

## 2.5. Flujo de carbono particulado a los sedimentos de dos lagos tropicales kársticos

Rivera-Herrera Erika M.<sup>1</sup>; Alcocer Javier<sup>2,\*</sup>; Oseguera Luis A.<sup>2</sup> y Fernández Rocío<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Tlalnepantla, México.

\*Autor para correspondencia: jalcocer@unam.mx

### Resumen

Se cuantificó el flujo de carbono total particulado (CTP) y carbono orgánico particulado (COP) hacia los sedimentos de los lagos Tzisco y San José, Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas. El flujo de CTP promedio en Tzisco fue  $0.25 \pm 0.01 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el periodo 1 (estratificación temprana) y  $0.09 \pm 0.01 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el periodo 2 (estratificación bien establecida); mientras que en San José el flujo de CTP promedio fue  $0.93 \pm 0.02 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el periodo 1 y  $0.74 \pm 0.01 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el periodo 2. El flujo de COP promedio en Tzisco fue  $0.17 \pm 0.00 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el periodo 1 y  $0.09 \pm 0.01 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el periodo 2; mientras que en San José el flujo de COP promedio fue  $0.11 \pm 0.03 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el periodo 1 y  $0.43 \pm 0.01 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el periodo 2. Los flujos de San José fueron mayores a los flujos de Tzisco debido a su mayor productividad primaria resultante del proceso de eutrofización (mesotrófico) al estar ubicado en la zona de planicie donde recibe la entrada de contaminantes asociados a la actividad antrópica. Tzisco mantiene su estado oligotrófico al estar ubicado en la zona de montaña rodeado de una zona boscosa, con un reducido aporte de material hacia el cuerpo de agua.

**Palabras clave:** COP; CTP; “Lagunas de Montebello”; Chiapas; México.

### Abstract

The flux of total particulate carbon (TPC) and particulate organic carbon (POC) towards the sediments of Lakes Tzisco and San José, “Lagunas de Montebello” National Park, Chiapas, was quantified. The average TPC flux in Tzisco was  $0.25 \pm 0.01 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  in period 1 (early stratification) and  $0.09 \pm 0.01 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  in period 2 (well-developed stratification), while in San José, the average TPC flux was  $0.93 \pm 0.02 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  in period 1 and  $0.74 \pm 0.01 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  in period 2. The average POC flux in Tzisco was  $0.17 \pm 0.00 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  in period 1 and  $0.09 \pm 0.01 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  in period 2, while in San José, the average POC flux was  $0.11 \pm 0.03 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  in period 1 and  $0.43 \pm 0.01 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  in period 2. The fluxes in San José were higher than those in Tzisco due to its higher primary productivity (mesotrophic) resulting from the eutrophication process since its location in the plateau area where it receives pollutants associated with anthropic activities. Tzisco maintains its oligotrophic status as it is in the mountain area surrounded by a forested area, with a reduced contribution of material to the body of water.

**Keywords:** POC, TPC; “Lagunas de Montebello”; Chiapas, México.

### Introducción

El almacenamiento de carbono (C) en ambientes acuáticos epicontinentales ha recibido más atención desde que se evidenció su gran capacidad de depósito. En particular, los lagos se conceptualizan como recipientes de materia y energía, que a su vez guardan información de eventos procedentes de la cuenca que los rodea y la atmósfera, motivo por el cual se han propuesto como “centinelas de cambio climático” (Williamson *et al.*, 2009; Adrian *et al.*, 2009). En los lagos, la acumulación de carbono total particulado (CTP), así como de su fracción orgánica (carbono orgánico particulado, COP), cobra relevancia debido

a la gran cantidad de sedimentos y la elevada proporción de C que éstos reciben de sus cuencas de drenaje (Mendonça *et al.*, 2017).

Algunos estudios sugieren que el incremento de los flujos de C a los sedimentos lacustres, tanto autóctono como alóctono, conlleva asimismo a tasas elevadas de enterramiento de C. Adicionalmente, otros estudios a escalas local y regional han mostrado que incluso si la sedimentación o flujo de C en los lagos es a menudo bajo comparado con su emisión, éste representa un enterramiento significativo a largo plazo (Heathcote y Downing, 2011; Anderson *et al.*, 2014; Mendonça *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2019).

