



## 4.1. Materia orgánica disuelta cromofórica en lagos kársticos tropicales con diferente estado trófico

Soria-Reinoso Ismael<sup>1,2</sup>; Alcocer Javier<sup>2,\*</sup>; Sánchez-Carrillo Salvador<sup>3</sup>; Vargas-Sánchez Mariana<sup>4</sup>; Rivera-Herrera E. Montserrat<sup>1</sup>; Fernández Rocío<sup>2</sup>; Oseguera Luis A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 3000, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. de los Barrios 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090, Tlalnepantla, Estado de México, México.

<sup>3</sup>Departamento de Biogeoquímica y Ecología Microbiana, Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC (MNCN-CSIC), Serrano 115 Bis, E-28006 Madrid, España.

<sup>4</sup>Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, Ciudad de México, México.

\*Autor para correspondencia: jalcocer@unam.mx

### Resumen

La materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM) es crucial en el ciclo global del carbono, sin embargo, su dinámica en lagos tropicales mexicanos y su relación con la eutrofización sigue siendo poco conocida. Este estudio utilizó espectroscopía de absorción para analizar las variaciones estacionales y espaciales de la CDOM en tres lagos kársticos con diferente estado trófico (Tzisco, San José y San Lorenzo) del Parque Nacional "Lagunas de Montebello", Chiapas. Los resultados revelaron un incremento de la CDOM con la eutrofización. En Tzisco, durante la estratificación, la transparencia del agua fomenta la fotodegradación de la CDOM alóctona, promoviendo la acumulación de compuestos de bajo peso molecular y menor aromaticidad en el epilimnion. Durante la circulación, en la capa media se registró una acumulación de CDOM asociada a la actividad microbiana, y en la zona profunda compuestos refractarios de alto peso molecular debido a la resuspensión del sedimento. En lluvias, los lagos San José y San Lorenzo presentaron una CDOM alóctona y más aromática derivada de la escorrentía superficial, mientras que en secas prevalece la CDOM autóctona. San Lorenzo destacó por las elevadas concentraciones de CDOM en el epilimnion, asociada a escorrentía agrícola y biomasa fitoplanctónica.

**Palabras clave:** *CDOM; eutrofización; propiedades ópticas; Chiapas; México.*

### Abstract

Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) is crucial in the global carbon cycle, yet its dynamic in Mexican tropical lakes and its relationship with eutrophication, remains poorly understood. This study utilized absorption spectroscopy to investigate the seasonal and spatial dynamics of CDOM properties in three karst lakes of varying trophic states (Tzisco, San José, and San Lorenzo) within the "Lagunas de Montebello" National Park, Chiapas. Results revealed an increase in CDOM with eutrophication. In Tzisco, during stratification, the photodegradation of allochthonous CDOM led to the accumulation in the epilimnion of low molecular weight compounds with reduced aromaticity. While, during the circulation, an accumulation of CDOM was observed in the middle layer due to microbial activity, and high molecular weight refractory compounds in the deep zone due to sediment resuspension. During the rainy season, San José and San Lorenzo exhibited predominantly allochthonous, aromatic CDOM from surface runoff, while the dry season showcased autochthonous CDOM. San Lorenzo, stood out for the high concentrations of CDOM in the epilimnion, linked to agricultural runoff and phytoplankton biomass.

**Keywords:** *CDOM; eutrophication; optical properties; Chiapas; Mexico*

## Introducción

La materia orgánica disuelta (DOM) de los lagos consiste en una mezcla compleja de componentes de origen autóctono (p.ej., derivadas del fitoplancton y de los restos de la vegetación acuática en descomposición) y alóctono (p.ej., sustancias húmicas terrígenas) que difieren en sus características químicas según su fuente (Zhang et al., 2021). Una fracción de la DOM se caracteriza por ser ópticamente activa y absorber la luz, por lo que se denomina DOM coloreada o cromofórica (CDOM) (Li y Hur, 2017). La CDOM desempeña un papel fundamental en el ciclo y presupuesto del carbono (C) de los sistemas acuáticos debido a que su mineralización por procesos biológicos y fotoquímicos condiciona el metabolismo acuático e influye directamente en las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> hacia la atmósfera (Tranvik et al., 2009).

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM), ubicado en la región montañosa del estado de Chiapas, es un complejo hidrológico kárstico constituido por 139 cuerpos de agua (Alcocer et al., 2024). Desde hace dos décadas, los lagos ubicados en la planicie sufren un proceso de eutrofización alarmante por diversas actividades antrópicas, a diferencia de los lagos de montaña, que aún permanecen prístinos (Alcocer et al., 2018). El presente estudio planteó evaluar el efecto de la eutrofización en la concentración y tipo de CDOM comparando tres lagos del PNLM con diferente estado trófico: Tzisco (oligotrófico; TZ), San José (mesotrófico; SJ) y San Lorenzo (eutrófico; SL).

