



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
(LIMNOLOGÍA)

**EVALUACIÓN DE UN LAGO TROPICAL COMO FUENTE DE CO<sub>2</sub> HACIA LA  
ATMÓSFERA (LAGO ALCHICHICA, PUEBLA, MÉXICO)**

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS

**PRESENTA:**  
ANDREA PATRICIA GUZMÁN ARIAS

**TUTOR:**  
DR. JAVIER ALCO CER DURAND  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

**COMITÉ TUTOR:**  
DR. MARTÍN MERINO IBARRA  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
DR. FELIPE GARCÍA OLIVA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS  
DRA. GLORIA VILA CLARA FATJÓ  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
DR. ALFONSO LUGO VÁSQUEZ  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2015



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.



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología  
Universidad Nacional Autónoma de México



**EVALUACIÓN DE UN LAGO TROPICAL COMO FUENTE DE CO<sub>2</sub> HACIA LA  
ATMÓSFERA (LAGO ALCHICHICA, PUEBLA, MÉXICO)**

TESIS

Que para obtener el grado académico de  
Maestra en Ciencias del Mar y Limnología  
(Limnología)

Presenta:

ANDREA PATRICIA GUZMÁN ARIAS

Tutor principal:

DR. JAVIER ALCOCER DURAND

Comité tutor:

DR. MARTÍN MERINO IBARRA  
DR. FELIPE GARCÍA OLIVA  
DRA. GLORIA VILA CLARA FATJÓ  
DR. ALFONSO LUGO VÁSQUEZ

Ciudad Universitaria, México D. F. Noviembre 2015

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo financiero otorgado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico a través del proyecto PAPIIT IN215512 y PAPCA 2014.

Al programa de becas de CONACYT por la beca otorgada durante la maestría.

Proyecto CFE-UNAM Río San Pedro por la beca que me otorgaron para terminar el escrito de la tesis e iniciar el artículo.

Al Dr. Luis A. Oseguera, por su orientación, apoyo, paciencia y respaldo.

Al Hidrobiól. Sergio Castillo (Laboratorio de Biogeoquímica Acuática) y Olivia Cruz Ronquillo, Nora E. Ceniceros Bombela, Alejandra Aguayo Ríos (Laboratorio de Química Analítica) por los análisis químicos realizados.

Al Proyecto de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, UNAM dirigido por el Dr. Javier Alcocer Durand y su equipo de colaboradores (Juan, Vicky, Vania, Lucely, Daniel) por el apoyo en campo y laboratorio a cargo del Dr. Luis Oseguera, porque en muchos de ellos a más que compañeros de trabajo encontré muy buenos amigos.

Agradezco al Dr. Javier Alcocer Durand por permitirme hacer parte de su equipo de trabajo, su inmenso apoyo, colaboración, entusiasmo, motivación, orientación y paciencia mucha paciencia.

Al Dr. Martin Marino Ibarra por acogerme en su laboratorio, por su apoyo entusiasta y motivación.

Al Dr. Felipe García por su carisma, amabilidad y atentos comentarios.

A la Dra. Gloria Vilaclara y al Dr. Alfonso Lugo por sus acertados comentarios, inquietudes y aportes.

Al Dr. Jorge Ramírez "el profe" por su tiempo, disposición, su infinita paciencia, por guiarme y orientarme en este camino del carbono.

A todo mi comité tutorial por darme la posibilidad de intentarlo, por creer en mí, en este trabajo y en especial por inspirarme y ser ejemplos de buen criterio.

Al posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, Diana, Lupita, Chantal, Gabriela y la Dra. Gloria Vilaclara por la colaboración y amable atención, a cada uno de los profesores por sus enseñanzas, sus clases y compartir con sus estudiantes tanta experiencia.

A todos y cada uno de los integrantes del Laboratorio de Biogeoquímica acuática, al Dr. Martin Merino, Dr. Jorge Ramírez, Hidrobiól. Sergio Castillo, M en C. Julio Díaz, Dra. Paty, M. en C. Luz María, muchas gracias por recibirme, acogerme, por permitirme hacer parte de su equipo, trabajar a su lado y enseñarme a ver esa parte bonita e interesante de la biogeoquímica.

*Cuando decidimos luchar por hacer realidad nuestros sueños, no hay nada mejor que iniciar un camino con buena compañía.....*

*Gracias a Dios por permitirme lograr este sueño y poner seres tan especiales en mi camino.....*

Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas.

Josué 1:9

Mi familia mi motor y mayor motivación, mi mamá, mi hermana, Sebas e Isa, todo esto lo hago por ustedes.

Natalia y Charlot, amigas, hermanas, gracias por su incondicionalidad, su cariño, gracias por estar tan cerca a pesar de la distancia.

Chongo, Angelita y Nico, gracias por estar allá y acá, por sus mensajes y apoyo.

María Luisa y Caro, gracias por motivarme, por ser amigas y ejemplos.

Aleja, Axel, Martina, Camos, gracias por recibirme, acogerme y hacerme parte de su familia, por su nobleza y ejemplo de pilera y berraquera.

Bere y Emi, que hubiera hecho sin ustedes, que bendición haberlos conocido, gracias por su apoyo, respaldo, sus palabras, su silencio.

Andrea, Paola y Jazmín, chinas colombomexicanas, que gusto haber compartido con ustedes este sueño, gracias por escucharme, acompañarme, gracias por las tardes de estudio, los almuerzos, los abrazos.

Luis, Daniel, Lucely, Juan, gracias por su paciencia, por hacer cada muestreo y tarde de trabajo más amena, por las sonrisas, las burlas, la paciencia, en especial, sumercé Luis, por hacer de cada monitoreo una reunión de amigos donde el trabajo no costaba ningún trabajo.

Ernesto y Laurita, que bueno haber coincidido en este viaje, en este sueño, gracias por siempre estar ahí, y permitirme caminar con ustedes.

Nidia, gracias por el apoyo, la compañía y por siempre sacar tiempo aunque no lo tuvieras para escucharme.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
INTRODUCCIÓN .....	9
Papel de los lagos en el ciclo global del carbono.....	9
Ciclo del carbono .....	12
Formas del carbono inorgánico y sus transformaciones en la columna de agua.....	13
Principales rutas del carbono en sistemas acuáticos.....	17
ANTECEDENTES .....	20
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	22
HIPOTESIS .....	22
OBJETIVOS .....	23
GENERAL.....	23
PARTICULARES .....	23
MATERIALES Y MÉTODOS .....	23
ÁREA DE ESTUDIO .....	23
MÉTODOS .....	26
TRABAJO DE CAMPO .....	27
Medición de parámetros fisicoquímicos .....	27
Determinación de pH, alcalinidad e iones.....	27
Obtención de muestras para Carbono Inorgánico Disuelto (CID).....	27
Determinación del flujo de Carbono Orgánico Particulado (COP) .....	27
Determinación de Clorofila “a” .....	28
Obtención de muestras para nutrientes .....	28
TRABAJO DE LABORATORIO.....	29
Análisis de muestras para Carbono Inorgánico Disuelto (CID).....	29
Determinación de pH, alcalinidad e iones.....	29
Determinación de Carbono Orgánico Particulado (COP).....	29
Determinación de Clorofila “a” (Clor-a) .....	30
Análisis de nutrientes.....	30
ANÁLISIS DE DATOS.....	31
Ecuaciones que describen el sistema CO <sub>2</sub> .....	31

Cálculo de la Salinidad .....	33
Fugacidad del CO <sub>2</sub> [ $f(\text{CO}_2)$ ] .....	33
Diferencia de $f(\text{CO}_2)$ de Alchichica con la $p(\text{CO}_2)$ para la atmósfera reportada por la NOAA [ $\Delta f(\text{CO}_2)$ ] .....	35
Flujo de CO <sub>2</sub> [ $f(\text{CO}_2)$ ].....	35
Flujo de Carbono Orgánico Particulado (COP) .....	36
Tratamiento estadístico.....	37
RESULTADOS .....	38
Parámetros fisicoquímicos .....	38
Clorofila (Clor- a).....	38
Nutrientes.....	39
Carbono Inorgánico Disuelto (CID) .....	42
Fugacidad de CO <sub>2</sub> [ $f(\text{CO}_2)$ ] y Diferencia de fugacidad de CO <sub>2</sub> con la presión parcial de CO <sub>2</sub> [ $p(\text{CO}_2)$ ] reportada por la NOAA [ $\Delta f(\text{CO}_2)$ ] .....	43
Flujos de dióxido de carbono CO <sub>2</sub> (F(CO <sub>2</sub> )) y carbono orgánico particulado (F(COP)) .....	48
DISCUSIÓN .....	52
CONCLUSIONES.....	57
LITERATURA CITADA.....	58

## RESUMEN

El papel que los ecosistemas acuáticos epicontinentales juegan en el ciclo global del carbono no es del todo claro aún y menos el de los lagos tropicales debido a la escasa información disponible. Alchichica es un lago tropical en el que, a pesar de su condición oligotrófica, la biomasa fitoplanctónica está dominada por organismos de talla grande ( $\geq 40 \mu\text{m}$ ). Esta característica favorece la exportación de carbono orgánico particulado (COP) al fondo del lago y su eventual secuestro. Por otro lado, el ser un lago salino ( $9.9 \pm 0.22 \text{ g L}^{-1}$ ) y alimentado por aguas subterráneas ricas en  $\text{CO}_2$  sugiere que el proceso favorecido es la emisión de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a la atmósfera. Para reconocer si Alchichica funciona como fuente de  $\text{CO}_2$  o sumidero de COP, se realizó un muestreo con frecuencia mensual en el que se midieron parámetros ambientales *in situ* (pH, temperatura y salinidad) y se tomaron muestras de agua para la determinación de carbono inorgánico disuelto (CID) y alcalinidad, además de muestras de material particulado en sedimentación utilizando dos trampas de sedimentos ubicadas cerca (59 m) del fondo del lago, para determinación de los flujos de COP ( $F(\text{COP})$ ). Para estimar la fugacidad del  $\text{CO}_2$  [ $f(\text{CO}_2)$ ] y el flujo de  $\text{CO}_2$   $F(\text{CO}_2)$  se aplicaron una serie de ecuaciones. El promedio anual de  $f(\text{CO}_2)$  estimado para Alchichica es 1.6 veces mayor al promedio de las registros mensuales de la fracción molar de  $\text{CO}_2$  reportados por la NOAA durante el mismo periodo del presente estudio. Durante un tercio (33%) del año (junio, octubre, noviembre y marzo)  $\Delta f(\text{CO}_2) < 0$  por lo que Alchichica funcionó como sumidero de C. Por el contrario, en los otros dos tercios (67%) del año (abril, mayo, julio, agosto, septiembre, diciembre, enero y febrero),  $\Delta f(\text{CO}_2) > 0$  por lo que Alchichica se comportó como fuente de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera. El  $F(\text{CO}_2)$  calculado fue  $61 \pm 59 \text{ ton año}^{-1}$ , 1.6 veces mayor que el  $F(\text{COP})$ .



## ABSTRACT

The role epicontinental aquatic ecosystems play in the global carbon cycle is not fully understood; this is particularly critical when referring to tropical lakes where limited information is available. Alchichica is a tropical lake in which, despite its oligotrophic status, the phytoplankton biomass is dominated by large-sized organisms ( $\geq 40 \mu\text{m}$ ). This characteristic favors the exportation of particulate organic carbon (POC) to the bottom of the lake that could eventually become sequestered. On the other side, Alchichica is saline ( $9.9 \pm 0.22 \text{ g L}^{-1}$ ), fed by  $\text{CO}_2$ -rich groundwater suggesting the  $\text{CO}_2$  emission to the atmosphere should be the favored process. To find out if Alchichica acts as a carbon source or sink, a monthly sampling program was carried out to measure environmental *in situ* variables (pH, temperature, and salinity), and water samples were taken to the laboratory to analyze dissolved inorganic carbon (DIC) and alkalinity. Additionally, two sediment traps were deployed just above (59 m) the lake's bottom, to evaluate settling POC. A series of equations were applied to estimate  $\text{CO}_2$  fugacity [ $f(\text{CO}_2)$ ] and the flow of  $\text{CO}_2$  ( $F(\text{CO}_2)$ ). The mean annual  $f(\text{CO}_2)$  value for Alchichica was 1.6 times the monthly average of the  $\text{CO}_2$  molar fraction reported by NOAA along the studied period. One third (33%) of the time (June, October, November, and March),  $\Delta f(\text{CO}_2) < 0$  indicating Alchichica was a C-sink. On the contrary, the remaining two thirds (67%) of the time (April, May, July, August, September, December, January, and February),  $\Delta f(\text{CO}_2) > 0$ , pointing out Alchichica behaves as a  $\text{CO}_2$ -source to the atmosphere. The  $F(\text{CO}_2)$  calculated was  $61 \pm 59 \text{ ton year}^{-1}$ , 1.6 times greater than the  $F(\text{POC})$ .

## INTRODUCCIÓN

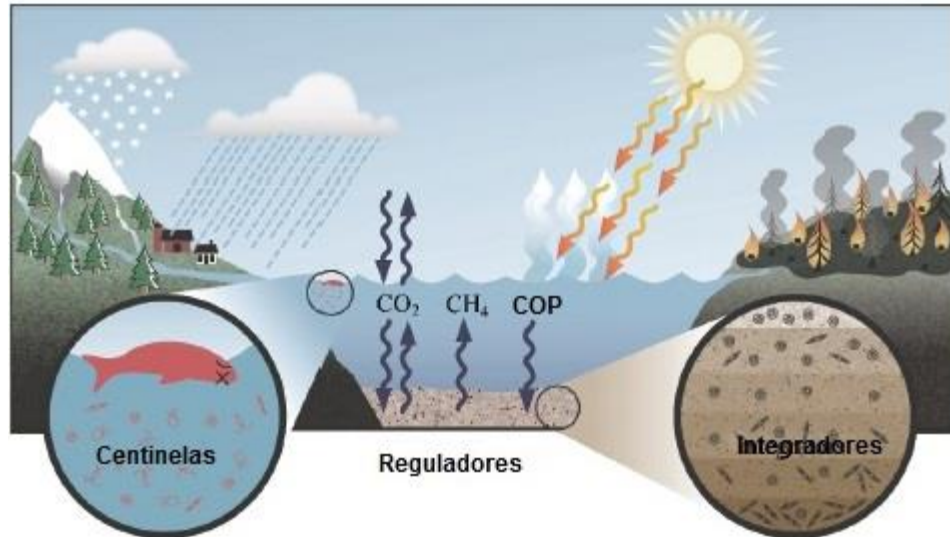
### Papel de los lagos en el ciclo global del carbono

El cambio climático global es considerado una de las amenazas más graves a los ecosistemas en todo el mundo; es sin lugar a dudas, uno de los problemas ambientales más importantes a los que se ha enfrentado el ser humano (Adrian *et al.*, 2009). El calentamiento continuo puede dar por resultado impactos ambientales tales como la elevación del nivel del mar, cambios en el ciclo hidrológico, modificación en la distribución de flora y fauna, además de un aumento previsto en la distribución de agentes patógenos y parásitos. Debido a esto es que la ciencia se ha abocado a evaluar la respuesta de los tres principales reservorios planetarios (terrestre, océano y atmósfera) ante el aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> que se están presentando a la atmósfera y la acumulación de gases con efecto invernadero, junto con la identificación de las perturbaciones en el ciclo global del carbono y el clima. Aunque se conoce que la corteza terrestre y el océano son los grandes reservorios de carbono (Libes, 2009; Cole *et al.*, 2007), aún no está claro el papel que los sistemas epicontinentales juegan en el ciclo global del carbono.

En particular, los lagos pueden actuar como centinelas del cambio climático debido a que constituyen una gran red con amplia distribución geográfica, por lo que pueden proporcionar información valiosa sobre los patrones y los mecanismos de cómo los ecosistemas terrestres y acuáticos están respondiendo al cambio climático; los lagos responden rápidamente a los cambios en la radiación solar, la precipitación, el viento, la hidrología y una variedad de aportes atmosféricos y terrestres. Williamson *et al.* (2009) describen a los lagos como reguladores del cambio climático (Fig. 1):

- 1) reciben, procesan y almacenan grandes cantidades de carbono de la cuenca,
- 2) están involucrados en un intercambio activo de gases de efecto invernadero con la atmósfera suprayacente y
- 3) pueden alterar el clima regional por formación de nubes, precipitación y evaporación.

Además de ser integradores del cambio climático porque almacenan señales de cambio en los sedimentos, integrando cambios no solo dentro del ecosistema acuático, sino también cambios en ecosistemas terrestres y acuáticos circundantes (Williamson *et al.*, 2009).

