



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Concentración y distribución vertical de la
biomasa fitoplanctónica en nueve lagos
oligotróficos tropicales**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A :

Maya Nastenka Vera Franco



**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Javier Alcocer Durand**

Ciudad Universitaria, CDMX, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

1.- Datos del alumno

Vera

Franco

Maya Nastenka

044 55 23615282

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Biología

308299825

2. Datos del tutor

Dr.

Javier

Alcocer

Durand

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Eberto

Novelo

Maldonado

4. Datos del sinodal 2

Dr.

Alfonso

Lugo

Vázquez

5. Datos del sinodal 3

M. en C.

León Felipe

Álvarez

Sánchez

6. Datos del sinodal 4

M. en C.

Alejandro

Rodríguez

Ramírez

7. Datos del trabajo escrito.

Concentración y distribución vertical de la biomasa fitoplanctónica en nueve lagos oligotróficos tropicales

51 p

2017



Concentración y distribución vertical de la
biomasa fitoplanctónica en nueve lagos
oligotróficos tropicales

Maya Nastenka Vera Franco

Abarca con tu mirada todos los caminos para que puedas elegir el tuyo; pero no lo escojas entre los que parecen fáciles y floridos, porque no llevan lejos. Elígelos entre los que se confunden con el infinito, entre aquellos que tu ojo no alcanza a verles el fin. Y cuando lo hayas elegido, transita por él con alegría, con decisión, con fe. La alegría te llenara de gozo; la decisión te dará todo el valor que es necesario para las luchas que te aguardan; la fe te hará invencible. Piensa antes de elegir que camino te conviene seguir si deseas ir lejos. Quienes solo trabajan para hoy, nada más viven; pero, los que trabajan para hoy y mañana, viven y progresan; pero, los que trabajan para hoy, mañana y siempre, elevan y magnifican su vida. En las medidas de nuestra fuerza, trabajemos para lograr un buen fin. Cada día hagamos parte de la obra, si nos es posible acabarla, pero es necesario que renovemos esperanzas y fe, porque en el camino de nuestras ilusiones hay siempre obstáculos, dificultades, lágrimas, desengaños y hasta fracasos. No te importe fracasar una y otra vez; los más grandes entre los hombres fracasaron muchas veces. Levántate cuando tropieces; levántate cuando caigas; levántate siempre, porque quizás un poco más allá de donde caíste, alguien te espera para repetirte, en nombre de la vida y la esperanza, las palabras del poeta:

“Lentamente pero siempre se realizan los sueños”

Anónimo



AGRADECIMIENTOS

Chesterton escribió: “Los cuentos de hadas son bien ciertos, pero no porque nos digan que los dragones existen, sino porque nos dicen que podemos vencerlos”.

Institucionales

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi alma mater, gracias a ti descubrí mis fuerzas y debilidades, por la formación que me has inculcado y por el conocimiento para afrontar esta vida y vivirla a plenitud.

A la Facultad de Ciencias por ser mi segundo hogar, por enseñarme que la perseverancia es la clave. Al laboratorio de Biodiversidad y Macroecología del ICMYL y a la Facultad de Estudios Superiores Iztacala por facilitarme el uso de sus instalaciones para la realización de este proyecto.

Al Dr. Javier Alcocer Durand por el conocimiento compartido, apoyo y paciencia para la realización de este trabajo.

A los miembros de mi jurado Dr. Eberto Novelo, Dr. Alfonso Lugo, M. en C. León Álvarez y M. en C. Alejandro Rodríguez por sus observaciones, apoyo e importantes comentarios a este trabajo.

A Vilma Ardiles por su apoyo para la formación de este escrito, comentarios y conocimiento compartido.

A Luis Oseguera por su apoyo en campo, laboratorio y su disposición en la revisión de este trabajo.

A todos los integrantes que forman el equipo de campo que muestreo los lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello.

Al Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua (CONAGUA-CONACYT) proyecto “*Estudio hidrológico y de calidad del agua del sistema Lagunar de Montebello, en el estado de Chiapas*” y a la DGAPA (PAPIIT IN219215) proyecto “*Factores que determinan el estado trófico de los lagos de Montebello, Chiapas*”. Al Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Protegidas (CONANP) (Jesús A. León y Roberto Castellanos), comunidad local y Comisarios Ejidales de Antelá, Cárdenas, Miguel Hidalgo, Ojo de Agua y Tzisco por facilitar el acceso a los lagos. Al Comité de Administración de Tzisco (Sergio Marcos y Miguel A. Tomas), al presidente del Comité de Turismo de Tzisco (Armando Hernández), Comisario Ejidal de Tzisco (Enrique M. Hernández), personal del Hotel Villas Tzisco (Rosemberg F. Jorge, Juan G. Espinoza y Gemuel P. Hernández) por su apoyo y facilidades ofrecidas para el desarrollo de este estudio.

Existen tres clases de familias:
aquella de la que se nace,
aquella que nace de nosotros
y aquella a la que permitimos entrar en nuestros corazones.

Sherrilyn Kenyon

Personales

A mis padres por ser mi apoyo, mi soporte, por siempre impulsarme a dar lo mejor de mí, por enseñarme a caminar por la vida con una sonrisa.

A mi madre, María de los Ángeles, por todo su amor, dedicación y paciencia por convertir los malos pasos en momentos de reflexión, por escucharme y siempre tener una palabra de aliento, por tu hombro cuando ya no podía seguir, gracias mommy.

A mi padre, Miguel Ángel, por tu amor, por desear y anhelar siempre lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y por cada una de tus palabras que me guían, por enseñarme a mover obstáculos, gracias papá y si lo siento, siempre querré un abrazo.

A mi hermano, JCN Ulises, por todas las risas, por ser el antídoto a mi mal humor, por decir las palabras precisas en el momento adecuado y si hubiera otro JCN aun así tú serías mi favorito.

A mis abuelos por su cariño, sus historias y grandes lecciones que me acompañaran durante mi vida.

A mis locas favoritas Paulina Espinosa y Jade Gonzaga, gracias por ser mis incondicionales.

A mis amigas Blanca Palma y Crystal Hernández por esas conversaciones, esos viajes pero sobre todo por su amistad.

A Ana Martínez por ser una amiga con la que puedo hablar de todo, por sentarte conmigo cuando no estaba lista, por tu confianza y cariño, gracias Nana.

A Dennise Hernández, ¡¡¡hannon lee, mellon nyn!!!! por ser la mejor y más leal “mala influencia” con la que puedo contar y por siempre estar a mi lado.

A Tzitz Mariel, por tu confianza, cariño pero sobre todo por siempre impulsarme a seguir.

A Elizabeth, Lizzi!! por todo tu cariño, apoyo, paciencia pero sobre todo por siempre estar conmigo.

A Tania Vázquez por los más largos desayunos de la historia, por las risas y demostrar que para la amistad “si se quiere, se puede”.

A Letty Jiménez, Esmeralda Domínguez, Sandra Hernández, Itzel Limón, Karen Rivera y Yossellin Tapia por su compañía, por creer en mí, por sus palabras de aliento, por nunca dejarme caer, gracias.

