueve el agua, y las fuentes de procedencia del agua. Estos factores controlan no solo las características biogeoquímicas de los humedales, sino también las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la diversidad biológica, la productividad de las comunidades vegetales y la calidad del agua (Reddy y DeLaune, 2008; Keddy, 2010).

Las principales fuentes de agua provienen de la precipitación, de corrientes subterráneas o descargas, entrada de agua superficial y mareas (Reddy y DeLaune, 2008; Keddy, 2010). Por lo tanto, las fuentes de agua determinan su

composición química. Es decir, los humedales cuya fuente de agua proviene de la precipitación, contendrá una composición química diferente a los humedales alimentados por corrientes subterráneas. Esta influencia se ve reflejada en la composición vegetal y la producción primaria (van der Valk, 2012).

1.4 Consecuencias de los suelos inundados

De acuerdo con el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS por sus siglas en inglés) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica, ha denominado “suelos hídricos” a los suelos asociados a humedales (Reddy y DeLaune, 2008; Mitsch y Gosselink, 2015; Vepraskas y Craft, 2016). Estos se forman por la inundación o saturación de agua, que a su vez propicia condiciones anaerobias y reductoras que hacen más lento el proceso de descomposición de la materia orgánica, por lo que esta se deposita y acumula (Reddy y DeLaune, 2008; Vepraskas y Craft, 2016). Si el porcentaje de material orgánico es mayor a 20-35%, se constituyen suelos hídricos orgánicos, debajo de estos porcentajes se consideran suelos minerales (Reddy y DeLaune, 2008; Keddy, 2010). Dado que los suelos hídricos promueven la formación de condiciones anaerobias, la flora y fauna de estos sistemas tiene diferentes dinámicas a la de los ecosistemas terrestres. En el caso de los microorganismos, los aerobios mueren y aparecen organismos anaerobios facultativos y obligados (Reddy y DeLaune, 2008; Douterelo, et al., 2010). Por otra parte, las plantas macrófitas son los principales productores primarios y algunas poseen estructuras especializadas para sobrevivir a condiciones de inundación y sin oxígeno en el suelo como tejidos parenquimáticos con grandes espacios intercelulares llenos de

aire (aerénquima), raíces aéreas en el caso de los manglares, troncos reforzados e hinchados para cubrir una mayor superficie de área y tomar mayor O_2 , lenticelas o poros en los troncos para el intercambio gaseoso y rutas metabólicas anaerobias que no producen compuestos tóxicos (van der Valk, 2012).

1.5 Descomposición y almacenes de C

Existen diferentes tipos de macrófitas asociadas a humedales por lo que son el principal aporte de masa vegetal a los suelos de los humedales. A pesar de abarcar una superficie pequeña en el planeta, la productividad primaria de estos sistemas es casi tan alta como la de los bosques tropicales (Mitsch et al., 2013; Reddy y DeLaune, 2008). Por lo tanto, su productividad varía de acuerdo con la vegetación predominante, la fuente principal del agua, al hidroperiodo y a la hidrodinámica al controlar la dirección y la velocidad de los nutrientes y el oxígeno.

Los humedales pueden representar fuentes, flujos de carbono o almacenes como lo son la biomasa vegetal viva, materia orgánica disuelta y materia orgánica particulada. En los humedales la descomposición se ve afectada por muchos factores, entre ellos la disminución de oxígeno disuelto en los suelos saturados, ya que los microorganismos aerobios rápidamente consumen el oxígeno disponible, y los organismos facultativos deben usar otros compuestos como nitratos (NO_3), iones de hierro (Fe^{3+}), manganeso (Mn^{4+}) y sulfatos (SO_4^{2-}) entre otros como aceptores de electrones y así oxidar compuestos orgánicos para obtener energía (Richardson, 2001). Otro factor es el hidroperiodo o el tiempo que el humedal permanece saturado de agua. Experimentos sobre descomposición en los

Everglades han mostrado que durante la temporada húmeda la descomposición es mayor que durante la temporada seca (Sema et al., 2013).

Asimismo, la descomposición es más eficiente en sistemas terrestres que en sistemas saturados de agua. En estos últimos se divide en dos fases, en la aerobia y anaerobia. La fase aerobia es corta, además los compuestos más lábiles se descomponen rápido y conforme se hace más profunda la columna de agua que cubre el suelo, el oxígeno se termina, se crean condiciones anaerobias y sólo los microorganismos como bacterias anaerobias pueden hacer uso de compuestos orgánicos e inorgánicos como NO_3 , Mn^{4+} , Fe^{3+} , CO_2 y SO_4^{2-} . Cabe resaltar que la descomposición en ambientes aerobios brinda mayor energía a los microorganismos involucrados ya que en el catabolismo aerobio, del 100% de la energía obtenida a partir de glucosa, el 40% es conservada, mientras que en ambientes anaerobios en donde procesos como la fermentación y metanogénesis sólo se obtienen algunas moléculas de ATP (Reddy y DeLaune, 2008). Por lo tanto, los humedales capturan grandes cantidades de carbono en forma de materia orgánica parcialmente descompuesta, la cual se acumula constantemente en los suelos debido a la falta oxígeno (Adame et al., 2015; Nahlik y Fennessy, 2016).

Sin embargo, los humedales son susceptibles a diferentes tipos de disturbios provocados por la creciente urbanización, el cambio de uso de suelo, el desarrollo de infraestructura, la propagación de especies invasoras, el control de enfermedades asociadas a mosquitos (Brinson y Malváre, 2002; van Asselen et al., 2013), por mencionar sólo algunos, que han provocado la pérdida de más del

60% de humedales a nivel mundial (Davidson., 2014). En el caso específico de México, Landgrave y Moreno (2012) reportaron la pérdida del 62% de humedales nacionales en su evaluación cuantitativa.

Específicamente, en el lago Cuitzeo se presentan, además del pastoreo y la alteración del régimen hidrológico, otro tipo de disturbios como incendios naturales o inducidos. Aunque en humedales, el fuego es una herramienta para eliminar vegetación no deseable (Nyman and Chabreck, 1995) se propician condiciones de hipoxia (Rolletschek et al., 2000) modifican la estructura y diversidad vegetal (Martin y Kirkman 2009; Watts et al., 2012; Kotze, 2013) y la dinámica de nutrientes (Schmalzer and Hinkle 1992; Laubhan 1995; Kotze, 2013).

El objetivo de este trabajo fue caracterizar el humedal que muestra el mejor estado de conservación del Lago Cuitzeo en cuanto a su estructura vegetal, biomasa aérea, carbono almacenado y dinámica espacial. Para esto se realizó un listado de las especies vegetales presentes y se estimó el porcentaje de área ocupada por cada especie vegetal. También se estimó la cantidad de carbono aportada por comunidad vegetal en su biomasa aérea y el carbono en el sustrato. Por último, se analizaron imágenes satelitales para medir el área total del humedal, así como de la expansión de la especie invasora *Phragmites australis* y de los incendios registrados.

2. Almacén de carbono en un humedal continental del estado de Michoacán, México

Carbon pools in a continental wetland in Michoacán, Mexico

Sally S. Paredes-García¹, Patricia Moreno- Casasola³, Erick de la Barrera²,
Roberto Lindig-Cisneros^{2*}

¹Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México.
Edificio D, 1º Piso, Circuito de Posgrados, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad
de México, 04510. México

²Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad
Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro
No. 8701, Morelia, Michoacán, 58190, México

³Red de Ecología Funcional. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, 91070,
México

*autor para correspondencia: rlindig@cieco.unam.mx

Contribuciones de autor: El primer autor realizó la revisión bibliográfica,
redacción, figuras, estadística descriptiva y trabajo de campo. El segundo, tercero
y cuarto autor realizaron comentarios y revisiones al texto.

2.1 Resumen

Antecedentes: Los humedales brindan numerosos servicios ecosistémicos como la captura de carbono en la biomasa viva y el suelo. Sin embargo, en México la mayoría de los estudios se ha centrado en humedales costeros por lo que la información sobre humedales continentales aún es escasa.

Preguntas: ¿Cuánto carbono se almacena en la biomasa aérea y en el sustrato de un humedal del lago de Cuitzeo? ¿Cómo es la estructura espacial y la distribución general de las especies vegetales dominantes?

Sitio y años de estudio: Humedal en mejor estado de conservación durante los años 2017 y 2018 del lago de Cuitzeo, Michoacán, México.