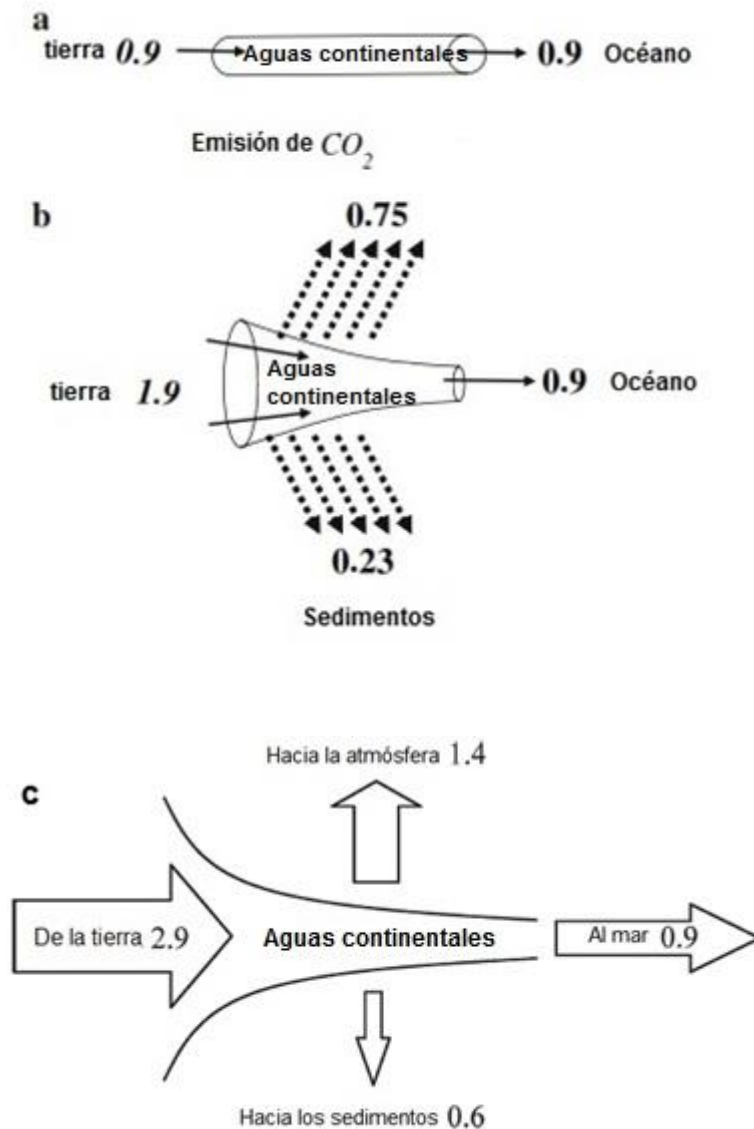


**Fig. 1.** Diagrama conceptual de los lagos como centinelas, integradores y reguladores del cambio climático (Modificado de Williamson *et al.*, 2009).

Los lagos, embalses y otros cuerpos de agua interiores: a) constituyen un importante componente del ciclo global del carbono, b) presentan cambios significativos en su contribución, como resultados de actividades humanas, c) podrían continuar cambiando en el futuro en respuesta al cambio climático, acoplado con el incremento de grandes y pequeños embalses. Estos cambios incluyen el secuestro hacia los sedimentos, o bien emisiones a la atmósfera, así como la alteración del transporte hacia el mar. Los lagos son activos, cambian y son reguladores importantes del ciclo del carbono y del clima global (Tranvik *et al.*, 2009).

En el ciclo del carbono, los productores primarios son los encargados de tomar el carbono inorgánico de la atmósfera (CO<sub>2</sub>) y transformarlo en orgánico; posteriormente, los productores primarios pueden agregarse y hundirse o ser consumidos por organismos heterótrofos, transfiriendo así una parte de este carbono a la red trófica. Otra parte es oxidada y retorna eventualmente a la atmósfera (Alcocer *et al.*, 2011b). El carbono que

no es oxidado en la zona eufótica de los ecosistemas acuáticos, puede ser reutilizado en la columna de agua o bien exportado por debajo de la termoclina y transportado al sedimento a través de la sedimentación de los organismos muertos, heces fecales ("fecal pellets"), agregados microscópicos ( $> 500 \mu\text{m}$ , conocido como nieve marina o lacustre) y compuestos de restos de materia orgánica e inorgánica (Honjo *et al.*, 1982; Simon *et al.*, 2002).



**Fig. 2.** a. Esquema simple del papel de los sistemas acuáticos epicontinentales como conductores pasivos en el transporte de carbono orgánico e inorgánico desde la tierra (continente) al mar. b. Propuesta alternativa tomando a los sistemas acuáticos epicontinentales como componentes activos del ciclo global de carbono como almacenes de

carbono en los sedimentos o fuente de este a la atmósfera (modificado de Cole *et al.*, 2007). c. Propuesta de flujo (modificada de Tranvik *et al.*, 2009). (Pg =  $10^{15}$  g).

A pesar que las aguas epicontinentales ocupan una fracción relativamente pequeña de la superficie terrestre y del volumen de agua planetario, existen aproximadamente 304 millones de lagos naturales que cubren un 2.8% de la superficie terrestre, sin incluir cuerpos de agua temporales ni humedales. Los embalses cubren otro 0.22% del área de la Tierra, número que está creciendo debido al aumento poblacional por el incremento en sus necesidades por el recurso acuático (Cole *et al.*, 2007; Downing *et al.*, 2006; Downing, 2009), razón por la cual tradicionalmente se han descartado como “actores” de importancia en el ciclo del carbono (C). Cole *et al.* (2007) ponen en evidencia el papel de los ecosistemas acuáticos epicontinentales como componentes activos del ciclo global del carbono. Su importancia radica en que pueden presentar una productividad primaria (PP) comparativamente elevada con la de otros ecosistemas, además de ser el “vehículo” para el transporte de carbono terrestre procedente de la cuenca, ya sea hacia los sedimentos, hacia la atmósfera o bien hacia otros sistemas acuáticos (Fig. 2).

### Ciclo del carbono

En términos de transferencia de masa entre los continentes, el océano y la atmósfera, el ciclo del carbono constituye el conjunto de procesos más activo que controla el comportamiento de los principales elementos en la superficie terrestre. El impacto humano en este ciclo es importante ya que incrementa las concentraciones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ) en la atmósfera, gases asociados con el calentamiento global a través del efecto invernadero (Stumm y Morgan, 1996).

La concentración del carbono inorgánico disuelto (CID) es de gran importancia en los sistemas acuáticos ya que: (1) amortigua los cambios de pH; (2) determina la cantidad de carbono inorgánico disponible para la fotosíntesis; (3) provee una gran capacidad de formación de pares iónicos entre los aniones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) con los cationes mayores principalmente  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ; (4) constituye un componente mayor a la concentración de aniones; y (5) puede remover algunos materiales de la columna de agua (p. ej. fósforo) asociado a la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  (Kalff, 2002).

El carbono de los sistemas acuáticos continentales se halla principalmente en forma de iones en equilibrio con el ácido carbónico. En menor proporción, aparece formando parte de compuestos orgánicos en forma de carbono detrítico disuelto y particulado, y una pequeña parte se encuentra en los seres vivos conformando sus tejidos. Se conocen con bastante precisión las complejas reacciones de equilibrio del carbono inorgánico disuelto y la distribución de sus distintas especies ( $\Sigma\text{CO}_2 = \text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ).

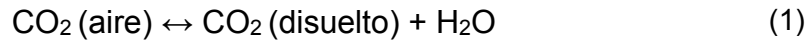
Cuando el  $\text{CO}_2$  atmosférico se disuelve en agua con bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), el cual normalmente se presenta asociado al catión calcio, las cinéticas de disociación del carbono inorgánico de las aguas dulces se aproximan bastante a las que presenta una solución diluida pura. Si el pH es superior a 8.5, las concentraciones de  $\text{CO}_2$  son inferiores a las deducibles atendiendo a las constantes de disociación aparentes del ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). El pH de la mayoría de las aguas dulces resulta de los iones  $\text{H}^+$  procedentes de la disociación del  $\text{H}_2\text{CO}_3$  y de los iones  $\text{OH}^-$  debido a la hidrólisis de los iones  $\text{HCO}_3^-$ .

Aunque en las zonas abiertas y aireadas de los lagos el intercambio del  $\text{CO}_2$  entre el agua y la atmósfera es un proceso rápido y relativamente completo, la distribución espacial y temporal de  $\text{CO}_2$  y del pH es alterada. El carbono inorgánico constituye uno de los principales nutrientes del metabolismo fotosintético de las algas, aunque en la naturaleza el carbono inorgánico se comporta raras veces como limitante de la fotosíntesis (Wetzel, 1981).

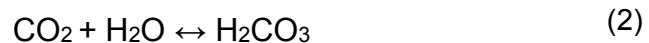
### Formas del carbono inorgánico y sus transformaciones en la columna de agua

El  $\text{CO}_2$  es muy soluble en el agua, unas 200 veces más que el oxígeno, y bajo las condiciones habituales de temperatura y presión de los lagos cumple las leyes normales de la solubilidad. La cantidad de  $\text{CO}_2$  atmosférico que se disuelve en el agua es aproximadamente  $1.10 \text{ mg L}^{-1}$  a  $0^\circ\text{C}$ ,  $0.65 \text{ mg L}^{-1}$  a  $15^\circ\text{C}$  y  $0.48 \text{ mg L}^{-1}$  a  $30^\circ\text{C}$  (Wetzel, 1981; Kalff, 2002).

Cuando el CO<sub>2</sub> se disuelve en el agua, la disolución contiene aproximadamente la misma concentración de CO<sub>2</sub> no hidratado por unidad de volumen (aprox. 10 μM) que la atmósfera:



El CO<sub>2</sub> del agua se hidrata convirtiéndose en H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>:



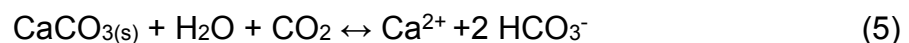
El H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> es un ácido débil, siendo su velocidad de disociación más rápida que la hidratación:



Una aparente disociación o constante de equilibrio ( $K_1$ ) para el primer paso de ionización de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> describe la reacción de equilibrio para la (Eq.3), la concentración de cada ión está en mol L<sup>-1</sup>.

$$K_1 = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = 4.41 \times 10^{-7} \text{ a } 25^\circ\text{C} \quad (4)$$

Donde el sustrato es rico en precipitados o rocas carbonatadas y los niveles de CO<sub>2</sub> son altos por producción microbiana, el H<sup>+</sup> producido (Eq.3) disuelve los carbonatos (Wetzel, 1981; Kalff, 2002):

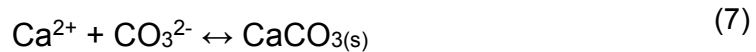


En drenajes calcáreos, cerca de la mitad del HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> relacionado con corrientes de agua es derivado de la intemperización (disolución) del sustrato, mientras que en sistemas con sustratos de bajo contenido de carbonato (p. ej., rocas ígneas), casi todo el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> producido es el resultado de la producción de CO<sub>2</sub> por respiración (Eq.3).

El  $\text{HCO}_3^-$  que es producido podría más adelante disociarse:



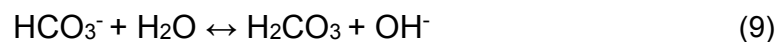
La alta concentración de  $\text{HCO}_3^-$  junto con un pH alto ( $\geq 8.5$ ) generan fácilmente precipitado después de la disminución por liberación de  $\text{CO}_2$ .



Esta disociación también puede ser descrita por una segunda constante de equilibrio ( $K_2$ )

$$K_2 = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = 4.7 \times 10^{-7} \text{ a } 25^\circ\text{C} \quad (8)$$

El  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  se hidrolizan para producir  $\text{OH}^-$ :



Si el equilibrio entre las diferentes formas está perturbado, como cuando el  $\text{CO}_2$  es adicionado al sistema por respiración, removido por la fotosíntesis o liberado a la atmósfera, la relación podría desplazarse en una vía u otra intentando restablecer el equilibrio. Cuando el  $\text{CO}_2$  es adicionado al sistema, esto incrementa el almacén de  $\text{H}^+$  seguido por la producción de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (Eqs. 2 y 3). Al mismo tiempo, el  $\text{CO}_3^{2-}$  presente consume el  $\text{H}^+$  produciendo  $\text{HCO}_3^-$  (Eq. 5). En ausencia de  $\text{CO}_3^{2-}$  el  $\text{OH}^-$  (Eq.9) neutraliza la adición de  $\text{H}^+$ :

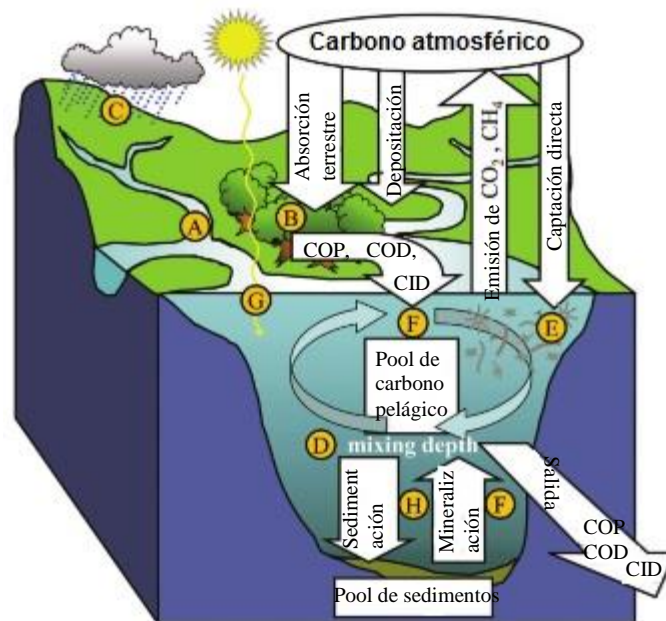


Los iones  $\text{OH}^-$  formados en las reacciones anteriores incrementan la alcalinidad en las aguas ( $\text{pH} > 7$ ) de los lagos que tienen concentraciones elevadas de carbonatos



derivados del agua superficial y subterránea en la cuenca de drenaje. Cuando el agua penetra en el suelo, se enriquece con el  $\text{CO}_2$  resultante de la respiración. El ácido carbónico solubiliza la calcita de las formaciones rocosas ricas en calcio  $[\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2]$ , relativamente soluble en el agua y provocando en ella un incremento de la cantidad de  $\text{Ca}^{2+}$  ionizado y de  $\text{HCO}_3^-$  (Wetzel, 1981; Kalff, 2002).

La fotosíntesis y la respiración son dos de los factores principales que influyen sobre las concentraciones de  $\text{CO}_2$  en el agua, disminuyendo o incrementando su fugacidad  $f(\text{CO}_2)$  y el contenido de CID en el lago. Donde la  $f(\text{CO}_2)$  describe la concentración o actividad del  $\text{CO}_2$  disuelto (DOE, 1994). Los procesos biológicos causan un agotamiento considerable de nutrientes superficiales, CID y  $f(\text{CO}_2)$ . El  $\text{CO}_2$  que es removido durante la fotosíntesis, se pierde por difusión hacia la atmósfera después del aumento de temperatura y disminución en la solubilidad o al ser asimilado por el fitoplancton pasa a ser parte del COP y a su vez es exportado a los sedimentos (Wetzel, 1981; Bates y Samuels, 2001) (Figs. 3 y 4).



**Fig. 3.** Esquema que muestra las rutas del ciclo del carbono mediadas por lagos y otros sistemas acuáticos. (Tomado de Tranvik *et al.*, 2009).

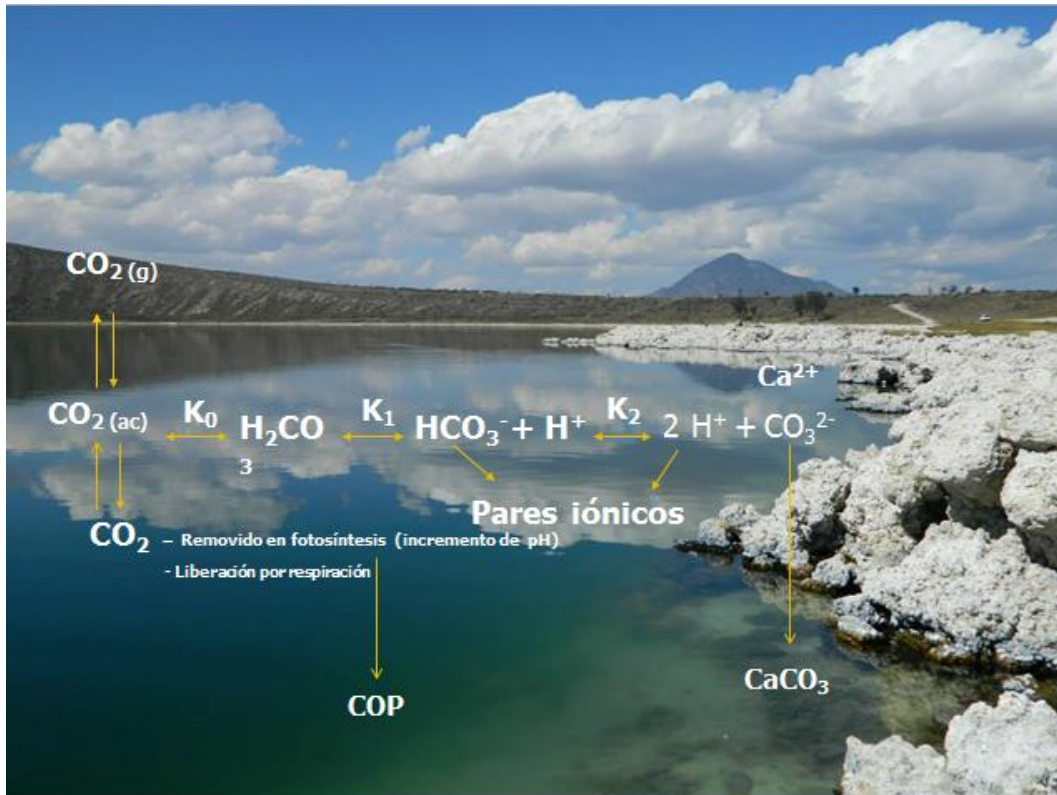


Fig. 4. Sistema carbónico- carbonatos representado gráficamente. (Modificado de Kalf, 2002)

### Principales rutas del carbono en sistemas acuáticos

Se puede conocer la ruta que sigue el carbono biogénico ( $\text{C}_{\text{BIO}}$ ) en un lago dependiendo de la talla dominante de fitoplancton. De acuerdo a Legendre (1999), si la talla dominante es la pequeña, la ruta principal será el reciclamiento de carbono en las capas superficiales del lago mediado por el circuito microbiano o "*microbial loop*", mientras que si la talla dominante es la grande, ésta ingresará a la trama de los herbívoros, aunque la ruta principal será finalmente su exportación hacia el fondo del lago, la cual se verá favorecida si además hay agregación de las células. Lampert y Sommer (1997) afirman que cuando un cuerpo acuático es oligotrófico, la talla dominante del fitoplancton es la pequeña, mientras que si es eutrófico tienden a dominar tallas más grandes.