## Materiales y Métodos

El PNLM (Figura 1) presenta un clima tropical lluvioso, con una temperatura y precipitación media anual de 18.7 °C y 1960 mm, respectivamente. Se distinguen dos temporadas, una fría y seca (enero a mayo) y otra cálida y lluviosa (de junio a noviembre) (Alcocer et al., 2024).

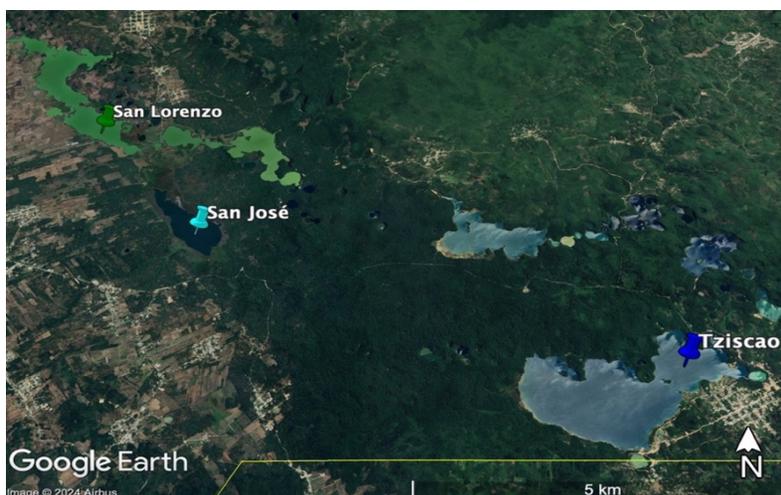


Figura 1. Lagos San Lorenzo (eutrófico), San José (mesotrófico) y Tzisco (oligotrófico), Chiapas. Imagen: Google Earth-2024.

## Metodología

Se realizaron dos muestreos, uno en noviembre 2021 (temporada cálida de lluvias, C/L) y otro en febrero 2022 (temporada fría de secas, F/S). En la porción central y más profunda de cada lago se seleccionaron tres profundidades que representaron la heterogeneidad de la columna de agua (presencia de termo y/o oxiclina). Se tomaron muestras de agua utilizando una botella UWITEC de 5 L para determinar la CDOM y el carbono orgánico disuelto (DOC); la concentración de clorofila-a (Clor-a), nutrientes y seston se describen en Vargas-Sánchez et al. (2023a).

Para la medición del DOC se filtraron 60 ml de agua a través de filtros Whatman GF/F (0.7  $\mu\text{m}$ ) previamente calcinados. Las muestras se fijaron con  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (40%) y se almacenaron en frascos ámbar. El DOC se midió en un Analizador TOC Shimadzu.

Las muestras por duplicado para el análisis de CDOM (40 ml) se filtraron sucesivamente por filtros pre-combustionados Whatman GF/F (0.7  $\mu\text{m}$ ) y por filtros Millipore (0.22  $\mu\text{m}$ ). Las muestras se almacenaron en oscuridad y frío (4  $^\circ\text{C}$ ) en frascos ámbar para evitar reacciones microbianas y de fotooxidación (Helms et al., 2008). Los espectros de absorbancia (A) UV-Vis entre 200 nm y 800 nm se realizaron utilizando un espectrofotómetro de doble haz (Perkin Elmer, Lambda-35) con cubetas de cuarzo (L: 1 cm) y agua ultrapura Milli-Q como blanco. Se realizó la corrección de la línea base instrumental (Helms et al., 2008) y se obtuvieron los coeficientes de absorción neperianos  $a_{\text{CDOM}}$  ( $\text{m}^{-1}$ ):

$$a_{\text{CDOM}} = 2.303 * A/L \quad (1)$$

Las pendientes espectrales  $S_{275-295}$  y  $S_{350-400}$  se calcularon mediante una regresión lineal de los  $a_{\text{CDOM}}$  del rango de longitud de onda transformados con el logaritmo natural y se expresaron como número positivo ( $\mu\text{m}^{-1}$ ). El coeficiente de pendiente espectral  $S_R$  se calculó como  $S_{275-295}$  dividido por  $S_{350-400}$  y el cociente  $E_2/E_3$  es la relación de  $a_{250}/a_{365}$  (M) (Helms et al., 2008). Finalmente, se calculó el  $\text{SUVA}_{254}$ , dividiendo la A de 254 nm por la concentración de DOC (Weishaar et al., 2003).