Métodos: En un transecto se tomaron seis puntos de muestreo y se cosechó la biomasa aérea de un metro cuadrado, se analizó el contenido de carbono en las especies predominantes, se tomó un perfil de sustrato de 55 cm, se determinó la densidad aparente, y el carbono almacenado en el suelo del humedal. Se analizaron imágenes satelitales para conocer el área total del humedal en el periodo de 2003 a 2017, se midió el área de los incendios detectados en las imágenes, así como el área ocupada por *P. australis* desde 2010 a 2017.

Resultados: Se estimó la biomasa aérea correspondiente a $173.1 \pm 61.1 \text{ kg/ha}^{-1}$, la cual almacena $70.4 \pm 25.4 \text{ kg-C ha}^{-1}$, y el sustrato del humedal contiene $168 \pm 10 \text{ Mg C ha}^{-1}$. *P. australis* ha aumentado su superficie casi un 10 % del área total del humedal desde 2010 a 2017 y se identificaron dos incendios en diferentes años, el más grave en 2016 que cubrió 242 ha de 535 ha pertenecientes al humedal.

Conclusiones: Se concluye que este humedal tiene una alta capacidad para almacenar carbono en el sustrato. Sin embargo, existen diferentes actividades antropogénicas que lo hacen propenso a incendios y alterar su estructura vegetal al aumentar la dominancia de especies invasoras.

Palabras clave

Vegetación emergente, captura de carbono, servicios ecosistémicos.

Abstract:

Background: Wetlands provide numerous ecosystem services such as carbon capture in living biomass and soil. Nevertheless, in Mexico most of the studies have focused on coastal wetlands, so information on continental wetlands is still insufficient.

Questions: How much carbon is stored in the aerial biomass and the surface of a wetland of Cuitzeo Lake? What is the spatial structure and general distribution of the dominant plant species?

Study site and dates: Wetland in better state of conservation of Cuitzeo Lake, during the years 2017 and 2018.

Methods: In a transect, six sampling points were taken and the aerial biomass of one square meter was harvested, the carbon content in the predominant species was analyzed, a soil profile was taken, the bulk density was determined, and the carbon stored in the wetland surface. Satellite images were analyzed to know the total area in the period from 2003 to 2017 and the area of fires detected in the images was measured.

Results: It was estimated a primary production of 173.1 ± 61.1 kg / ha-1 that stores 70.4 ± 28.6 kg-C ha-1, and the total surface of the wetland contains 346,782 Mg C. *P. australis* surface has increased by almost 10 % of the total área of wetland and two fires that damage one third were identified

Conclusions: It is concluded that this wetland provides various ecosystem services so a sustainable management plan is needed.

Keywords: *floating vegetation, carbon storage, ecosystem services.*

2.2 Introducción

Los humedales son ecosistemas intermedios entre el medio terrestre y el medio acuático, que se distinguen por suelos saturados de agua dulce o salobre, suelos dominados por procesos anaerobios y biota conformada por plantas vasculares con adaptaciones a entornos edáficos anaerobios, entre las que destacan las macrófitas (Reddy y DeLaune 2008; Landgrave y Moreno 2012; van der Valk 2012; Smardon 2014). Estas características están determinadas principalmente por la cantidad, fuente y duración de la permanencia del agua (hidrología) y el relieve (geomorfología) en el que se encuentra el humedal (van der Valk 2012). La inundación o saturación de los suelos propicia condiciones anaerobias constituyendo suelos hídricos orgánicos o minerales dependiendo de su contenido de materia orgánica y mineral.

La inundación disminuye la velocidad de difusión del oxígeno y se modifican los procesos químicos y biológicos de un estado aerobio y oxidante a un estado anaerobio y reducido (Fiedler *et al.* 2007). En el caso de los microorganismos, los

aerobios mueren y aparecen organismos anaerobios facultativos y obligados (Reddy y DeLaune 2008; Douterelo *et al.* 2010) y las plantas macrófitas son los principales productores primarios y aporte de masa vegetal a los suelos de los humedales. Estas condiciones reducidas y anaerobias propician tasas bajas de descomposición debido a que la oxidación de la materia orgánica es lenta y ocasiona una acumulación en el suelo e incremento de sedimentos de los humedales. Esto los convierte en excelentes almacenes de carbono. De acuerdo con Mitsch y Gosselink (2015) se estima que los humedales a nivel mundial almacenan hasta 530 PgC, el equivalente a aproximadamente 75 % del carbono atmosférico. De los diferentes tipos de humedales, las turberas son las que mayor proporción de C almacenan con aproximadamente 89 PgC debido a la materia orgánica almacenada como turba acumulada en el suelo (Paige y Baird 2016).

Con el propósito de una identificación rápida y eficiente, a partir de 1990 la Convención de Ramsar aprobó una clasificación en donde se identifican 42 tipos de humedales agrupados en tres categorías: marino-costeros, continentales y artificiales. En el caso de México, la Convención entró en vigor hasta el 4 de noviembre de 1986. Actualmente se reconocen 8,657,057 ha del territorio nacional como sitios Ramsar. Tal es el caso del Lago de Chapala, los humedales del lago de Pátzcuaro, La Mintzita, por mencionar sólo algunos en el occidente de México. Sin embargo, el lago Cuitzeo en la misma región, a pesar de ser el segundo lago más grande de México, no cuenta con esta denominación (Ramsar, 2014).

De acuerdo con el inventario más actual realizado por Davidson y colaboradores (2018) a nivel mundial se estima una superficie correspondiente a

humedales de $12.1 \times 10^6 \text{ km}^2$ de los cuales el 92 % corresponde a humedales continentales. En México, el Inventario Nacional de Humedales (2008) reportó que cubren una superficie de $12.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ lo que corresponde a 6.54% del territorio nacional. Aunque es una superficie relativamente pequeña, la productividad primaria de estos sistemas es casi tan alta como la de los bosques tropicales (Mitsch *et al.* 2013; Reddy y DeLaune 2008). Sin embargo, los humedales son susceptibles a diferentes tipos de disturbios provocados por la creciente urbanización, el cambio de uso de suelo sobre todo para actividades agropecuarias, el desarrollo de infraestructura, la propagación de especies invasoras, el control de enfermedades asociadas a mosquitos (Brinson y Malvárez 2002; van Asselen *et al.* 2013), por mencionar sólo algunos, que han provocado la pérdida de más del 60 % de humedales a nivel mundial (Davidson. 2014). En el caso específico de México, Landgrave y Moreno-Casasola (2012) reportaron la pérdida del 62% de humedales nacionales en su evaluación cuantitativa.

Específicamente, en el lago Cuitzeo se presentan, además del pastoreo y la alteración del régimen hidrológico, otro tipo de disturbios como incendios naturales o inducidos. En humedales, el fuego es una herramienta para eliminar vegetación no deseable (Nyman y Chabreck 1995) pero propician condiciones de hipoxia (Rolletschek *et al.* 2000) modifican la estructura y diversidad vegetal (Martin y Kirkman 2009; Watts *et al.* 2012; Kotze 2013) y la dinámica de nutrientes (Schmalzer y Hinkle 1992; Laubhan 1995; Kotze 2013). La incidencia de estos disturbios se ve influida por la modificación de los patrones de drenaje como

consecuencia de la construcción de obras hidráulicas, las cuales crean canales de riego que desembocan en el humedal.

La superficie de México corresponde aproximadamente en un 17% a humedales de tipo continentales y costeros. La pérdida de más de la mitad de ellos, así como de los variables recursos y bienes que proveen remarca la importancia de su estudio y conservación (Landgrave y Moreno, 2012). El objetivo de este trabajo fue caracterizar el humedal que muestra el mejor estado de conservación del Lago Cuitzeo en cuanto a su estructura vegetal, biomasa aérea, carbono almacenado y dinámica espacial. Para esto se realizó un listado de las especies vegetales presentes y se estimó el porcentaje de área ocupada por cada especie vegetal. También se estimó la cantidad de carbono aportada por comunidad vegetal en su biomasa aérea y el carbono en el sustrato. Por último, se analizaron imágenes satelitales para medir el área total del humedal, así como de la expansión de la especie invasora *Phragmites australis* y de los incendios registrados.