Cole *et al.* (1994) mencionan que hay estudios que muestran, por un lado, que los lagos árticos son fuentes de CO<sub>2</sub> a la atmósfera como resultado de la gran cantidad de materia orgánica presente en la tundra y que finalmente es arrastrada a los lagos; pero, por otro lado, se ha encontrado que otros lagos, en este caso boreales y templados, son sumideros netos de carbono. Por lo anterior, los mismos autores analizaron 1,835 lagos boreales, templados y unos pocos tropicales y encontraron que el 87% de las aguas superficiales estaban sobresaturados de CO<sub>2</sub>, indicando que los lagos funcionan más bien como fuentes y no como sumideros de carbono. Por otro lado, Duarte *et al.* (2008) encontraron que para el caso de los lagos salinos, éstos no sólo emiten CO<sub>2</sub>, sino que lo hacen a tasas mayores a las encontradas en los lagos de aguas dulces.

La información que existe sobre lagos tropicales no permite aún conocer si éstos funcionan como fuentes o como sumideros de carbono (Cole *et al.*, 1994). Un caso interesante lo constituye Alchichica que, a pesar de ser un lago tropical oligotrófico, su biomasa fitoplanctónica está dominada por organismos de talla grande, particularmente organismos > 40 µm representados por la diatomea *Cyclotella alchichicana* (Adame *et al.*, 2008). De acuerdo a lo anterior, se espera que se presente una mayor exportación y, por ende, acumulación de COP en el fondo, en comparación con otros lagos de estado trófico similar. Alcocer *et al.* (2011b) mencionan que los lagos tropicales pequeños y profundos como Alchichica, contribuyen al almacén de carbono en los sedimentos como reflejo no sólo de su productividad, sino también de la tasa de acumulación y capacidad de preservación de los sedimentos debido a que: a) el hipolimnion permanece anóxico una parte importante del año ( $\geq 6$  meses), b) se encuentran a una temperatura relativamente baja ( $\sim 14.5^{\circ}\text{C}$ ) y c) hay una escasa presencia de fauna bentónica.

Por otro lado, si bien el lago Alchichica presenta características que favorecen la retención de carbono, otras sugieren que se favorece la emisión de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera al ser un lago tropical, salino y alimentado por aguas subterráneas ricas en CO<sub>2</sub> (Vilaclara *et al.*, 1993; Alcocer y Hammer, 1998), características mencionadas por Duarte *et al.* (2008) para otros sistemas epicontinentales. En particular, los lagos salinos tienen el potencial de mantener altas tasas de intercambio de CO<sub>2</sub> con la atmósfera. A pesar que los lagos salinos son posiblemente los mayores lugares de intercambio de

CO<sub>2</sub> entre los ecosistemas acuáticos y la atmósfera, su papel global no ha sido estudiado aún (Duarte *et al.* 2008).

De acuerdo a lo mencionado por Balmer y Downing (2011), conocer las concentraciones y contribuciones del CO<sub>2</sub> en ecosistemas acuáticos es una parte de gran importancia para comprender el balance global de carbono, la premisa sugiere que los lagos del mundo son importantes emisores de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Los autores estimaron la presión parcial de CO<sub>2</sub>  $p$  (CO<sub>2</sub>) por un periodo de 7 años en muestras de 131 lagos eutroficados por actividades agrícolas. Los valores de  $p$  (CO<sub>2</sub>) oscilaron entre 0.1 a 40,392  $\mu$ atm con una media de 322  $\mu$ atm. En contraste y considerando análisis previos de CO<sub>2</sub> en lagos, el 60% de las muestras en lagos eutróficos estuvieron subsaturadas con CO<sub>2</sub>. Los datos reportados sugieren que los principales lagos eutróficos en zonas templadas están subsaturados con CO<sub>2</sub>, al menos durante el verano, lo cual difiere de muchos resultados de estudios previos en lagos boreales templados. Esto resalta la importancia de cuantificar CO<sub>2</sub> en diversos tipos de lagos, para que sea factible la inclusión de éstos en los modelos de balance global y regional de carbono.

Si bien se conoce más sobre el papel de Alchichica como exportador de carbono a los sedimentos por haberse realizado varios trabajos al respecto (p. ej., Alcocer *et al.*, 2007; Alcocer *et al.*, 2011a; Alcocer *et al.*, 2014a), se desconocen sus tasas de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Lo anterior permitiría ponderar los factores que mayor peso tienen en el balance de carbono en este lago tropical, para determinar si funciona como fuente neta de CO<sub>2</sub> a la atmósfera o como sumidero de carbono a los sedimentos. Lo mencionado anteriormente es importante ya que permitirá entender las dinámicas regionales para lagos semejantes en latitudes tropicales debido a que la información acerca del papel del carbono en cuerpos acuáticos epicontinentales es aún escasa y la mayoría de ésta procede de estudios realizados en los lagos de las zonas templadas y muy pocos de ambientes tropicales.

## ANTECEDENTES

Alchichica es uno de los lagos más estudiados en México. Los trabajos e investigaciones relacionados con el papel del carbono en este sistema son relativamente recientes y se enfocan en la dinámica y almacenamiento del carbono orgánico particulado (COP).

En el primer estudio (Alcocer *et al.*, 2007) se menciona que, contrario a lo esperado (mayores concentraciones de COP durante los florecimientos fitoplanctónicos de invierno y primavera), no se encontró un patrón temporal claro en la concentración de COP medido a través de la técnica de pérdida en combustión (LOI) del seston. Se menciona que la probable discrepancia derive del hecho de que el detrito de alóctono sea una fuente importante de COP para el lago. Sin embargo, la técnica de aproximación empleada conduce a sobrestimar la materia inorgánica particulada, a pesar de que la mayor cantidad de ésta en realidad está constituida por frústulas de diatomeas, las cuales tienen origen orgánico.

Los mismos autores mencionan que, en general, la dinámica del COP en Alchichica está muy relacionada con la hidrodinámica del lago. El largo periodo de estratificación (alrededor de nueve meses) hace que el COP permanezca dentro de la  $Z_{MIX}$  (capa de mezcla) que coincide con la  $Z_{EU}$  (zona eufótica).

Posteriormente, Alcocer *et al.* (2011a y 2011c) encuentran que la concentración de COP (medida por análisis elemental) en Alchichica presenta valores promedio de  $32.46 \pm 14.81 \mu\text{mol l}^{-1}$ . Su dinámica responde a la existencia de tres eventos principales del desarrollo del fitoplancton que, a su vez, están asociados a la hidrodinámica del lago: a) un florecimiento invernal de diatomeas dominado por *Cyclotella alchichicana* y por *C. choctawacheeana* que ocurre durante la época de mezcla; b) un florecimiento primaveral de la cianobacteria fijadora de nitrógeno *Nodularia spumigena* durante la estratificación temprana; c) el desarrollo de un máximo profundo de clorofila (DCM) que ocurre en el metalimnion a lo largo de la estratificación bien establecida y de la estratificación tardía dominado por *C. alchichicana*.

La relación entre el COP y la Clor-a pueden servir como un *proxy* de la contribución del detrito al material particulado suspendido (Hessen, 2006). El análisis de los valores integrados de COP y Clor-a en la  $Z_{MIX}$  de Alchichica reveló una buena correlación ( $r$  de Pearson = 0.72) entre ambos parámetros. Por otro lado, los autores mostraron que la dinámica del COP en Alchichica resultó similar a la descrita para el seston del mismo lago por López-Anaya *et al.* (2010). Lo anterior indicó que la materia particulada y por ende el COP dentro de la zona de mezcla en Alchichica está conformada en su mayoría por células vivas del fitoplancton.

Los resultados encontrados por Alcocer *et al.* (2011b y 2011d): a) modifican la percepción de que los lagos oligotróficos son menos importantes en los balances de carbono regionales, b) muestran que independientemente el estado trófico, la talla del fitoplancton dominante puede ser más relevante en los procesos de exportación y almacén de carbono en los sedimentos y c) los lagos tropicales profundos que generalmente desarrollan un hipolimnion anóxico tienden a acumular mayor cantidad de carbono en los sedimentos.

Kazmierczak *et al.* (2011) reportan una estimación puntual (un solo sitio y fecha de muestreo) de la  $p$  ( $CO_2$ ) en el lago Alchichica de  $1265 \pm 32.1$  ppm para la columna de agua utilizando el programa PHREEQE.

Actualmente se ha dado mayor atención a los ecosistemas acuáticos continentales mexicanos. Uno de los trabajos más recientes es el realizado en el embalse de Valle de Bravo por Valdespino *et al.* (2014), donde reportan que el balance del sistema en su totalidad indicó heterotrofia neta ( $P:R < 1$ ). También postulan que los eventos de mezcla provocados por la acción del viento aumentan su frecuencia e intensidad cuando el embalse presenta nivel bajo, incrementando la respiración del ecosistema y presentando en ese periodo un aporte hacia la atmósfera de  $4.0 \text{ mg } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  y una producción neta del ecosistema equivalente a una exportación neta de  $3.4 \text{ mg } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  a la atmósfera.

Alcocer *et al.* (2014a) reportan para Alchichica una concentración alta de carbono orgánico particulado (COP), principalmente de origen autóctono. La concentración de COP registrada hacia el núcleo de sedimentos (16.6 a 31.6 mg g<sup>-1</sup> peso seco) fue comparable a los intervalos de concentración observados en las muestras de sedimento superficial lo cual señala una alta preservación de COP en la columna sedimentaria del lago. El flujo de COP datado con <sup>210</sup>Pb en núcleos de sedimentos varió entre 14.9 y 35.3 g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> con respecto a valores registrados en años anteriores; esto llevo a los autores a la conclusión de que los lagos tropicales, ejemplificados por el Lago Alchichica, pueden acumular y preservar una mayor cantidad del COP depositado en los sedimentos, jugando un papel importante en el balance regional del carbono, además de dejar en evidencia la independencia del estado trófico de los lagos ya que el tamaño del fitoplancton puede ser relevante para los procesos de captura y exportación de carbono.

## PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

El lago Alchichica ha mostrado ser un sistema ideal para estudiar la importancia relativa de la dinámica del carbono, ya que presenta características que parecen favorecer tanto la exportación y secuestro potencial de carbono a los sedimentos (p.ej., estar dominado por fitoplancton de talla grande, presencia de un hipolimnion anóxico), como la emisión de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera, al ser un lago hiposalino enriquecido en CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Alcocer y Hammer, 1998; Adame *et al.*, 2008). De acuerdo a lo anterior, en este trabajo se planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿El lago Alchichica funciona como fuente de CO<sub>2</sub> a la atmósfera o como sumidero de carbono al sedimento?

## HIPOTESIS

- Hipótesis 1: Alchichica, por ser un lago salino y alimentado por aguas subterráneas ricas en carbonatos, presentará un comportamiento como fuente de carbono.

- Hipótesis 2: Dado que la biomasa fitoplanctónica de Alchichica está dominada por fitoplancton de talla grande, genera un hipolimnion anóxico la mayor parte del ciclo anual y posee fauna bentónica reducida, presentará un comportamiento como sumidero de carbono.

## OBJETIVOS

### GENERAL

Determinar si el lago Alchichica funciona como fuente<sup>1</sup> o sumidero<sup>2</sup> de carbono, a través de estimar la cantidad de CO<sub>2</sub> que emite el lago hacia la atmósfera, así como la cantidad de Carbono Orgánico Particulado (COP) que exporta al sedimento.

### PARTICULARES

- Estimar la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera por medio del cálculo de la fugacidad del CO<sub>2</sub> [ $f(\text{CO}_2)$ ]
- Calcular la cantidad de COP que llega al fondo mediante el uso de trampas de sedimentos.
- Asociar la dinámica de emisión/depósito de carbono con las características limnológicas principales y los eventos productivos del lago a lo largo del ciclo anual.
- Hacer un balance entre el carbono emitido a la atmósfera y el exportado hacia los sedimentos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo entre los meses de abril de 2013 y marzo de 2014 en el lago Alchichica, ubicado en la porción poblana de la cuenca Oriental (19°24.7'N; 97° 24.0'W),

---

<sup>1</sup> Fuente: se refiere a las emisiones de CO<sub>2</sub> del lago hacia la atmósfera, cuando la  $f(\text{CO}_2)$  del agua es mayor que la  $p(\text{CO}_2)$  de la atmósfera (tomándose como positivo (+)).

<sup>2</sup> Sumidero: se refiere al CO<sub>2</sub> que ingresa al cuerpo de agua cuando la  $p(\text{CO}_2)$  de la atmósfera es mayor que la  $f(\text{CO}_2)$  del agua, este gas es consumido en reacciones bioquímicas o exportado a los sedimentos (tomándose como negativo (-)) (Blade, 2009).

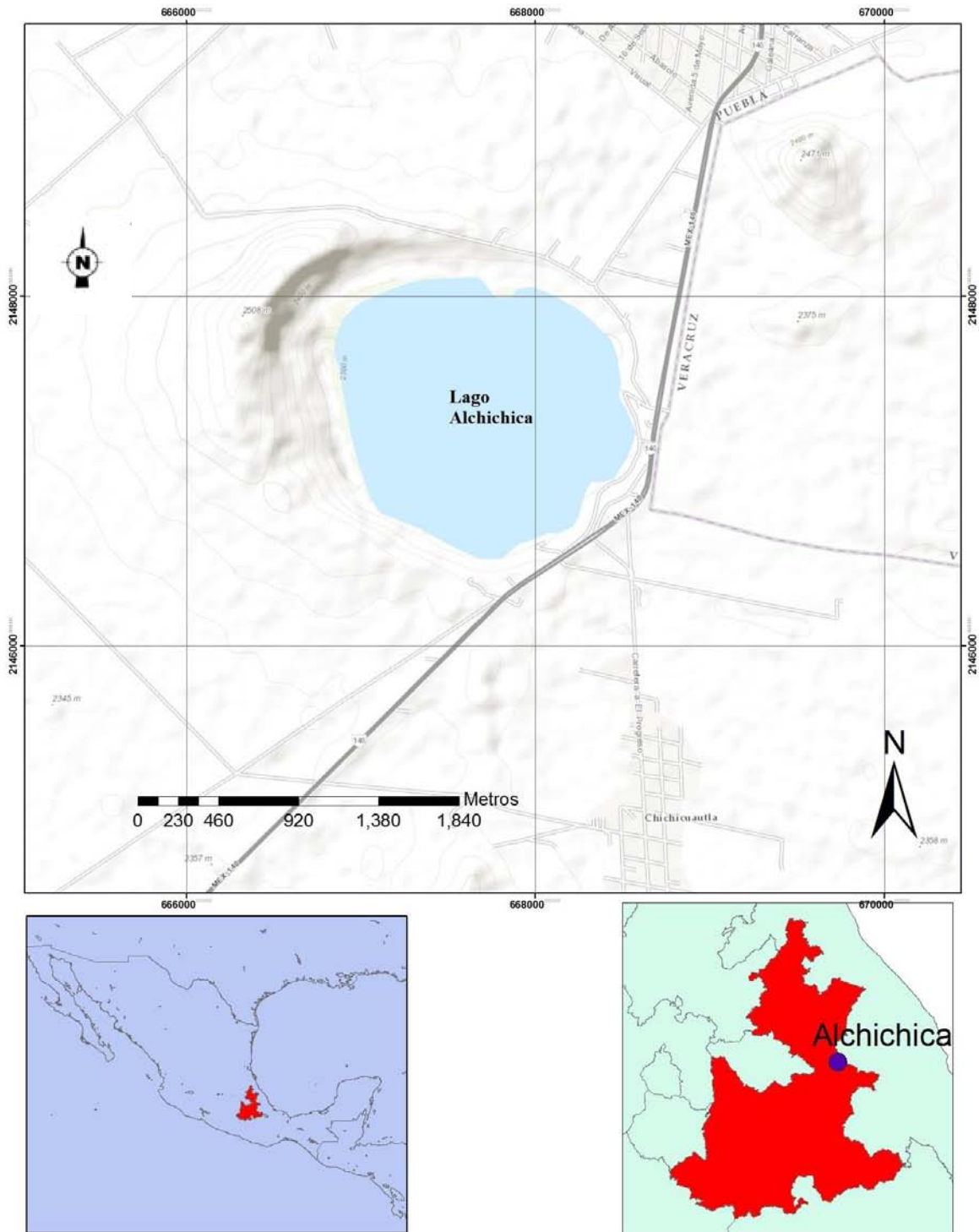


a 2,345 m s.n.m. (Fig. 5) (Alcocer *et al.*, 2007). Alchichica es lago casi circular con un área de 2.3 km<sup>2</sup> y con una profundidad máxima de 62 m (Filonov *et al.*, 2006).

La región tiene un clima árido, con una tasa de evaporación anual de 1,690 mm y una precipitación de menos de 500 mm (promedio desde 1966 a 2002, datos suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional, Adame *et al.*, 2008). El lago presenta aguas hiposalinas (8.5 g L<sup>-1</sup>), alcalinas y de pH básico (aprox. 9) (Vilaclara *et al.*, 1993).

Es un lago tropical, oligotrófico (concentración de clorofila *a* y nutrientes medios anuales en la zona eufótica < 5 µg L<sup>-1</sup> y < 4 µM, respectivamente [Adame *et al.* (2008) y Ramírez-Olvera *et al.* (2009)] y monomítico cálido. La circulación se lleva a cabo desde finales de diciembre o principios de enero hasta el inicio del periodo de estratificación, a finales de marzo o principios de abril; el periodo de estratificación se puede dividir en estratificación temprana (abril-junio), estratificación bien establecida (Julio-Septiembre) y estratificación tardía (Octubre-Diciembre) (Alcocer *et al.*, 2000; Oseguera *et al.*, 2011).

