2.3. Variación espacial y temporal de CO_2, CH_4 y N_2O disuelto en lagos kársticos tropicales

Vargas-Sánchez Mariana[1,*]**;** Alcocer Javier[2]; Sánchez-Carrillo Salvador[3] y Oseguera-Pérez Luis[2]

[1]Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
[2]Grupo de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Tlalnepantla, México.
[3]Departamento de Biogeoquímica y Ecología Microbiana, Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (MNCN-CSIC).
[*]Autor de correspondencia: marianavs@me.com

Resumen

Los ecosistemas acuáticos epicontinentales son fuentes importantes de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera a nivel mundial. Sin embargo, existen muy pocos estudios sobre la concentración y evasión de GEI en sistemas acuáticos kársticos y hasta el momento se sabe poco sobre cuál es su contribución al cambio global. El presente trabajo estudia la variación espacial y temporal de las concentraciones de CO_2, CH_4 y N_2O en tres lagos kársticos del Parque Nacional "Lagunas de Montebello" (PNLM), Chiapas y su relación con variables ambientales asociadas al estado trófico de los cuerpos de agua. Se analizaron las dos temporadas climáticas tropicales (cálida/lluvia y fría/seca). La concentración de CO_2, CH_4 y N_2O se estimó siguiendo la técnica del espacio de cabeza utilizando He como gas de intercambio. Los tres lagos estudiados presentaron sobresaturación de los tres gases en relación con el equilibrio atmosférico en ambas temporadas de muestreo. La concentración de CO_2, CH_4 y N_2O osciló entre 13.0 – 168.6 µmol L^{-1}, 0.02 – 364.1 µmol L^{-1} y 0.01 – 0.17 µmol L^{-1}, respectivamente. Se observó una distribución vertical diferencial en la temporada cálida/lluvias asociada a la estratificación térmica de los lagos. En la temporada fría/secas la concentración fue homogénea debido a la mezcla de la columna de agua. En general, las concentraciones de GEI aumentaron con el grado de eutrofización de los lagos y se encuentran en el rango de otros cuerpos de agua tropicales. Los lagos kársticos tropicales del PNLM son fuentes importantes de GEI a la atmósfera.

Palabras clave: *GEI; carbono; nitrógeno; eutrofización; Chiapas.*

Abstract

Epicontinental aquatic ecosystems are significant sources of greenhouse gases (GHG) worldwide. However, there are only a few studies on the concentration and evasion of GHGs in karst aquatic systems. Hence, very little is known about their contribution to global change. This study examines the spatial and temporal variation of CO_2, CH_4, and N_2O concentrations in three karst lakes of the "Lagunas de Montebello" National Park (PNLM) in Chiapas. It also explores the relationship between these concentrations and environmental variables linked to the trophic state of the water bodies. The study analyzes both tropical climatic seasons (i.e., the warm/rainy and cold/dry). The concentration of GHG was estimated using the headspace technique with He as the exchange gas. The study found that the three lakes showed supersaturation of the three gases in both sampling seasons, exceeding the atmospheric balance. CO_2, CH_4, and N_2O concentrations ranged between 13.0 – 168.6 µmol L^{-1}, 0.02 – 364.1 µmol L^{-1}, and 0.01 – 0.17 µmol L^{-1}, respectively. In the warm/rainy season, a differential vertical distribution was observed associated with the thermal stratification of the lakes. In contrast, in the cold/dry season, the concentration was homogeneous due to the mixing of the water column. In general, GHG concentrations increase with the degree of eutrophication of lakes and are similar to those found

in other tropical water bodies. The study concludes that the tropical karst lakes of the PNLM are significant sources of GHGs in the atmosphere.

Keywords: *GHG; carbon; nitrogen; eutrophication; Chiapas.*

Introducción

Dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) son los tres gases de efecto invernadero (GEI) más estudiados debido a su alto potencial de calentamiento global[1] y su reciente aumento de concentración en la atmósfera (Ciais *et al.*, 2013). Los sistemas acuáticos epicontinentales son sitios importantes en la dinámica del C y N debido a que en ellos tienen lugar diversos procesos aeróbicos y anaeróbicos que resultan en la producción o consumo de GEI (Ortiz- Llorente y Álvarez-Cobelas, 2012; Raymond *et al.*, 2013; Li *et al.,* 2021; Prairie y Cole, 2022).