2.3 Métodos

2.3.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en un humedal al oriente del lago de Cuitzeo (figura 1). El lago se encuentra ubicado a 19° 53' 15" norte y 100° 50' 20" este, a una altura de 1820 m snm, con clima templado subhúmedo con lluvias en verano Cwo y Cw1 y suelos de tipo Solonchak. Se considera el segundo lago con mayor extensión de México, con aproximadamente 420 km² y una profundidad promedio de 0.67m. El lago recibe escurrimientos superficiales de los ríos Grande de Morelia, Queréndaro y Zinapécuaro, también es alimentado por precipitación y por los manantiales que se encuentran dentro y alrededor del mismo. El lago era un cuerpo conectado, pero actualmente se encuentra fragmentado en tres porciones como consecuencia de la construcción de la carretera federal 43 y la autopista Morelia-Salamanca y la construcción de un bordo de 2,500 ha para evitar inundaciones y darle uso agropecuario que ha provocado la reducción de la porción centro-oriental del lago y el incremento y estancamiento de nutrientes por parte de aguas negras provenientes del Río Grande de Morelia (Cram *et al.* 2010). Las especies de hidrófitas emergentes predominantes pertenecen a los géneros *Typha*, *Scirpus*, *Cyperus* y *Eleocharis* (Rojas y Novelo 1995).

2.3.2 Muestreo en campo

La selección de puntos de muestreo se realizó siguiendo un transecto este-oeste de 2 km que coincide con la dirección de la carretera Atlacomulco-Morelia que define el extremo sur del humedal en el lago de Cuitzeo (Figura 1).

Aproximadamente cada trescientos metros se estableció el punto de partida y el sitio de muestreo se fijó adentrándose al humedal desde la carretera. Se identificaron puntos del humedal con diferentes grados de afectación por incendio, con un total de seis puntos. Los niveles de afectación por incendio se identificaron en diferentes grados: sin quemar si se presentaban estructuras reproductivas; poco quemado si aún permanecían estructuras vegetales aéreas, pero no estructuras reproductivas; quemado si los tallos estaban cercanos al suelo y severamente quemado si no presentaba partes aéreas. En cada punto se cosecharon dos muestras de biomasa aérea en un metro cuadrado durante el mes de junio de 2017. De cada muestra de biomasa aérea se separaron las especies vegetales y de cada especie se obtuvieron 4 muestras. De las muestras por especie se obtuvo la masa en gramos y la concentración de carbono total. También se realizó un perfil de sustrato de 55 cm hasta llegar al agua libre debajo del sustrato flotante durante el mes de enero de 2018. El perfil se dividió desde los 0 cm hasta los 55 cm cada 10 cm de dónde se obtuvieron núcleos de 1000 cm^3 con los que se determinó la densidad aparente, el porcentaje de materia orgánica y la concentración de carbono. Por último, se realizó una colecta de la vegetación presente durante el mes de mayo de 2018.

2.3.3 Análisis de laboratorio

2.3.4.1 Almacén de carbono en sustrato

Del perfil de sustrato se obtuvieron núcleos de 1000 cm³. Cada núcleo se dejó secar a temperatura ambiente para eliminar el exceso de agua y posteriormente se secó en estufa a una temperatura de 105 °C hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente los valores de densidad aparente (DA) se calcularon de la siguiente manera:

$$DAp(gcm^3) = \frac{\text{peso suelo seco}(g)}{\text{volumen del cilindro}(cm^3)}$$

El porcentaje de materia orgánica (MO) se determinó por el método de pérdida por ignición en una mufla marca Hermoscientific. Se tomaron 6 muestras de 20 g de suelo y se quemaron durante 4 horas a 550°C (Hoogsteen *et al.* 2015). La concentración de carbono (CC) fue determinada por combustión y detección coulométrica utilizando un Analizador de Carbono Total (UIC-COULOMETRICS mod. 50120; Chicago, E.U.A.) (Huffman, 1997) El almacén de carbono se estimó multiplicando la CC por la DA y el volumen del humedal:

$$\text{Almacén de Carbono} = CC\left(\frac{mg}{g}\right) * DA(gcm^3) * \text{Volumen del humedal}(m^3)$$

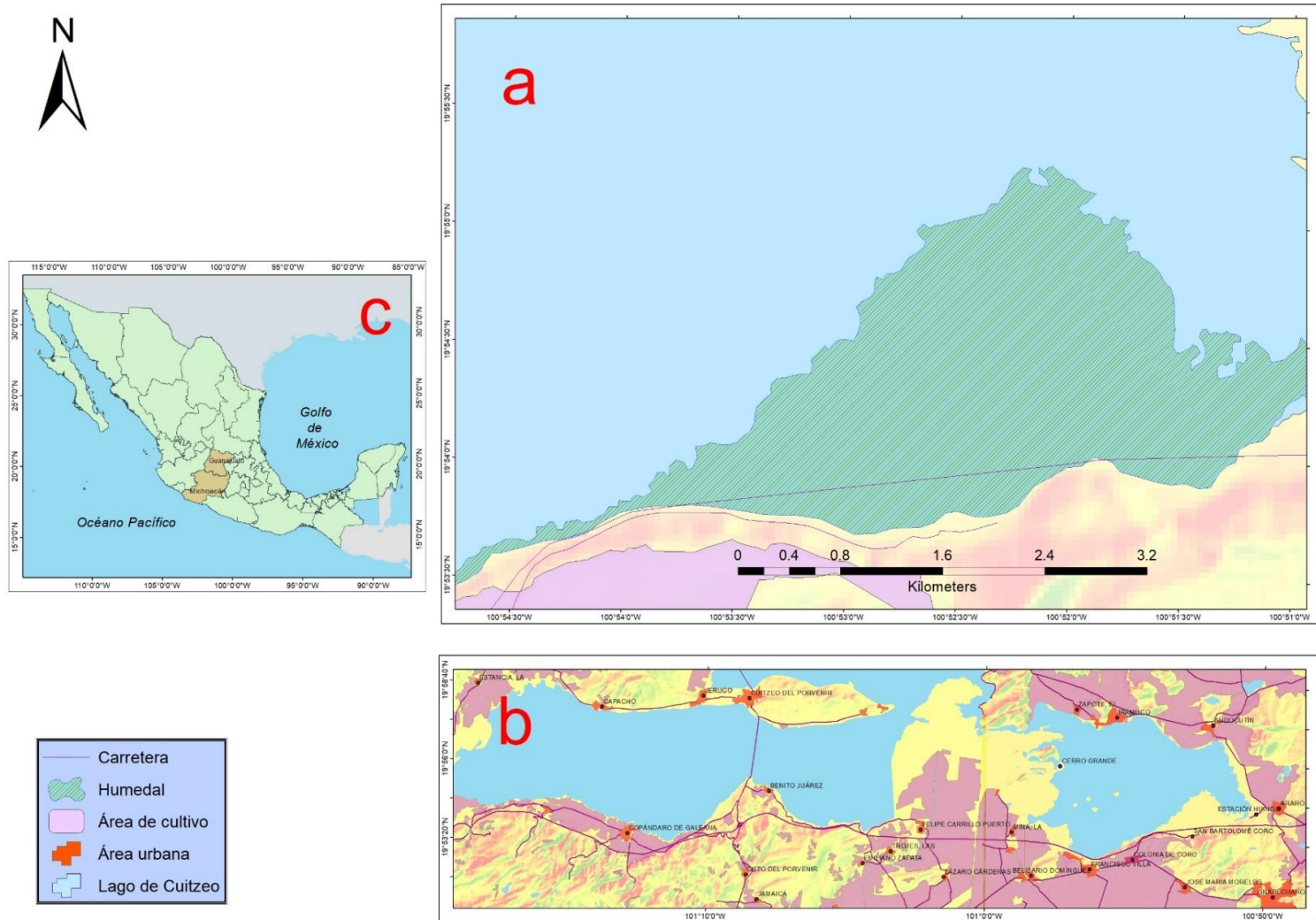


Figura 1. a) Humedal mejor conservado al oriente del Lago Cuitzeo, b) se encuentra dividido en tres porciones, por la carretera Federal 43 y la autopista Morelia, Salamanca y un bordo de 2,500 ha para uso agropecuario; c) el lago se encuentra en mayor proporción en Michoacán, pero también abarca un área menor de Guanajuato, México.

2.3.4.2 Carbono orgánico en biomasa aérea

La concentración de carbono en muestras de cada una de las especies vegetales también fue determinada por combustión y detección coulométrica (Huffman, 1997). El carbono en cada especie vegetal (C_{veg}) por ha se estimó conociendo la biomasa de cada especie en un área conocida (1 m^2) multiplicada por el área total del sitio de estudio:

$$C_{veg} = CT * Biomasa\ aérea (g) * \text{Área del humedal} (ha)$$

2.3.5 Imágenes satelitales

El registro y procesamiento de imágenes satelitales se llevó a cabo mediante fotointerpretación en el programa Google Earth Pro en el que existen registros del sitio de estudio desde 2003 hasta 2017. Se midieron polígonos del área total del humedal en dicho periodo de tiempo y polígonos áreas incendiadas que se pudieron identificar por las marcas oscuras que provocan el fuego a la vegetación, así como el humo desprendido como evidencia de fuego. Los diferentes tipos de cobertura de la vegetación del humedal se identificaron en las fotografías validando por medio de visitas de campo a través de puntos de verificación georreferenciados.