Alchichica presenta tres eventos importantes de producción primaria: 1) un florecimiento invernal de diatomeas dominado por *Cyclotella alchichicana* que ocurre durante la época de circulación (enero-marzo), 2) un florecimiento primaveral de la cianobacteria fijadora de nitrógeno *Nodularia spumigena* durante la estratificación temprana, correspondiendo a finales del mes de abril y el mes de mayo y 3) el desarrollo de un máximo profundo de clorofila (DCM) que se presenta en el metalimnion durante la estratificación bien establecida y parte de la tardía, aproximadamente entre junio y noviembre, dominado por *C. alchichicana* (Oliva *et al.*, 2001 y 2006; Alcocer *et al.*, 2011a y 2011c).



**Fig. 5.** Localización geográfica del Lago Alchichica, Puebla, y ubicación del sitio de muestreo en el lago.

## MÉTODOS

Con el objetivo de conocer si el lago Alchichica funcionaba como fuente de CO<sub>2</sub> a la atmósfera o sumidero de COP al sedimento se planteó la siguiente metodología.

Inicialmente se obtuvo un perfil usando la sonda multiparamétrica de calidad de agua marca Hydrolab modelo DS5 acoplado a un registrador SVR 4. Se tomaron muestras de agua en superficie con ayuda de una botella marca UWITEC de 5 litros para determinar iones mayores, alcalinidad, pH y carbono inorgánico disuelto (CID). Mientras que para la determinación de carbono orgánico particulado (COP) se tomaron muestras de las trampas de sedimentos ubicadas a 59 m de profundidad, 3 m por encima del fondo del lago.

Para su análisis, las muestras para determinación de CID y COP se enviaron al Center for Marine Science de la University of North Carolina at Wilmington (Dr. Robert Whitehead), mientras que las muestras para iones mayores, alcalinidad y pH se analizaron en el Laboratorio de Química Analítica (Dra. María Aurora Armienta), Instituto de Geofísica, UNAM.

Los valores de CID junto con los de pH, alcalinidad total, salinidad (calculada por medio de la suma de sólidos totales disueltos) y temperatura fueron usados para los cálculos de la fugacidad de CO<sub>2</sub> ( $f(\text{CO}_2)$ ) (Eq.13-30) siguiendo la metodología de DOE (1994) y Grasshoff *et al.* (2002), además del uso de la plantilla co2sys, reportando así tres métodos para la obtención de la  $f(\text{CO}_2)$ .

Por otro lado, los perfiles obtenidos para nutrientes, clorofilas, temperatura, oxígeno disuelto y CID en la columna de agua fueron graficados con la aplicación Surfer versión 8.02.27 para analizar y comparar el comportamiento de éstos a lo largo de la columna de agua en el periodo de estudio (Figs. 8-12). El análisis de nutrientes se hizo en el laboratorio de Biogeoquímica Acuática (Dr. Martín Merino Ibarra) del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM) y finalmente la determinación de clorofilas en el laboratorio de Limnología Tropical de la FES Iztacala (Dr. Javier Alcocer Durand).

Cada una de las metodologías mencionadas se describe a continuación.

## TRABAJO DE CAMPO

### Medición de parámetros fisicoquímicos

La medición de los parámetros fisicoquímicos se realizó *in situ* con una sonda multiparamétrica de calidad de agua marca Hydrolab modelo DS5 acoplada a un registrador SVR4, con la cual se registraron los valores de temperatura y oxígeno disuelto metro a metro a lo largo de la columna de agua en la estación de monitoreo ubicada en la parte central más profunda del lago (19°24.759' N; 97° 24.198' W) (Fig. 5).

### Determinación de pH, alcalinidad e iones

Para las determinaciones de pH, alcalinidad e iones mayores, las muestras de agua fueron colocadas en envases de polipropileno de 1000 ml para pH e iones mayores y de 500 ml para alcalinidad, a esta última se agregaron 50 gotas de ácido nítrico concentrado ( $\text{HNO}_3$ ) para inhibir la actividad microbiana.

### Obtención de muestras para Carbono Inorgánico Disuelto (CID)

Las muestras de agua para medir el CID se guardaron en botellas de DBO de 60 ml. En éstas se adicionaron 50 ml de muestra y se le agregaron 25  $\mu\text{L}$  de una solución saturada al 50% ( $0.10 \text{ cm}^3$ ) de cloruro mercuríco ( $\text{HgCl}_2$ ) para inhibir la actividad microbiológica. El contenido de la botella fue agitado para mezclar de manera homogénea. Las tapas de las botellas se sellan con grasa de silicona para evitar el intercambio de  $\text{CO}_2$  con la atmósfera. Las muestras se ubicaron en un lugar oscuro y frío para su posterior análisis.

### Determinación del flujo de Carbono Orgánico Particulado (COP)

Para la obtención de los flujos de carbono orgánico particulado (COP) se empleó una estación de trampas de sedimento (KC Denmark sediment trap 2-tube station). La estación consta de dos tubos de acrílico ( $\varnothing = 80/74 \text{ mm}$ ,  $L = 450 \text{ mm}$ ,  $V = 19 \text{ L}$ ) con una

proporción L:  $\emptyset$  de 6, la cual garantiza que el material atrapado no se resuspenda (Callieri, 1997; Weyhenmeyer, 1997; Punning *et al.* 2003). Las trampas se ubicaron a tres metros del fondo para evitar la captura del sedimento resuspendido.

Las trampas se llenaron de agua filtrada (malla de nylon de 100  $\mu\text{m}$  de apertura) de la misma profundidad en la que se colocó. Una vez recuperadas las trampas, el agua y el material capturado se homogenizó y filtró a través de una malla de 100  $\mu\text{m}$  de apertura para eliminar el zooplancton y otros organismos nadadores (Karl *et al.*, 1991a; Lee *et al.*, 1988). Enseguida, el contenido, agua y material atrapado de cada trampa, se colocó en recipientes de plástico de 2.0 L previamente lavados con HCl al 2% y enjuagados tres veces con agua desionizada para evitar la contaminación de las muestras (Karl *et al.*, 1991a). Las muestras fueron transportadas al laboratorio en oscuridad y con hielo para evitar su alteración.

#### Determinación de Clorofila “a”

Los perfiles verticales de la concentración de clorofila “a” (Clor-a) fueron obtenidos tomando muestras puntuales a 10 profundidades a lo largo de la columna de agua mediante una botella muestreadora UWITEC de 5 L. De la botella muestreadora se traspasaron 250 ml de muestra a una botella de polipropileno 500 ml, la cual fue transportada al laboratorio en frío y oscuridad.

#### Obtención de muestras para nutrientes

Las muestras para nutrientes disueltos, N y P totales, se colocaron en frascos de polipropileno pre-lavados con agua desionizada; se tomaron volúmenes de agua de 30 ml pre-filtrados a través de membranas de nitrocelulosa de 0.45  $\mu\text{m}$ . Para N y P totales se puso directamente la muestra de agua mientras que para nutrientes disueltos se pasa nuevamente por membranas de nitrocelulosa pero esta vez de 0.22  $\mu\text{m}$ . Las muestras fueron mantenidas en congelación y oscuridad hasta su posterior análisis.

## TRABAJO DE LABORATORIO

### Análisis de muestras para Carbono Inorgánico Disuelto (CID)

Las concentraciones de CID se midieron con un equipo Shimadzu TOC 5050 en el Center for Marine Science de la University of North Carolina at Wilmington (Dr. Robert Whitehead). Las muestras fueron inyectadas en una solución de ácido fosfórico que libera el CO<sub>2</sub> el cual es acarreado a un detector infrarrojo. Las muestras fueron corridas contra estándares con inyecciones intermitentes de Dickson's CO<sub>2</sub> CRM para conocer la precisión de los registros. La precisión conseguida fue típicamente de +/- 5 µM C.

### Determinación de pH, alcalinidad e iones

El pH se midió con un potenciómetro Oakton serie 510. Los análisis de alcalinidad y dureza de Mg<sup>2+</sup> y Ca<sup>2+</sup> se realizaron siguiendo el método de titulación, de Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> con un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 2380; la concentración de Cl<sup>-</sup> potenciométricamente con un electrodo Orion EA 940 y los SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> por turbidimetría (APHA, AWWA, WEF, 2005). Todos estos análisis se realizaron en el Instituto de Geofísica, UNAM, en el Laboratorio de Química Analítica (Dra. María Aurora Armienta).

### Determinación de Carbono Orgánico Particulado (COP)

Para determinar los flujos de COP en el laboratorio se tomó una alícuota de 10 mL y 20 mL dependiendo del material capturado de cada uno de los dos tubos de la estación para tener un total de dos réplicas de fondo. La muestra se filtró con ayuda de un equipo de filtración (13 mm) marca Millipore. Para ello se utilizaron filtros de fibra de vidrio (Whatman GF/F, 13mm de diámetro, 0.7 µm de retención nominal) previamente calcinados a 550°C durante 4 horas para eliminar cualquier residuo de carbono (Veronesi *et al.*, 2002). Después de la filtración, los filtros se acidificaron con HCl al 10% para eliminar la fracción inorgánica del carbono (carbonatos) en la muestra (Karl *et al.*, 1991a; Veronesi *et al.*, 2002). Posteriormente estos se secaron (60°C) y guardaron hasta sus análisis con un Analizador Elemental Carlo Erba NA 1500. En este caso, Analizador Elemental Carlo Erba NA 1500 proporcionó la cantidad de COP.

## Determinación de Clorofila “a” (Clor-a)

Para la evaluación de la concentración de la Clor-a las muestras se filtraron a través de filtros de fibra de vidrio GF/F (Whatman, de 13 mm de diámetro, con apertura de poro nominal de 0.7  $\mu\text{m}$ ). Posteriormente, se extrajo la Clor-a de los filtros con acetona al 90% a 4°C, durante un periodo entre 18 y 20 h en oscuridad y refrigeración. La Clor-a extraída se leyó en un fluorómetro digital Turner Designs 10-AU en el laboratorio de Limnología Tropical de la FES Iztacala (Dr. Javier Alcocer Durand). Las lecturas obtenidas se convirtieron a  $\mu\text{g Clor-a L}^{-1}$  con la siguiente fórmula (método US EPA 445.0, Arar y Collins 1997):

$$\text{Clor-a} = \frac{(C_e V_e F D)}{V_m} \quad (12)$$

Donde, Clor-a es la concentración de clorofila “a” ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ),  $C_e$  es la concentración de clorofila “a” ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) obtenida de la solución extractora,  $V_e$  es el volumen (L) utilizado para la extracción, FD es el factor de dilución y  $V_m$  corresponde al volumen (L) de la muestra de agua.

## Análisis de nutrientes

Se determinó la concentración de amonio ( $\text{N-NH}_4^+$ ), nitritos ( $\text{N-NO}_2^-$ ), nitratos ( $\text{N-NO}_3^-$ ) y fosforo soluble reactivo (FSR) para la columna de agua por medio de un auto-analizador de flujo segmentado (Skalar San Plus System, Skalar). La determinación de nitrógeno amoniacal se realizó según la técnica descrita por Solórzano (1969); los nitratos se determinaron mediante su reducción a nitritos, empleando el método modificado de Treguer y Le Corre (1974), usando como agente reductor una columna empacada de limaduras de cadmio recubiertas con cobre, acondicionada con cloruro de amonio. La determinación fosforo soluble disuelto se realizó como lo describen Strickland y Parsons (1972), fundamentado en la formación del ácido 12-molibdofosfórico y su posterior

reducción a fosfomolibdeno azul con ácido ascórbico. Los análisis de N y P totales fueron realizados según el método del Valderrama (1981). Estos análisis fueron realizados con el apoyo del Laboratorio de Biogeoquímica Acuática (Dr. Martín Merino Ibarra) del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM).

## ANALISIS DE DATOS

### Ecuaciones que describen el sistema CO<sub>2</sub>

Las variables registradas se sustituyeron en las ecuaciones que describen el sistema de CO<sub>2</sub> en el agua epicontinental con el objetivo de calcular la fugacidad del CO<sub>2</sub> con el carbono inorgánico disuelto (CID) y alcalinidad total (A<sub>T</sub>). Estas ecuaciones incluyen las contribuciones sólo de bicarbonatos, carbonatos, boratos e hidróxidos a la alcalinidad total. Los sistemas están definidos por tres ecuaciones de balance de masas (13) a (15) y cinco constantes de equilibrio (16) a (20):

Estimación de la alcalinidad total

$$A_T = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{B}(\text{OH})_4^-]^3 - [\text{H}^+] + [\text{OH}^-] \quad (13)$$

Estimación de Carbono Inorgánico Disuelto (CID)

$$\begin{aligned} C_{ID} &= [\text{H}_2\text{CO}_3^*] + [\text{CO}_2(\text{aq})] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \\ &= [\text{H}_2\text{CO}_3^*] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \end{aligned} \quad (14)$$

Constante de solubilidad de CO<sub>2</sub>

$$K_0 = [\text{H}_2\text{CO}_3^*] / f(\text{CO}_2) \quad (15)$$

Donde  $f(\text{CO}_2)$  es la fugacidad del dióxido de carbono

Primera constante de disociación ácida

---

<sup>3</sup> Los B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> fueron determinados en el Instituto de Geofísica, UNAM, en el Laboratorio de Química Analítica (Dra. María Aurora Armienta).



$$K_1 = [\text{HCO}_3^-] \{ \text{H}^+ \} / [\text{H}_2\text{CO}_3^*] \quad (16)$$

Segunda constante de disociación ácida

$$K_2 = [\text{CO}_3^{2-}] \{ \text{H}^+ \} / [\text{HCO}_3^-] \quad (17)$$

Constante de disociación de ácido bórico <sup>3</sup>

$$K_B = [\text{B(OH)}_4^-] \{ \text{H}^+ \} / [\text{B(OH)}_3] \quad (18)$$

Producto de ionización del agua

$$K_W = \{ \text{H}^+ \} [\text{OH}^-] \quad (19)$$

Teniendo en cuenta las constantes de equilibrio junto con la temperatura (K) y salinidad (g L<sup>-1</sup>) se usaron las siguientes ecuaciones de acuerdo a Grasshoff *et al.* (2002):

$$\begin{aligned} \ln K_0 = & - 60.2409 + 93.4517(100/T) + 23.3585 - \ln(T/100) \\ & + S [0.023517 - 0.023656 (T/100) + 0.0047036 (T/100)^2] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \ln K_1 = & 2.83655 - 2307.1266/T - 15529413 - \ln T \\ & + (-0.20760841 - 4.0484/T)S^{0.5} + 0.08468345. S \\ & - 0.00654208. S \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \ln K_2 = & -9.226508 - 3351.6106/T - 0.2005743 - \ln T \\ & + (-0.106901773 - 23.9722/T)S^{0.5} + 0.1130822. S \\ & - 0.00846934. S^{1.5} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \ln K_B = & 148.0248 + 137.1942. S^{0.5} + 1.62142. S \\ & + (-8966.90 - 2890.53. S^{0.5} - 77.942. S + 1.728. S^{1.5} - 0.0996. S^2)/T \\ & + (-24.4344 - 25.085. S^{0.5} - 0.2474. S) \ln T + 0.053105. S^{0.5}. T \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \ln K_W = & 148.9802 - 13847.26/T - 23.6521. \ln T \\ & + (-97.9429 + 4149.915/T + 14.8269. \ln T)S^{0.5} - 0.023694. S \end{aligned} \quad (24)$$

## Cálculo de la Salinidad

Se procedió a calcular la salinidad con base en la concentración ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de los cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ ) mayores; se estimó el valor de los Sólidos Disueltos Totales (SDT). Con este valor dividido entre 1000 se obtuvieron los datos de salinidad en  $\text{g L}^{-1}$ . Los valores de salinidad calculados se utilizaron en las ecuaciones para el cálculo de las constantes de estabilidad (21)-(25).

**Tabla 1.** Constantes utilizadas para los cálculos de fugacidad  $f(\text{CO}_2)$  en Alchichica de acuerdo a los valores de salinidad (S) y temperatura (T). (Modificado de DOE, 1994).

Constante	S ( $\text{g L}^{-1}$ )	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	Autor, año
$K_0$	0-35	0-35	Weiss, 1974
$K_1$	5-45	0-45	Roy <i>et al.</i> , 1993; 1994
$K_2$	5-45	0-45	Roy <i>et al.</i> , 1993; 1994
$K_B$	5-45	0-45	Dickson, 1990
$K_w$	20-40	5-30	Hansson, 1973
Alchichica	8.5	14.5	Vilaclara <i>et al.</i> , 1993

## Fugacidad del $\text{CO}_2$ [ $f(\text{CO}_2)$ ]

Para calcular la actividad del  $\text{CO}_2$  disuelto  $f(\text{CO}_2)$  en el Lago Alchichica se usó la metodología de la DOE (1994) desarrollando una serie de ecuaciones, esto ya que los intervalos de temperatura y salinidad de Alchichica se encuentran entre los reportados para esta metodología (Tabla 1), al ser un lago hiposalino y tener valores de salinidad superiores a  $8.5 \text{ g L}^{-1}$  (Vilaclara *et al.*, 1993) y  $9.9 \text{ g L}^{-1}$  para el periodo estudiado (abril de 2013 y marzo de 2014). Adicionalmente, se calcularon las fugacidades con la plantilla de macros *co2sys.xls* (Lewis y Wallace, 1998); lo anterior confirmó la veracidad de los resultados obtenidos en los cálculos con las ecuaciones planteadas inicialmente.