Los cuerpos acuáticos de las regiones tropicales han mostrado tener tasas elevadas tanto de sedimentación como de emisión de C ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) por unidad de área, lo que sugiere que su alta productividad y metabolismo -comparada con los templados- convierte a los lagos tropicales en procesadores activos de C (Mendonça *et al.*, 2017). Sin embargo, se conoce poco sobre la magnitud de los flujos de C en cuerpos acuáticos epicontinentales tropicales y cómo los procesos biogeoquímicos actúan sobre éstos, ya que la mayoría de los estudios se han realizado en lagos de latitudes templadas (Alcocer *et al.*, 2014; Maxon y Harvey, 2017). Incluso y a pesar de que se ha reconocido su importancia, la exportación de C hacia los sedimentos en ambientes tropicales ha sido pobremente estudiada y se cuenta con pocas estimaciones (Tranvik *et al.*, 2018).

Actualmente, la mayoría de los estudios con relación al balance de C en ambientes acuáticos epicontinentales se enfocan en el efecto del cambio climático y las actividades humanas en las emisiones de C, mientras que los efectos netos de estos balances dependen fuertemente del flujo de C hacia los sedimentos (Velthuis *et al.*, 2017). De esta manera, para generar un mejor entendimiento de cómo los lagos regulan el flujo de C, en este trabajo se cuantificó el flujo de CTP y COP hacia los sedimentos en dos lagos tropicales kársticos.

## Materiales y Métodos

El estudio se llevó a cabo en el Parque Nacional "Lagunas de Montebello" (PNLM), localizado al sureste del estado de Chiapas, entre los  $16^{\circ}04'$  y  $16^{\circ}10'$  latitud norte y  $91^{\circ}37'$  y  $91^{\circ}47'$  de longitud oeste. Los lagos seleccionados fueron Tziscaco y San José. El clima es C(fm), templado húmedo con lluvias todo el año (García-Amaro, 1981). La precipitación total anual es de 1,750 mm. La época con mayor precipitación ocurre a partir de mayo y hasta enero, con un total de lluvia de 1,625 mm, siendo los meses de julio y septiembre los que presentan máximos valores; mientras que la época de relativa sequía ocurre de febrero a abril, con una precipitación de 116 mm (CFE, 2012). La comunidad vegetal más importante es el bosque de coníferas (CONANP, 2007).

Para la medición de los flujos del CTP, COP, seston y clorofila a (Clor-a) se empleó una estación de trampas de sedimento KC-Denmark (sediment trap 2-tube station), con dos tubos de acrílico ( $\text{Ø}=80/74$  mm,  $L=450$  mm,  $V=1.9$  L, con una proporción  $L:\text{Ø}=6$ ). Se colocaron anclajes a un metro del fondo, a 45 m de profundidad en Tziscaco y de 14 m en San José. La recuperación de las trampas con los sedimentos se hizo durante dos periodos consecutivos: 01 de mayo a 27 de junio (periodo 1, estratificación temprana) y 27 de junio a 27 de septiembre (periodo 2, estratificación bien establecida) del 2022. Cada vez que se colocaron las trampas de sedimentos se midieron perfiles verticales metro a metro de temperatura (T) y oxígeno disuelto (OD) mediante una sonda multiparamétrica marca *Hydrolab* modelo DS5X acoplado a un sistema de captura de información modelo SVR4a. De forma adicional, se determinó la concentración inicial del CTP, COP, seston y Clor-a con la ayuda de una botella muestreadora marca UWITEC de 5L y la concentración final se midió en los sedimentos recuperados de las trampas.

Una vez recuperado el material de las trampas se filtró el mismo día de la colecta a través de filtros Whatman tipo GF/F de 13 mm de diámetro para el CTP, COP y la Clor-a; así como de 47 mm (combustionados a  $550^{\circ}\text{C}$ , 4 h) de diámetro para el seston. El CTP y COP se determinaron con un analizador elemental Carlo Erba NC2100 en la Universidad de Carolina del Norte en Wilmington;

mientras que para la determinación de la Clor-a se siguió el método 445.0 de la United States Environmental Protection Agency (EPA) (Arar y Collins, 1997). El seston se determinó por gravimetría a partir de la diferencia inicial y final del material retenido en los filtros completamente secos.