Las variaciones espaciales y temporales de la concentración de CO_2, CH_4 y N_2O en los lagos tropicales han sido menos documentadas en comparación con las zonas templadas y boreales (Huttunen *et al.,* 2003; Karlsson *et al.,* 2013; Denfeld *et al.,* 2015). En las zonas tropicales los procesos metabólicos tienen mayor intensidad que implican mayores tasas de producción y/o consumo de GEI en comparación con las zonas templadas debido a la elevada temperatura (Barros *et al.,* 2011; Raymond *et al.,* 2013; Amado y Roland, 2017). Diversos estudios demuestran que el procesamiento de C y N en los lagos está estrechamente relacionado con el estado trófico de los cuerpos de agua (Drake *et al.,* 2018, DelSontro *et al.,* 2018; Li *et al.,* 2021). Sin embargo, se sabe muy poco sobre las principales variables que controlan la dinámica de los GEI en el ambiente acuático.

Los lagos kársticos son sistemas peculiares debido a que la acción simultanea de procesos biológicos, la litología regional y los aportes de agua subterránea, determina el balance de C y N en ellos (Liu *et al.,* 2010). Como la mayoría de los sistemas acuáticos, los lagos kársticos no han escapado de la contaminación del agua y la eutrofización. Las "Lagunas de Montebello" representan uno de los sistemas kársticos más importantes de México el cual está conformado por más de 130 cuerpos de agua con diferentes características morfométricas (Alcocer *et al.,* 2016) y ecológicas (Rivera *et al*., 2019; Vargas-Sánchez *et al*., 2022). En el presente trabajo se estudió la variación espacial y temporal de las concentraciones de CO_2, CH_4 y N_2O en tres lagos kársticos con diferente estado trófico y su relación con variables ambientales de los cuerpos de agua.

Materiales y Métodos

El Parque Nacional "Lagunas de Montebello" (PNLM) se localiza en el sureste de Chiapas (16°04'-16°10' N y 91°37'-91°47' O, 1,500 m s.n.m; Figura 1) y abarca una superficie aproximada de 6,425 ha entre los municipios de La Independencia y La Trinitaria (CONANP, 2011). Aunque el Río Grande de Comitán desemboca en las lagunas del extremo NO del PNLM, el aporte de agua subterránea es el más relevante. El clima es templado lluvioso con un verano largo, fresco y húmedo, con un régimen de precipitaciones típico de verano [Cb(m)(f)ig] (García, 2004). Para el estudio se seleccionaron tres lagos con estado trófico contrastante: Tziscao (prístino/ultra-oligotrófico; TZ), San José (prístino/oligotrófico; SJ) y San Lorenzo (impactado-eutrófico; SL). Los muestreos se llevaron a cabo en dos temporadas climáticas (hidrodinámicas) contrastantes: la cálida/lluvias (estratificación de noviembre 2021) y la fría/seca (circulación de febrero 2022). Se midieron *in situ* perfiles verticales metro a metro de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (K_{25}) y pH mediante una sonda

[1] El **potencial de calentamiento global** (GWP por sus siglas en inglés) es una medida que combina los efectos de la influencia radiactiva de un gas en la atmósfera en relación con el CO_2, así como el tiempo de residencia del gas en la atmósfera. El CO_2 es el estándar con el que se comparan otros gases, por lo que tiene un GWP de 1 (CO_2eq) (IPCC, 2013).

multiparamétrica marca *Hydrolab* modelo DS5X (precisión T: ± 0.10°C, OD: ± 0.2 mg L^{-1}, K_{25}: 1 µS cm^{-1}, pH: 0.2) acoplado a un sistema de captura de información modelo SVR4a. Se realizó la calibración correspondiente previa a cada muestreo.

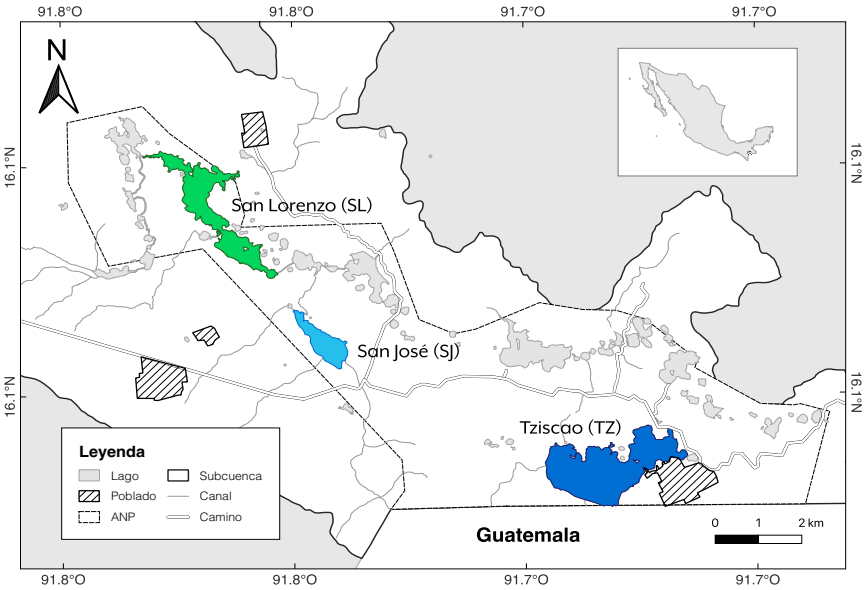


Figura 1. Localización del Parque Nacional "Lagunas de Montebello", Chiapas, México.