Las diferencias temporales entre lagos se determinaron mediante un análisis factorial de varianza (lago x temporada); del mismo modo, se realizó un ANOVA para verificar las diferencias de las variables de CDOM en la columna de agua. Se realizó la prueba de Shapiro-Wilk y el test de Levene para corroborar la normalidad y homocedasticidad de varianzas utilizando el programa SigmaPlot V14.0.

## Resultados y Discusión

Durante la temporada C/L, los tres lagos presentaron estratificación térmica con hipolimnion anóxico; de forma diferente, en la temporada F/S, TZ y SJ estaban circulando y la columna de agua se encontró completamente oxigenada, a diferencia de SL que mantuvo anoxia debajo de los 8 m. La fisicoquímica de los lagos se detalla en Vargas-Sánchez et al. (2023a).

### *Variación de CDOM según el nivel trófico*

La concentración y propiedades de la CDOM presentaron amplios rangos de variación en función del estado trófico, temporada y profundidad (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Caracterización de la CDOM de los lagos durante las épocas cálida/lluvias (C/L) y fría/seca (F/S).**

Época	Lago	$a_{254}$		M		$S_{275-295}$	$S_R$	$\text{SUVA}_{254}$
		X $\pm$ DE	rango	X $\pm$ DE	rango	X $\pm$ DE	X $\pm$ DE	X $\pm$ DE
C/L	TZ	6.48 $\pm$ 0.34	5.94-6.94	31.59 $\pm$ 6.97	24.39-42.38	30.83 $\pm$ 2.46	1.58 $\pm$ 0.49	2.31 $\pm$ 0.21
	SJ	17.43 $\pm$ 0.25	17.18-17.81	9.97 $\pm$ 0.31	9.55-10.41	21.28 $\pm$ 0.39	0.98 $\pm$ 0.04	2.78 $\pm$ 0.20
	SL	33.56 $\pm$ 3.54	30.25-38.29	7.77 $\pm$ 1.54	6.26-9.66	18.55 $\pm$ 1.51	0.95 $\pm$ 0.05	3.00 $\pm$ 0.29
F/S	TZ	4.81 $\pm$ 1.84	2.86-7.53	19.39 $\pm$ 10.6	5.99-36.83	23.37 $\pm$ 5.93	1.75 $\pm$ 0.48	1.24 $\pm$ 0.37
	SJ	14.58 $\pm$ 0.96	13.47-16.37	10.65 $\pm$ 1.32	8.52-12.71	22.27 $\pm$ 1.14	1.08 $\pm$ 0.12	2.13 $\pm$ 0.22
	SL	26.19 $\pm$ 2.03	23.65-29.05	8.89 $\pm$ 1.87	6.74-11.71	20.74 $\pm$ 1.53	1.04 $\pm$ 0.08	1.04 $\pm$ 0.67

X: promedio, DE: desviación estándar.  $a_{254}$  [ $\text{m}^{-1}$ ];  $S_{275-295}$  [ $\mu\text{m}^{-1}$ ];  $\text{SUVA}_{254}$  [ $\text{L mg}^{-1} \text{m}^{-1}$ ]; M y  $S_R$  son adimensionales.

El  $a_{CDOM}$  a 254 nm ( $a_{254}$ ), indicador del grado de eutrofización (Zhang et al., 2018), varió entre 2.86 y 38.29  $m^{-1}$ , con una tendencia creciente significativa ( $p < 0.001$ ) desde el lago oligotrófico Tz ( $5.56 \pm 1.59 m^{-1}$ ), al mesotrófico SJ ( $16.00 \pm 1.60 m^{-1}$ ), hasta el eutrófico SL ( $30.21 \pm 4.73 m^{-1}$ ) (Figura 2a). Este patrón coincide con estudios previos (Shang et al., 2019; Zhang et al., 2018) que relacionan el aumento del  $a_{254}$  con mayores niveles tróficos debido a la acumulación de nutrientes que promueven el crecimiento de fitoplancton y la producción de DOM en lagos eutróficos. Los valores de  $a_{254}$  fueron diferentes entre temporadas y entre lagos (interacción;  $F = 13.8$ ;  $p < 0.0001$ ), siendo mayores durante la temporada C/L en SJ y SL ( $p < 0.01$ ). Tz no mostró diferencias temporales de  $a_{254}$  ( $p > 0.05$ ) atribuibles a la baja variabilidad estacional de Clor-a y transparencia ( $Z_{DS}$ ) (Vargas-Sánchez et al., 2023b).