Se calculó la fracción inorgánica del carbono (CIP) de la diferencia entre el CTP y el COP. El seston se diferenció en bioseston y abioseston. El bioseston se midió como el peso perdido de la muestra después de calentar los filtros durante 4 h a una temperatura de 550 °C en una mufla marca Thermolyne modelo 48000. El abioseston se determinó de la diferencia entre el seston y el bioseston. Se llevaron a cabo análisis de varianza de un factor para determinar diferencias entre los flujos de COP, Clor-a, seston, bioseston y abioseston en los 2 periodos. El cálculo de los flujos para los diferentes componentes se hizo considerando la diferencia entre las concentración inicial y final, el diámetro interno de la trampa y el tiempo que permanecieron colocadas las trampas.

## Resultados y Discusión

### Tziscoa

Se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en los flujos de seston, CTP, COP, CIP y Clor-a entre los dos periodos en los que las trampas capturaron el material en sedimentación. El periodo 1 (mayo a junio) presentó flujos mayores con respecto al periodo 2 (junio a septiembre) (Figura 1; Cuadro 1). Lo anterior se asocia a que el periodo 1 correspondió a la estratificación temprana donde el lago está apenas estratificándose y el flujo del material de la capa de mezcla no es retenido por la termoclina, a diferencia del periodo 2, cuando el lago está bien estratificado, la termoclina se convierte en una barrera para el flujo vertical hacia el fondo (Figura 2).