2.4 Resultados

2.4.1 Dinámica espacial

Se midió el área total del humedal desde 2003 hasta 2017 y se encontraron fluctuaciones en su área durante ese periodo. De acuerdo con el registro histórico durante el año de 2006 el área del humedal era casi un 10% menor a la registrada en noviembre de 2017. Sin embargo, el análisis a través del tiempo muestra una ligera tendencia del humedal a incrementar su superficie de 533 ha a 552 ha (figura 2). Asimismo, se identificaron ocho incendios en los nueve años que se tienen registro. En 2010 hubo un incendio que dañó 35% del área (figura 3), pero el mayor incendio registrado sucedió en 2016 cubriendo un área del 45% del humedal (figura 4-b). La fotointerpretación de las imágenes satelitales también permitió identificar que el área del humedal está cubierta en casi un 10% por *P. australis* y desde 2010 a 2017 su área se incrementó de 3 ha hasta más de 70 ha (Figura 3).

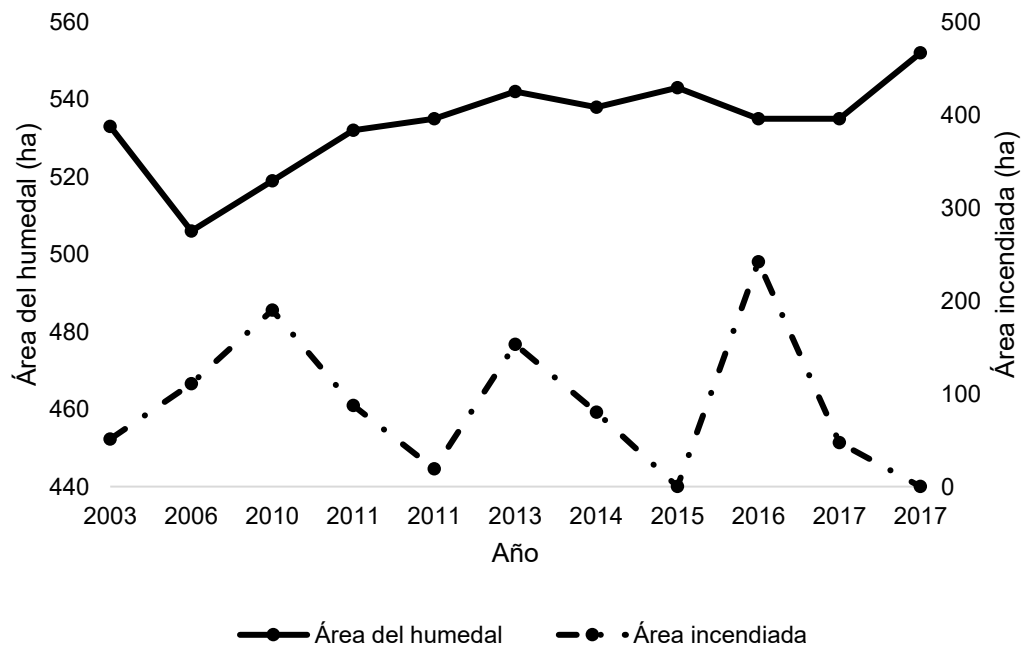


Figura 2. Área total y área dañada por incendios del humedal este del Lago Cuitzeo desde el año 2003 hasta 2017, Michoacán de Ocampo.

2.4.2 Estructura y diversidad vegetal

Se identificaron cuatro especies dominantes de hidrófitas emergentes, *Typha dominguensis* Pers., *Typha latifolia* L., *Schoenoplectus americanus* Pers., y *Phragmites australis* (Cav.) Trin & Steud., ya sea formando asociaciones o solas. Además, se identificaron tres especies con menor dominancia y formando asociaciones, una hidrófita emergente, *Hydrocotyle verticillata* Thunb. var. *Triradiata* (Rich.) y dos subacuáticas tolerantes, *Eleocharys montevidensis* Kunth. y *Juncus arcticus* Willd.

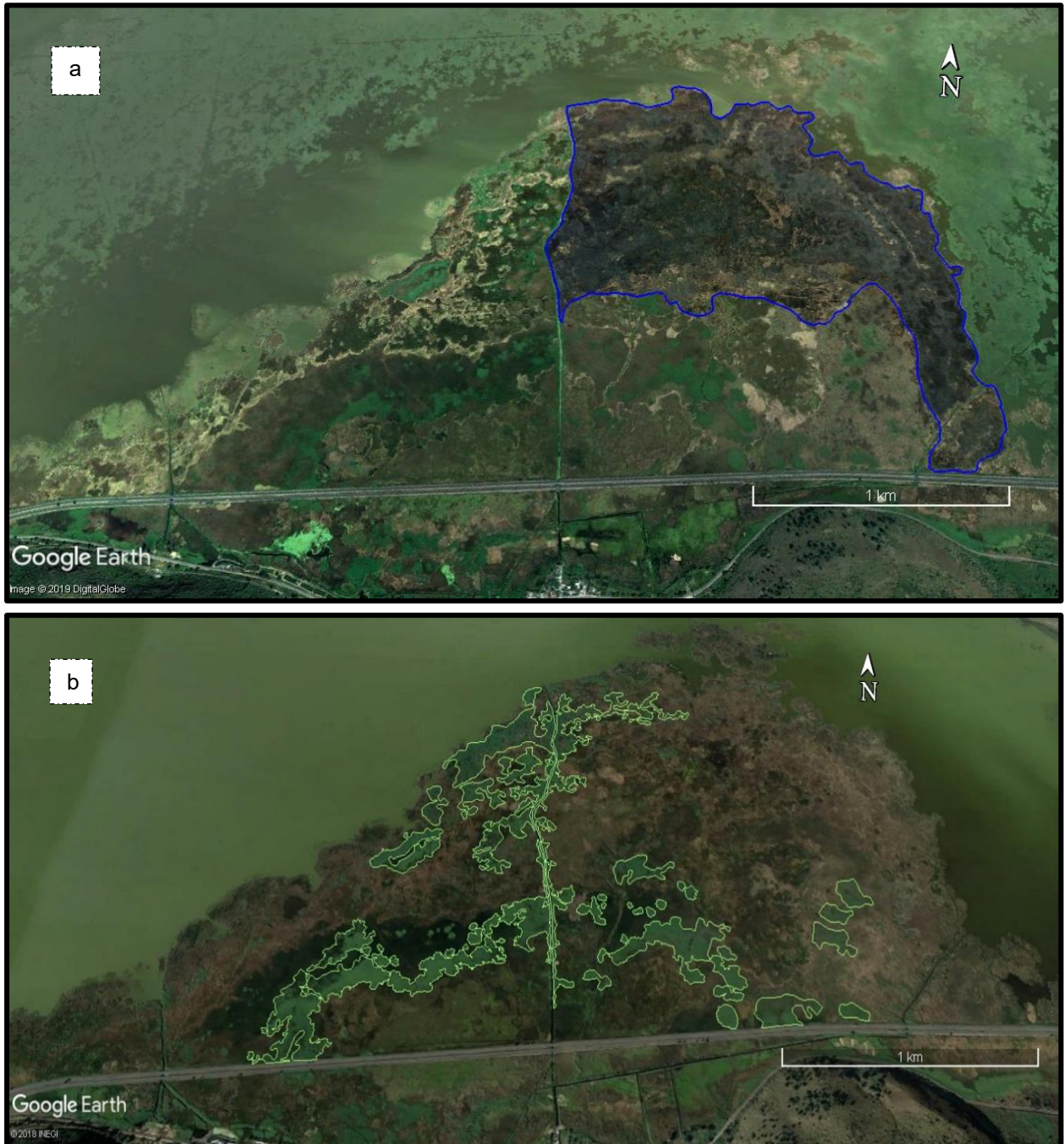
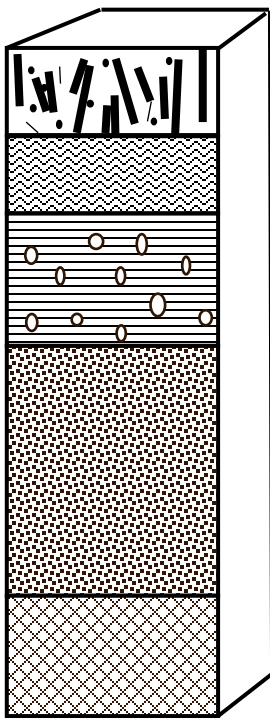


Figura 3. a) Área incendiada de 186 ha en octubre de 2010 y b) área abarcada por *P. australis* en noviembre de 2017.