Según la clasificación del estado trófico basada en el  $a_{254}$  (Zhang et al., 2018), se categoriza a Tz como mesotrófico ( $4 < a_{254} < 10$ ), a SJ como eutrófico moderado ( $15 < a_{254} < 23$ ) y ligero ( $10 < a_{254} < 15$ ) según la temporada, y a SL como hipereutrófico ( $a_{254} > 23$ ) en ambas temporadas. Lo anterior coincide con la alta concentración de Clor-a registrada en SL, hasta 80 y 50 veces mayor que Tz y SJ, respectivamente (Vargas-Sánchez et al., 2023b). Esto sugiere que la CDOM en los lagos de montaña del PNLM ya refleja un claro impacto asociado al incremento de su nivel trófico, tal como mencionan Alcocer et al. (2024).

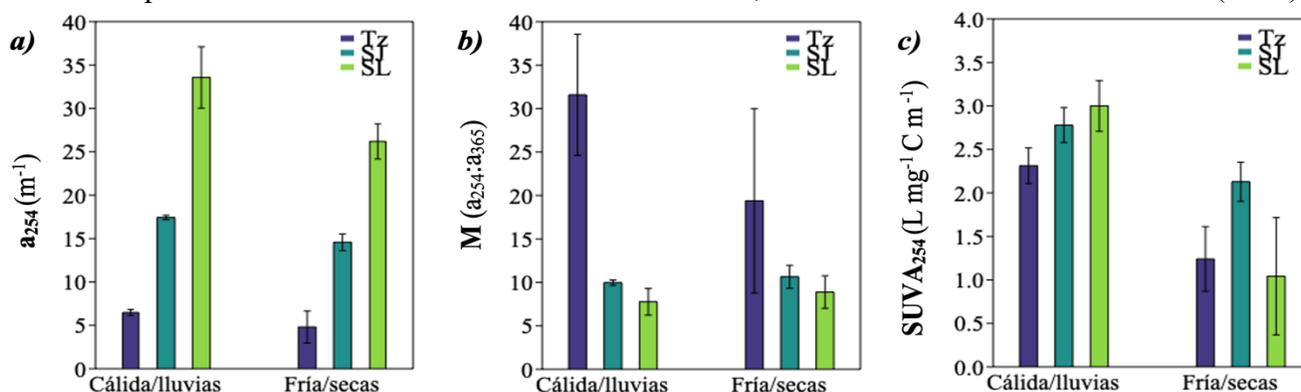


Figura 2. Gráfico de barras del promedio ( $\pm$ d.e) de la (a) absorción de CDOM a 254 nm ( $a_{254}$ ), (b) peso molecular (M) y (c) absorbancia UV específica a 254 nm ( $SUVA_{254}$ ) de los lagos Tzisco, San José y San Lorenzo en ambas temporadas.

Las propiedades ópticas como M,  $S_{275-295}$ ,  $S_R$  y  $SUVA_{254}$  son indicadores de la composición y fuentes del DOM (Li y Hur, 2017). M disminuyó con el aumento del nivel trófico (Cuadro 1; Figura 2b), con diferencias significativas entre lagos ( $F = 50.6$ ;  $p < 0.001$ ), pero no entre temporadas ( $p > 0.05$ ), salvo en Tz, donde M fue mayor en la temporada C/L (*post hoc de Tukey*;  $p < 0.001$ ; Figura 2b).  $S_{275-295}$  y  $S_R$  también disminuyeron con el nivel trófico, sin variación temporal significativa (Cuadro 1). Sin embargo,  $S_R$  en SJ y SL no fueron significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ).  $SUVA_{254}$  mostró diferencias significativas entre temporadas y lagos según el estado trófico (interacción;  $F = 19.6$ ;  $p < 0.0001$ ; Figura 2c).

M y  $S_{275-295}$  disminuyeron con el nivel trófico, contrario que  $SUVA_{254}$ , indicando que SJ y SL tienen una DOM de alto PM y más aromática que Tz. Lo anterior sugiere que los lagos de montaña del PNLM, oligotróficos y transparentes (Alcocer et al., 2024), tienen menos CDOM que los de planicie y está dominada por compuestos autóctonos ( $S_R > 1$ ) de bajo PM ( $< 1000$  Da) y menor aromaticidad ( $< SUVA_{254}$ ). La alta transparencia de Tz ( $Z_{DS}$ : 7 m) favorece la penetración de la radiación solar y la oxidación fotoquímica del DOM ( $> S_{275-295}$ ), acumulando compuestos de bajo PM (An et al., 2023). Así, se estaría procesando CDOM terrestre, más susceptible a la fotodegradación (Catalán et al., 2013) y acumulando CDOM de origen autóctono, más biolábil y de materiales alifáticos (Cory et al., 2014). Durante la temporada C/L, los lagos de planicie presentan mayor DOM alóctona ( $S_R < 1$ ) de alto PM ( $> 1000$  Da) y más aromática ( $> SUVA_{254}$ ), asociado a la escorrentía agrícola y aportes de la cuenca del río Grande de Comitán (SL) y a la descomposición de los macrófitos del litoral (SJ). En la temporada F/S, la CDOM en SL es más autóctona ( $S_R > 1$ ), menos aromática ( $< SUVA_{254}$ ) y biolábil, producto de la elevada producción primaria y alta concentración de Clor-a (Vargas-Sánchez et al., 2023a).