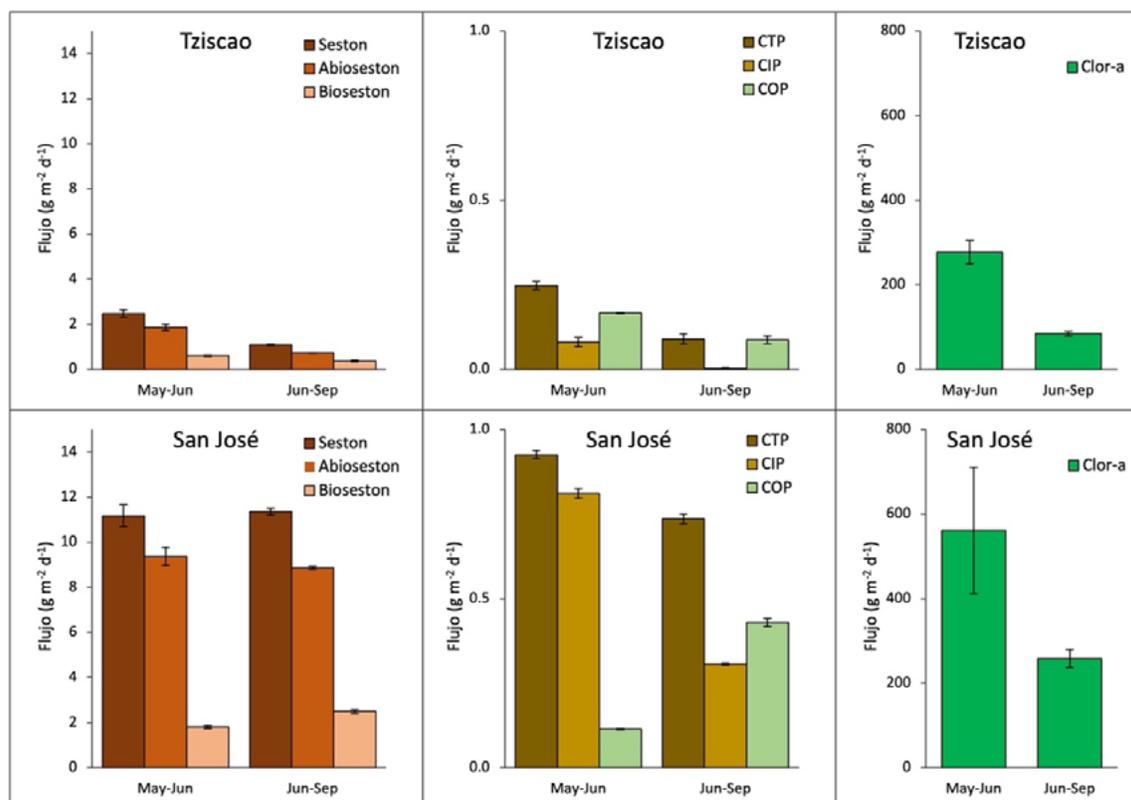


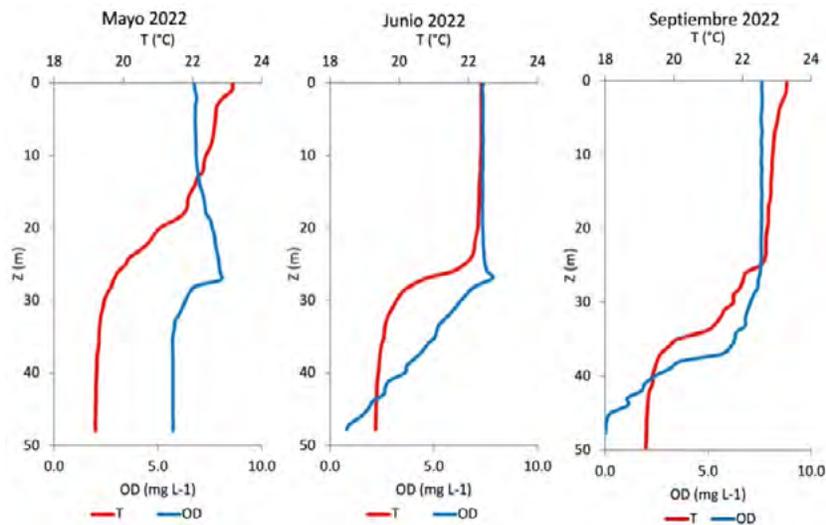
Figura 1. Flujo de seston, bioseston y abioseston (izquierda), CTP, COP y CIP (centro) y Clor-a (derecha) hacia los sedimentos en los dos periodos de muestreo en los lagos Tziscoa (arriba) y San José (abajo).

**Cuadro 1. Flujos promedio (X) con desviación estándar (D.E.) de Seston, abioseston, bioseston, CTP, COP, CIP y Clor-a en los periodos en los que se colocaron las trampas en Tzisco y San José.**

		Tzisco				San José			
		May-Jun		Jun-Sep		May-Jun		Jun-Sep	
		X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.
Seston	(g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	2.48	0.16	1.09	0.03	11.2	0.48	11.4	0.14
Abioseston	(g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	1.87	0.14	0.73	0.01	9.37	0.40	8.86	0.07
Bioseston	(g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	0.61	0.02	0.36	0.04	1.81	0.08	2.49	0.07
CTP	(g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	0.25	0.01	0.09	0.01	0.93	0.02	0.74	0.01
CIP	(g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	0.08	0.01	0.00	0.00	0.81	0.01	0.31	0.03
COP	(g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	0.17	0.00	0.09	0.01	0.11	0.03	0.43	0.01
Clor-a	(µg m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	277.0	27.8	84.7	5.4	561.3	149.3	258.1	20.9