A Letty, Itzel, Karen, Sandra, Odette, Yosse, Esme, Soni, Paco, Iris, Ivonne, Adri, Karla, Nora, Elías, Darién y todos aquellos que forman ¡Deep sea and Montebello! por ser mis amigos, por ser un soporte en momentos difíciles y por hacer esta etapa inolvidable.

A León Álvarez por su gran disponibilidad para resolver dudas y su inmensa ayuda cuando mi compu se enfermaba.

A mis profesores de carrera por avivar el amor a la ciencia, por sus palabras de aliento por ser guías en mi vida profesional y académica: Iván Castellanos, Guillermo Maldonado, Blanca Millán y Alicia Cruz.

A mis compañeros y amigos de carrera, por todo lo que vivimos juntos y las grandes lecciones, gracias.

Índice

	Pág.
Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
Antecedentes	15
Justificación	17
Hipótesis	17
Objetivos	18
Área de estudio	19
Metodología	22
Resultados	26
Discusión	37
Conclusiones	43
Bibliografía	44

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1. Ubicación geográfica, profundidad máxima (Z Máx.) y profundidad media (Z med), ambas en metros, de los lagos de estudio.	22
Tabla 2. Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de temperatura (°C) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.	26
Tabla 3. Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de Oxígeno disuelto (mg L^{-1}) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.	28
Tabla 4. Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de pH durante primavera e invierno en los lagos de estudio.	31
Tabla 5. Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de conductividad ($\mu\text{S/cm}$) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.	31
Tabla 6. Valores promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de Z_{EU} (m) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.	32
Tabla 7. Valores mínimos (Mín.) máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de las concentraciones de clorofila-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.	33
Tabla 8. Valores promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de clorofila-a integrada (mg m^{-2}) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.	33
Tabla 9. Estado trófico propuesto por la OCDE basados en la concentración de clorofila-a ($\mu\text{g L}^{-1}$).	34
Tabla 10. Concentraciones de clorofila-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) y parámetros físico-químicos reportados para otros lagos.	38

Índice de figuras

	Pág.
Fig. 1 Ubicación geográfica del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas.	20
Fig. 2 Equipos utilizados para la obtención de muestras de agua y el registro <i>in situ</i> de variables ambientales.	23
Fig. 3 Perfiles de temperatura, oxígeno disuelto y conductividad de tres lagos con menor profundidad (Agua Tinta, Kichail y Yalalush) en el muestreo del 2014 (primavera).	27
Fig. 4 Perfiles de temperatura, oxígeno disuelto y conductividad de Dos Lagos, Montebello y San José en primavera. Las dos líneas punteadas representan el techo y piso de la termoclina.	27
Fig. 5 Perfiles de temperatura, oxígeno disuelto y conductividad de tres lagos profundos (Cinco Lagos, Pojoj y Tzisco) en primavera.	28
Fig. 6 Perfiles de temperatura, oxígeno disuelto y conductividad de tres lagos con menor profundidad (Agua Tinta, Kichail y Yalalush) en el muestreo del 2015 (invierno).	29
Fig. 7 Perfiles de temperatura, oxígeno disuelto y conductividad de Dos Lagos, Montebello y San José en invierno.	30
Fig. 8 Perfiles de temperatura, oxígeno disuelto y conductividad de tres lagos profundos (Cinco Lagos, Pojoj y Tzisco) durante el invierno.	30
Fig. 9 Variación de la clorofila-a integrada (mg m^{-2}) en la columna de agua de los lagos muestreados en ambos periodos de estudio.	34
Fig. 10 Distribución vertical de la clorofila-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) de los lagos en primavera.	35
Fig. 11 Contribución de clorofila-a generada por parte del máximo profundo de clorofila a la clorofila-a total de los lagos Agua Tinta, Cinco Lagos, Dos Lagos, Kichail, Montebello, Pojoj, San José y Tzisco.	36
Fig. 12 Relación de la profundidad de la zona eufótica y la concentración de clorofila-a durante primavera en los lagos del PNLM	41
Fig. 13 Relación de la profundidad de la zona eufótica y la concentración de clorofila-a durante el invierno en los lagos del PNLM.	41

Resumen

Los lagos ubicados en el Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) están siendo afectados, principalmente, por el vertimiento de aguas residuales y desechos agrícolas, ganaderos y domésticos, así como por el cambio de uso de suelo, teniendo como consecuencia una afectación en algunos de los cuerpos acuáticos, que se ha expresado como un cambio en el color del agua, olores desagradables, formación de natas en la superficie y mortandad de peces, entre otros. El reconocer el estado actual de los lagos, aún no impactados, permitirá contar con una línea base de referencia para estudios posteriores, así como medios de reconocer los cambios acaecidos en los lagos impactados. La presente investigación contribuye con la caracterización del estado trófico y algunas características limnológicas de nueve lagos considerados *a priori*, como prístinos en dos periodos limnológicos contrastantes: estratificación (mayo de 2014, primavera) y mezcla (febrero de 2015, invierno) empleando para ello la concentración de clorofila-a (clor-a) como indicador de la concentración de la biomasa fitoplanctónica. La determinación de clor-a se hizo mediante extracción con acetona y fluorimetría siguiendo el método 445.0 de la EPA y midiendo el sobrenadante en un fluorómetro Turner Designs 10-AU. Se encontró que las concentraciones de clor-a en los lagos varían entre 0.14 y 4.57 $\mu\text{g L}^{-1}$; estas concentraciones son similares con lo reportado en otros lagos oligotróficos y ultra oligotróficos y coincide con lo reportado para otros lagos tropicales, por lo que su coloración azul se corresponde con su estado trófico. La distribución y concentración de clor-a en aquellos lagos que se encontraron térmicamente estratificados, está relacionada con la dinámica estacional (mezcla-estratificación); durante la estratificación de primavera se forma un máximo profundo de clorofila, en algunos lagos se encontró asociado a cambios de densidad por un incremento en la conductividad, mientras en los otros lagos se encontró asociado a la termoclina. Salvo Dos Lagos que permaneció estratificado por temperatura, los demás lagos circularon en febrero y la clor-a se encontró homogéneamente distribuida a lo largo de la columna de agua. Dos Lagos presentó un perfil térmico clinogrado y los valores de conductividad permitieron diferenciar dos estratos: monimolimnion y mixolimnion, lo que permite calificarlo como un lago meromítico. La presencia de DCM en ocho de los nueve lagos oligotróficos durante el periodo de estratificación primavera confirma el estado oligotrófico de éstos. El lago que no presentó DCM fue Yalalush y se debió a que se encontró circulando en ambos muestreos. El DCM se encontró ubicado entre la base del metalimnion y el tope del hipolimnion, en el límite de la ZEU 0.1% PAR; lo anterior ha sido reportado para otros lagos oligotróficos. Los resultados encontrados permiten asegurar que la condición prístina de los lagos del PNLM es de la ultra oligotrofia a la oligotrofia.