### Variación vertical de CDOM en la columna de agua

Durante la estratificación térmica, el intercambio vertical disminuye y aumenta el tiempo de residencia del agua, generando diferentes etapas de degradación de la DOM según la profundidad. Sin embargo, la DOM se estratifica independientemente de la estratificación térmica debido a la fotodegradación (Wei *et al.*, 2024). En lagos oligotróficos, la oxidación fotoquímica procesa del 70 al 95% del DOC total (Cory *et al.*, 2014). En Tz, durante la temporada C/L, el menor valor de  $a_{254}$  se registró en el epilimnion ( $F=34.5$ ;  $p<0.001$ ); mientras que en la temporada F/S, el mayor  $a_{254}$  apareció en la capa media del lago ( $F=27.7$ ;  $p<0.001$ ; Figura 3a). La intensa fotodegradación de la CDOM en la superficie de Tz disminuye su concentración y promueve la acumulación de compuestos de bajo PM ( $>S_{275-295}$ ). Según Wei *et al.* (2024), la DOM que “evade” este proceso se acumula en la capa intermedia, favoreciendo la actividad microbiana y generando un pico de  $a_{254}$  de menor PM (F/S; Figura 3a-b), incluso sin estratificación. Por otro lado, el DOM liberado desde los sedimentos (Wei *et al.*, 2024) genera un bajo M ( $F=15.4$   $p<0.05$ ) en la zona profunda de Tz (F/S; Figura 3b), evidenciando la acumulación de compuestos refractarios y de alto PM. Alcocer *et al.* (2021), mencionan que los sedimentos de los lagos de montaña tienen mayor contenido de C orgánico recalcitrante, el cual podría resuspenderse durante la circulación, aumentando la MOD de alto PM en el fondo (Wei *et al.*, 2024).

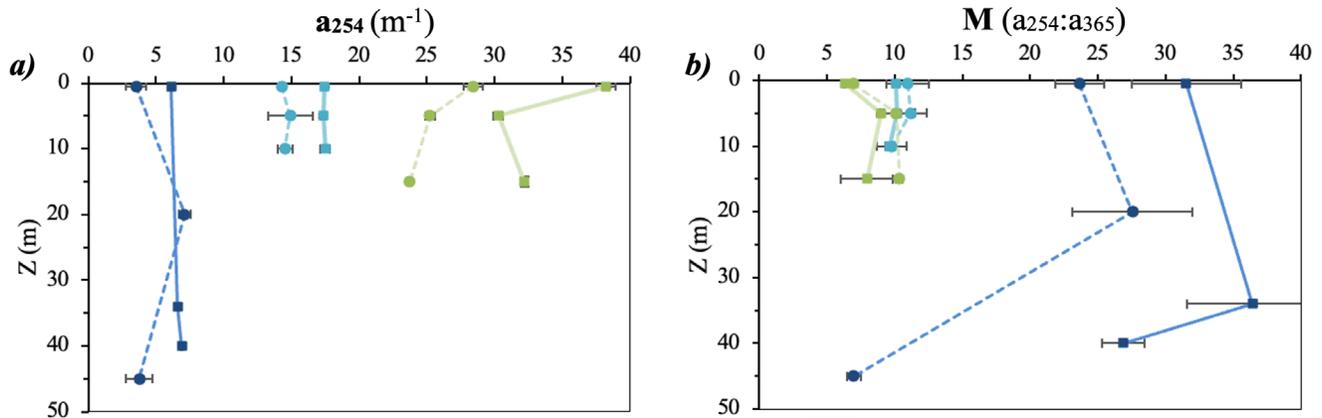


Figura 3. Distribución vertical de la (a) absorción a 254 nm ( $a_{254}$ ) y (b) peso molecular (M) de los lagos Tzisco (azul), San José (celeste) y San Lorenzo (verde). Líneas continuas corresponden a la temporada cálida/lluvias y líneas discontinuas a la fría/seca.

En SL, los valores más altos de  $a_{254}$ , se registraron en la superficie ( $p<0.001$ ) en ambas temporadas, disminuyendo hacia el fondo. SJ no mostró variación vertical del  $a_{254}$  en ninguna temporada ( $p>0.05$ ). En lagos eutróficos, la alta CDOM superficial se asocia con un mayor arrastre de materia orgánica por escorrentía superficial y con la elevada biomasa fitoplanctónica en la zona eufótica (Wei *et al.*, 2024). El mayor  $a_{254}$  superficial de SL durante la temporada lluviosa (Figura. 3a) se relaciona con la escorrentía agrícola y la alta concentración de Clor-a (Alcocer *et al.*, 2024). En el hipolimnion de SL, los valores más bajos de  $a_{254}$  reflejan una mayor actividad bacteriana heterotrófica en condiciones anóxicas, que consume DOM (Berg *et al.*, 2022) y produce  $CH_4$  (Vargas-Sánchez *et al.*, 2023b).