La  $f(\text{CO}_2)$  describe la actividad o fugacidad del  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua, mientras que la  $p(\text{CO}_2)$  es la presión parcial de  $\text{CO}_2$  en el aire y generalmente esta se aplica para referirse a la fracción molar del carbono en una muestra gaseosa; por otro lado, la diferencia entre la  $f(\text{CO}_2)$  y la  $p(\text{CO}_2)$  es de 0.03% (Lewis y Wallace, 1998). La fugacidad de un gas, tal como el  $\text{CO}_2$ , puede ser expresada de la siguiente manera (DOE, 1994):

Cálculo de fugacidad usando pH y  $A_T$  (Alcalinidad total)

$$f(\text{CO}_2) = \frac{Ac \{H^+\}^2}{K_0 K_1 (\{H^+\} + 2K_2)} \quad (25)$$

$$Ac = A_T + \{H^+\} - K_w / \{H^+\} - B_T / (1 + \{H^+\} / K_B) \quad (26)$$

$$CID = \frac{Ac (\{H^+\}^2 / K_1 + \{H^+\} + K_2)}{\{H^+\} + 2K_2} \quad (27)$$

Cálculo de fugacidad usando pH y CID

$$f(\text{CO}_2) = \frac{CID \{H^+\}^2}{K_0 (\{H^+\} K_1 \{H^+\} + K_1 K_2)} \quad (28)$$

$$A_T = \frac{CID K_1 (\{H^+\} + 2 K_2) + B_T / (1 + \{H^+\} / K_B) + K_w / \{H^+\} - \{H^+\}}{(\{H^+\}^2 + K_1 \{H^+\} + K_1 K_2)} \quad (29)$$

Calculador co2sys.xls

Se calcularon las fugacidades  $f(\text{CO}_2)$  para el periodo de estudio con “co2sys”, una hoja de cálculo en formato Microsoft Excel/ VBA diseñada para estimar el sistema  $\text{CO}_2$  en agua de mar. Este programa es tanto para agua de mar como para agua dulce y da la

posibilidad de seleccionar las constantes ( $K_1$  y  $K_2$ ) que correspondan al sistema en estudio, además de poder incluir en la hoja de cálculo diferentes parámetros como temperatura, salinidad,  $A_T$  (alcalinidad total) ó CID (carbono inorgánico disuelto) y pH para así obtener  $f(\text{CO}_2)$ . Esta hoja de cálculo está disponible en <http://cdiac.esd.ornl.gov/oceans/co2rprt.html> (Lewis y Wallace, 1998).

### Diferencia de $f(\text{CO}_2)$ de Alchichica con la $p(\text{CO}_2)$ para la atmósfera reportada por la NOAA [ $\Delta f(\text{CO}_2)$ ]

Los datos de  $f(\text{CO}_2)$  se compararon con los datos de promedios mensuales de  $f(\text{CO}_2)$  reportados por la NOAA (2013-2014) ([ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2\\_mm\\_mlo.txt](ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_mm_mlo.txt)) y de esta manera, de acuerdo al comportamiento del  $\text{CO}_2$  en la capa de intercambio entre agua y atmósfera, se determinó si Alchichica constituía una fuente o un sumidero de carbono.

### Flujo de $\text{CO}_2$ [ $f(\text{CO}_2)$ ]

El flujo de un gas altamente soluble a través de la interface agua-aire puede ser expresada como:

$$F = k_s (f \text{CO}_{2\text{water}} - p \text{CO}_{2\text{air}}) = k (C_w - \alpha C_a) \quad (30)$$

Donde:

$k$  es la velocidad de transferencia del gas ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $C_w$  es la concentración del gas en el agua cerca a la interface,  $\alpha$  es el coeficiente de solubilidad de Ostwald y  $C_a$  es la concentración del gas en el aire. La dependencia de  $k$  es expresada como el número Schmidt ( $Sc$ ),  $k$  es proporcional a  $Sc^{-2/3}$ , mientras que para una interface con ondas (oleaje) los principales modelos predicen que  $k$  es proporcional a  $Sc^{-1/2}$ .

$$Sc = A - Bt + Ct^2 - Dt^3 \quad (t \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad (31)$$

El número de Schmidt es conocido como la viscosidad cinemática del agua dividida por el coeficiente de difusión del gas.

$$\alpha = \beta/T \dots\dots\dots(T \text{ en K}) \quad (32)$$

$$\ln\beta = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) S[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (33)$$

Donde  $\beta$  es el coeficiente de solubilidad de Bunsen, T es la temperatura en Kelvin, y S es la salinidad (ppt).

La relación entre la transferencia de CO<sub>2</sub> y la constante de la velocidad del viento es:

$$k = [2.5(0.5246 + 1.6256 \times 10^{-2}t + 4.9946 \times 10^{-4}t^2) + 0.3u^2](Sc/660)^{-1/2} \quad (34)$$

Donde 660 es el número de Schmidt de CO<sub>2</sub> en el mar a 20°C, por otro lado 600 a 20°C, es el número Schmidt para agua dulce (Wanninkhof, 1992; Cole y Caraco, 1998; Jonsson *et al.*, 2007; Wanninkhof *et al.*, 2009).

### Flujo de Carbono Orgánico Particulado (COP)

Los flujos de exportación de COP hacia los sedimentos fueron calculados a partir de los pesos de material retenidos en las trampas de sedimentos con la siguiente fórmula según Karl *et al.* (1991b).

$$FCOP = \frac{[(PF_a - PF_f) - \text{Blanco}] v_t}{V_f A_t T} \quad (35)$$

Donde , F(COP) es el flujo de COP (mg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), PF<sub>a</sub> es el peso seco del filtro después del filtrado de la muestra (mg), PF<sub>f</sub> es el peso seco del filtro antes del filtrado de la muestra (mg), V<sub>t</sub> es el volumen de la trampa (mL), V<sub>f</sub> es el volumen filtrado (mL), A<sub>t</sub> es el área de la boca de la trampa (m<sup>-2</sup>) y T es el tiempo de exposición de las trampas (días). Para

transformar los flujos de  $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$  a  $\text{mmol m}^{-2} \text{mes}^{-1}$  el resultado obtenido ( $\text{FCOP mg m}^{-2} \text{d}^{-1} / 12 \text{ mg C} \cdot (30.4375 \text{ días}) \cdot (1000)$ ).

### Tratamiento estadístico

Para el tratamiento estadístico de los datos se utilizó el paquete estadístico SPSS 18. Debido a que el número de datos era menor a 30, se usó la prueba de Shapiro-Wilk para determinar la normalidad de los datos y aplicar el tratamiento correspondiente. Se compararon las fugacidades obtenidas con  $\text{pH}$  y  $\text{C}_\text{T}$ ,  $\text{pH}$  y  $\text{A}_\text{T}$  y con la plantilla *co2sys* para determinar si había diferencias significativas, los valores de  $f(\text{CO}_2)$  reportados para Alchichica fueron analizados con el tratamiento estadístico *t student*.

## RESULTADOS

### Parámetros fisicoquímicos

Durante el periodo de estudio la temperatura promedio de la columna de agua fue de  $16.3 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$ ; fue más baja durante el periodo de circulación (enero-marzo) ( $15.4 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ ), mientras que en el periodo de estratificación (abril-diciembre) aumentó el promedio poco más de un grado ( $16.8 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ ). El intervalo de porcentaje de saturación de oxígeno pasó de la anoxia (0%) en el hipolimnion hasta la sobre-saturación (122%) en la superficie, con un promedio durante el año estudiado de  $58.6 \pm 39.5\%$ . El periodo de anoxia abarcó aproximadamente nueve meses, desde mayo hasta diciembre. Durante el periodo de circulación, de enero a abril, el porcentaje de saturación de oxígeno promedio fue de 70%.

### Clorofila "a" (Clor- a)

El promedio de la concentración de Clor-a fue de  $3.4 \pm 3.5 \mu\text{g L}^{-1}$ . La máxima concentración fue de  $8.10 \pm 6.10 \mu\text{g L}^{-1}$  en mayo y la mínimo de  $0.8 \pm 0.4 \mu\text{g L}^{-1}$  en octubre. Por evento de producción, la concentración más alta se alcanzó durante el florecimiento invernal de diatomeas con un promedio de  $5.8 \pm 0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ , seguido por el florecimiento primaveral cianobacterias con  $4.8 \pm 1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ ; el promedio para los meses en los que se presenta el DCM fue de  $1.5 \pm 2.0 \mu\text{g L}^{-1}$  (Fig. 8).

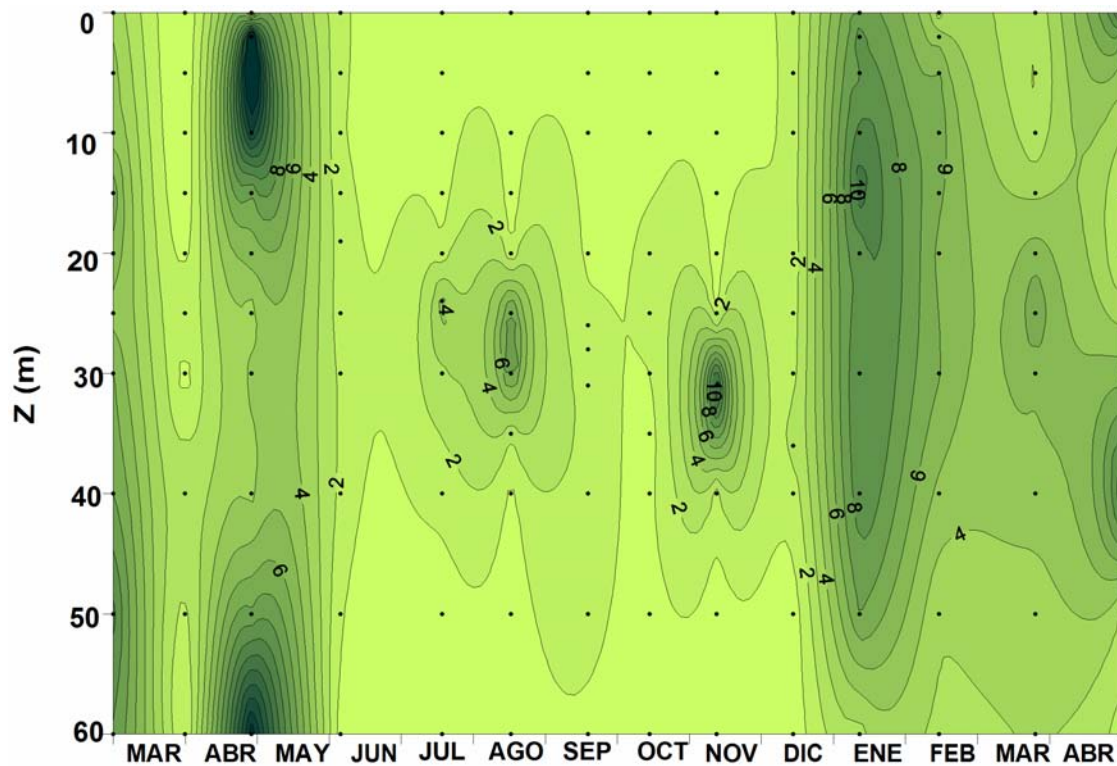


Fig. 8. Diagrama profundidad-tiempo de la concentración de clorofila "a" ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en el lago Alchichica.

## Nutrientes

El perfil de  $\text{N-NH}_4$  (Fig. 9) muestra un promedio de  $1.4 \pm 0.6 \mu\text{M}$  en el epilimnion y  $8.3 \pm 7.9 \mu\text{M}$  en el hipolimnion durante el periodo de estudio, la mayor concentración se presentó en el hipolimnion durante la estratificación ( $11.8 \pm 8.4 \mu\text{M}$ ), particularmente durante el periodo de anoxia y concentraciones reducidas durante el periodo de circulación ( $1.2 \pm 0.7 \mu\text{M}$  en el epilimnion y  $3.1 \pm 2.9 \mu\text{M}$  en el hipolimnion). Se observa como bajas concentraciones de  $\text{N-NH}_4$  (Fig. 9) se encuentran disponibles en la columna de agua coincidiendo con las zonas de mayor concentración de Clor-a (Fig. 8) y a su vez con los florecimientos algales.



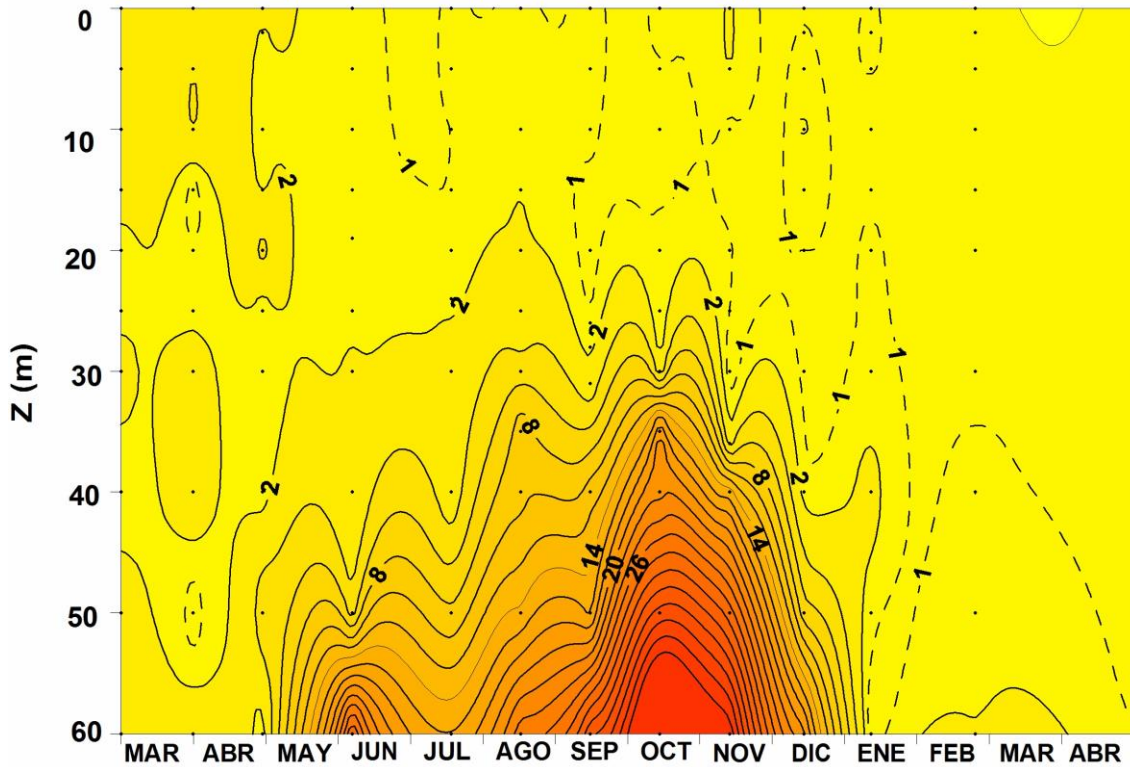


Fig. 9. Diagrama profundidad-tiempo de la concentración de  $N-NH_4$  ( $\mu M$ ) en el Lago Alchichica.

El  $N-NO_3$  presenta un promedio de  $2.4 \pm 2.1 \mu M$  en el epilimnion y  $3.3 \pm 3.4 \mu M$  en el hipolimnion, los valores más altos se encontraron en el periodo de circulación ( $4.4 \pm 3.2 \mu M$  epilimnion y  $5.7 \pm 5.4 \mu M$  hipolimnion) (Fig. 10) probablemente debido a la nitrificación del amonio acumulado en el hipolimnion durante la estratificación y que puede estar disponible para el florecimiento de diatomeas reflejando en los promedios un posible consumo de acuerdo a los promedios reportados para el  $N-NH_4$ .

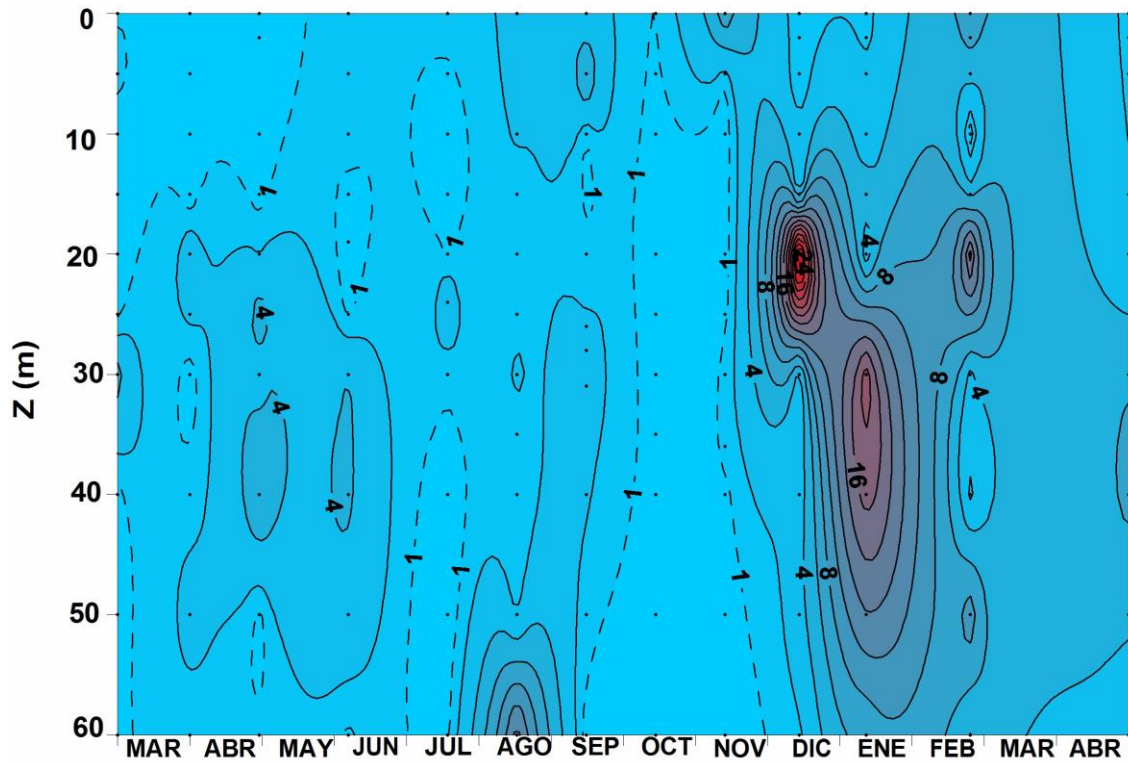


Fig. 10. Diagrama profundidad-tiempo de la concentración de N-NO<sub>3</sub> (µM) en el Lago Alchichica

El perfil de Fosforo Soluble Reactivo (FSR) (Fig. 11) muestra la mayor concentración en el hipolimnion, particularmente durante el periodo de anoxia (Fig. 7). El FSR se encuentra ausente en el resto de la columna de agua o con concentraciones reducidas durante el periodo de circulación, la presencia de bajas concentraciones de FSR coincide con la presencia de *N. spumigena* al ser una cianobacteria fijadora de nitrógeno que permanece mientras hay disponibilidad de fósforo (Alcocer *et al.*, 2014b).