Abstract

The lakes located in the "Lagunas de Montebello" National Park (PNLM) are being affected, mainly, by the dumping of wastewater and agricultural, livestock and domestic waste, as well as by the change of land use, resulting in an affectation in some of the aquatic bodies, which has been expressed as a change in water color, unpleasant odors, formation of cream on the surface and mortality of fish, etc. Recognition of the current status of lakes, not yet impacted, will provide a base line for further studies, as well as ways to recognize changes in impacted lakes. The present research contributes to the characterization of the trophic state and some limnological characteristics of nine lakes considered a priori, as pristine in two contrasting limnological periods: stratification (May 2014, spring) and mixing (February 2015, winter) using concentration of chlorophyll-a (chlor-a) as an indicator of the concentration of phytoplankton biomass. The determination of chlor-a was made by extraction with acetone and fluorometry following the EPA method 445.0 and measuring the supernatant in a Turner Designs 10-AU fluorometer. It was found that the concentrations of chlor-a in the lakes vary between 0.14 and 4.57 $\mu\text{g L}^{-1}$; these concentrations are similar to those reported in other oligotrophic and ultra oligotrophic lakes and coincides with that reported for other tropical lakes, so that their blue color corresponds to their trophic state. The distribution and concentration of chlor-a in those lakes that were found to be thermally stratified, is related to the seasonal dynamics (mixture-stratification); during the spring stratification a deep maximum of chlorophyll was formed, in some lakes it was found to be associated to density changes by an increase in conductivity, while in the other lakes it was found associated to the thermocline. Except for Two Lakes that remained stratified by temperature, the other lakes circulated in February and chlor-a was found homogeneously distributed along the water column. Two Lakes presented a clinograd thermal profile and the conductivity values allowed to differentiate two strata: monimolimnion and mixolimnion, which allows to qualify it as a meromictic lake. The presence of DCM in eight of the nine oligotrophic lakes during the spring stratification period confirms their oligotrophic state. The lake that did not present DCM was Yalalush and was because it was found circulating in both samples. The DCM was located between the base of the metalimnion and the top of the hipolimnion, in the limit of the $Z_{\text{EU}} 0.1\% \text{ PAR}$; this has been reported for other oligotrophic lakes. The results found allow to assure that the pristine condition of the lakes of the PNLM is from ultra-oligotrophy to oligotrophy.

Introducción

Los estudios que se realizan para evaluar el estado de salud ambiental de un sistema acuático consideran diferentes variables químicas, físicas y biológicas. Entre las de carácter biológico se encuentran las relacionadas con los productores primarios, tal como el fitoplancton, el cual juega un papel importante como base de las tramas tróficas, así como en las concentraciones de nutrientes y en el flujo de energía de los ecosistemas acuáticos (Gregor y Marsalek, 2004).

El fitoplancton es una comunidad de organismos microscópicos fotosintetizadores que viven suspendidos en la zona fótica de la columna de agua; de acuerdo con Reynolds (1996), el tamaño de los organismos que componen el fitoplancton varía de 0.2 a 2,000 μm . Existen diferentes factores que forman parte de la dinámica lacustre y que afectan al fitoplancton. Entre los factores que Reynolds (2006) menciona como los más importantes que regulan la producción y la biomasa fitoplanctónica se encuentran la luz y la temperatura.

La luz es uno de los recursos principales para el fitoplancton, respondiendo ante sus fluctuaciones (Litchman, 2000). En la naturaleza se han observado comportamientos cíclicos, a escala diaria o estacional y afectan el desarrollo de la competencia entre grupos de fitoplancton con características diferentes (Dupuis y Hann, 2009). Una vez que la luz penetra en el agua, es refractada, dispersada, transmitida o absorbida y sólo cerca de la mitad del amplio espectro de la luz que se transmite bajo el agua puede utilizarse para realizar fotosíntesis. Esta fracción útil para la fotosíntesis se conoce con el término de radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus iniciales en inglés) y abarca un espectro que va aproximadamente de los 400 a los 700 nm. Con base en la PAR se define la zona eufótica (ZEU) como aquella zona que se encuentra desde la superficie del cuerpo de agua hasta la profundidad en la cual la PAR es aproximadamente el 1% de la que hay en la superficie (Horne y Goldman, 1994).

En la columna de agua se reconocen tres zonas importantes con relación a la PAR: una zona de fotoinhibición, una profundidad con alta producción y un declive progresivo de este máximo de producción hacia el fondo, debido a la limitación de la luz (Payne, 1986; Barnes y Mann, 1991). En ambientes oligotróficos y tropicales, los productores primarios pueden alcanzar su concentración máxima a profundidades considerables (Margalef, 1983). Esta profundidad con alta producción se denomina “máximo profundo de clorofila” (DCM, por sus siglas en inglés) que está fuertemente relacionado con la profundidad a la que se encuentra en la vertical el gradiente de mayor concentración de nutrientes inorgánicos disueltos (nutriclina) (Cullen, 1982).

Otra de las variables físicas de mayor relevancia en un cuerpo acuático es la temperatura, ya que afecta a diversos procesos, como la tasa de evaporación, la concentración de oxígeno y

los procesos biogeoquímicos. Además, influye sobre la sucesión de las comunidades planctónicas (Lewis, 1987). La temperatura genera el establecimiento de una estratificación térmica en donde la zona que está en contacto con la atmósfera y que frecuentemente es turbulenta, se conoce como epilimnion; la zona profunda, el hipolimnion, casi no es turbulento y se encuentra separado del contacto con la atmósfera; finalmente, la zona de transición entre el epilimnion y el hipolimnion, es el metalimnion, el cual se caracteriza por la presencia de un gradiente de temperatura al que se llama termoclina. La formación del metalimnion y las restricciones que esta capa impone para la mezcla de nutrientes y de gases entre el epi y el hipolimnion, hacen de la estratificación el evento físico más importante para la biota, por lo tanto, para el fitoplancton (Kalff, 2002).

La incidencia de la estabilidad generada durante la estratificación térmica sobre los organismos planctónicos ha sido descrita en varios trabajos (p. ej. Reynolds, 1992; Miracle *et al.*, 1998) y, en último término, implica una estrecha vinculación entre las relaciones tróficas y los factores ambientales. Los lagos de profundidades relativas mayores a 7 m muestran marcados gradientes verticales de temperatura, con un notable máximo metalimnético de oxígeno, resultante de la fotosíntesis algal, generándose en el hipolimnion una oxiclina, en cuya parte inferior se mantienen también altas densidades fitoplanctónicas (Camacho *et al.*, 2009, Morata *et al.*, 2003).

De acuerdo con los factores que tienen influencia sobre el crecimiento fitoplanctónico se produce un espectro vertical de microhábitats, cada uno de los cuales ofrece condiciones únicas de crecimiento para el mismo (Reynolds, 1984), lo que ha permitido mantener una distribución diferencial de fitoplancton. En contraste, la mezcla distribuye al fitoplancton a lo largo de la columna de agua y acarrea nutrientes desde grandes profundidades, fertilizando las aguas sub-superficiales y superficiales, y lo que genera importantes florecimientos de fitoplancton (Lee y Williams, 2000). Los máximos de biomasa fitoplanctónica que pueden aparecer durante la estratificación no se encuentran en la capa de mezcla debido a que la turbulencia generada por la mezcla del agua evita la acumulación de fotótrofos en cierta profundidad (Reynolds, 1994).