Con base en los perfiles verticales se seleccionaron tres profundidades de muestreo que representaron la heterogeneidad ambiental de la columna de agua. Se tomaron muestras de agua con una botella muestreadora de agua *UWITEC* de 5 L de capacidad para la determinación de la concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo), clorofila "a" (Clor-a), sólidos suspendidos totales (SST) y GEI disueltos. Se estimó la transparencia del agua mediante la profundidad del disco de Secchi (Z_{DS}). Los análisis para determinar la concentración de nutrientes se realizaron siguiendo los métodos propuestos por Solórzano (1969). Para la determinación de la Clor-a se siguió el método 445.0 de la USEPA (Arar y Collins 1997). La extracción de los GEI se realizó siguiendo la técnica del espacio de cabeza, con 40 ml de agua en jeringas de 60 ml, usando He como gas de intercambio. Se tomaron muestras de aire *in situ* para estimar el equilibrio atmosférico. La concentración de los gases se estimó por cromatografía de gases. Finalmente, se realizaron análisis de varianza para comparar las concentraciones entre temporadas, entre lagos y entre las profundidades en las que fueron tomadas las muestras y se utilizaron modelos de regresión múltiple (MRM) paso a paso para identificar qué factor ambiental explicaba mejor la variación en GEI en cada temporada. Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el software R Core Team (2016).

Resultados y discusión

Los lagos presentaron características fisicoquímicas y biológicas con amplios rangos de variación temporal y espacial (Cuadro 1). Únicamente la T, el OD, el pH, la K_{25} y el N-NO_3 presentaron variaciones estacionales significativas (ANOVA, $p < 0.05$). El resto de las variables (Clor-a, SST, N-NO_2, P-PO_4 y Z_{SD}) mostraron valores similares en ambas temporadas de muestreo (ANOVA, $p > 0.05$). Sin embargo, todas las variables (excepto el pH) mostraron variación significativa entre lagos (ANOVA, $p < 0.05$). Durante la temporada cálida/lluvias, los lagos se encontraban estratificados térmicamente. TZ y SL presentaron termo y oxiclinas profundas (31-34 m y 11-13 m, respectivamente) en comparación con SJ el cual presentó termo y oxiclinas superficiales (~ 3 – 5 m). Durante la temporada fría/seca, TZ y SJ presentaron columnas de agua completamente oxigenadas mientras que SL presentó anoxia por

debajo de los 8 m debido a la alta carga de materia orgánica que este recibe. La concentración de Clor-a en SL fue cerca de 80 y 50 veces mayor en comparación con TZ y SJ, respectivamente ($p < 0.05$). La concentración de SST fue superior en SL en contraste con SJ y TZ ($p < 0.05$). En concordancia, SL presentó los valores más bajos de transparencia de la columna de agua y TZ los más elevados (Cuadro 1). SL presentó los valores más elevados de P-PO_4, N-NO_2 y N-NH_4, mientras que SJ presentó los valores más altos de N-NO_3. TZ fue el lago con las concentraciones más bajas de nutrientes (P-PO_4, N-NO_3, N-NO_2 y N-NH_4) (Cuadro 2).

Cuadro 1. Caracterización fisicoquímica de los lagos en estudio durante la temporada cálida/lluvias (C/L) y la temporada fría/seca (F/S). (Temp: temporada, X: promedio, DE: desviación estándar).

Lago	Temp	T (ºC)		DO (mg L^{-1})		pH		K_{25} (µS cm^{-1})		SST (mg L^{-1})		Clor-a (µg L-1)		Z_{DS}
		X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	(m)
TZ	C/L	21.8	1.1	7.2	3.6	8.5	0.3	235	9.3	1.2	0.3	0.6	0.1	7.2
	F/S	19.2	0.5	5.4	0.6	8.5	0.1	242	1.9	1.6	1.0	0.5	0.1	7.0
SJ	C/L	20.9	0.7	7.5	2.2	9.1	0.1	338	8.8	4.4	2.6	1.0	0.1	3.5
	F/S	21.4	0.6	6.0	0.2	7.6	0.1	333	0.9	2.9	1.3	0.8	0.1	2.3
SL	C/L	21.2	1.3	4.7	2.8	7.7	0.4	518	77.8	9.4	6.5	46.3	10.1	0.6
	F/S	20.8	0.6	6.1	5.0	9.1	0.6	609	17.2	7.2	0.7	50.8	8.5	0.4

Cuadro 2. Concentración de nutrientes durante la temporada cálida/lluvias (C/L) y la temporada fría/seca (F/S). (Temp: temporada, X: promedio, DE: desviación estándar).