2.4.3 Características del sustrato del humedal

La exploración y muestreo en el humedal del lago Cuitzeo, permitió identificar que se trata de una superficie flotante conformada por un sustrato de material orgánico, encima de una columna de agua de aproximadamente un metro de profundidad. Tal sustrato está compuesto principalmente por material orgánico en diferentes grados de descomposición, sin contacto con rocas parentales, por lo que carece de alguna porción mineral. El perfil del sustrato extraído presentaba diferentes características desde la parte más superficial (0 cm) hasta la parte más profunda (55 cm; figura 2). En los primeros 7 cm se encuentra la mayor cantidad de raíces, delgadas y poco profundas, así como restos frescos de plantas. Desde los 7-13 cm disminuyen las raíces delgadas, pero contiene una proporción alta de rizomas y la materia orgánica presenta de manera visual un grado de descomposición mayor. Desde los 23 cm hasta los últimos 55 cm se localizan raíces profundas, material orgánico con un grado de descomposición que casi impide reconocer la procedencia del material. En la zona que se encuentra en contacto con la columna de agua no presenta raíces, y presentaba una textura al tacto y a la vista lodosa (figura 3). Sobre dicho sustrato se mantienen todas las especies vegetales vivas, que promueven la formación de sustrato al depositarse continuamente.



0-7 cm. Capa con alto contenido de raíces poco profundas y fibras, con restos de vegetación viva y material vegetal con poco grado de descomposición, color pardo oscuro.

7-13 cm. Capa con pocas raíces y fibras, material vegetal con mayor grado de descomposición, color pardo oscuro.

13-23 cm. Capa con alto contenido en rizomas y fibras, material vegetal con signos de incendio, color rojizo oscuro

23-44 cm. Capa con raíces profundas y material arenoso

44-55 cm. Capa con lodo y sedimentos, sin presencia de raíces, pero con contenido de fibras.

Figura 3. Descripción morfológica del perfil de suelo del humedal

2.4.4 Almacén de carbono en el sustrato

El sustrato del humedal del lago Cuitzeo posee en promedio 96% de materia orgánica, un porcentaje muy alto que indica la constante formación de turba y la ausencia de un suelo consolidado, ello también explica la conformación de un humedal flotante. El valor promedio de densidad aparente fue de 0.13 ± 0.04 g/cm³. En promedio el contenido de carbono orgánico fue de 26 ± 0.75 kg C/m² a 50 cm de profundidad y en todo el humedal con un área de 552 ha se calcularon 92,617 Mg C equivalente a 168 Mg C/ha⁻¹.

Cuadro 1. Promedio y desviación estándar de la densidad aparente, concentración de carbono, materia orgánica del sustrato y área del humedal.

Características del humedal	
<i>Densidad Aparente</i>	0.13 ± 0.04
<i>%Materia Orgánica</i>	96 ± 1.43
<i>%C</i>	26 ± 0.75
<i>Mg C/ha⁻¹ almacenado</i>	168 ± 10
Área	
<i>Área P. australis m²</i>	714,429
<i>Área total</i>	5,515,145

2.4.5 Almacén de carbono en biomasa aérea

En promedio, la biomasa aérea producida por unidad fue de 173.1 ± 61.1 kg/ha⁻¹ en todo el humedal. La especie que tiene un mayor aporte es *P. australis* con una proporción del 43 %, seguida de *T. dominguensis* y *T. latifolia* en un 32 %, *S. americanus* con el 21 % y el resto de las especies aportan el 4 % de la biomasa aérea total. El promedio de C almacenado en la biomasa aérea fue de 70 ± 25.4 kg-C ha⁻¹ tomando en cuenta todas las especies encontradas (Cuadro 1). Para estimar un intervalo del C en la biomasa aérea considerando las especies con mayor y menor abundancia, se calculó el C almacenado considerando si el humedal estuviera dominado por una sola especie vegetal. Dado que *P. australis* es la especie con mayor C en su biomasa, su contenido por unidad corresponde

a 133.1 ± 33.2 kg-C ha¹, seguido por *T. dominguensis* con 83.5 ± 18 kg-C ha¹ y por último *S. americanus* con 55.3 ± 42.1 kg-C ha¹.

Cuadro 2. Promedio y desviación estándar de la biomasa aérea y estimación de carbono almacenado en la biomasa de cada una de las especies dominantes.

Biomasa vegetal	Biomasa aérea (g m ²)	Biomasa aérea (Kg C ha ⁻¹)	%Carbono	C almacenado (kg C ha ⁻¹)	% aportado por cada especie
<i>Phragmites australis</i>	557 ± 136	318.2 ± 75	42 ± 1.9	133.1 ± 33.2	43
<i>Typha dominguensis</i> y <i>Typha latifolia</i>	384 ± 79	212 ± 44	39 ± 1.6	83.5 ± 18	32
<i>Shoenoplectus americanus</i>	249.5 ± 191	138 ± 105	40 ± 0.5	55.3 ± 30.5	21
Spp menos dominantes	44.9 ± 37.9	25 ± 21	38 ± 4.6	9.7 ± 8.2	4
Promedio	314 ± 111	173 ± 61	40 ± 2.1	70 ± 25.4	-

2.5 Discusión

2.5.1 Vegetación flotante

La exploración y muestreo del humedal del lago Cuitzeo permitió identificar su naturaleza como un sustrato de materia orgánica en distintos grados de descomposición y vegetación viva flotante sobre una columna de agua libre. La estructura general de las islas de vegetación flotante se constituye por una capa superficial de raíces entrelazadas, seguido de una capa de turba cuya profundidad

está determinada por la profundidad de las raíces vecinas con la columna de agua libre. La interacción del agua con las raíces permite la formación de biopelículas, la liberación de enzimas extracelulares, la captación de nutrientes y metales, el aumento en las tasas de desnitrificación, la precipitación, adsorción sobre sedimentos, incorporación a la biomasa microbiana y absorción de las plantas del fósforo (Jacobs y Harrison 2014; Masters 2012; Yeh *et al.* 2015). Por su parte el lago Cuitzeo es alimentado de manera permanente por Queréndaro, Zinapécuaro y Río Grande de Morelia. Este último transporta y vierte aguas negras de la ciudad y recibe el aporte continuo de fosfatos y nitratos como producto de desechos agrícolas, urbanos, e industriales (CONAGUA, 2009). A pesar de que actualmente se cuentan con ocho plantas de tratamiento para el agua proveniente de Río Grande, la infraestructura comienza a ser deficiente. Por tanto, resulta de vital importancia la dinámica entre el microcosmos de la zona de raíces y la columna de agua debajo de ella, ya que, aunque no sustituye un tratamiento íntegro de los contaminantes, sí supone un sistema natural de filtración de dichos agentes contaminantes.

2.5.2 Dinámica espacial del humedal

La ligera expansión del humedal hacia el lago puede ser consecuencia de los afluentes y entradas por precipitación de agua, ya que la contracción y expansión de los humedales es producto de la fluctuación en el hidropereodo (Mitsch y Gosselink, 2015). La construcción de las dos autopistas que cruzan el lago, los afluentes de ríos y el vertedero de desechos de diferente naturaleza ha provocado diferentes condiciones en las tres porciones en las que el lago Cuitzeo se

encuentra dividido. La porción centro-oriente en la que se encuentra el humedal recibe un afluente controlado por las represas de la planta de saneamiento Atapane lo cual ha provocado un nivel sin fluctuaciones importantes. Sin embargo, en noviembre y diciembre de 2017 y enero de 2018 al realizar las visitas periódicas al lago fue imposible adentrarnos por el nivel alto de agua, debido a las altas y constantes e inusuales precipitaciones durante esos meses. En el humedal se encontraron tan sólo siete especies, en contraste con las 12 especies descritas por Rojas y Novelo (1995) que denominaron esa zona como la de mayor diversidad. Esto puede deberse a las problemáticas crecientes derivadas de la contaminación del agua que alimenta al lago y a los crecientes asentamientos humanos en la ribera del lago. Otro aspecto relevante encontrado en este estudio es la expansión de *P. australis* desde 2010 con un área cubierta de 3 ha a 2017 ya con un área de 50 ha. La proliferación de esta especie ha sido bien documentada tanto en humedales costeros como continentales, asegurando que la presencia de *P. australis* excluye a las especies nativas y disminuye la biodiversidad (Chambers *et al.* 1999; Minchinton *et al.* 2006). Además, su presencia es signo de algún tipo de alteración en los humedales como la adición de nutrientes al sistema por actividades antropogénicas (Chambers *et al.* 1999; Uddin y Robinson 2018). Como parte de la exploración remota de la dinámica espacial del humedal, la exploración de disturbios como los incendios puede proporcionar una idea de la resiliencia de este sistema. Aunque se desconoce el origen de dichos incendios, es decir, si son naturales o inducidos, el hecho de encontrar áreas con señales de fuego en casi todas las imágenes satelitales es evidencia de que se trata de un fenómeno constante en el sitio. El estudio realizado por Escutia-Lara y