Para estimar la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas se utilizan diversos métodos, uno de los cuales es a través de la concentración de la clorofila-a (clor-a). La medición de este pigmento se considera, asimismo, un buen indicador para determinar el estado trófico de un ecosistema (Gregor y Marsalek, 2004).

Antecedentes

Debido a la afectación en algunos de los lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) que se ha expresado como un cambio en el color del agua, olores desagradables, formación de natas en la superficie y mortandad de peces, entre otros, la Comisión Nacional de Áreas Naturales realizó el “Estudio para monitorear los parámetros de calidad de agua de las lagunas de Montebello comunicadas con el sistema lagunar Tepancoapan” en 2011 que determinó parámetros físico-químicos del agua, para verificar si la calidad del recurso cumplía con las condiciones para los usos requeridos. Mediante los resultados obtenidos se pudo observar que el oxígeno disuelto debe encontrarse entre 6 y 12 unidades y contar con un rango de 10 y 5.5 unidades de pH, de acuerdo con la NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites permisibles para la vida acuática.

En ese mismo año, 2011, la Comisión Nacional del Agua en conjunto con el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través de “Estudio hidrológico y de Calidad del Agua del sistema Lagunar de Montebello, en el estado de Chiapas” estudió el patrón hidrológico superficial y subterráneo, junto con una caracterización física, química, biológica y toxicológica, para conocer las causas del cambio en la calidad del agua en las lagunas Vuelta de Agua, Montebello, Tziscaco y Bosque Azul. En el caso de Montebello, Tziscaco y Bosque Azul, se encontró que el pH oscilaba entre 6 y 9 unidades, la temperatura en un rango que va de 22 a 33 °C y la conductividad presentaba valores máximos de 5.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en cumplimiento con la NMX-AA-115-SCFI-2000. La laguna Vuelta del Agua presentó valores más altos en todas las variables y no conservó su color natural, así como la presencia de materia inorgánica suspendida.

Almeida (2014) comparó la estructura de la comunidad de fitoplancton con base en la composición funcional y taxonómica de 17 lagos de Montebello durante una temporada seca cálida. Los resultados permitieron clasificar a 4 grupos de lagos, de acuerdo con la cantidad de biomasa fitoplanctónica y a las especies dominantes. Se concluyó que, para el periodo de estudio, los lagos presentaron heterogeneidad espacial, taxonómica y funcional fitoplanctónica, a pesar de la cercanía entre ellos y, con base a esto, se observa que están siendo negativamente influenciados por las actividades antropogénicas de las zonas circundantes, aunque de manera diferencial, ya que algunos se encuentran más alterados que otros.

Recientemente se realizó un estudio que midió la concentración y variación temporal en el perfil vertical del seston y el carbono orgánico particulado (COP), así como la transparencia de la columna de agua de nueve lagos con distintos grados de impacto (Vargas, 2016). Los resultados muestran que los perfiles verticales de seston y COP difieren entre los lagos prístinos e impactados, siendo los impactados los que presentan la concentración máxima de

seston y COP en o cerca de la superficie, a diferencia de los prístinos que muestran la concentración máxima a media agua.

Finalmente, Hernández (2016) realizó un estudio comparativo en nueve lagos distintos a los incluidos en la presente investigación del PNLM incluyendo lagos tanto impactados como prístinos con el fin de llevar a cabo una evaluación de su estado trófico, a partir de la concentración de clor-a como proxy de la biomasa fitoplanctónica. Los lagos presentaron una amplia variación de clor-a donde los valores más altos estuvieron presentes en período de mezcla (invierno) así como la presencia de máximos profundos de clorofila en lagos prístinos y máximos superficiales o sub-superficiales en lagos impactados durante la estratificación (primavera). De acuerdo con los criterios de la Organización y Cooperación para el Desarrollo Económico (OCDE) los lagos se clasificaron desde ultra oligotróficos hasta hipereutrófico.

Justificación e Hipótesis

Justificación

Los lagos de Montebello están siendo afectados principalmente por desechos de asentamientos humanos y por el cambio de uso de suelo alrededor de éstos (CONANP, 2007), teniendo como consecuencia un cambio en el color del agua, malos olores, formación de natas y mortandad de peces, lo cual ha generado una disminución en el atractivo turístico y, por ende, una disminución en la economía regional.

El PNLM representa una zona fundamental como parte de un complejo sistema ecológico, cultural y económico. Sin embargo, existe un número reducido de trabajos que de forma integrada muestre las características limnológicas de los diferentes cuerpos acuáticos. La presente investigación proporciona una línea base sobre la concentración y distribución vertical de la biomasa fitoplanctónica, expresada a través de la concentración de la clor-a de los lagos no impactados que se consideran como prístinos, esto es, que reflejan las condiciones de los cuerpos acuáticos, previa a la afectación antropogénica.

Hipótesis

Los lagos seleccionados que han sido considerado a priori como limpios o no impactados, reflejarán su condición prístina a través de bajas concentraciones de clor-a, así como en aquellos suficientemente profundos para estratificarse, presentarán el desarrollo de un máximo profundo de clorofila, rasgo característico de ambientes acuáticos oligotróficos.