## Conclusiones

Las propiedades ópticas y la composición de la CDOM están influenciadas significativamente por el estado trófico de los lagos y su ubicación. En el PNLM, la estacionalidad tropical afecta de manera diferenciada a los lagos de planicie y montaña. En lagos oligotróficos como Tzisco, la alta transparencia favorece la oxidación fotoquímica y la acumulación de compuestos autóctonos de bajo peso molecular y menor aromaticidad. En contraste, en lagos de planicie como San José y San Lorenzo, con mayor estado trófico, la CDOM es mayoritariamente alóctona y más aromática en lluvias, mientras en secas predomina la CDOM autóctona y más alifática. La evaluación de la CDOM se propone como herramienta diagnóstica para monitorear el estado trófico y los procesos biogeoquímicos.

## Agradecimientos

Este estudio fue financiado por la DGAPA-UNAM (PAPIIT IV200319, IV200122), por el Programa de Investigación en Cambio Climático (proyectos PINCC 2020, 2021 y 2023), por el CONAHCYT (proyecto CF-2023-G-221) y el Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN/AEI) de España a través de los proyectos PID2020-116147GB-C21/AEI/10.13039/501100011033 “DAMOLAKE” de la “European Union NextGenerationEU/PRTR Funds” y COOPA20433 del Programa ICOOP-CSIC. 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. Asimismo, al equipo de Limnología Tropical de la FES Iztacala (UNAM) por su apoyo en el trabajo de campo.

## Literatura citada

- Alcocer, J., M. Merino-Ibarra, L.A. Oseguera and O. Escolero. 2018. Anthropogenic impacts on tropical karst lakes: “Lagunas de Montebello,” Chiapas. *Ecology* 11:1-13. <https://doi.org/10.1002/eco.2029>.
- Alcocer, J., B. Prado, L. Mora, L.A. Oseguera y M. Caballero. 2021. Sediment characteristics of tropical, karst lakes and their relationship with watershed topography, lake morphometry, and human activities. *J Paleolimnol* 66:333–353. <https://doi.org/10.1007/s10933-021-00210-z>.
- Alcocer, J., M. Vargas-Sánchez, E.M. Rivera-Herrera, L.A. Oseguera and S. Sánchez-Carrillo. 2024. Limnological comparison of pristine and impacted lakes from a tropical, high-altitude karst region in southern Mexico. *Inland Waters* 1–33. <https://doi.org/10.1080/20442041.2024.2351324>.
- An, S.L., F.Z. Chen, S. Chen, M.H. Feng, M.L. Jiang, L.G. Xu, S.L. Wen, Q.Y. Zhang, J.D. Xu, Y.X. Du and Y.L. Zhang. 2023. In-lake processing counteracts the effect of allochthonous input on the composition of color dissolved organic matter in a deep lake. *STOTEN* 856:158970. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.158970>.
- Berg, S.M., B.D. Peterson, K.D. McMahon and C.K. Remucal. 2022. Spatial and Temporal Variability of Dissolved Organic Matter Molecular Composition in a Stratified Eutrophic Lake. *J Geophys Res Biogeosci* 127:e2021JG006550. <https://doi.org/10.1029/2021JG006550>.
- Catalán, N., B. Obrador, M. Felip and J.L. Pretus. 2013. Higher reactivity of allochthonous vs. autochthonous DOC sources in a shallow lake. *Aquat Sci* 75:581–593. <https://doi.org/10.1007/s00027-013-0302-y>
- Cory, R.M., C.P. Ward, B.C. Crump and G.W. Kling. 2014. Sunlight controls water column processing of carbon in arctic fresh waters. *Science* 345:925–928. DOI: 10.1126/science.1253119.
- Helms, J.R., A. Stubbins, J.D. Ritchie, E.C. Minor, D.J. Kieber y K. Mopper. 2008. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnol Oceanogr* 53:955–969. <https://doi.org/https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.0955>.
- Li, P. and J. Hur. 2017. Utilization of UV-Vis spectroscopy and related data analyses for dissolved organic matter (DOM) studies: A review. *Crit Rev Environ Sci Technol* 47:131–154. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1309186>.
- Shang, Y., K. Song, P.A. Jacinthe, Z. Wen, L. Lyu, C. Fang and G. Liu. 2019. Characterization of CDOM in reservoirs and its linkage to trophic status assessment across China using spectroscopic analysis. *J Hydrol* 576:1–11. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.06.028>.
- Tranvik, L.J., J.A. Downing, J.B. Cotner, S.A. Loiselle, R.G. Striegl, T.J. Ballatore, P. Dillon, K. Finlay, K. Fortino, L.B. Knoll, P.L. Kortelainen, T. Kutser, S. Larsen, I. Laurion, D.M. Leech, S.L. McCallister, D.M. McKnight, J.M. Melack, E. Overholt, J.A. Porter, Y. Prairie, W.H. Renwick, F. Roland, B.S. Sherman, D.W. Schindler, S. Sobek, A. Tremblay, M.J. Vanni, A.M. Verschoor, E. von Wachenfeldt and G.A. Weyhenmeyer. 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnol Oceanogr* 54: 2298–2314. [https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6\\_part\\_2.2298](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298).