colaboradores (2009) en el que se evalúa el efecto del fuego en la dinámica de las hidrófitas en La Mintzita, Michoacán sin duda es un importante precedente sobre el efecto del fuego en la estructura y composición del humedal, sugiriendo que tales efectos tienen un efecto positivo al reducir la cobertura de las especies dominantes como *T. dominguensis* y *S. americanus*, así como la competencia que a su vez promueve la expansión y proliferación de especies nativas y, por tanto, aumentar la diversidad. Cabe mencionar que este fenómeno se ha registrado en diversos tulares como los de Chiapas (Rincón 2014) y Veracruz (P. Moreno-Casasola, com. pers.).

2.5.3 Carbono almacenado en la superficie y la biomasa aérea

A pesar de que el humedal carece de un suelo con una porción mineral, los valores densidad aparente (0.13 g/cm^3) y materia orgánica (96%) del sustrato del humedal se asimilan a los valores reportados a humedales con suelos orgánicos. De acuerdo con Mitsch y Gosselink (2015) los suelos orgánicos presentan densidades aparentes de 0.2 a 0.3 g/cm^3 , pero aquellos humedales formados por turba pueden presentar valores más bajos debido a la alta porosidad. Es bien sabido a nivel mundial que los humedales almacenan grandes cantidades de carbono, aproximadamente 530 PgC (Mitsch y Gosselink 2015) y gran parte se encuentra en la superficie o suelos de turberas (Saragi-Sasmito *et al.* 2019). Sin embargo, de acuerdo con la revisión realizada por Hernández y Moreno-Casasola (2018), existen pocos trabajos sobre la dinámica del carbono en humedales continentales en México. Este estudio es el primero en su tipo en la región oeste del país y comprueba el potencial de los humedales continentales para almacenar

carbono principalmente en el suelo ya que ahí fue el mayor almacén de carbono en el humedal, tanto por su volumen como por la cantidad de materia orgánica depositada y poca o nula descomposición, obteniendo una cantidad considerablemente alta de C del orden de $168 \pm 10 \text{ Mg C/ha}^{-1}$, equiparable al resultado más alto reportado por Hernández y Moreno-Casasola (2018) en el suelo de selvas inundables (150 a 650 Mg C ha⁻¹). Estos resultados entran dentro del rango de C almacenado reportado en trabajos realizados en turberas tropicales al sureste de Asia con 151.6 ± 36 y ciénegas en Indonesia con $1752 \pm 401 \text{ Mg-C ha}^{-1}$ (Hergoualc'h, y Verchot 2011; Saragi-Sasmito *et al.* 2019). A diferencia del C almacenado en la superficie, la vegetación supone un almacén considerablemente pequeño, pero no por eso despreciable, ya que supone la entrada de materia orgánica que eventualmente formará parte de la turba debajo de la biomasa aérea y la permanencia de la vegetación influye en la dinámica del C en un humedal y promueve su secuestro (Bedard-Haughn *et al.* 2006). La especie con mayor proporción de biomasa fue *P. australis*, sin embargo, Brix y colaboradores (2001) señalan que la mitad de esa alta productividad vuelve a la atmósfera en forma de metano (CH₄). Asimismo, existen otros factores que pueden convertir a un humedal de almacén a fuente de C, como la temperatura del suelo (Christensen *et al.* 2003), la profundidad de la columna de agua (Moore, *et al.* 1998; Hirano *et al.* 2007) y la composición química y cantidad de la materia orgánica (Christensen *et al.* 2003). En este sentido, las múltiples problemáticas socioambientales que sufre, no sólo los asentamientos alrededor del lago, sino toda la Cuenca del lago Cuitzeo, incluyendo los incendios, repercuten en diferentes aspectos, como en el hidropериodo, composición química del agua y sedimentos del suelo y temperatura.

Buenrostro e Israde (2003) realizaron una descripción detallada de los residuos sólidos de diferente índole generados en ocho municipios colindantes con el lago Cuitzeo, y señalan que hasta ese momento no existía una gestión adecuada de los desechos, por lo que se depositaban en rellenos sanitarios que incumplían las Normas Oficiales Mexicanas, o en terrenos baldíos, por lo que existía un riesgo grande de lixiviación y contaminación del agua subterránea, cuyos cauces llegan hasta el lago. Por lo que todos estos factores determinan en qué condiciones el humedal puede actuar como un almacén o como una fuente de carbono.

2.6 Conclusiones

Pese a que ciertos sectores consideran la vegetación hidrófita como una maleza, con efectos negativos, este estudio proporciona información sobre algunos servicios que se obtienen, principalmente el almacén de carbono en la biomasa aérea y en la materia orgánica que forma el humedal. Así como la posible filtración del agua y estabilización de sedimentos debido a su naturaleza flotante. Son necesarias distintas herramientas para conocer la dinámica y origen de incendios, para tener un panorama más completo sobre la dinámica de nutrientes y la productividad para un mejor aprovechamiento por parte de las comunidades aledañas. Los resultados apuntan a la necesidad de conservar estas comunidades vegetales, incorporar su valor a las políticas públicas por los servicios ecosistémicos que proporcionan y particularmente en el caso del Lago de Cuitzeo, proponerlo como un sitio Ramsar para garantizar un plan de manejo sustentable.

2.7 Agradecimientos

Al Posgrado en Ciencias Biológicas, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca recibida por S. P-G., al Mtro. Rodrigo Velázquez-Duran y al Laboratorio de Biogeoquímica de Suelos, IIES, UNAM por los análisis de carbono. Este proyecto fue financiado por recursos institucionales del IIES-UNAM.

2.8 Referencias

- Astrálaga, M. y para las Américas, C. P. 2006. La convención Ramsar y los ecosistemas de manglar. Secretaría de la Convención Ramsar. Suiza, febrero de 2006.
- Bedard-Haughn A, Jongbloed F, Akkerman J, Uijl A, Jong E, Yates T. y Pennock D. 2006. The effects of erosional and management history on soil organic carbon stores in ephemeral wetlands of hummocky agricultural landscapes. *Geoderma* 135:296–306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.01.004>
- Brinson, M. M. y Malvárez, A. I. 2002. Temperate freshwater wetlands: types, status, and threats. *Environmental conservation* 29:115-133. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0376892902000085>
- Brix H., Sorrell B.K. y Lorenzen B. 2001. Are *Phragmites*-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases. *Aquatic Botany* 69:313–324. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(01\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(01)00145-0)
- Buenrostro, O. e Israde, I. 2003. La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del lago de Cuitzeo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 19:161-169. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37019401> (consultado el 18 de marzo de 2019).
- Cram, S., Galicia, L. y Alcántara, I. I. 2010. Atlas de la cuenca del lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y su entorno socioambiental. Instituto de Geografía-UNAM / Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. <<http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/132>> (consultado el 6 de mayo de 2017).
- Chambers, R. M., Meyerson, L. A. y Saltonstall, K. 1999. Expansion of *Phragmites australis* into tidal wetlands of North America. *Aquatic botany* 64:261-273. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(99\)00055-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00055-8).