Objetivos

Objetivo general

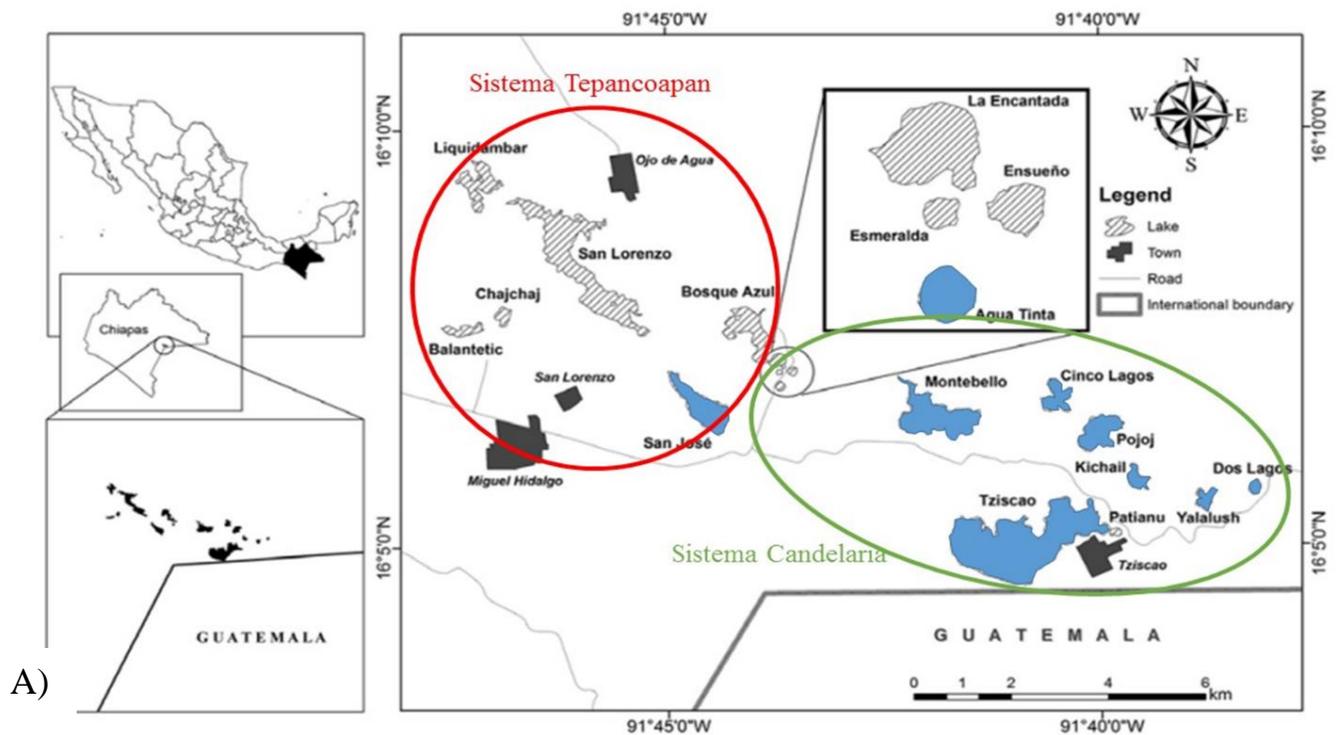
Medir la concentración y reconocer la distribución en el perfil vertical de la biomasa fitoplanctónica en nueve lagos oligotróficos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, empleando para ello la concentración de clor-a como indicador de la concentración de biomasa fitoplanctónica.

Objetivos particulares

- ☞ Medir los perfiles de temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad, en cada uno de los lagos.
- ☞ Determinar la concentración y distribución vertical de la clor-a en la columna de agua de los lagos en estudio, en dos periodos limnológicos contrastantes: estratificación (mayo de 2014, primavera) y mezcla (febrero de 2015, invierno).
- ☞ Determinar con base en la concentración de clor-a el estado trófico de los lagos.
- ☞ Relacionar la concentración y distribución de la clor-a con las variables ambientales medidas.

Área de estudio

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” se localiza en la región sureste del Estado de Chiapas, en la provincia fisiográfica de Altos de Chiapas, a una altitud promedio de 1,500 m s.n.m., que es también conocido como el Macizo Central de Chiapas, sus coordenadas geográficas son 16.07° y 16.17° N y 91.62° y 91.79° O (CONANP, 2007) (Fig. 1). Hidrológicamente, la cuenca endorreica es parte, de la Región Hidrológica 30GI subcuenca del río Comitán, y se alimenta superficialmente por el Grande Río (INEGI, 1988). Los datos de la estación meteorológica en Tziscaco (16.1° N, 91.63° W; 1475 m s.n.m.), indican que la media anual de la temperatura es de 17.3 °C, la precipitación anual media es 2, 279 mm y la evaporación media anual es de 948 mm.



Agua Tinta



Cinco Lagos



Dos Lagos



Kichail



Montebello



Pojoj



B) San José



Tzisco



Yalalush

Fig. 1 Ubicación geográfica del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas. A) Se muestra la ubicación de los lagos seleccionados para este estudio. (Editado de Alcocer *et al.*, 2016). B) Se muestran fotografías de los lagos muestreados en primavera (2015).

El clima de la región es Cb(m)(f)ig que representa un primavera fresco, húmedo y con un régimen típico de la precipitación estival. Más del 10.2% de la precipitación anual cae durante el invierno (García, 1988). La mayor parte de los suelos del PNLM se ha desarrollado de las calizas o de sedimentos fluviales y lacustres. Se han identificado los siguientes tipos de suelos: litosoles, rendzinas, vertisoles, acrisoles, fluvisoles y gleysoles (Vásquez y Méndez, 1994; INEGI, 2000). En cuanto a la litología, toda el área está cubierta por una roca caliza del Cretácico Inferior que se asocia con la formación de un complejo de origen kárstico (Hutchinson, 1957) con dolinas, uvalas y poljes. La vegetación predominante del PNLM es bosque de clima templado (SEMARNAT, 2002).

La presencia de superficies inundables, sobre todo en la porción noroccidental del Parque, determina oscilaciones substanciales del medio lacustre-palustre entre las estaciones lo que divide el complejo lacustre en siete sistemas, destacando los sistemas Tepancoapan y Candelaria. El Sistema Tepancoapan tiene aproximadamente 13 km de longitud; está considerado como un cuerpo de agua continuo que reúne a los lagos San Lorenzo, Bosque Azul, Peninsular, La Encantada, Bartolo, Peñasquito y San José. Este sistema se alimenta, además del aporte de aguas subterráneas, de las descargas del Río Grande de Comitán en el lago Chinkultick hasta llegar a la Encantada. Los lagos se comunican por la inundación de sus áreas colindantes durante la época de lluvia. El desagüe parcial del sistema se realiza a

través de un arroyo que se alimenta de las aguas de San Lorenzo y Bosque Azul, a través de un sumidero en el sitio denominado “El Arco”. El Sistema Candelaria, de aproximadamente 7 km de longitud, viaja desde Tziscoa hasta Esmeralda y se compone principalmente de los lagos Tziscoa, Pojoj, Montebello y Cinco Lagos. Las conexiones de este sistema son menos claras ya que son subterráneas (Galicia, 2012).

El río Grande constituye el río principal de la subcuenca que abarca el PNLM. Las aguas negras de la ciudad de Comitán de Domínguez desembocan en éste y conforma una seria amenaza de contaminación al sistema hidrológico de Montebello. No obstante, existe inconsistencia en la información sobre el sitio en que el río Grande vierte el contenido de sus aguas, recordemos que la comunicación entre los lagos no solo es superficial sino también subterránea.

Metodología

a) Trabajo de campo

Se seleccionaron 9 lagos considerados a priori como no contaminados (limpios) con base en su coloración azul: Agua Tinta, Cinco lagos, Dos lagos, Kichail, Montebello, Pojoj, San José, Tzisco y Yalalush (Tabla 1). Se muestrearon en dos periodos contrastantes del ciclo hidrodinámico: mayo de 2014 (primavera) y febrero de 2015 (invierno).

Tabla 1. Ubicación geográfica, profundidad máxima ($Z_{\text{máx}}$) y profundidad media (Z_{med}) de los lagos de estudio (Tomado de Alcocer *et al.*, 2016).