### San José

En el periodo 1 (mayo a junio) los flujos de CTP, CIP y Clor-a fueron mayores con respecto al periodo 2 (junio a septiembre) ( $p < 0.05$ ); mientras que en el periodo 2 los flujos de bioseston y COP fueron mayores ( $p < 0.05$ ) (Figura 1; Cuadro 1). Esto puede explicarse porque en el periodo 1, probablemente existe un aporte de material inorgánico por escorrentía hacia el lago, además de un aumento en la biomasa de fitoplancton derivada de nutrientes arrastrados hacia el cuerpo de agua; mientras que en el periodo 2, contrariamente a lo esperado, el flujo de COP y bioseston no corresponde con el flujo de Clor-a, por lo que probablemente en este periodo el aporte de material orgánico sea en gran medida alóctono. Cabe mencionar que durante el mes de junio se presentó una mezcla vertical incompleta o atelomixis en San José, fenómeno común en los lagos tropicales (Figura 3).


**Figura 2. Perfiles de temperatura (T) y concentración de oxígeno disuelto (OD) en los meses de muestreo del lago Tzisco.**

Todos los flujos de los materiales particulados fueron mayores en San José con respecto a Tzisco. El flujo de CTP fue hasta 8 veces mayor, el de COP hasta 5 veces, el de CIP hasta 100 veces, el de seston hasta 10 veces, el de abioseston hasta 12 veces, el de bioseston hasta 7 veces y el de la Clor-a hasta 3 veces mayores que Tzisco (Figura 1; Cuadro 1).