- Christensen, T.R., Ekberg, A., Ström L., Mastepanov, M., Panikov, N., Oquist, M., Svenson B.H., Nykanen, H., Martikainen, P.J. y Oskarsson, H. 2003. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. *Geophysical Research Letters* 30:1-67. DOI: <http://doi.org/10.1029/2002GL016848>.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) y CEAC (Comisión Estatal del Agua y Gestión de Cuencas), 2009. Plan de gestión integral de los recursos naturales de la Cuenca del lago de Cuitzeo. <morelos.morelia.gob.mx/ArchivosTransp2017/Articulo35/Normatividad/fraccion/plan_gestion_ccl.pdf> (consultado el 3 de noviembre de 2018).
- Davidson, N. C. 2014. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research* 65:934-941. DOI: <https://doi.org/10.101017/MF14173>
- Davidson, N. C., Fluet-Chouinard, E., y Finlayson, C. M. 2018. Global extent and distribution of wetlands: trends and issues. *Marine and Freshwater Research* 69:620-627. DOI: <https://doi.org/10.107/MF17019>
- Douterelo, I., Goulder, R., y Lillie, M. 2010. Soil microbial community response to land-management and depth, related to the degradation of organic matter in English wetlands: Implications for the in situ preservation of archaeological remains. *Applied Soil Ecology* 44:219-227. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.12.009>
- Escutia-Lara, Y., Lara-Cabrera, S., y Lindig-Cisneros, R. A. 2009. Efecto del fuego y dinámica de las hidrófitas emergentes en el humedal de la Mintzita, Michoacán, México. *Revista mexicana de biodiversidad* 80:771-778. <www.ib.unam.mx/m/revista/pdfs/19-Escutia_et-310.pdf> (consultado el 10 de diciembre de 2018)
- Fiedler, S., Vepraskas, M. J., y Richardson, J. L. 2007. Soil redox potential: importance, field measurements, and observations. *Advances in Agronomy* 94:1-54. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)94001-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)94001-2)

- Hernández, M. E., y Barceló, P. M. C. 2018. Almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en México. *Madera y Bosques* 24. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401881>
- Hergoualc'h, K., y Verchot, L. V. 2011. Stocks and fluxes of carbon associated with land use change in Southeast Asian tropical peatlands: A review. *Global Biogeochemical Cycles* 25. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009GB003718>
- Hirano T., Segah H., Harada T., Limin S., June T., Hirata R. y Osaki, M. 2007. Carbon dioxide balance of a tropical peat swamp forest in Kalimantan, Indonesia. *Global Change Biology* 13:412–425. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01301.x>
- Hoogsteen, M. J. J., Lantinga, E. A., Bakker, E. J., Groot, J. C. J., y Tiftonell, P. A. 2015. Estimating soil organic carbon through loss on ignition: effects of ignition conditions and structural water loss. *European Journal of Soil Science* 66:320-328. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12224>
- Huffman E. N. 1997. Performance of a new automatic carbon dioxide coulometer. *Microchemical Journal* 2:567-573. DOI: [https://doi.org/10.1016/0026-265X\(77\)90128-X](https://doi.org/10.1016/0026-265X(77)90128-X)
- Jacobs, A. E., y Harrison, J. A. 2014. Effects of floating vegetation on denitrification, nitrogen retention, and greenhouse gas production in wetland microcosms. *Biogeochemistry* 119:51-66. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9947-9>
- Kotze, D. C. 2013. The effects of fire on wetland structure and functioning. *African Journal of Aquatic Science* 38:237-247. DOI: <https://doi.org/10.2989/16085914.2013.828008>
- Landgrave, R. y Moreno-Casasola, P. 2012. Evaluación cuantitativa de la pérdida de humedales en México. *Investigación ambiental Ciencia y política pública* 4. www.revista.inecc.gob.mx/article/view/121#.XKIkI5gzblU (consultado el 27 de agosto de 2017)

- Laubhan, M. K. 1995. Effects of prescribed fire on moist-soil vegetation and soil macronutrients. *Wetlands* 15:159-166. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03160669>
- Martin, K. L. y Kirkman, L. K. 2009. Management of ecological thresholds to re-establish disturbance-maintained herbaceous wetlands of the south-eastern USA. *Journal of Applied Ecology* 46:906–914. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01659.x>
- Masters, B. 2012. The ability of vegetated floating Islands to improve water quality in natural and constructed wetlands: a review. *Water Practice and Technology* 7. DOI: <https://doi.org/10.2166/wpt.2012.022>
- Minchinton, T.E., J.C. Simpson, and M.D. Bertness. 2006. Mechanisms of exclusion of native coastal marsh plants by an invasive grass. *Journal of Ecology* 94:342-354. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01099.x>
- Mitsch, W. J., Bernal, B., Nahlik, A. M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C. J., y Brix, H. 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28:583-597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>
- Mitsch, W. J., y J. Gosselink. (2015). *Wetlands* (5a ed). Nueva York: John Wiley and Sons Inc. ISBN: 978-1-118-67682-0
- Moore, T.R., Roulet, N.T. y Waddington, J.M. 1998 Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peatlands. *Climate Change* 40:229–245. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1005408719297>
- Nyman, J. A., y Chabreck, R. H. 1995. Fire in coastal marshes: history and recent concerns. In *Fire in wetlands: a management perspective*. Proceedings of the Tall Timbers Fire Ecology Conference (Vol. 19). < http://talltimbers.org/wp-content/uploads/2014/03/NymanandChabreck1995_op.pdf > (consultado el 13 de enero de 2019)

- Olmsted, I. 1993. Wetlands of Mexico. En: D.F. Whigham, D. Dykyjová y S. Hejný, (eds.) *Wetlands of the world I: inventory, ecology and management*. Handbook of vegetation science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 637- 678. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8212-4>
- Page, S. E., y Baird, A. J. 2016. Peatlands and Global Change: Response and Resilience. *Annual Review of Environment and Resources* 41:35-57. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085520>
- Ramsar. 2014. Servicios de información sobre sitios Ramsar. Recuperado de: <https://rsis.ramsar.org/es?language=es>.
- Reddy, K. R., y DeLaune, R. D. 2008. Biogeochemistry of wetlands: science and applications. CRC press. ISBN: 978-1-56670-678-0
- Rincón P. M. 2014. Bosques de zapotonales (*Pachira aquatica*) en la Reserva de la Biosfera la Encrucijada, Chiapas, México. Tesis de Maestría. Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rojas M. J., y Novelo R. A. 1995. Flora y vegetación acuáticas del lago de Cuitzeo, Michoacán, México. *Acta Botánica Mexicana* 31. DOI: <https://doi.org/10.21829/anm31.1995.733>
- Rolletschek, H., Rolletschek, A., Hartzendorf, T., y Kohl, J. G. 2000. Physiological consequences of mowing and burning of *Phragmites australis* stands for rhizome ventilation and amino acid metabolism. *Wetlands ecology and management* 8:425-433. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1026562002388>
- Smardon, R. 2014. Wetland Ecology Principles and Conservation. *Water* 6:813-817. DOI: <https://doi.org/10.3390/w6040813>
- Saragi-Sasmito, M. F., Murdiyarso, D., June, T., y Sasmito, S. D. 2019. Carbon stocks, emissions, and aboveground productivity in restored secondary tropical peat swamp forests. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 24:521-533. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9793-0>

- Semarnat [Secretaría del Medio ambiente y Recursos Naturales], Conabio [Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad]. 2008. Documento Estratégico Rector (DER)- Inventario Nacional de Humedales. Semarnat, México, DF.
<<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/CD001073.pdf>> (consultado el 13 de abril de 2017)
- Schmalzer PA, Hinkle CR. 1992. Soil dynamics following fire in *Juncus* and *Spartina* marshes. *Wetlands* 12:8–21. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03160539>
- van Asselen, S., Verburg, P. H., Vermaat, J. E., y Janse, J. 2013. Drivers of Wetland Conversion: a Global Meta-Analysis. *PLoS ONE* 8. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081292>
- Uddin, M. N., y Robinson, R. W. 2018. Can nutrient enrichment influence the invasion of *Phragmites australis*? *Science of the Total Environment* 613:1449-1459. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.131>
- van der Valk, A. 2012. The biology of freshwater wetlands. Oxford University Press. ISBN: 978-0-19-852539-4
- Watts, A.C., Kobsiar, L. N. y Snyder, J. R. 2012. Fire reinforces structure of pond cypress (*Taxodium distichum* var. *imbricarium*) domes in a wetland landscape. *Wetlands* 32:439-448. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-012-0277-9>
- Yeh, N., Yeh, P., y Chang, Y. H. 2015. Artificial floating islands for environmental improvement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47:616-622. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.090>

3. Discusión general y conclusiones

Los resultados de esta investigación arrojaron evidencia sobre los servicios ecosistémicos que brinda la vegetación circundante del lago de Cuitzeo. La exploración y muestreo del humedal en mejor estado de conservación del lago, permitió en primera instancia, identificarlo como una isla flotante creada por la constante acumulación de materia orgánica en diferentes estados de descomposición o turba. Estas formaciones se producen de manera natural en cuerpos de agua como lagos poco profundos, y han sido denominadas como “esteras flotantes” o “tembladeras” debido al temblor que se produce al caminar sobre su superficie (Mitsch y Gosselink 2000; Mallison et al., 2001; Azza et al., 2006; Moreno com. pers.). La formación de esta estructura de vegetación flotante del lago Cuitzeo puede deberse principalmente a tres factores, el oleaje o marea nula dentro del lago, los sistemas fluviales locales como las descargas diarias provenientes de Río Grande y la acumulación constante de materia orgánica y tasas bajas de descomposición (Mitsch y Gosselink 2015). Las esteras flotantes pueden tener implicaciones importantes como la filtración y remoción de agentes contaminantes como amonio, nitrato, fosfato y metales pesados ya sea a través de los tejidos de las plantas o por la interacción del medio con la biopelícula de las raíces conformada por bacterias aerobias y anaerobias (Stewart et al. 2008; Jacobs y Harrison 2014; Masters 2012; Yeh *et al.* 2015).