Lago	Lat. N	Long. O	$Z_{\text{máx}}$ (m)	Z_{med} (m)
Agua Tinta	16°06'25.5"	91°41'19.8"	24	14.7
Cinco lagos	16°06'39.7"	91°40'35.0"	162	42.5
Dos lagos	16°05'37.6"	91°38'22.0"	42	25.2
Kichail	16°05'45.6"	91°39'35.6"	22	9.5
Montebello	16°06'32.0"	91°40'57.5"	45	12.3
Pojoj	16°06'22.2"	91°40'03.3"	198	35.2
San José	16°06'34.0"	91°44'29.2"	30	10.3
Tzisco	16°04'59.0"	91°40'46.8"	86	28.9
Yalalush	16°05'30.3"	91°38'47.8"	23	9.9

En cada lago se midieron perfiles verticales de toda la columna de agua, estos fueron temperatura, oxígeno disuelto (OD), pH y conductividad eléctrica (K_{25}). Se utilizó una sonda multiparamétrica de calidad de agua marca Hydrolab modelo Datasonde 4 (DS4) unida a una caja controladora modelo Surveyor 4 (SVR4). Para los perfiles PAR se utilizó un perfilador de fluorescencia natural marca Biospherical Instruments, modelo PNF-300 con la que se calculó la profundidad de zona eufótica (Z_{EU}). En el caso de Pojoj 2015 (invierno) solo se trabajó con un perfil de PAR por un fallo en el cable serial.

Para evaluar la concentración de la clor-a se tomaron muestras de agua utilizando una botella muestreadora UWITEC de 5 L de capacidad (Fig. 2). Durante ambos muestreos las profundidades se seleccionaron como aquellas que mejor representan la heterogeneidad de la columna de agua (por ejemplo, termoclina, oxiclina) a tres profundidades en San José y Yalalush, cuatro en Agua Tinta y cinco profundidades en el resto de los lagos. El filtrado de las muestras se llevó a cabo en el laboratorio de campo con una bomba de vacío, a una presión de aproximadamente 0.3 atm. Se siguió el método 445.0 de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (en inglés, Environmental Protection Agency; más conocida por las siglas EPA) (Arar y Collins, 1997). El filtrado se hizo a través de filtros de fibra de vidrio (GF/F) marca Whatman, con apertura de poro nominal de 0.7 μm . Los filtros se etiquetaron y

transportaron al laboratorio de la FESI (Facultad de Estudios Superiores Iztacala) en frascos oscuros y en refrigeración para su análisis posterior.

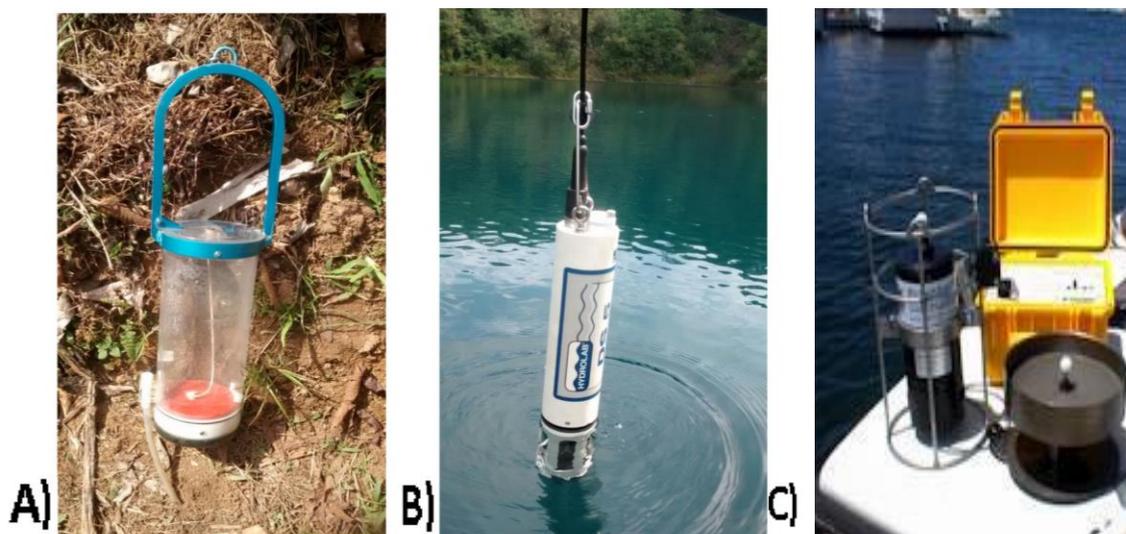


Fig. 2 Equipos utilizados para la obtención de muestras de agua y el registro *in situ* de variables ambientales. A) Botella muestreadora UWITEC, B) Sonda multiparamétrica de calidad de agua Hydrolab DS4, C) Perfilador de Fluorescencia Natural Biospherical PNF-300.

b) Trabajo de laboratorio

Para extraer los pigmentos se trituraron los filtros utilizando un macerador de filtros con punta de teflón adicionando 10 ml de acetona al 90%. Posteriormente se mantuvieron en oscuridad y refrigeración durante 20 horas para la extracción del pigmento. Transcurrido el tiempo, las muestras se centrifugaron a 3,000 rpm durante 15 minutos y se midió la fluorescencia del sobrenadante en un fluorómetro Turner Designs 10-AU.

c) Método estadístico

Las lecturas del fluorómetro se convirtieron a μg clor-a L^{-1} utilizando el algoritmo de la ecuación que se presenta a continuación. Esta ecuación es utilizada para la marca y modelo del fluorómetro empleado en esta investigación (Arar y Collins, 1997).

$$C_{s, u} = \frac{(C_{e,u})(V_e)(FD)}{V_m} \quad (\text{Ec.})$$

Donde:

$C_{s, u}$ = concentración de clor-a (μg L^{-1}) en toda la muestra de agua.

$C_{e, u}$ = concentración de clor-a (μg L^{-1}) no corregida.

V_e = Volumen (L) de la extracción antes de ser diluida.

FD = factor de dilución.

V_m = volumen (L) de toda la muestra de agua.

La zona eufótica (Z_{EU}) se calculó con base en los registros de PAR; generalmente se considera que el límite inferior de la zona eufótica es la profundidad a la que llega el 1% de la PAR superficial, radiación estimada como mínima para que el fitoplancton realice fotosíntesis (Arocena y Conde, 1999). Sin embargo, durante el presente estudio, el DCM frecuentemente se localizó por debajo del 1% y por arriba del 0.1% de la PAR superficial, lo cual ha sido reportado con anterioridad para lagos mexicanos como Alchichica, Puebla (González, 2013) y los lagos Morency en Canadá y Rond en Nueva York (Pinel-Alloul *et al.*, 2008); de acuerdo con lo anterior, la Z_{EU} calculada en esta investigación se hizo bajo el criterio del 0.1% del SPAR.

Para cada perfil, se integró por unidad de área (mg/m^2) la concentración de clor-a en la vertical por medio de los valores de clor-a de las profundidades muestreadas. Las integraciones en la vertical se realizaron hasta una profundidad marcada por la Z_{EU} 0.1%.

Respecto a la presencia del DCM existen diferentes aproximaciones para definir sus límites (i.e., dónde inicia y termina). Algunos trabajos consideran la porción del perfil mayor a la media de la concentración de clor-a de todo el perfil (p.ej. Cullen y Eppley, 1981). Otros investigadores (p.ej. Signoret *et al.*, 1998) consideran al DCM como aquel segmento del perfil que iguala o supera el valor de la media más una desviación estándar. Otros más lo consideran como la porción del perfil cuya concentración de clor-a es igual o mayor a la media más dos veces la desviación estándar de la concentración de clor-a en todo el perfil (Signoret *et al.*, 2006). Sin embargo, ninguno de estos autores explica el razonamiento detrás de la selección del método empleado para delimitar el DCM.