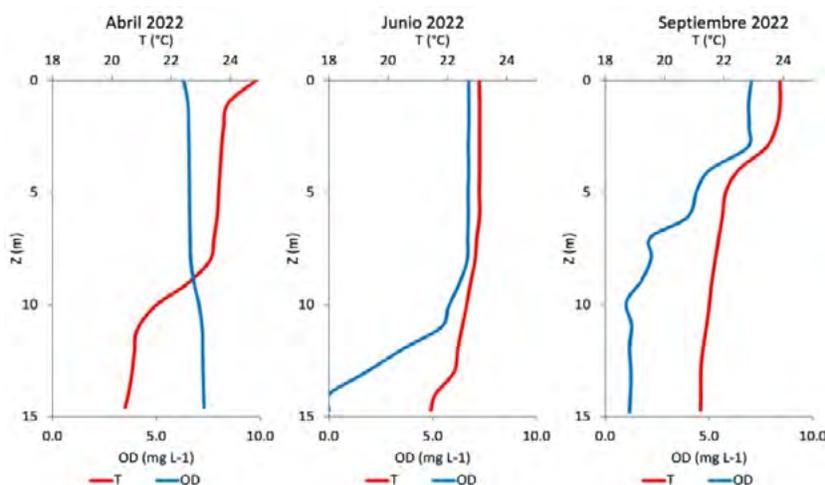


Figura 3. Perfiles de temperatura (T) y concentración de oxígeno disuelto (OD) en los meses de muestreo del lago San José.

Lo anterior puede explicarse a que la productividad primaria (PP) es mayor en San José al ser mesotrófico (Vargas *et al.*, 2023); así, el incremento de productores primarios incentivados por las concentraciones mayores de nutrientes (Alcocer *et al.*, 2023) conllevan un aumento de los flujos de Clor-a, COP y bioeston en comparación con el oligotrófico Tzisco. San José al ubicarse en la zona de planicie del PNLM recibe contaminantes y sedimentos proveniente de la cuenca del Río Grande de Comitán y que se caracteriza por presentar extensas áreas de actividad agrícola por lo que por la escorrentía puede traer consigo material erosionado, así como fertilizantes (Martínez, 2015). Lo anterior puede explicar los flujos mayores de abioeston, CTP y CIP. pero también la entrada de nutrientes que incentiven el crecimiento de los organismos fitoplanctónicos. De forma diferente, Tzisco está rodeado de una zona boscosa por lo que el material alóctono que recibe, sedimentos y materia orgánica, es en menor cantidad (Alcocer *et al.*, 2021).

Finalmente, los flujos de CTP y COP de Tzisco fueron similares a los presentados en lagos tropicales oligotróficos como Alchichica en Puebla con un flujo de CTP de 0.09 a 0.73  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$  y un flujo de COP de 0.12 a 0.77  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$  (Oseguera *et al.*, 2013; Pascoe-Orrala *et al.*, 2013) y los lagos Maggiore y Mergozzo en Italia con un flujo de COP de 0.15-0.17  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$  y 0.08-0.16  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , respectivamente (Callieri, 1997; Callieri *et al.*, 1999). Mientras que San José, presentó flujos superiores a los lagos anteriormente mencionados.

## Conclusión

Los flujos de CTP (0.74-0.93  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) y COP (0.11-0.43  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) en el lago San José fueron mayores que en el lago Tzisco (CTP: 0.10-0.25  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; COP: 0.10-0.17  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), estas diferencias se explican en gran medida a la mayor productividad primaria del lago San José además del aporte alóctono proveniente de la cuenca donde se desarrollan actividades agrícolas, ganaderas y erosión por deforestación. Tzisco, a diferencia de San José, presenta una menor productividad primaria y está rodeado de bosques que reducen la movilización de sedimentos y materia orgánica hacia el lago.