Lago	Temp	P-PO_4 (µmol L^{-1})		N-NO_3 (µmol L^{-1})		N-NO_2 (µmol L^{-1})		N-NH_4 (µmol L^{-1})	
		X	DE	X	DE	X	DE	X	DE
TZ	C/L	0.06	0.00	0.31	0.35	0.10	0.02	0.13	0.04
	F/S	0.46	0.37	4.20	0.51	0.14	0.09	2.02	1.09
SJ	C/L	0.03	0.01	5.45	3.62	0.44	0.08	3.40	2.44
	F/S	0.07	0.04	3.98	1.47	0.13	0.10	2.70	1.31
SL	C/L	2.01	0.83	16.48	23.83	0.72	0.43	18.37	12.90
	F/S	1.25	0.02	1.67	0.99	0.17	0.07	11.46	13.33

Los lagos presentaron sobresaturación de CO_2 en relación con el equilibrio atmosférico (10.9 ± 0.6 µmol CO_2 L^{-1}) durante ambas temporadas de muestreo. La concentración de CO_2 (C_{CO2}) osciló entre 13.0 – 168.6 µmol L^{-1} y presentó claras diferencias entre temporadas ($p < 0.001$) con un promedio de 41.9 ± 35.3 µmol L^{-1} durante la temporada cálida/lluvias en comparación con 20.9 ± 7.2 µmol L^{-1} en la temporada fría/secas (Figura 2); probablemente las temperaturas más altas del agua la temporada cálida/lluvias incrementan la productividad primaria e impulsan los procesos de mineralización de la MO, responsable del consumo de OD y de la metanogénesis (Sjögersten et al., 2014). Los lagos presentaron sobresaturación de CH_4 en relación con el equilibrio atmosférico (0.04 ± 0.01 µmol CH_4 L^{-1}) durante ambas temporadas de muestreo (con excepción de SJ durante la temporada cálida/lluvias). La concentración de CH_4 (C_{CH4}) osciló entre 0.02 – 364.1 µmol L^{-1} sin diferencias entre temporadas ($p > 0.05$). Únicamente SL presentó sobresaturación de N_2O en relación con el equilibrio atmosférico (0.03 ± 0.004 µmol N_2O L^{-1}) durante ambas temporadas de muestreo. TZ y SJ presentaron sobresaturación de N_2O únicamente en la temporada fría/seca. La concentración de N_2O (C_{N2O}) osciló entre 0.01 – 0.17 µmol L^{-1} sin diferencias entre temporadas ($p > 0.05$). Se observó que existen diferencias significativas en la C_{CO2} y C_{CH4} en los lagos ($p < 0.05$). TZ presentó los valores más bajos de CO_2 disuelto (19.9 ± 10.8 µmol L^{-1}) y SL los más elevados (35.1 ± 17.8 µmol L^{-1}) ($p < 0.05$). En el caso del CH_4, SJ presentó los valores más bajos (0.13 ± 0.1 µmol L^{-1}) y SL los más elevados (4.6 ± 14.1 µmol L^{-1}) ($p < 0.05$). Lo anterior sugiere que el estado trófico y el proceso de eutrofización de los cuerpos de agua tiene una relación directa y de manera constante a lo largo del año con la C_{CO2} y C_{CH4}. La C_{N2O} no presentó variación significativa entre los lagos ($p > 0.05$). Las concentraciones de GEI medidas en TZ y SJ están en el rango de otros cuerpos de agua tropicales, mientras que las concentraciones registradas en SL son

cerca de dos veces superiores a las reportadas en trabajos previos (Aufdenkampe et al., 2011; Raymond et al., 2013, Borges et al., 2023).