De acuerdo con lo anterior, el concepto utilizado, más no mencionado comúnmente (p.ej., Camacho, 2006) en los estudios, para definir un DCM para el caso de los lagos del PNLM es un criterio gráfico, el cual considera al DCM como la porción comprendida entre los puntos (puntos de inflexión de la curva) donde la pendiente de la gráfica de concentración de clor-a tiene su mayor cambio.

Además, para delimitar el DCM se graficó junto al metalimnion y la Z_{EU} con el objetivo de conocer su presencia respecto a estos parámetros.

Posteriormente se obtuvieron los promedios y desviaciones estándar de los datos obtenidos de clor-a, temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad y turbidez. Para definir una termoclina se tomó como el intervalo de profundidad en el que el gradiente de temperatura por metro es igual o mayor que $0.3 \text{ }^\circ\text{C m}^{-1}$. En lagos ecuatoriales y tropicales se presentan

pequeñas diferencias verticales de temperatura en comparación a lagos templados, sin embargo Álvarez-Cobelas (1992) propone que un gradiente térmico de 0.3 °C es suficiente para el desarrollo de una estructura térmica estable.

Para determinar si existe una diferencia entre las concentraciones de clor-a en cada período de muestreo, se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) y una prueba Post hoc de Tukey para comparar las concentraciones de clor-a de los lagos en cada período de muestreo, utilizando el programa SPSS Statistics, IBM ®, versión 21.

Resultados

a) Parámetros físico-químicos

Los valores de temperatura de los dos periodos muestreados se presentan en la Tabla 2. Durante el primavera todos los lagos se encontraron térmicamente estratificados, excepto Yalalush que estaba circulando (Fig. 3), presentándose una disminución de la temperatura según aumenta la profundidad. La mayor diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo (6.30 °C) se encontró en Kichail ($Z_{\text{máx}} = 22$ m) mientras la menor diferencia se encontró en Yalalush (0.70 °C), esta diferencia de temperatura explicaría la mezcla en Yalalush dado que una mayor diferencia entre la superficie y el fondo originan capas con diferentes densidades que constituyen en sí mismas una barrera física a la mezcla (Cole, 1983).

Tabla 2. Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de temperatura (°C) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.

Lago	$Z_{\text{máx}}$ (m)	T (°C)							
		Primavera				Invierno			
		Mín.	Máx.	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.
Agua Tinta	24	20.1	24.0	22.5	1.6	18.7	19.9	19.0	0.4
Cinco Lagos	162	18.3	22.3	19.7	1.4	18.3	18.6	18.3	0.1
Dos Lagos	42	18.5	21.9	19.3	2.5	18.1	19.1	18.5	0.3
Kichail	22	18.2	24.5	20.7	2.3	17.4	19.4	17.8	0.6
Montebello	45	17.7	22.6	20.2	2.2	17.0	17.4	17.1	0.1
Pojoj	198	17.9	22.5	20.0	1.7	18.7	19.4	18.8	0.1
San José	30	18.4	23.6	21.6	1.8	17.1	18.8	17.6	0.6
Tzisco	86	17.9	22.5	19.9	1.9	17.5	18.2	17.6	0.1
Yalalush	23	20.4	21.1	20.7	0.3	17.3	18.4	17.8	0.4

En el presente trabajo la termoclina que presentó el mayor gradiente de temperatura se encontró en Montebello (1.36 °C de 18-19 m) mientras que el gradiente más reducido fue de 0.4 °C de 23-24 m en Cinco Lagos y en Pojoj de 26-28 m. El techo de la termoclina más superficial se localizó a los 2 m (San José) (Fig. 4) y el más profundo a los 25 m (Pojoj) (Fig. 5). El metalimnion con mayor espesor fue de 17 m en Cinco Lagos (Fig. 5) y el más angosto fue en Agua Tinta (Fig. 3) y Dos Lagos (Fig. 4) con 4 y 3 m, respectivamente.

En el invierno los lagos presentaron temperaturas homogéneas en toda columna de agua a excepción de Dos Lagos que se encontró estratificado (Fig. 6, 7 y 8).

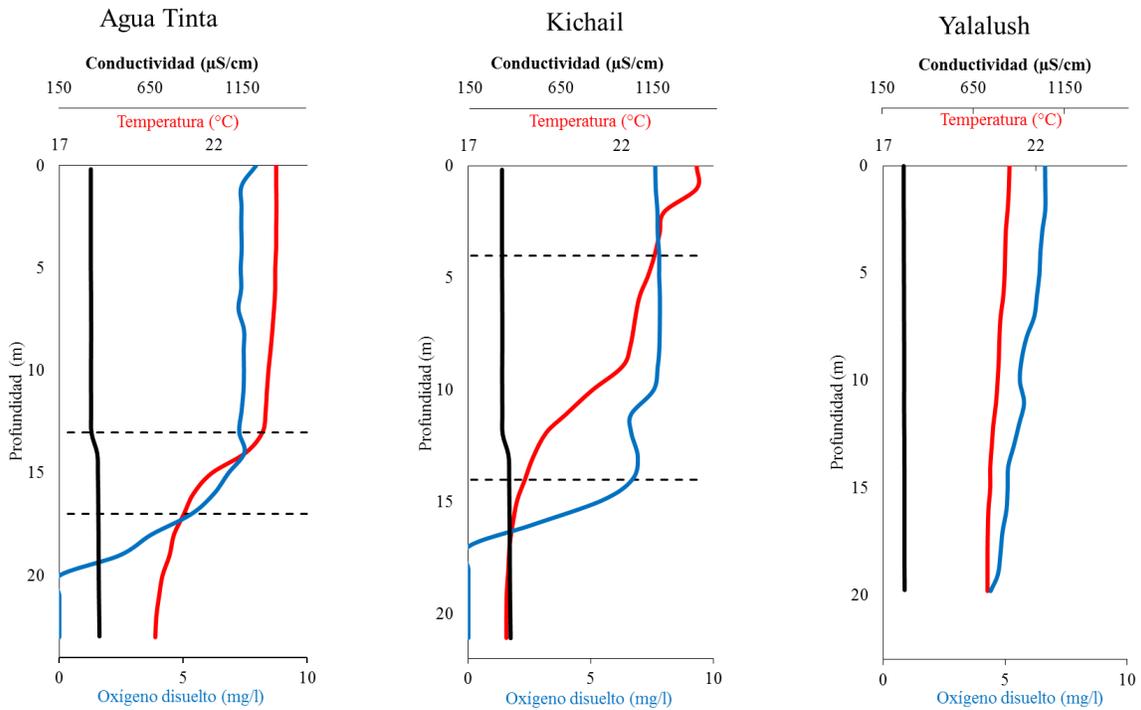


Fig. 3 Perfiles de temperatura, OD y conductividad de tres lagos con menor profundidad (Agua Tinta, Kichail y Yalalush) en el muestreo del 2014 (primavera). Las dos líneas punteadas representan el techo y piso de la termoclina.