El análisis de las imágenes satelitales desde 2003 hasta 2017 ha mostrado fluctuaciones en la superficie del humedal con una tendencia ligera de expansión hacia el lago, probablemente por el afluente controlado y constante proveniente de

las represas de la planta de saneamiento de Atapaneo. Sin embargo, otros factores como los crecientes asentamientos humanos alrededor de la ribera, la descarga de contaminantes provenientes de Río Grande, el desarrollo de infraestructura como la carretera federal 43 y la autopista Morelia-Salamanca también pueden afectar la diversidad vegetal del sitio, ya que se encontraron tan sólo siete especies, en contraste con lo descrito por Rojas y Novelo (1995) que denominaron esa zona como la de mayor diversidad. Las imágenes satelitales también permitieron identificar un incremento en la extensión de *P. australis* desde 2010 con un área cubierta de 3 ha a 2017 ya con un área de 50 ha. La introducción de especies invasoras como *P. australis* ha sido documentada en humedales tanto costeros como continentales, asegurando que su presencia excluye a las especies nativas y disminuye la biodiversidad (Chambers *et al.* 1999; Minchinton *et al.* 2006). También se identificaron numerosos incendios de diferente extensión en la mayoría de los años que se tienen registro. Aunque se desconoce el origen de dichos incendios, es decir, si son naturales o inducidos, el hecho de encontrar áreas con señales de fuego en casi todas las imágenes satelitales es evidencia de que se trata de un fenómeno constante en el sitio.

En cuanto al almacén de carbono, este estudio es el primero en su tipo en la región oeste del país y comprueba el potencial de los humedales continentales para almacenar carbono principalmente en el suelo ya que ahí fue el mayor almacén en el humedal, tanto por su volumen como por la cantidad de materia orgánica depositada y poca o nula descomposición, obteniendo una cantidad considerablemente alta de C del orden de 628 Mg C/ha⁻¹ equiparable al resultado

más alto reportado por Hernández y Moreno-Casasola (2018) en el suelo de selvas inundables en México (150 a 650 Mg C ha⁻¹) y a trabajos realizados en turberas tropicales al sureste de Asia y ciénegas en Indonesia (Hergoualc'h, y Verchot 2011; Saragi-Sasmito *et al.* 2019). A diferencia del C almacenado en la superficie, la vegetación supone un almacén considerablemente pequeño, pero no por eso despreciable, ya que es la entrada de materia orgánica que eventualmente formará parte de la turba debajo de la biomasa aérea y la permanencia de la vegetación influye en la dinámica del C en un humedal y promueve su secuestro (Bedard-Haughn *et al.* 2006). La presencia y expansión de *P. australis* también es un indicador de disturbio en los humedales, ya que la construcción de caminos, vías férreas, zanjas o canales propician las condiciones ideales para la invasión de especies exóticas altamente competitivas y tolerantes al estrés (Arteaga *et al.* 2009; Brisson *et al.* 2010)

Aunque la vegetación hidrófita sea considerada una maleza, los resultados de este estudio apuntan a la necesidad de un plan de manejo sustentable para aprovechar los numerosos servicios ecosistémicos que provee, como el secuestro y almacén de carbono en la biomasa viva y en la materia orgánica depositada. Asimismo, son necesarias distintas herramientas para conocer la dinámica y origen de incendios, para tener un panorama más completo sobre la dinámica de nutrientes y la productividad para un mejor aprovechamiento por parte de las comunidades aledañas.

4. Referencias

- Arteaga, M. A., J. D. Delgado, R. Otto, J. M. Fernandez-Palacios, and J. R. Arevalo. 2009. How do alien plants distribute along roads on oceanic islands? A case study in Tenerife, Canary Islands. *Biol. Invas.* 11:1071–1086.
- Azza N, Denny P, Koppel JVD, Kanshme F. 2006 Floating mats: their occurrence and influence on shoreline distribution of emergent vegetation. *Freshw Biol* 51:1286– 1297.
- Adame, M. F., Santini, N. S., Tovilla, C., Vázquez-Lule, A., Castro, L. y Guevara, M. 2015. Carbon stocks and soil sequestration rates of tropical riverine wetlands. *Biogeosciences*, 12:3805-3818.
- Bedard-Haughn A, Jongbloed F, Akkerman J, Uijl A, Jong E, Yates T. y Pennock D. 2006. The effects of erosional and management history on soil organic carbon stores in ephemeral wetlands of hummocky agricultural landscapes. *Geoderma* 135:296–306
- Brisson, J., de Blois, S., y Lavoie, C. 2010. Roadside as invasion pathway for common reed (*Phragmites australis*). *Invasive Plant Science and Management*, 3: 506-514.
- Chambers, R. M., Meyerson, L. A. y Saltonstall, K. 1999. Expansion of *Phragmites australis* into tidal wetlands of North America. *Aquatic botany* 64:261-273.
- Hernández, M. E., y Barceló, P. M. C. 2018. Almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en México. *Madera y Bosques* 24.

- Hergoualc'h, K., y Verchot, L. V. 2011. Stocks and fluxes of carbon associated with land use change in Southeast Asian tropical peatlands: A review. *Global Biogeochemical Cycles* 25
- Jacobs, A. E., y Harrison, J. A. 2014. Effects of floating vegetation on denitrification, nitrogen retention, and greenhouse gas production in wetland microcosms. *Biogeochemistry* 119:51-66.
- Keddy, P. A. 2010. *Wetland ecology: principles and conservation*. Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-51940-3
- Mallison CT, Stocker RK, Cichra CE. 2001 Physical and vegetative characteristics of floating islands. *J Aquat Plant Manage* 39:107–111
- Maltby, E., y Barker, T. (Eds.). 2009. *The Wetlands Handbook, 2 Volume Set*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-632-05255-4
- Masters, B. 2012. The ability of vegetated floating Islands to improve water quality in natural and constructed wetlands: a review. *Water Practice and Technology* 7.
- Minchinton, T.E., J.C. Simpson, and M.D. Bertness. 2006. Mechanisms of exclusion of native coastal marsh plants by an invasive grass. *Journal of Ecology* 94:342-354.
- Mitsch, W. J., y J. Gosselink. 2015. *Wetlands (5a ed)*. Nueva York: John Wiley and Sons Inc. ISBN: 978-1-118-67682-0.
- Nahlik, A. M. y Fennessy, M. S. 2016. Carbon storage in US wetlands. *Nature Communications* 7:13835.

Ramsar. 2012. Definición de “humedales” y sistemas de clasificación de tipos de humedales de la Convención de Ramsar. Recuperado de:
http://archive.ramsar.org/cda/es/ramsar-documents-guidelines/main/ramsar/1-31-105_4000_2_.

Ramsar. 2014. La convención de Ramsar y su misión. Recuperado de:
<https://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-convencion-de-ramsar-y-su-mision>.

Ramsar. 2014. Servicios de información sobre sitios Ramsar. Recuperado de:
<https://rsis.ramsar.org/es?language=es>.

Rojas M. J., y Novelo R. A. 1995. Flora y vegetación acuáticas del lago de Cuitzeo, Michoacán, México. Acta Botánica Mexicana 31.

Saragi-Sasmito, M. F., Murdiyarsa, D., June, T., y Sasmito, S. D. 2019. Carbon stocks, emissions, and aboveground productivity in restored secondary tropical peat swamp forests. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 24:521-533.

Stewart FM, Mulholland T, Cunningham AB, Kania BG, Osterlund MT. 2008. Floating islands as an alternative to constructed wetlands for treatment of excess nutrients from agricultural and municipal wastes—results of laboratory-scale tests. Land Contam Reclam 16:25–33

Yeh, N., Yeh, P., y Chang, Y. H. 2015. Artificial floating islands for environmental improvement. Renewable and Sustainable Energy Reviews 47:616-622.