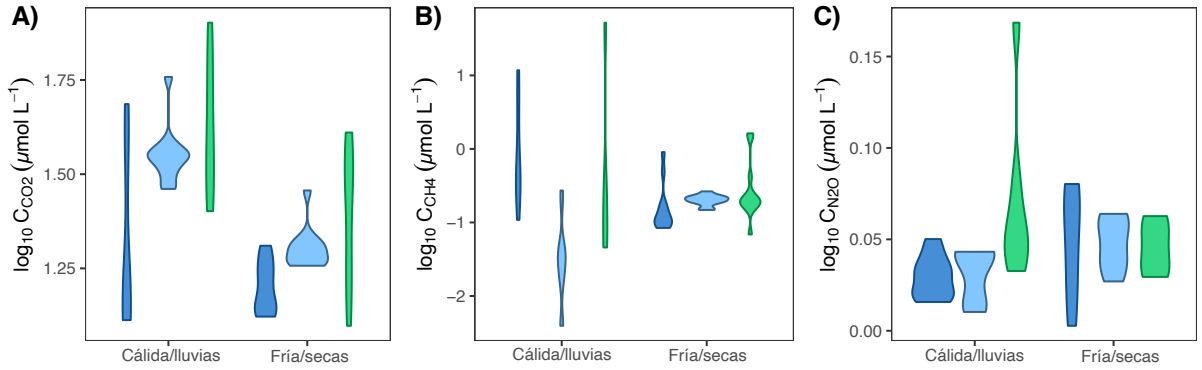


Figura 2. Gráfico de violín del log_{10} de la concentración de CO_2, CH_4 y N_2O en Tziscao (azul oscuro), San José (azul claro) y San Lorenzo (verde).

Los tres GEI mostraron patrones espaciales claros relacionados con los cambios estacionales en la estratificación y la mezcla vertical. Durante la temporada cálida/lluvias, la C_{CO2} y C_{CH4} fue más elevada en el hipolimnion de TZ y SL ($p < 0.05$, Cuadro 3) debido a que la anoxia estimuló la metanogénesis y la estratificación térmica limitó el intercambio vertical de gases por difusión vertical, lo que condujo a que los gases se almacenaran en el hipolimnion. En SJ, la C_{CH4} fue más elevada en la superficie sugiriendo producción de CH_4 aún en condiciones óxicas (Tang et al., 2022). La concentración de N_2O no presentó variación espacial vertical de ningún lago (KW, $p > 0.05$). Durante la temporada fría/seca y en respuesta a que la columna de agua se encontraba en circulación en los tres lagos la C_{CO2}, C_{CH4} y C_{N2O} fue homogénea ($p > 0.05$).

Cuadro 3. Concentración promedio (X) y desviación estándar (DE) de los GEI disueltos en la columna de agua de Tziscao (TZ), San José (SJ) y San Lorenzo (SL).

Lago	Temporada	Z (m)	C_{CO2} (µmol L^{-1}) X	C_{CO2} (µmol L^{-1}) DE	C_{CH4} (µmol L^{-1}) X	C_{CH4} (µmol L^{-1}) DE	C_{N2O} (µmol L^{-1}) X	C_{N2O} (µmol L^{-1}) DE
TZ	Cálida/lluvias	0	13.88	0.09	0.39	0.09	0.03	0.00
		34	14.79	2.19	0.32	0.04	0.03	0.01
		40	42.35	6.20	7.52	5.79	0.03	0.01
	Fría/secas	0	17.36	1.62	0.43	0.38	0.05	
		20	16.42	0.58	0.11	0.03	0.04	
		45	14.43	0.95	0.10	0.01	0.05	
SJ	Cálida/lluvias	0	35.22	0.83	0.13	0.14	0.02	0.01
		5	39.95	6.63	0.03	0.01	0.03	0.02
		10	33.12	1.44	0.02	0.02	0.03	0.01
	Fría/secas	0	18.77	0.70	0.22	0.03	0.05	
		5	22.24	2.84	0.17	0.03	0.05	
		10	19.77	1.88	0.21	0.01	0.05	
SL	Cálida/lluvias	0	29.16	4.32	0.21	0.22	0.04	0.02
		5	46.30	12.86	0.11	0.09	0.05	0.01
		15	122.39	65.33	205.59	224.22	0.12	0.07
	Fría/secas	0	18.51	7.82	0.87	0.96	0.03	
		5	33.60	6.14	0.16	0.07	0.05	
		15	27.33	13.79	0.25	0.11	0.05	

Los MRM sugirieron que en la temporada cálida/lluvias las variables que más influyeron en la variabilidad de la C_{CO2} fueron la C_{CH4}, el pH y el OD ($R^2 = 0.98$). Para la C_{CH4}, el MRM incluyó la C_{CO2}, el pH, el OD y el P-PO_4 como variables independientes ($R^2 = 0.97$). Finalmente, para la C_{N2O}, los

predictores más importantes en el MRM fueron el N-NH_4, los SST, N-NO_2, y la Clor-a (R^2 = 0.96). La relación que existe entre la C_{CO2} y la C_{CH4} sugiere que la oxidación de la materia orgánica en los sedimentos estimuló la producción de CH_4, pero probablemente la mayor parte del CH_4 podría haberse consumido bajo la oxidación anaeróbica del CH_4 (AOM; Deutzmann et al., 2014) y liberado como CO_2 a la columna de agua. Durante la temporada fría/secas las variables que más influyeron en la variabilidad de la C_{CO2} fueron P-PO_4, N-NH_4, el OD y el pH (R^2 = 0.65). Para la C_{CH4}, el MRM incluyó el N-NH_4, el OD y el N-NO_3 como variables independientes (R^2 = 0.75). Finalmente, para la C_{N2O}, los predictores más importantes en el MRM fueron el pH, P-PO_4 y la C_{CO2} (R^2 = 0.69).