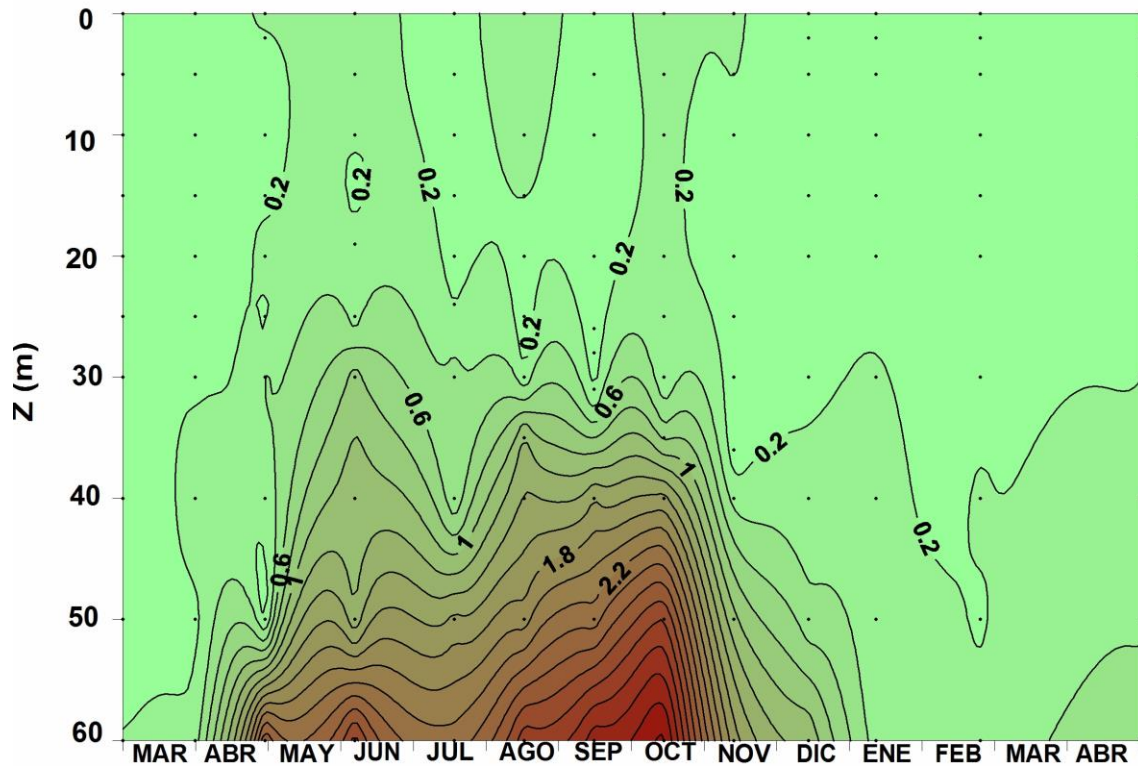


Fig. 11. Diagrama profundidad-tiempo de la concentración de FSR ( $\mu\text{M}$ ) en el Lago Alchichica.

### Carbono Inorgánico Disuelto (CID)

Los valores de CID presentaron un promedio de  $35.5 \pm 2.1 \text{ mmol L}^{-1}$ , mostrando las concentraciones menores hacia el mes de septiembre y las mayores hacia noviembre, abril, mayo y julio, siendo valores muy homogéneos a lo largo de la columna de agua durante el periodo de tiempo estudiado; esto puede deberse a la capacidad amortiguadora que presenta Alchichica debido a la reserva alcalina y fijación de C en los estromatolitos (Fig.12).

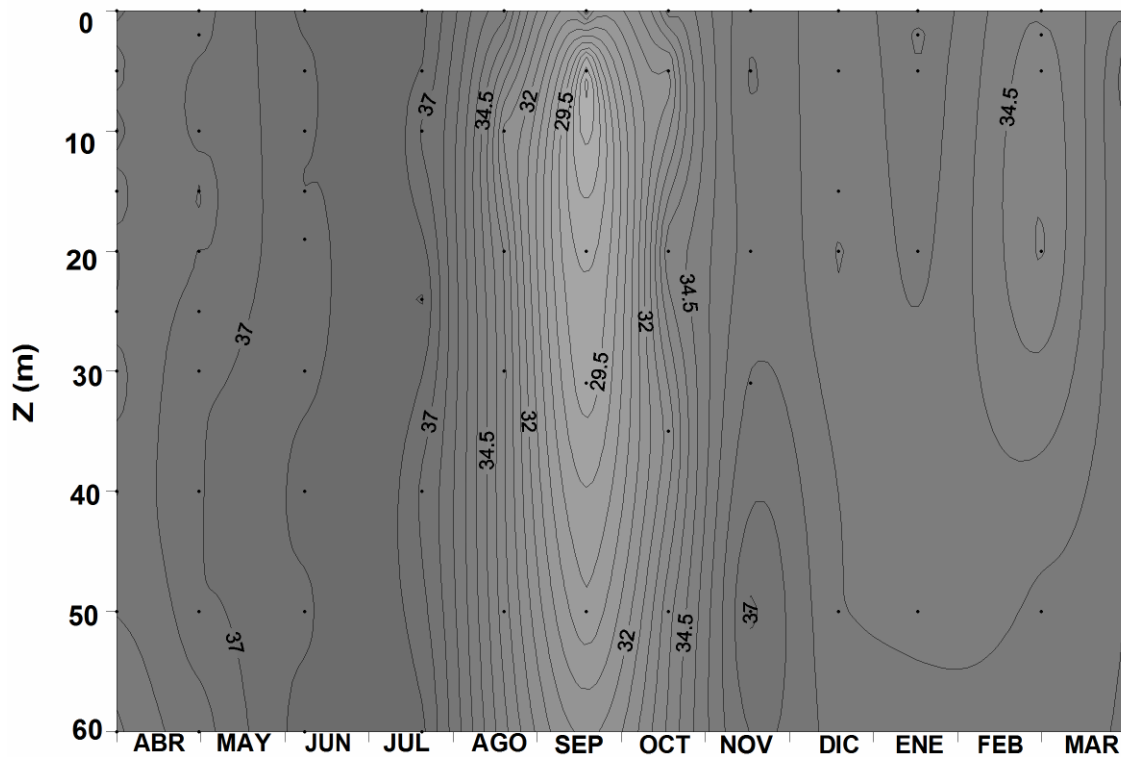


Fig. 12. Diagramas profundidad-tiempo de la concentración de CID (m moles L<sup>-1</sup>).

Fugacidad de CO<sub>2</sub> [ $f(\text{CO}_2)$ ] y Diferencia de fugacidad de CO<sub>2</sub> con la presión parcial de CO<sub>2</sub> [ $p(\text{CO}_2)$ ] reportada por la NOAA [ $\Delta f(\text{CO}_2)$ ]

Se calculó la fugacidad del CO<sub>2</sub> [ $f(\text{CO}_2)$ ] empleando para ello a) los valores de pH y  $A_T$ , b) y pH y CID y c) la plantilla co2sys. Todas las metodologías mostraron la misma tendencia mensual del comportamiento de la  $f(\text{CO}_2)$  (Tabla 2).

**Tabla 2.** Valores estimados de  $f(\text{CO}_2)$  con cada una de las metodologías empleadas y usando la plantilla co2Sys

Fecha		$f(\text{CO}_2)$			
Mes	Año	pH y $A_T$		pH y CID	
		Estimado	CO <sub>2</sub> Sys	Estimado	CO <sub>2</sub> Sys
		ppm	ppm	ppm	ppm
Abril	2013	999	1091	1053	1114
Mayo		477	538	536	583
Junio		299	344	371	411
Julio		358	407	433	475
Agosto		813	894	851	905
Septiembre		635	706	636	683
Octubre		249	285	286	317
Noviembre		215	247	263	292
Diciembre		624	693	662	709
Enero	2014	776	854	826	879
Febrero		1257	1362	1211	1272
Marzo		273		328	
<b>Promedio Anual</b>		<b>581 ± 331</b>	<b>675 ± 355</b>	<b>621 ± 311</b>	<b>694 ± 322</b>

Aunque los valores calculados de  $f(\text{CO}_2)$  para Alchichica utilizando el pH y el  $A_T$  parecen ser menores que los calculados con pH y CID y la plantilla co2sys, no se encontraron diferencias significativas ( $t\ 0.763 > t_{0.0003}$ ), lo cual indica que la  $f(\text{CO}_2)$  puede ser determinada de forma consistente utilizando tanto el  $A_T$  y pH como CID y pH o la plantilla co2sys.

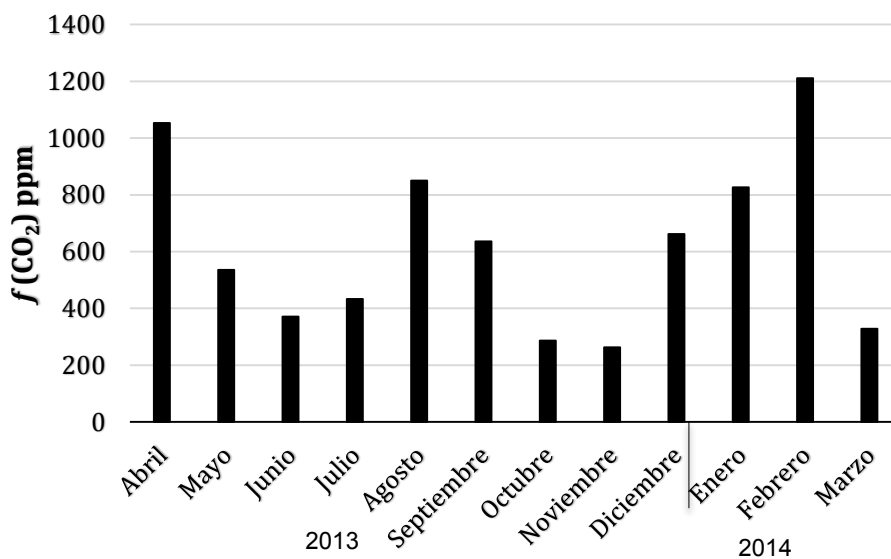
Considerando lo anterior, se plantearon el resto de los resultados y la discusión teniendo en cuenta los valores de  $f(\text{CO}_2)$  reportados con pH y el CID, debido a que los valores usados en el caso del CID fueron obtenidos por metodología que refleja de una manera

más completa el sistema carbonatos teniendo en cuenta que con esta metodología contemplan la especie  $[H_2CO_3^*]$ , contrario a los obtenidos para pH y  $A_T$  ya que fueron producto de la sumatoria de diferentes resultados obtenidos.

**Tabla 3.** Valores calculados de  $f(CO_2)$  para Alchichica comparados con los datos de  $p(CO_2)$  reportados por la NOAA (2013-2014).

Año	Mes	$f(CO_2)$	NOAA
		ppm	ppm
2013	Abril	1053	398
	Mayo	536	400
	Junio	371	399
	Julio	433	397
	Agosto	851	395
	Septiembre	636	394
	Octubre	286	394
	Noviembre	263	395
	Diciembre	662	397
2014	Enero	826	398
	Febrero	1211	398
	Marzo	328	400
<b>Promedio Anual</b>		<b>621 ± 311</b>	<b>397 ± 2</b>

La mayor fugacidad [ $f(\text{CO}_2)$ ] se presentó en el mes de febrero de 2014 con 1211 ppm, mientras que las menores fugacidades fueron en el mes de noviembre de 2013 con 263 ppm (Fig. 14; Tabla 3).



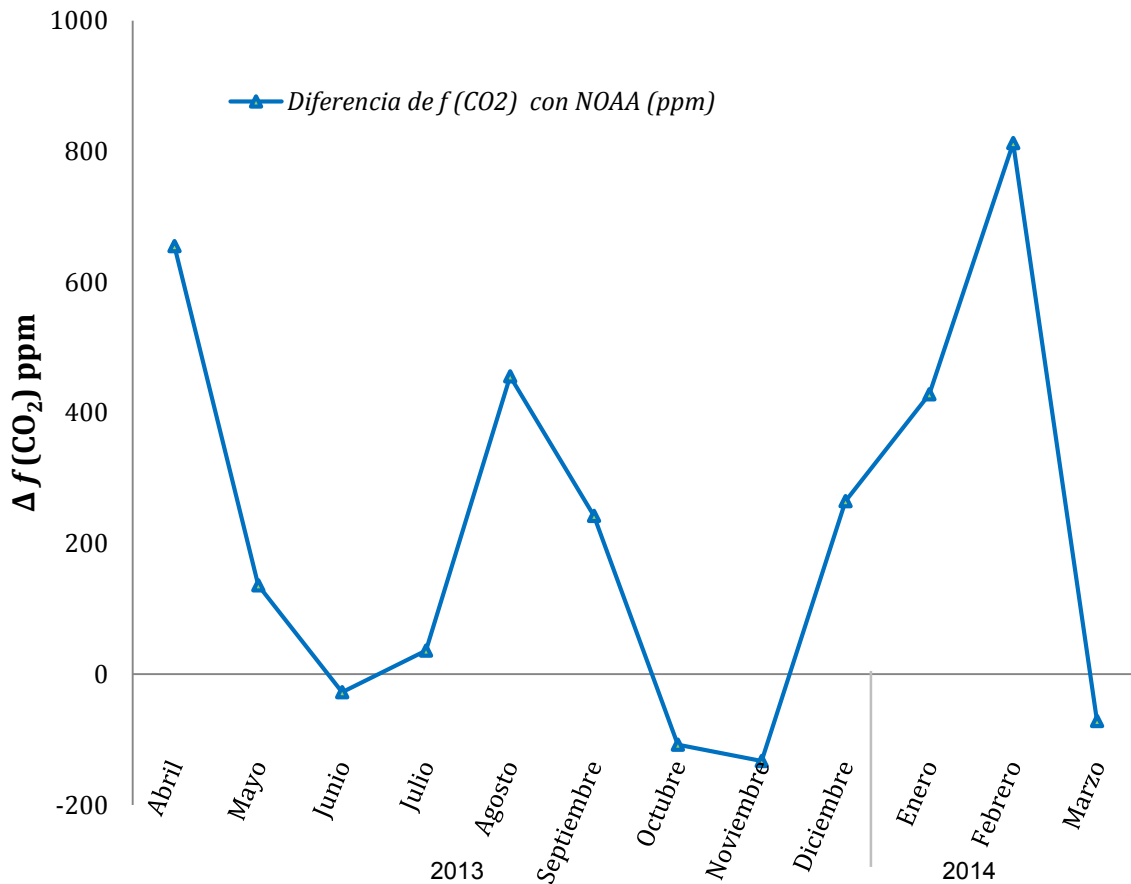
**Fig. 14.** Valores mensuales de  $f(\text{CO}_2)$  calculados para el lago Alchichica

Al comparar los valores de  $f(\text{CO}_2)$  obtenidos con los datos de  $p(\text{CO}_2)$  atmosférica reportados por la NOAA para el mismo periodo (2013-2014), se observa lo siguiente; cuando  $\Delta f(\text{CO}_2) < 0$ , Alchichica presenta un comportamiento de sumidero de C, exportando posiblemente el  $\text{CO}_2$  en forma de COP hacia los sedimentos; esto sucede en 4 meses del año (junio, octubre, noviembre y marzo). Por el contrario, cuando  $\Delta f(\text{CO}_2) > 0$ , Alchichica se convierte en fuente de C emitiendo  $\text{CO}_2$  a la atmósfera; este comportamiento es observado en 8 meses (abril, mayo, julio, agosto, septiembre, diciembre, enero y febrero) (Tabla 4, Fig. 15).

**Tabla 4.** Diferencia de  $f$  (CO<sub>2</sub>) del lago Alchichica con los valores de  $p$  (CO<sub>2</sub>) reportados por la NOAA [ $\Delta f$  (CO<sub>2</sub>)]

Año	Mes	$\Delta f$ (CO <sub>2</sub> )
		ppm
2013	Abril	655
	Mayo	136
	Junio	-27
	Julio	36
	Agosto	456
	Septiembre	242
	Octubre	-108
	Noviembre	-133
	Diciembre	265
2014	Enero	429
	Febrero	813
	Marzo	-72
<b>Promedio Anual</b>		<b>224 ± 311</b>





**Fig 15.** Diferencia de  $f$  (CO<sub>2</sub>) del lago Alchichica con los valores de  $\rho$  (CO<sub>2</sub>) reportados por la NOAA [ $\Delta f$  (CO<sub>2</sub>)]

### Flujos de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> (F(CO<sub>2</sub>)) y carbono orgánico particulado (F(COP))

Los valores de F(CO<sub>2</sub>) presentaron un promedio de  $3 \pm 7$  mmol m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, siendo mayor para el mes de diciembre  $17$  mmol m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> y menor para octubre con un flujo de  $-7$  mmol m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. El valor promedio de F(COP) de  $20 \pm 5$  mmol m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, fue mayor en octubre  $27.0$  mmol m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, mientras que el menor flujo se presentó en julio con  $11$  mmol m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>; para marzo no se registraron datos por un problema de muestreo (Tabla 5).