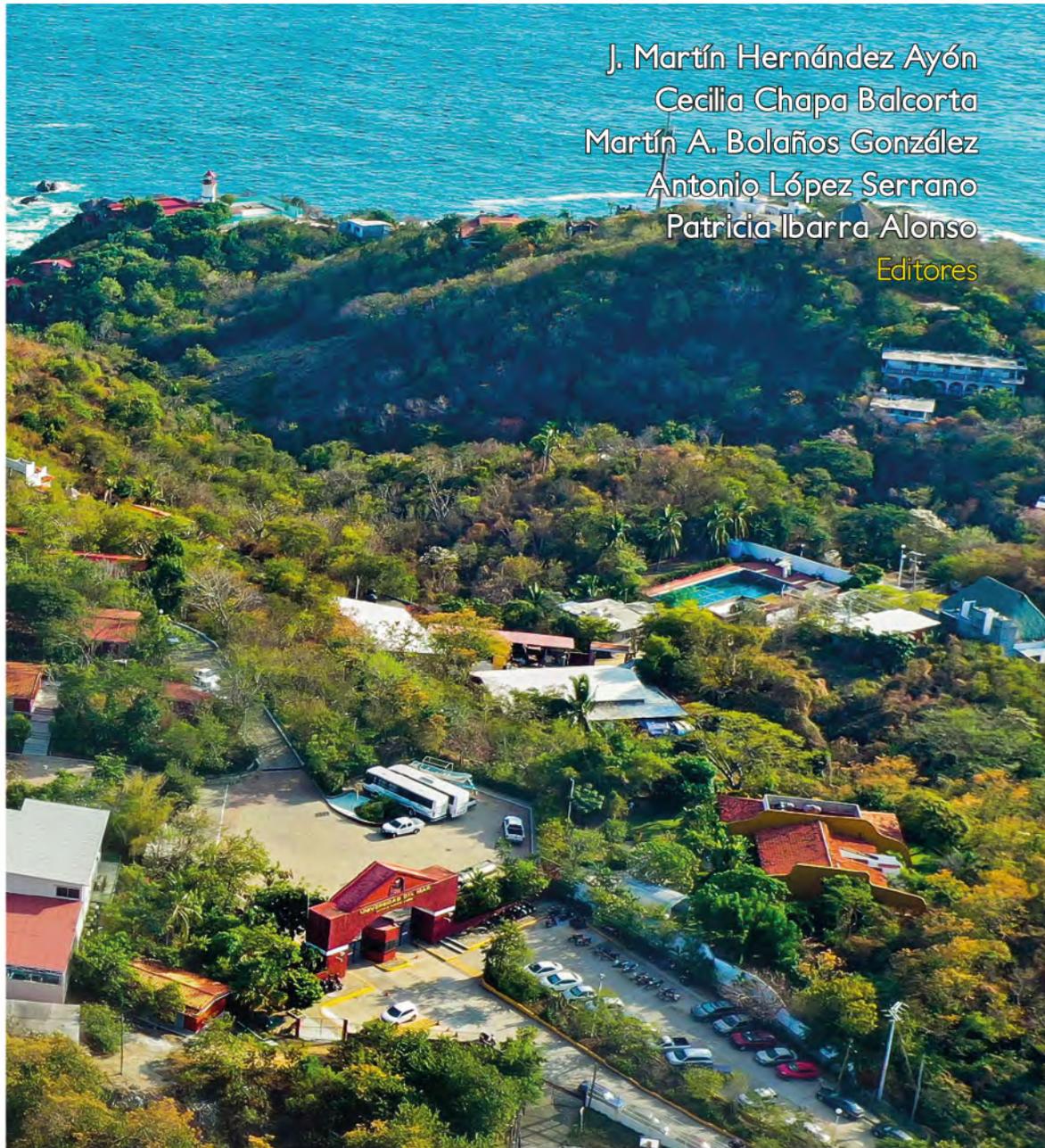
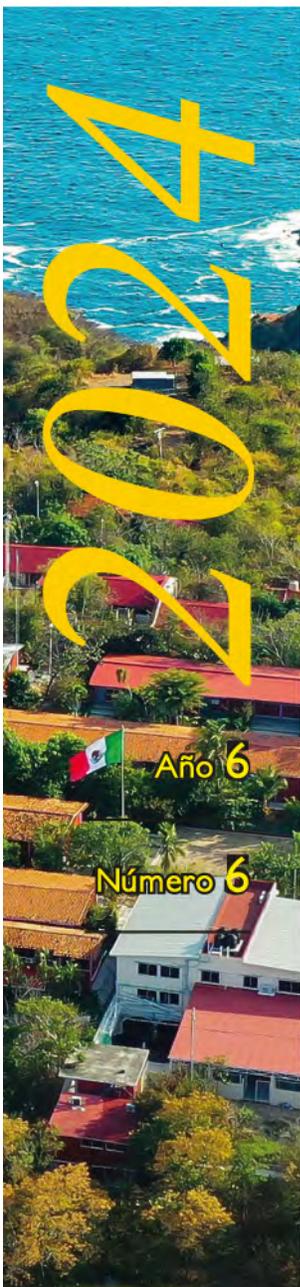