Conclusiones

Los resultados sugieren que existe una relación directa entre la concentración de GEI disueltos y el estado trófico de los lagos kársticos del PNLM. La dinámica estacional de la concentración de GEI disueltos en los lagos del PNLM resultó de una interacción compleja de variables bióticas y abióticas expuestas a una fuerte estacionalidad tropical. A pesar de que la magnitud de la C_{CH4} y C_{N2O} no mostró variación estacional, los patrones de distribución vertical de los GEI estuvieron relacionados principalmente con la anoxia hipolimnética que estimuló los procesos de producción y/o consumo de CO_2, CH_4 y N_2O y, por lo tanto, con la estacionalidad e hidrodinámica de la columna de agua de los lagos kársticos tropicales.

Agradecimientos

El presente trabajo fue apoyado por la DGAPA-UNAM a través de los proyectos *PAPIIT IV200319* "*Área Experimental de Lagos Tropicales ()*" y *PAPIIT IV200122 "AELT - Efectos del cambio global y climático sobre la limnología y biodiversidad acuática ()*", por el Programa de Investigación en Cambio Climático a través de los proyectos *PINCC 2020* "*Cuerpos acuáticos epicontinentales: papel en la dinámica del carbono y emisiones de gases de efecto invernadero en México*", *PINCC 2021 "Cuerpos acuáticos epicontinentales: papel en la dinámica del carbono y emisiones de gases de efecto invernadero en México. Continuación"* y *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",* así como por el Ministerio de Ciencia e Innovación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, a través del proyecto ICOOP-CSIC "*Contribución del Neotrópico Acuático Continental a las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (COOPA20433)*". Los autores agradecen 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, agradecen a los colegas del equipo de Limnología Tropical de la FES Iztacala (UNAM) por su apoyo en el trabajo de campo, al laboratorio de Biogeoquímica Acuática del ICMyL por los análisis de nutrientes y a José Luis Ayala Liquiñano (MNCN-CSIC) por los análisis de gases.

Literatura citada

Alcocer, J., L. A. Oseguera, G. Sánchez, C. G. González, J. R. Martínez and R. González. 2016. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. Journal of Limnology, 75(s1). https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1343

Amado, A. and M. Roland. 2017. Microbial role in the carbon cycle in tropical inland aquatic ecosystems. *Frontiers in microbiology*.

Arar, E. J. and G. Collins. 1997. *In vitro* determination of chlorophyll a and pheophytin a in marine and freshwater algae by fluorescence (445.0). US Environmental Protection Agency.

Aufdenkampe, A. K., E. Mayorga, P. A. Raymond, J. M. Melack, S. C. Doney, S. R. Alin, R. E. Aalto and K. Yoo. 2011. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *9*(1), 53-60. https://doi.org/10.1890/100014

Barros, N., J. J. Cole, L. J. Tranvik, Y. T. Prairie, D. Bastviken, V. L. M. Huszar, P. Del Giorgio and F. Roland. 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Natural Geoscience,* 4: 593-596 pp.

Borges, A., W. Okello, S. Bouillon, L. Deirmendjian, A. Nankabirwa, E. Nabafu, T. Lambert, J. Descy and C. Morana. 2023. Spatial and temporal variations of dissolved CO2, CH4 and N2O in lakes Edward and George (East Africa). *Journal of Great Lakes Research*, *49*(1), 229-245. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2022.11.010

Ciais P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin and J. Canadell. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds) Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, New York, NY, USA, pp 465–570

CONANP. 2007. Programa de conservación y manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello, México.

CONANP. 2011. Programa de Monitoreo de Calidad del Agua, Estudio para monitorear los parámetros de calidad del agua de las lagunas de Montebello.