Al comparar los flujos de CO<sub>2</sub> y COP el mes de octubre presenta el valor más bajo para F(CO<sub>2</sub>) ( $-7.0$  mmol m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) y uno de los valores más altos para F(COP) ( $27.0$  mmol m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>); en diciembre se presentan los valores más altos en los dos casos (F(CO<sub>2</sub>)  $17.0$

mmol m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>; F(COP) 19.5 mmol m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>), siendo ligeramente mayores para F(COP), (Tabla 5, Fig. 16).

**Tabla 5.** Flujo de CO<sub>2</sub> [F (CO<sub>2</sub>)] y flujo de COP [F(COP)] en el lago Alchichica

Año	Mes	F(CO <sub>2</sub> )	F(COP)
		(mmol m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	(mmol m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )
<b>2013</b>	Abril	2.0	26.6
	Mayo	1.3	27.0
	Junio	-0.3	12.6
	Julio	0.5	11.4
	Agosto	10.6	17.7
	Septiembre	1.4	21.0
	Octubre	-7.0	27.0
	Noviembre	-0.6	18.6
	Diciembre	17.0	19.5
<b>2014</b>	Enero	8.8	18.7
	Febrero	6.5	18.0
	Marzo	-6.0	-
<b>Promedio Anual</b>		<b>3.0 ± 6.5</b>	<b>19.8 ± 5.3</b>

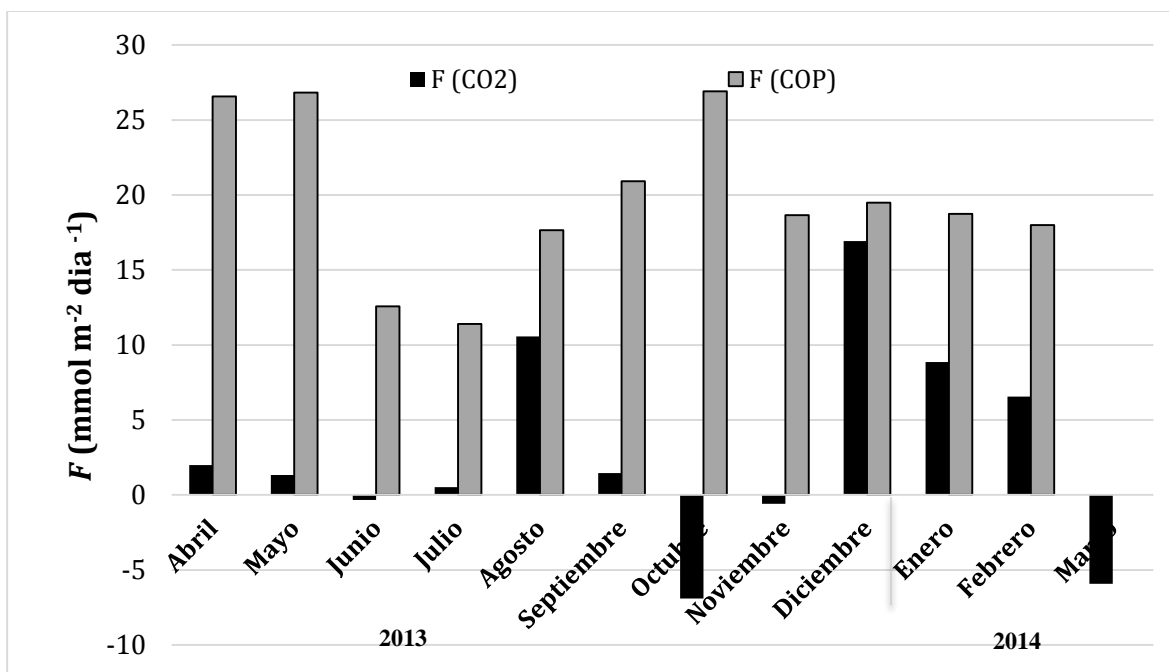


Fig. 16. Flujo de CO<sub>2</sub> [F(CO<sub>2</sub>)] y flujo de COP [F(COP)] en el lago Alchichica

Considerando que el área superficial del lago Alchichica es de 2,299,590 m<sup>2</sup> y el área del fondo a los 59 m de profundidad donde se ubicaron las trampas de sedimento es de 421,000 m<sup>2</sup>, los flujos totales por área fueron de 61 ± 59 ton año<sup>-1</sup> F(CO<sub>2</sub>) y 37 ± 10 ton año<sup>-1</sup> F(COP) (Tabla 6).

Tabla 6. Flujo de CO<sub>2</sub> [F(CO<sub>2</sub>)] y flujo de COP [F(COP)] por el total del área superficial y total del área de fondo en el lago Alchichica.

Año	Mes	F(CO <sub>2</sub> ) x área superficial	F(COP) x área de fondo
		(ton año <sup>-1</sup> )	(ton año <sup>-1</sup> )
2013	Abril	20	49
	Mayo	14	50
	Junio	-	23
	Julio	5	21
	Agosto	106	33
	Septiembre	15	39
	Octubre	-	50
	Noviembre	-	34
	Diciembre	170	36
2014	Enero	89	35
	Febrero	66	33
<b>Promedio</b>		<b>61 ± 59</b>	<b>37 ± 10</b>

Los  $F(\text{CO}_2)$  negativos no se tomaron en cuenta en este último balance ya que se enfocaron en los flujos positivos, ya sea del lago hacia la atmosfera o el sedimento, siendo 1.6 veces mayor el  $F(\text{CO}_2)$  en relación con el  $F(\text{COP})$  (Tabla 5, Fig. 17).

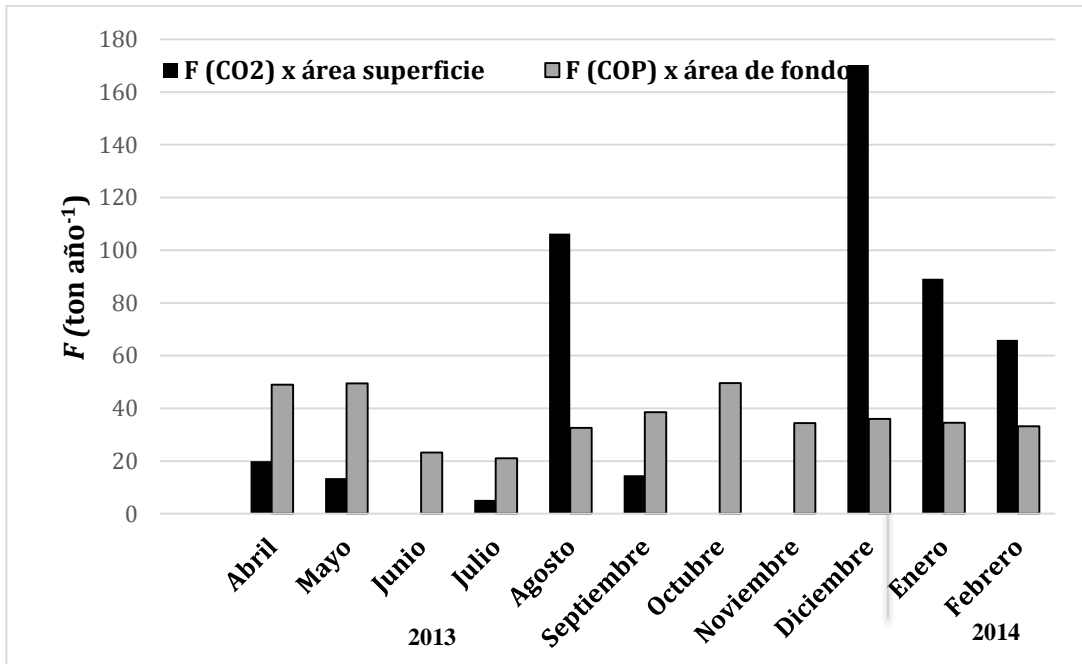


Fig. 17. Flujo de  $\text{CO}_2$  [ $F(\text{CO}_2)$ ] y flujo de COP [ $F(\text{COP})$ ] por el total del área superficial y total del área de fondo en el lago Alchichica

## DISCUSIÓN

Los resultados muestran que los valores de la  $f$  ( $\text{CO}_2$ ) cubren un amplio intervalo de variación con respecto al valor promedio anual, variación esperada considerando las diferentes condiciones que presenta el lago, tanto en su hidrodinámica (circulación y estratificación) como de los eventos de producción primaria (florecimiento de diatomeas, florecimiento de cianobacterias y máximo profundo de clorofila), entre otros (Tabla 2, Fig. 8). En general, el promedio anual de  $f$  ( $\text{CO}_2$ ) es 1.6 veces mayor que el valor anual de  $p$  ( $\text{CO}_2$ ) reportado por la NOAA ([ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2\\_mm\\_mlo.txt](ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_mm_mlo.txt), 2013-2014); Alchichica juega un papel más como fuente de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera (67% del tiempo) que como sumidero de C (33% del tiempo) a nivel capa superficial. El  $\Delta f$  ( $\text{CO}_2$ ) fue de 945 ppm entre el mes con el valor más alto (febrero: 813 ppm) y el más bajo (noviembre: -132 ppm).

Los promedios de fugacidad (1,900 ppm para aguas salinas) y flujos ( $81 \text{ mmol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) reportados por Duarte *et al.* (2008) son más elevados que los calculados para Alchichica ( $621 \pm 311 \text{ ppm}$  y  $3 \pm 7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , respectivamente), hecho muy probablemente derivado de que la mayoría de los lagos estudiados por Duarte *et al.* (2008) reciben elevadas cantidad de carbono alóctono proveniente de sus cuencas de drenaje, mientras que en Alchichica el carbono es principalmente de origen autóctono, lo que hace que las emisiones de  $\text{CO}_2$  sean más bajas.

Cole *et al.* (1994, 2007) mencionan que el 90% de los lagos que estudiaron emiten  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, con un promedio de  $0.11$  ( $0.07$ - $0.15$ )  $\text{Pg C año}^{-1}$ , mientras que almacenan en los sedimentos un promedio de  $0.05$  ( $0.03$ - $0.07$ )  $\text{Pg C año}^{-1}$ , esto es, emiten el doble de lo que almacenan en los sedimentos. Por el contrario, en Alchichica la tasa de emisión de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera es de  $60.6 \pm 58.6 \text{ ton año}^{-1}$ , mientras que la tasa de almacenamiento de COP en los sedimentos es  $36.5 \pm 9.8 \text{ ton año}^{-1}$ , emitiendo –al igual que para la fugacidad– 1.6 veces más de los que almacenan en los sedimentos. Las razones de esta diferencia probablemente son las mismas que las mencionadas en el anterior párrafo (falta de arrastre de carbono alóctono de la cuenca de drenaje), así como

la predominancia de diatomeas de gran tamaño cuyo destino principal es su exportación por debajo de la termoclina hacia el sedimento (Alcocer *et al.*, 2011b, 2011d, 2014a).

El promedio de fugacidad calculado para Alchichica ( $621 \pm 311$  ppm) es más bajo que el reportado por Sobek *et al.* (2005) con un promedio de  $p$  ( $\text{CO}_2$ ) (en este caso se refieren a la  $f$  ( $\text{CO}_2$ ) por esta razón se puede comparar directamente) de  $1,287 \pm 41$  ppm medidos en 4,902 lagos naturales dulceacuícolas ubicados en su mayoría en Estados Unidos, Canadá y Suecia. El valor promedio reportado en dicho artículo es similar a los valores de  $f$  ( $\text{CO}_2$ ) más altos registrados en este estudio que fueron para febrero de 2014 con 1,211 ppm y abril de 2013 con 1,053 ppm. Aunque las características de los lagos del estudio son diferentes a las de Alchichica, -ya que se trata de lagos dulceacuícolas que reciben materia orgánica de origen alóctono-, sirven como un punto de partida para comparar el comportamiento de Alchichica frente a lagos con otras condiciones ambientales.

El Carbono Orgánico Disuelto (COD) en lagos puede ser autóctono y/o alóctono; en ambos casos es causante de un aumento en la respiración al ser sustrato de los microorganismos. Al respecto, Sobek *et al.* (2005) mencionan que la dominancia de la respiración sobre la producción primaria en un lago es el factor principal de la sobresaturación de  $\text{CO}_2$  en los lagos, siendo el COD un promotor de esto, debido a que estimula la heterotrofia neta en lagos. Las mediciones de COD realizadas en Alchichica hasta ahora muestran un intervalo de 3.7- 4.9  $\text{mg L}^{-1}$  (Alcocer *et al.*, 2014b), lo cual resulta ser un valor bajo comparado con lo reportado, por ejemplo, por Jonsson *et al.* (2007) para un lago poco productivo (al norte de Suecia), con 6.0- 7.9  $\text{mg COD L}^{-1}$ .

De acuerdo a lo ya mencionado, Alchichica es un lago cuya fuente principal de COD es autóctona y está influida en gran medida por los florecimientos fitoplanctónicos, como es el caso de *Nodularia spumigena*; de acuerdo con Alcocer *et al.* (2014b), después del florecimiento (julio) de esta cianobacteria, la concentración de COD fue de  $4.3 \pm 0.4$   $\text{mg C L}^{-1}$ , valores 0.4 veces más elevados que en condiciones previas al florecimiento (abril),  $3.9 \pm 0.1$   $\text{mg C L}^{-1}$ . El incremento en COD podría ser precursor del aumento de  $f$  ( $\text{CO}_2$ ) asociados al florecimiento de esta cianobacteria.

En el periodo en que se presenta la mayor concentración de Clor-a y que está asociada a los florecimientos fitoplanctónicos se desarrollan, asimismo, las densidades más elevadas del copépodo herbívoro *Leptodiaptomus novamexicanus* (Lugo *et al.*, 1999). La mayor densidad del copépodo se reporta en la circulación ( $66.9 \pm 75.6$  copéodos  $L^{-1}$ ), junto con concentraciones elevadas de Clor-a ( $5.8 \pm 0.5 \mu g L^{-1}$ ). La presencia de las mayores densidades de copéodos en los periodos de florecimientos fitoplanctónicos conlleva seguramente a mayores tasas de respiración y, por ende, picos de liberación de  $CO_2$  a la atmósfera.

De acuerdo a Macek *et al.* (2009), entre enero y marzo se presentan los valores más elevados ( $\geq 5 \times 10^6$  células  $mL^{-1}$ ) de picoplancton total [TPP = APP (picoplancton autótrofo) + HPP (picoplancton heterótrofo)]. Los valores más altos de TPP se encontraron dentro de los primeros 20 m, mostrándose una elevada concentración hacia el máximo profundo de clorofila. En el hipolimnion se presentaron los valores más bajos, reportando densidades  $< 1 \times 10^6$  células  $mL^{-1}$ , aparentemente como resultado del periodo prolongado de anoxia. Lo anterior también sugiere que el picoplancton heterótrofo contribuye al aumento de  $CO_2$  liberado a la atmósfera durante el periodo de circulación.

Por otro lado, Macek *et al.* (2008) encontraron que el máximo desarrollo de ciliados ( $54$  cél.  $ml^{-1}$ ) se presenta al final del periodo de estratificación, así como durante los florecimientos y posteriores decaimientos de diatomeas y cianobacterias, lo cual conlleva un aumento en la liberación de  $CO_2$  hacia la atmósfera. De manera general, las mayores densidades de bacterias, protistas, pico y zooplancton se asociaron a las épocas donde se observaron incrementos en la densidad del fitoplancton y, con ello, a los picos de exportación de  $CO_2$  hacia la atmósfera.

A diferencia de los estudios anteriores, Balmer y Downing (2011) analizaron 131 lagos eutrofizados, encontrando que el 60% de estos estaban subsaturados con  $CO_2$  y que los valores de  $p$  ( $CO_2$ ) estimados fueron significativamente más bajos que los datos publicados para lagos de oligo a mesotróficos. Esta subsaturación deriva del hecho que los lagos con altas concentraciones de nutrientes, especialmente los pequeños y ricos

en oxígeno disuelto derivado de la producción primaria elevada, podrían estar actuando como consumidores netos de CO<sub>2</sub> atmosférico, requerido para mantener las altas tasas de producción primaria.

Para el presente estudio, el F(COP) fue 6.6 veces mayor que el F(CO<sub>2</sub>), siendo de  $19.8 \pm 5.3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  y  $3.0 \pm 6.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , respectivamente; en el mes de diciembre se presentó el mayor F(CO<sub>2</sub>) hacia la atmósfera, mientras que en abril, mayo y octubre se presentaron los mayores F(COP) hacia el sedimento. Sin embargo, al calcular los flujos por área de cobertura, esto es, el área superficial del lago para los de F(CO<sub>2</sub>) y el área de la zona profunda del lago para el F(COP), el F(CO<sub>2</sub>) pasó a ser 1.6 veces ( $61 \pm 59 \text{ ton año}^{-1}$ ) mayor que el F(COP) ( $36.5 \pm 9.8 \text{ ton año}^{-1}$ ), evidenciando el papel de Alchichica como fuente de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera y coincidiendo con lo encontrado por Duarte *et al.* (2008), entre otros.

El comportamiento de Alchichica durante el periodo de circulación, cuando se presentan las tasas de liberación de CO<sub>2</sub> más elevadas, sugiere que el lago pudiera estar funcionando de manera similar a un evento de surgencia oceánica. En una surgencia emergen aguas sub-superficiales (de mayor concentración de nutrientes, menor temperatura, con altas concentraciones de CID y ligeramente más salinas). La incorporación de CID en la superficie del mar al inicio de los eventos de surgencia ocasiona que el sistema se encuentre saturado, por lo que existe una transferencia de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera. Al transcurrir los días, debido a la alta producción primaria, por el incremento de nutrientes y tener las condiciones óptimas, se ocasiona la disminución en la  $p(\text{CO}_2)$  en el océano (Falkowski *et al.*, 2000), lo cual indica que -durante los periodos de surgencia- el océano pasa a ser una fuente de CO<sub>2</sub>, hasta el momento en que aumenta la producción primaria y, nuevamente, recupera su papel de sumidero de carbono.