- Vargas-Sánchez, M., J. Alcocer, S. Sánchez-Carrillo, L.A. Oseguera, E.M. Rivera-Herrera, I. Soria-Reinoso, A. Guzmán-Arias, F. García-Oliva and M. Merino-Ibarra. 2023a. Carbon Dioxide Concentration and Emissions along a Trophic Gradient in Tropical Karst Lakes. *Water* 15(1):13. <https://doi.org/10.3390/W15010013>.
- Vargas-Sánchez, M, J. Alcocer, S. Sánchez-Carrillo y L.A. Oseguera. 2023b. Variación espacial y temporal de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O disuelto en lagos kársticos tropicales, en: Hernández Ayón, J.M., M. Bolaños González, C.O. Norzagaray López, L. Coronado Álvarez y P. Ibarra Alonso. (Eds.), *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. pp. 52–58.
- Wei, M., S. Huang and W. Akram. 2024. Dissolved organic matter (DOM) is independently stratified in thermally stratified water bodies. *J Environ Manage* 356:120582. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.120582>.
- Weishaar, J.L., G.R. Aiken, B.A. Bergamaschi, M.S. Fram, R. Fujii and K. Mopper. 2003. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environ Sci Technol* 37:4702–4708. <https://doi.org/10.1021/es030360x>
- Zhang, Y., L. Zhou, Y. Zhou, L. Zhang, X. Yao, K. Shi, E. Jeppesen, Q. Yu and W. Zhu. 2021. Chromophoric dissolved organic matter in inland waters: Present knowledge and future challenges. *STOTEN* 759:143550. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143550>.
- Zhang, Y., Y. Zhou, K. Shi, B. Qin, X. Yao and Y. Zhang. 2018. Optical properties and composition changes in chromophoric dissolved organic matter along trophic gradients: Implications for monitoring and assessing lake eutrophication. *Water Res* 131:255–263. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.05.1>.



# Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México. Síntesis a 2024

PROGRAMA MEXICANO DEL CARBONO



J. Martín Hernández Ayón  
Cecilia Chapa Balcorta  
Martín A. Bolaños González  
Antonio López Serrano  
Patricia Ibarra Alonso  
Editores



**Forma correcta de citar:**

Hernández Ayón J. M.; Chapa Balcorta C.; Bolaños González M. A.; López Serrano A.; e Ibarra Alonso P. (Editores). 2024. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2024. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad del Mar (UMAR). Texcoco, Estado de México, México. ISSN 2954-4882. 254 p.

Programa Mexicano del Carbono  
Calle Morelos No. 17  
Colonia San Simón, C.P. 56210, 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 6, No. 6, enero - diciembre de 2024. Es una publicación anual editada por el Programa Mexicano del Carbono, A.C., calle Morelos No. 17, Colonia San Simón, C.P. 56210, 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 Morelos No. 17, Colonia San Simón, C.P. 56210, Texcoco, Estado de México, México, fecha de última modificación, diciembre de 2024.

# Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2024

---

J. Martín Hernández Ayón, Cecilia Chapa Balcorta,  
Martín A. Bolaños González, Antonio López Serrano  
y Patricia Ibarra Alonso

---

EDITORES

Programa Mexicano del Carbono (PMC)

Universidad del Mar (UMAR)

Puerto Ángel, Oaxaca, México

Diciembre 2024