Deemer, B. R., J. A. Harrison, S. Li, J. J. Beaulieu, T. DelSontro, N. Barros, J. F. Bezerra-Neto, S. M. Powers, M. A. Dos Santos and J. A. Vonk. 2016. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. BioScience, 66(11), 949–964. https://doi.org/10.1093/biosci/biw117

DelSontro, T., J. J. Beaulieu and J. A. Downing. 2018. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change. Limnology and Oceanography Letters, 3(3), 64–75. https://doi.org/10.1002/lol2.10073

Denfeld, B. A., M. Wallin, E. Sahlée, S. Sobek, J. Kokic, H. E. Chmiel and G. A. Weyhenmeyer. 2015. Temporal and spatial carbon dioxide concentration patterns in a small boreal lake in relation to ice cover dynamics. *Boreal Environment Research*, *20*(6), 679-692. http://diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:872262

Deutzmann, J. S., P. Stief, J. Brandes and B. Schink. 2014. Anaerobic methane oxidation coupled to denitrification is the dominant methane sink in a deep lake. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *111*(51), 18273-18278. https://doi.org/10.1073/pnas.1411617111

Drake, T. W., P. A. Raymond and R. G. M. Spencer. 2017. Terrestrial carbon inputs to inland waters: A current synthesis of estimates and uncertainty. *Limnology and oceanography letters*, *3*(3), 132-142. https://doi.org/10.1002/lol2.10055

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Huttunen, J. T., J. Alm, A. Liikanen, S. Juutinen, T. Larmola, T. Hammar, J. Silvola and P. J. Martikainen. 2003. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions. Chemosphere, 52(3), 609–621. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00243-1

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

Karlsson, J., R. Giesler, J. L. Persson and E. Lundin. 2013. High emission of carbon dioxide and methane during ice thaw in high latitude lakes. *Geophysical Research Letters*, *40*(6), 1123-1127. https://doi.org/10.1002/grl.50152

Kortelainen, P., T. Larmola, M. Rantakari, S. Juutinen, J. Alm and P. J. Martikainen. 2020. Lakes as nitrous oxide sources in the boreal landscape. *Global Change Biology*, *26*(3), 1432-1445. https://doi.org/10.1111/gcb.14928

Li, Y., J. Shang, C. Zhang, W. Zhang, L. Niu, L. Wang and H. Zhang. 2021. The role of freshwater eutrophication in greenhouse gas emissions: A review. In Science of the Total Environment (Vol. 768). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144582

Liu, Z., W. Dreybrodt and H. Wang. 2010. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO2 budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms. Earth Sci. Rev. 99, 162–172.

Marcé, R., B. Obrador, J. A. Morguí, J. Lluís Riera, P. López and J. Armengol. 2015. Carbonate weathering as a driver of CO2 supersaturation in lakes. Nature Geoscience, 8(2), 107–111. https://doi.org/10.1038/ngeo2341

Natchimuthu, S., I. Sundgren, M. Gålfalk, L. Klemedtsson and D. Bastviken. 2017. Spatiotemporal variability of lake pCO2 and CO2 fluxes in a hemiboreal catchment. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 122(1), 30-49. https://doi.org/10.1002/2016jg003449

Ortiz-Llorente, M. J. and M. Alvarez-Cobelas. 2012. Comparison of biogenic methane emissions from unmanaged estuaries, lakes, oceans, rivers and wetlands. In Atmospheric Environment (Vol. 59, pp. 328–337). https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.031

Prairie, Y. T. and J. J. Cole. 2022. The Carbon Cycle in Lakes: A Biogeochemical Perspective. Encyclopedia of Inland Waters, 89-101. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819166-8.00055-4

Raymond, P. A., J. Hartmann, R. Lauerwald, S. Sobek, C. McDonald, M. Hoover, D. Butman, R. Striegl, E. Mayorga, C. Humborg, P. Kortelainen, H. Dürr, M. Meybeck, P. Ciais and P. Guth. 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. Nature, 503(7476), 355–359. https://doi.org/10.1038/nature12760

Rivera-Herrera E.M., M. Vargas-Sánchez, J. Alcocer y L.A Oseguera-Pérez. 2019. 2.16. Impacto antrópico en la biomasa fitoplanctónica de lagos kársticos, Chiapas, México. pp. 318-324. En: Paz-Pellat, F. A. Velázquez y M. Rojo (Editores). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono sus Interacciones en México. Síntesis a 2019. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología, Universidad Autónoma de Nayarit, Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Nayarit y Stanford University-México Economía Limpia 2050-USAID. Texcoco, Estado de México, México. 541 pp.

Sjögersten, S., C. R. Black, S. Evers, J. Hoyos-Santillan, E. L. Wright and B. L. Turner. 2014. Tropical wetlands: A missing link in the global carbon cycle? Global biogeochemical cycles 28: 1371-1386.