De acuerdo con Vilaclara *et al.* (1993) y Alcocer y Hammer (1998), Alchichica es alimentado con aguas subterráneas ricas en CO<sub>2</sub>, por lo que -cuando el lago esta estratificado- el CO<sub>2</sub> tendería a irse acumulando en el hipolimnion. Por otro lado, la materia orgánica que se exporta por debajo de la termoclina se remineraliza en el



hipolimnion, por lo cual se libera  $\text{CO}_2$ , así como nutrientes tal y como se observa en las figuras 9 y 11. Cuando el lago circula, se liberan tanto el  $\text{CO}_2$  como los nutrientes acumulados en el hipolimnion; estos nutrientes promueven el florecimiento invernal de diatomeas y, aunque el aumento de la producción primaria conllevaría una gran demanda de  $\text{CO}_2$ , al parecer la cantidad de  $\text{CO}_2$  puesta en circulación probablemente es mayor al demandado por los productores primarios, lo que explicaría los elevados valores de fugacidad medidos en esta época.

Sin embargo, la hipótesis del incremento de  $\text{CO}_2$  en la columna de agua al circular el lago no se comprueba al analizar la concentración de CID. Ni la concentración de CID hipolimnético antes de la circulación, ni la del CID durante el periodo de circulación son mayores que el resto del ciclo anual. El CID mostró gran homogeneidad a lo largo de la columna de agua y el tiempo (Fig. 13). Una posible respuesta es que la elevada alcalinidad de las aguas del lago esté amortiguando el cambio de CID producto del incremento de  $\text{CO}_2$ .

Se observa que el comportamiento de Alchichica como fuente de  $\text{CO}_2$  es más bien el resultado de un aumento del proceso de respiración derivado del incremento, tanto del desarrollo masivo de los productores primarios, como del de los herbívoros que los consumen, más que por la liberación masiva del  $\text{CO}_2$  acumulado en el hipolimnion.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el lago Alchichica se comporta como una fuente de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera la mayor parte del ciclo anual, por lo que se acepta parcialmente la hipótesis 1, aunque alternado con periodos en los que funciona como sumidero de COP a los sedimentos, en este caso, aceptándose en forma parcial la hipótesis 2.

Por lo anterior, podría considerarse a Alchichica como un sistema heterotrófico, es decir, que la respiración resulta ser mayor que la producción primaria. Esto último tendría que evaluarse mediante la medición de las tasas de producción y respiración respectivas.

Finalmente, no puede descartarse la existencia de otra fuente importante de  $\text{CO}_2$  hacia el lago, como a través del ingreso de agua subterránea por el fondo, lo que

probablemente es más consistente con la condición del lago como fuente neta de CO<sub>2</sub>, al no tener entradas superficiales de carbono alóctono.

## CONCLUSIONES

Alchichica presentó una fluctuación amplia de  $f(\text{CO}_2)$ , con un mínimo de 262.6 ppm y un máximo de 1,210.7 ppm (promedio de  $621.3 \pm 310.8$  ppm), revelando un comportamiento principalmente de fuente de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (67% del tiempo) y, en menor medida (33% del tiempo), de sumidero de C.

Los picos de liberación de CO<sub>2</sub> más elevados en febrero y abril parecen estar asociados a las tasas respiratorias elevadas del zooplancton herbívoro que se acopla con los florecimientos de fitoplancton, en este caso, de diatomeas y cianobacterias, respectivamente.

Al no considerar el área superficial y de fondo del lago, el F(COP) fue 6.6 veces mayor que el F(CO<sub>2</sub>), indicando de esta manera un comportamiento de sumidero de C hacía los sedimentos.

Considerando las áreas superficiales y de fondo del lago, el F(CO<sub>2</sub>) es 1.6 veces mayor que el F(COP), lo que indica un comportamiento de Alchichica como fuente neta de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Adicionalmente, para definir la función de Alchichica como fuente de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en vez de sumidero de COP a los sedimentos, se ha de considerar su naturaleza de lago salino, alimentado por aguas subterráneas, lo que –al parecer- es más importante que presentar una biomasa fitoplanctónica dominada por especies de talla grande.

## Recomendaciones

Derivado de los resultados de este trabajo se recomienda medir la  $p$  ( $\text{CO}_2$ ) local *in situ* lo cual permitirá mejorar las estimaciones para el lago, además de hacer un balance producción – respiración, estimando la producción primaria por medio de botellas claras y oscuras o sensores de oxígeno a una escala espacio-temporal adecuada (24-36h), con el fin de conocer los flujos teniendo en cuenta los eventos biológicos y medir el caudal de agua subterránea que alimenta al lago así como las concentraciones de CID, alcalinidad y características fisicoquímicas que nos permitan conocer el comportamiento del sistema.

## LITERATURA CITADA

Adame M. F., J. Alcocer, E. Escobar. 2008. Size–fractionated phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake. *Freshwater Biology* 53:22-31.

Adrian R., C. M. Reilly, H. Zagarese, S. B. Baines, D. O. Hessen, W. Keller, D. M. Livingstone, R. Sommaruga, D. Straile, E. V. Donk, G. A. Weyhenmeyer, M. Winder. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography* 54(6, part 2):2283-2297.

Alcocer J., U. Hammer. 1998. Saline lake ecosystems of México. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 1(3-4):291-315.

Alcocer J., A. Lugo, E. Escobar, M.R. Sánchez, G. Vilaclara. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, México. *Verhandlungeng Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 27:3166–3169.

Alcocer J., D. P López., L. A. Oseguera. 2007. Dinámica del carbono orgánico particulado en un lago tropical profundo. En: Hernández-de la Torre, B., G. Gaxiola-Castro (eds). *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*. Secretaría de Medio

- Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, México. pp. 239-247.
- Alcocer J., D. López, L. Oseguera. 2011a. Dinámica del carbono orgánico particulado en un lago oligotrófico tropical. En: Paz, F., R.M. Cuevas (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Capítulo 2. Universidad Autónoma del Estado de México. México. pp. 541-547.
- Alcocer J., E. Escobar, L. A. Oseguera, V. Ardiles. 2011b. El almacén de carbono orgánico particulado en los sedimentos de un lago oligotrófico tropical. En: Paz, F., R.M. Cuevas (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Capítulo 2. Universidad Autónoma del Estado de México. México. pp. 534-540.
- Alcocer J., D. López-Anaya, L. Oseguera. 2011c. Variación espacial y temporal del carbono orgánico particulado en un lago tropical. En: Paz, F., R.M. Cuevas (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Capítulo 2. Universidad Autónoma del Estado de México. pp. 437-442.
- Alcocer J., E. Escobar, L. Oseguera, V. Ardiles. 2011d. Dinámica intra e interanual del almacén de carbono orgánico particulado en los sedimentos de un lago oligotrófico. En: Paz, F., R.M. Cuevas (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Capítulo 2. Universidad Autónoma del Estado de México. pp. 431-436.
- Alcocer J., A. C. Cruz-Fernández, E. Escobar, L. H. Pérez-Bernal, L.A. Oseguera, V. Adiles-Gloria. 2014a. Deposition, burial and sequestration of carbon in an oligotrophic, oligotrophic lake. *Journal of Limnology* 73(2):223-235.

Alcocer J., A. Guzmán-Arias, L. A. Oseguera, E. Escobar. 2014b. Dinámica del carbono orgánico disuelto y particulado asociados al florecimiento de *Nodularia spumigena* en un lago tropical oligotrófico. En: Paz, F., J. Wong. (editores). 2015. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida y el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: En trámite. pp. 404-411.

APHA, AWWA. WEF. 2005. Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 21<sup>st</sup> ed. American Public Health Association. Washington D. C., USA.

Arar E.J., G.B Collins. 1997. Method 445.0. In vitro determination of chlorophyll a and pheophytin a in marine and freshwater algae by fluorescence. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati. USA.

Balmer M., J. A. Downing. 2011. Carbon dioxide concentrations in eutrophic lakes: undersaturation implies atmospheric uptake. *Inland Waters* 1:125-132.

Bates N. R., L. Samuels. 2001. Biogeochemical and physical factors influencing seawater  $f\text{CO}_2$  and air-sea  $\text{CO}_2$  exchange on the Bermuda coral reef. *Limnology and Oceanography* 46(4):833-846.

Blade D. L. 2009. Gas Exchange at the Air-Water interface. Kent State University, Kent. USA. pp.70.

Callieri C. 1997. Sedimentation and aggregate dynamics in lake Maggiore, a large deep lake in Northern Italy. *Memorie dell' Instituto Italiano di Idrobiologia* 56:37-50.

Cole J.J., N. F. Caraco, G. W. Kling, T. K. Kratz. 1994. Carbon Dioxide Supersaturation in the Surface Waters of Lakes. *Science* 265(5178):1568-1570.

- Cole J. J., N. F. Caraco. 1998. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF<sub>6</sub>. *Limnology and Oceanography* 43(4):647-656.
- Cole J. J., Y. T. Prairie, N. F. Caraco, W. H. McDowell, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, C. M. Duarte, P. Kortelainen, J. A. Downing, J. J. Middelburg, J. Melack. 2007. Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosystems* 10:171-184.
- DOE (U. S. Department of Energy). 1994. Handbook of methods of the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water. version 2. Dickson A.G., C. Goyet (eds). ORNL/CDIAC-74.
- Downing J. A., Y. T. Prairie, J. J. Cole, C. M. Duarte, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, W. H. McDowell, P. Kortelainen, N. F. Caraco, J. M. Melack, J. J. Middelburg. 2006. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography* 51(5):2388-2397.
- Downing J. A. 2009. Global Limnology: Up-scaling aquatic services and processes to planet Earth. *Verhandlungeng Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 30(8):1149-1166.
- Duarte C. M., Y. T. Prairie., C. Montes., J. J. Cole, R. Striegl, J. Melack, J. A. Downing. 2008. CO<sub>2</sub> emissions from saline lakes: A global estimate of a surprisingly large flux. *J. Geophys. Res.*, 113, G04041, doi:10.1029/2007JG000637.
- Falkowski P. G., J. Scholes, E. Boyle, J. Canadell, D. Canfield, J. Elser, K. Hibbard, P. Hoegberg, S. Linder, F. Mackenzie, B. Moore. T. Pedersen, Y. Rosenthal, S. Seitzinger, V. Smeteczek, W. steffen. 2000. The Global Carbon Cycle: a test of our knowledge of Earth as a system. *Science* 290:291-296.

- Filonov A., I. Tereshchenko, J. Alcocer. 2006. Dynamic response to mountain breeze circulation in Alchichica, a crater lake in Mexico. *Geophysical Research Letters* 33:L07404.
- Grasshoff K., K. Kremling, M. Ehrhardt. 2002. *Methods of seawater Analysis*. Wiley-Vch. 3ra edition. Capítulo 8. Alemania. pp.127-148.
- Hensen D. 2006. Determinants of seston C:P ratio in lakes. *Freshwater Biology* 51:1560-1569
- Honjo S., S Manganini, J.J. Cole. 1982. Sedimentation of biogenic matter in the deep ocean. *Deep-Sea Research* 29(5):609–625.
- Jonsson A., J. Aberg, M. Jansson. 2007. Variations in  $p\text{CO}_2$  during summer in the surface water of an unproductive lake in northern Sweden. *Tellus*(59B):797-803.
- Kalff J. 2002. *Limnology*. Ed. Prentice- Hall, Inc. p.218-225.
- Karl D.M., D.V. Hebel, C. Winn. 1991a. Procedures for particulate carbón, nitrogen, phosphorus and total mass analysis used in the US-JGOFS Hawaii ocean time-series program. In: *Marine particles: Analysis and characterization* (eds.) Hurd D.C. y Spencer D.W. Geophysical Monograph 63. American Geophysical Union. Washington, USA. pp.71-77.
- Karl D. M. y miembros del grupo de trabajo. 1991b. Major Bioelements. In: Hurd, D. C., D. W. Spence (eds.). *Marine particles: Analysis and characterization*. Geophysical Monograph 63. American Geophysical Union, Washington. pp.33-42.
- Kazmierczak J., S. Kempe, B. Kremer, P. López-García, D. Moreira, R. Tavera. 2011. Hydrochemistry and microbialites of the alkaline crater lake Alchichica, México. *Facies* 57:543-570

- Lampert W., U. Sommer. 1997. Limnoecology. The Ecology of Lakes and Streams. Oxford University Press. Oxford, USA.
- Lee C., S. G. Wakeham, J. I. Hedges. 1988. The measurement by oceanic particle flux- Are "swimmers" a problema?. *Oceanography* 1:34-36.
- Legendre L. 1999. Environmental fate of biogenic carbon in lakes. *Japanese Journal of Limnology* 60 (1):1-10.
- Lewis E., D.W.R. Wallace. 1998. Program Developed for CO<sub>2</sub> System Calculations. ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. Disponible en <http://cdiac.esd.ornl.gov/oceans/co2rprt.html>. Citado mayo de 2014.
- Libes S. 2009. Introduction to Marine Biogeochemistry. Segunda edición. Elsevier. USA. Capítulo 25. pp.709-758.
- López-Anaya D., J. Alcocer, L. Oseguera, G. Vilaclara. 2010. Seston dynamics in a saline Mexican Lake. *Verhandlungeng Internationale Vereinigug für theoretische und angewandte Limnologie* 30(9):1445-1448.
- Lugo A., Ma. E. González, Ma. R. Sánchez, J. Alcocer. 1999. Distribución de *Leptodiatomus novamexicanus* (Copepoda: Calanoida) in a Mexican hyposaline lake. *Rev. Biol. Trop.* 47 (1):141:148.
- Macek M., D. Pestová, M. E. Martínez- Pérez. 2008. Seasonal and spatial dynamics of a ciliate assemblage in a warm-monomictic Lake Alchichica (Puebla, México). *Hidrobiológica* 18(1 suplemento):25-35.



- Macek M., J. Alcocer, A. Lugo -Vázquez, M. E. Martínez – Pérez, L. Peralta-Soriano, G. Vilaclara – Fatjó. 2009. Long term picoplankton dynamics in a warm-monomictic tropical high altitude lake. *Journal of Limnology* 68(3):183-192.
- NOAA. National Oceanic & atmospheric Administration. ESRL. Global Monitoring Division. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Disponible en <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html> (Citado junio de 2014).
- Oliva M. G., J. Alcocer, A. Lugo, L. Peralta, M. R. Sánchez. 2001. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical hyposaline lake. *Hydrobiologia* 466:299-306.
- Oliva M. G., A. Lugo, J. Alcocer, E. Cantoral-Uriza. 2006. *Cyclotella alchichicana* sp. Nov. from a saline lake. *Diatom Research* 21:81-89.
- Oseguera L., J. Alcocer, G. Vilaclara. 2011. Relative importance of dust inputs and aquatic biological production as sources of lake sediments in an oligotrophic lake in a semi-arid area. *Earth Surf. Process. Landforms* 36:419-426.
- Punning J. M., J. Terassma, T. Koff, Alliksaar. 2003. Seasonal fluxes of particulate matter in a small closed lake in Northern Estonia. *Water, air and soil pollution* 149:77-92.
- Ramírez-Olvera M. A., J. Alcocer, M. Merino, A. Lugo. 2009. Nutrient limitation in a tropical saline lake: a microcosm experiment. *Hydrobiologia* 626:5-13.
- Simon M., H. P. Graossart, B. Schweitzer, H. Ploug. 2002. Microbial ecology of aggregates in aquatic ecosystems. *Aquatic Microbial Ecology* 28(2):175–211.
- Sobek S, L. T. Tranvik, J. J. Cole. 2005. Temperature Independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes. *Global Biogeochemical Cycles* (19):GB2003.
- Solórzano L. 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenol hypochlorite method. *Limnology and Oceanography* 14(5):799-801.

- Strickland J., T. Parson. 1972. A practical Handbook of Seawater Analysis. Fisheries Research Board of Canada. Ottawa. 310 pp.
- Stumm W., J.J. Morgan. 1996. Aquatic Chemistry. John Wiley & sons, INA. Third Edition. EEUU. pp.148-241
- Tranvik J. L., 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, G. A. Weyhenmeyer. 2009 .Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography* 54(6, parte 2):2298-2314.
- Treguer y Le Corre. 1974. Manuel d`analyse des sels nutritifs dans L`eau de mer. Laboratoire d`Oceanologie Chimique, Université de Bretagne occidentale Brest. 58 pp.
- Valderrama J.C. 1981. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Marine Chemistry* 10:109-122.
- Valdespino-Castillo P.M., M. Merino-Ibarra, J. Jiménez-Contreras, F.S. Castillo-Sandoval, J.A. Ramírez-Zierold. 2014. Community metabolism in a deep (stratified) tropical reservoir during a period of high water-level fluctuations. *Environ Monit Assess* 186(10):6505-6520.
- Verosnesi M. L., A. Barbieri, W. Hanselmann. 2002. Phosphorus, carbón and nitrogen enrichment during sedimentation in a seasonally anoxic lake (Lake Lugano, Switzerland). *Journal of Limnology* 61:215-223.

- Vilaclara G., M. Chavéz, A. Lugo, H. González, M. Gaytán. 1993. Comparative description of crater-lakes basic chemistry in Puebla state, México. *Verhandlungeng Internationale Vereinigug für theoretische und angewandte Limnologie* 25:435-440.
- Wanninkhof R. 1992. Relationship Between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean. *Journal of Geophysical Research* 97(5):7373-7382.
- Wanninkhof R., W. E. Asher, D. T. Ho, C. Sweeney, W. R. McGillis. 2009. Advances in Quantifying Air-Sea Gas exchange and Enviromental Forcing. *The Annual Review of Marine Science* (1):213-244.
- Wetzel R. 1981. *Limnología*. Ediciones Omega, S. A. Barcelona. pp.152-155.
- Weyhenmeyer G. A. 1997. Quantification of resuspended paticles in sedimentation trapsa. *Verhandlungen Internationale Vereinigun fur theoretische and angewandte Limnologie* 26:271-276.
- Williamson C. E., J. E. Saros, W. F. Vicent, J. P. Smol. 2009. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography* 54(6):2273-2282.