## Agradecimientos

La presente investigación fue apoyada por la UNAM a través de los proyectos DGAPA/PAPIIT IV200319 “Área Experimental de Lagos Tropicales”, DGAPA/PAPIIT IV200122 “AELT - Efectos del cambio global y climático sobre la limnología y biodiversidad acuática” y UNAM/PINCC 2021 “Cuerpos acuáticos epicontinentales: papel en la dinámica del carbono y emisiones de gases de efecto invernadero en México. Continuación” y UNAM/PINCC 2023 “Cuerpos Acuáticos Epicontinentales: Papel en la



Dinámica del Carbono y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en México. Segunda parte: Eutroficación y emisión de GEI”. Se agradece al Parque Nacional Lagunas de Montebello, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), comunidad local y Comisarios Ejidales por facilitar el acceso a los lagos. A los colegas del equipo de trabajo de la FES Iztacala, UNAM: M. Vargas, I.F. Soria, y R.R. Aucancela, por su apoyo en el trabajo de campo.

## Literatura citada

- Alcocer J., A. C. Ruiz-Fernández, E. Escobar, L. H. Pérez-Bernal, L. A. Oseguera, V. Ardiles-Gloria. 2014. Deposition, burial and sequestration of carbon in an oligotrophic, tropical lake. *J. Limnol.* 73(2):223-235.
- Alcocer, J., B. Prado, L. Mora, L.A. Oseguera and M. Caballero. 2021. Sediment characteristics of tropical, karst lakes and their relationship with watershed topography, lake morphometry, and human activities. *Journal of Paleolimnology* 66: 333-353. <https://doi.org/10.1007/s10933-021-00210-z>
- Adrian, R., C. M. O'Reilly, H. Zagaese, S. B. Baines, D. O. Hessen, W. Keller... and G. A. Weyhenmeyer. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and oceanography* 54(6part2): 2283-2297.
- Alcocer, J., F. Álvarez, M. Caballero, O. Escolero, L. Mora y B. Prado. 2023. Las causas del deterioro. En: Alcocer, J., Escolero, O. y Álvarez, F. (Eds.). Las “Lagunas de Montebello”. Joyas de la naturaleza amenazadas. FES Iztacala, UNAM. México. 81 p.
- Anderson, N. J., H. Bennion, y A. F. Lotter. 2014. Lake eutrophication and its implications for organic carbon sequestration in Europe. *Global Change Biology* 20(9): 2741-2751.
- Arar, E. J. and Collins, G. B. 1997. In vitro determination of chlorophyll a and pheophytin a in marine and freshwater algae by fluorescence (Method 445.0). *National Exposure Research Laboratory—US Environmental Protection Agency, Ohio*.
- Callieri, C. 1997. Sedimentation and aggregate dynamics in Lake Maggiore, a large deep lake in Northern Italy. *Memorie dell'Istituto italiano di Idrobiologia* 56:37-50. Callieri C., R. Bertoni, C. De Marco, M. Contesini. 1991. Settling flux and sinking velocity of seston in lago di Mergozzo (northern Italy) and influence of microbial activity on the decomposition of entrapped organic material. *Hydrobiologia* 213:155-165.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2012. Estudio para Conocer la Calidad del Agua de las Lagunas de Montebello, Chiapas. Tomo 1, Hidrometeorología. 264 p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales protegidas (CONANP). 2007. Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello.
- García-Amaro, E. 1981. En CONANP (2007), Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello.
- Heathcote, A. J. and J. A. Downing. 2012. Impacts of eutrophication on carbon burial in freshwater lakes in an intensively agricultural landscape. *Ecosystems*, 15(1): 60-70.
- Huang, C., Z. Chen, Y. Gao, Y. Luo, T. Huang, A. Zhu... and B. Yang. 2019. Enhanced mineralization of sedimentary organic carbon induced by excess carbon from phytoplankton in a eutrophic plateau lake. *Journal of Soils and Sediments* 19(5): 2613-2623.
- Martínez, A. M. 2015. Caracterización de los suelos de la cuenca del Río Grande, como soporte para entender la dinámica de contaminantes que llegan al sistema lagunar de Montebello, Chiapas. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. 139 p.
- Maxon J. Ngochera and Harvey A. Bootsma. 2018. Carbon, nitrogen and phosphorus content of seston and zooplankton in tropical Lake Malawi: Implications for zooplankton nutrient cycling. *Aquatic Ecosystem Health & Management* 21(2): 185-192
- Mendonça, R., R. A. Müller, D. Clow, C. Verpoorter, P. Raymond, L. J. Tranvik and S. Sobek. 2017. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs. *Nature communications* 8(1): 1-7.
- Oseguera-Pérez, L.A., J. Alcocer-Durand y B. Hernández-Hernández. 2013. 2.7. Variación del flujo de carbono orgánico particulado en un lago oligotrófico con dominancia de fitoplancton de talla grande. pp. 328-334. En: F. Paz Pellat, J. Wong González, M. Bazan y V. Saynes. (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013. Programa Mexicano del Carbono, Colegio de Posgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo e Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. México. 696 pp. ISBN 978-607-96490-1-2
- Pascoe-Orrala, T., J. Alcocer-Durand y L.A. Oseguera-Pérez. 2013. 2.9. Variación horizontal de los flujos de carbono particulado en un lago tropical. pp. 343-348. En: F. Paz Pellat, J. Wong González, M. Bazan y V. Saynes. (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013. Programa Mexicano del Carbono, Colegio de Posgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo e Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. México. 696 pp. ISBN 978-607-96490-1-2
- Sun, W., Q. Jiang, E. Liu, J. Chang and E. Zhang. 2018. Climate change dominates recent sedimentation and organic carbon burial in Lake Chenghai, southwest China. *Journal of Limnology* 77(3).
- Tranvik, L., J. J. Cole and Y. T. Prairie. 2018. The study of carbon in inland waters—from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle. *Limnology and oceanography Letters* 3(3): 41-48.
- Vargas-Sánchez, M., J. Alcocer, S. Sánchez-Carrillo, L.A. Oseguera, E.M. Rivera-Herrera, I. Soria-Reinoso, A. Guzmán-Arias, F. García-Oliva, M. Merino-Ibarra. 2023. Carbon Dioxide Concentration and Emissions along a Trophic Gradient in Tropical Karst Lakes. *Water* 2023, 15,13. <https://doi.org/10.3390/w15010013>
- Velthuis, M., S. Kosten, R. Aben, G. Kazanjian, S. Hilt, E. T. Peeters... and E. S. Bakker. 2018. Warming enhances sedimentation and decomposition of organic carbon in shallow macrophyte-dominated systems with zero net effect on carbon burial. *Global change biology* 24(11): 5231-5242.
- Williamson, C. E., J. E. Saros and D. W. Schindler. 2009. Sentinels of change. *Science (Washington)* 323(5916): 887-888.



# Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México. Síntesis a 2023

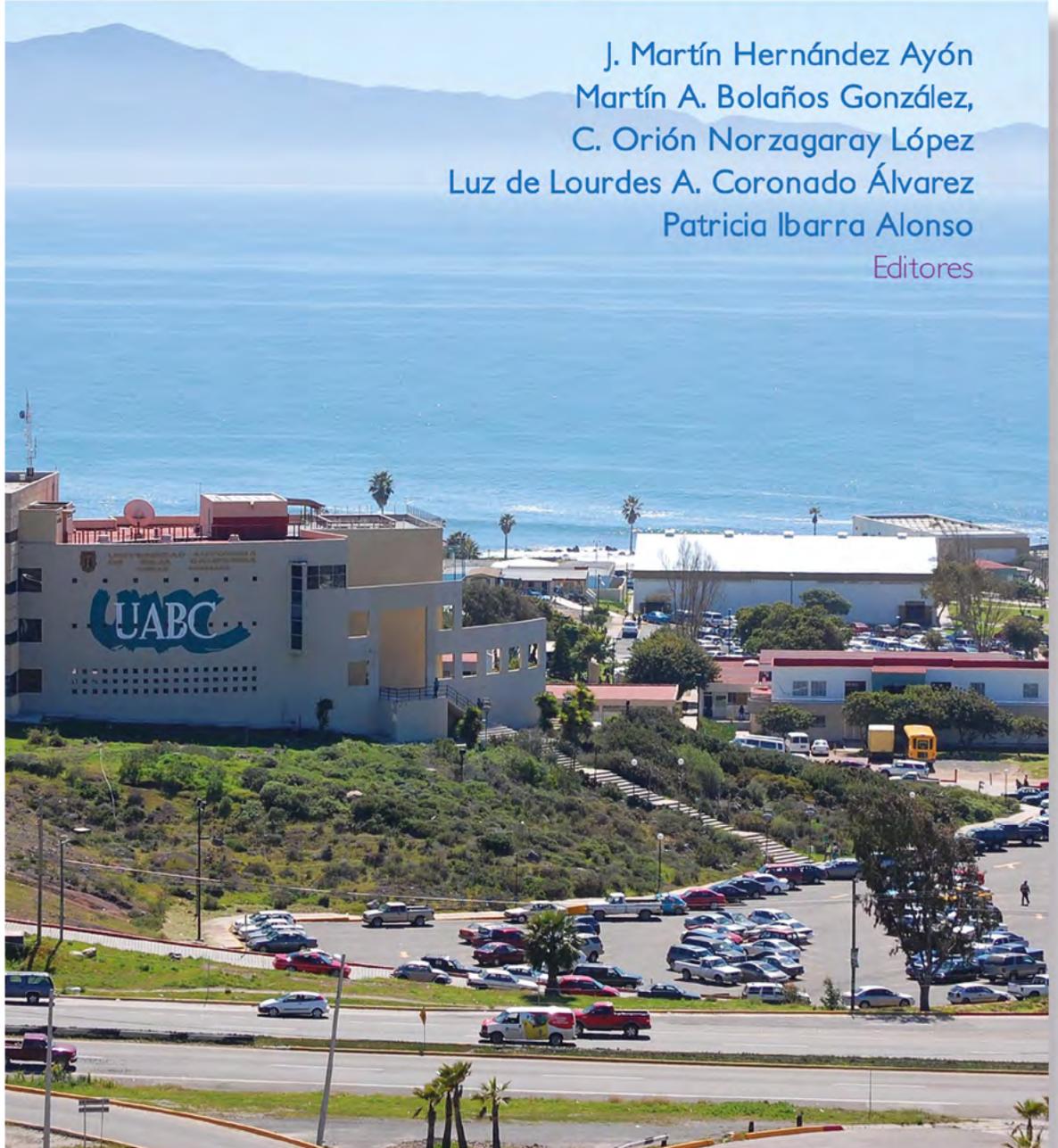
PROGRAMA MEXICANO DEL CARBONO

2023

Año 5

Número 5

J. Martín Hernández Ayón  
Martín A. Bolaños González,  
C. Orión Norzagaray López  
Luz de Lourdes A. Coronado Álvarez  
Patricia Ibarra Alonso  
Editores



**PM<sub>C</sub>**  
Programa Mexicano del Carbono  
RED TEMÁTICA DEL CONACYT



**io**  
Instituto de  
Investigaciones  
Oceanológicas

**Stanford** | México Clean  
Economy 2050

**THE OCEAN  
FOUNDATION**



**Forma correcta de citar:**

Hernández Ayón J. M.; Bolaños González M. A.; Norzagaray López C. O.; Coronado Álvarez L. e Ibarra Alonso P. (Editores). 2023. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2023. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Texcoco, Estado de México, México. ISSN 2954-4882. 326 p.

Programa Mexicano del Carbono A.C.  
Calle Chiconautla No. 8 Interior A  
Colonia Lomas de Cristo, Texcoco, Estado de México, México

---

[www.pmcarbono.org](http://www.pmcarbono.org)

Esta obra fue elaborada por el Programa Mexicano del Carbono (PMC).  
Se prohíbe la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio.

---

Diseño Gráfico: Oscar J. Velázquez R.

---

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DEL CICLO DEL CARBONO Y SUS INTERACCIONES EN MEXICO. Año 5, No. 5, enero - diciembre de 2023. Es una publicación anual editada por el Programa Mexicano del Carbono, A.C., calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México. Tel. +52 (595) 951•2182, [www.pmcarbono.org](http://www.pmcarbono.org) Editor responsable: José Martín Hernández Ayón. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-121910292200-102, ISSN 2954-4882. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: José Martín Hernández Ayón, Calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México, fecha de última modificación, diciembre de 2023.

# Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2023

---

J. Martín Hernández Ayón, Martín A. Bolaños González,  
C. Orión Norzagaray López, Luz de Lourdes A. Coronado Álvarez  
y Patricia Ibarra Alonso

---

EDITORES

Programa Mexicano del Carbono (PMC)  
Universidad Autónoma de Baja California (UABC)

Ensenada, Baja California, México

Diciembre 2023