Solórzano, L. 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method 1 1 This research was fully supported by U.S. Atomic Energy Commission Contract No. ATS (11-1) GEN 10, P.A. 20. *Limnology and Oceanography*, *14*(5), 799-801. https://doi.org/10.4319/lo.1969.14.5.0799

Tang, K. W., D. F. Mcginnis, D. Ionescu and H. Grossart. 2016. Methane production in Oxic Lake waters potentially increases aquatic methane flux to air. *Environmental Science and Technology Letters*, *3*(6), 227-233. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00150

Vargas-Sánchez, M., J. Alcocer and L. A. Oseguera. 2022. Seston and eutrophication on a tropical karst lake district: Lagunas de Montebello, Chiapas, Mexico. Limnetica, 41(2), 1. https://doi.org/10.23818/limn.41.16

Estado Actual del Conocimiento del **Ciclo del Carbono** y sus Interacciones **en México.**

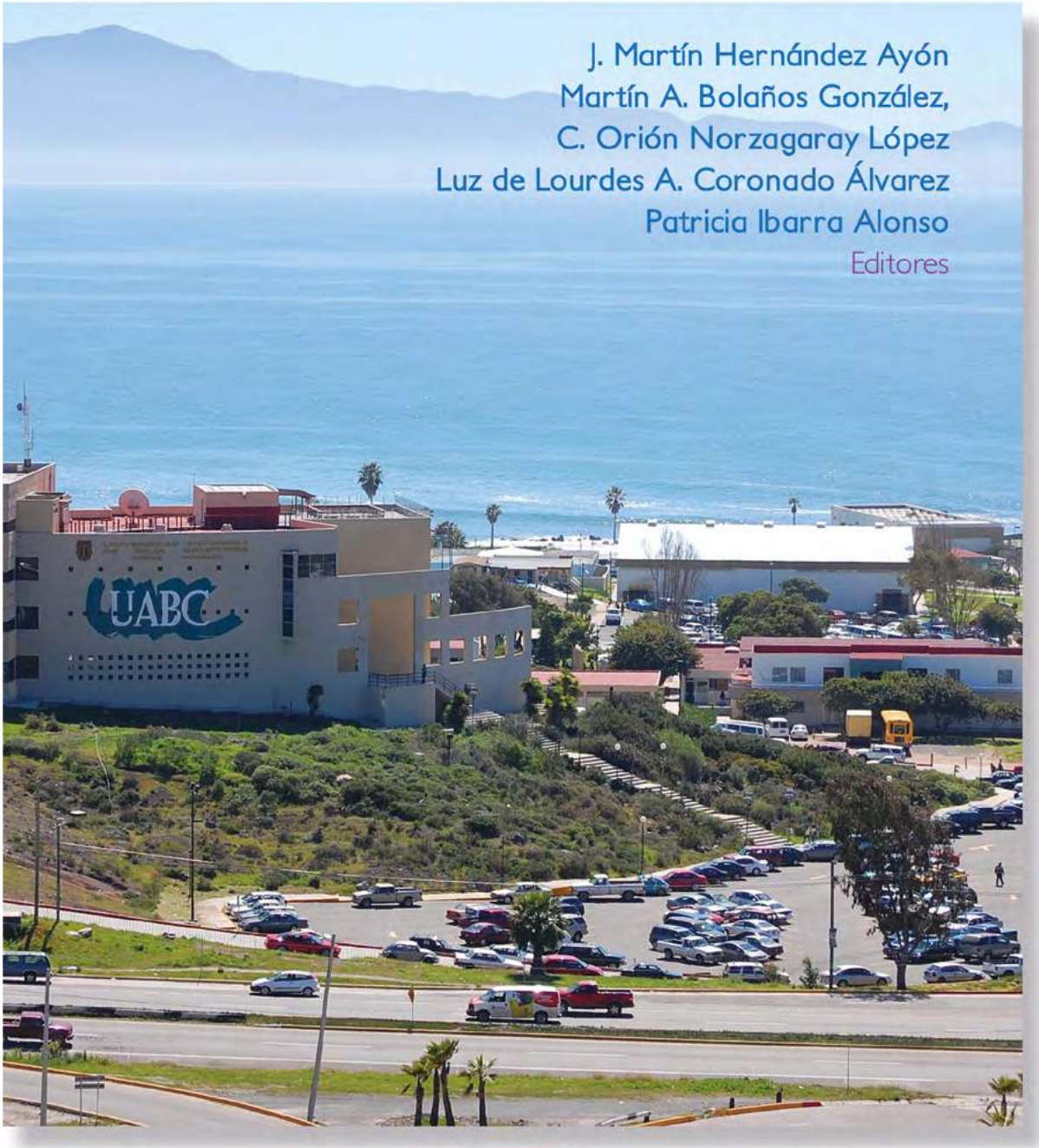
Síntesis a 2023

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

PMC
Programa Mexicano del Carbono
Red Temática del CONACYT

Instituto de Investigaciones Oceanológicas

Stanford | México Clean Economy 2050

The Ocean Foundation

PMC

Programa Mexicano del Carbono

Red Temática del **CONAHCYT**

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
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 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