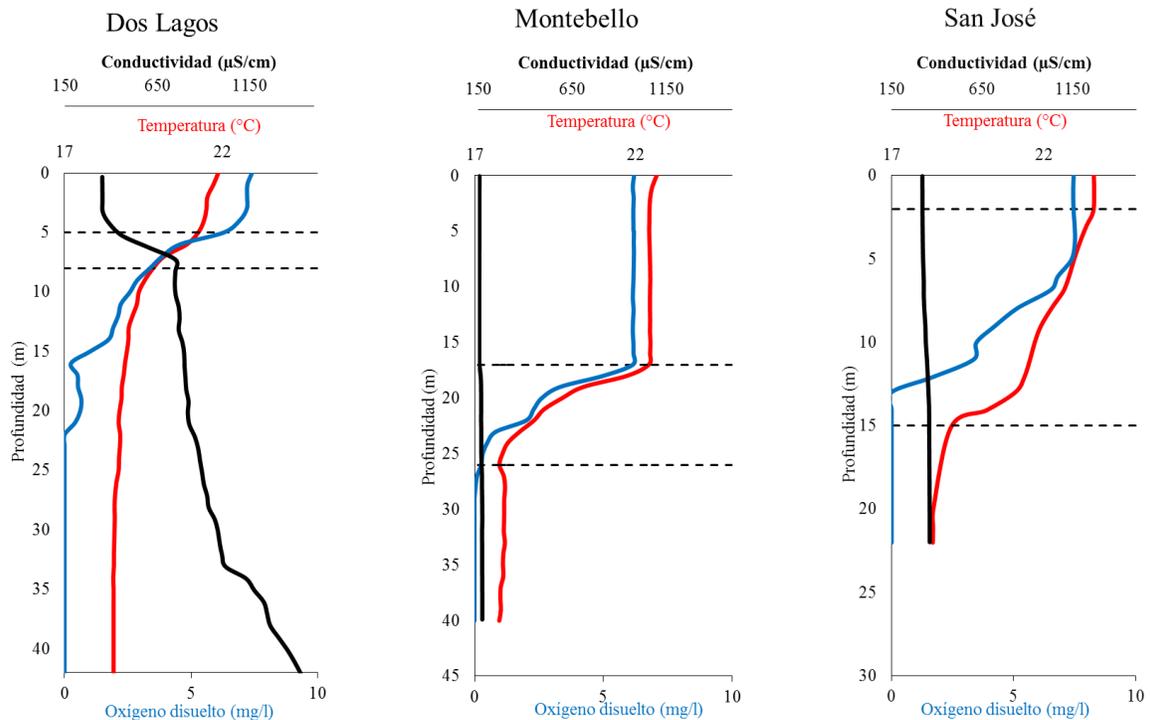


Fig. 4 Perfiles de temperatura, OD y conductividad de Dos Lagos, Montebello y San José en primavera. Las dos líneas punteadas representan el techo y piso de la termoclina.

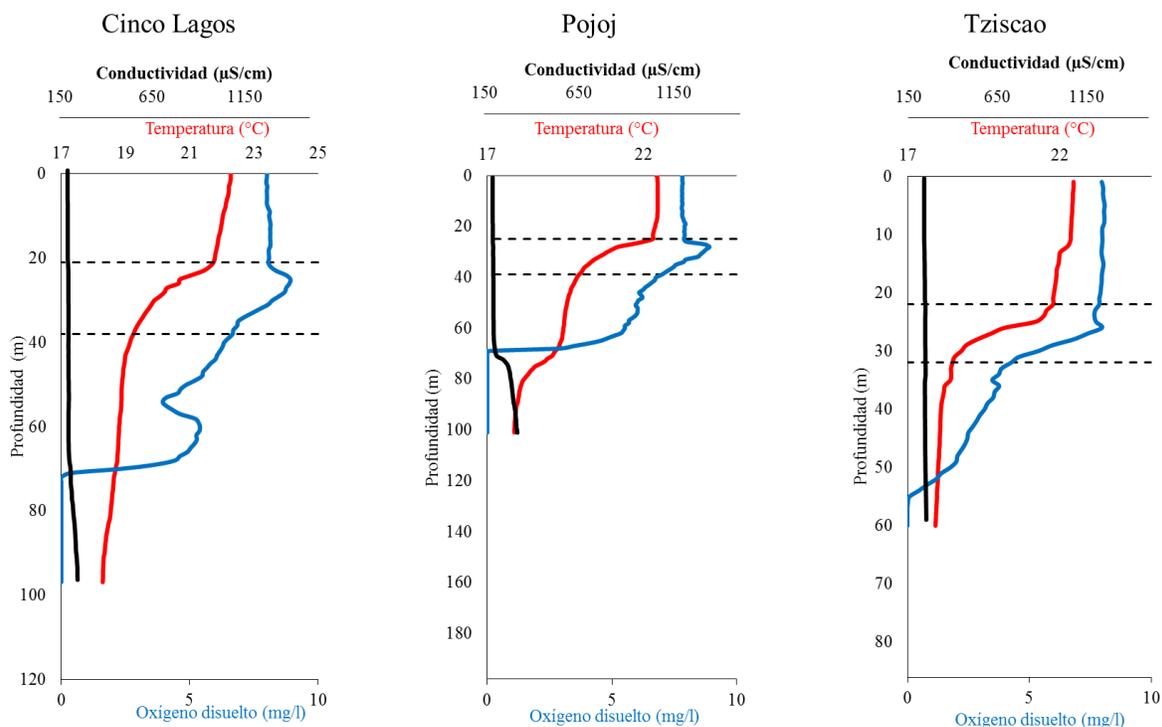


Fig. 5 Perfiles de temperatura, OD y conductividad de tres lagos profundos (Cinco Lagos, Pojoj y Tzisco) en primavera. Las dos líneas punteadas representan el techo y piso de la termoclina.

Tabla 3. Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de Oxígeno disuelto (mg L^{-1}) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.

Lago	OD (mg L^{-1})							
	Primavera				Invierno			
	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.
Agua Tinta	0.00	7.94	5.65	2.88	6.33	6.84	6.65	0.18
Cinco Lagos	0.00	8.88	5.05	3.21	6.04	6.53	6.09	0.08
Dos Lagos	0.00	7.41	1.66	2.49	0.05	7.18	2.65	2.68
Kichail	0.00	7.78	5.33	3.27	6.67	7.32	6.95	0.17
Montebello	0.00	6.20	3.13	2.90	6.97	7.53	7.35	0.16
Pojoj	0.00	8.91	4.66	3.46	6.00	6.50	6.41	0.06
San José	0.00	7.46	4.11	3.20	5.41	7.51	6.55	0.73
Tzisco	0.00	8.05	4.96	3.03	7.19	7.51	7.27	0.05
Yalalush	4.40	6.63	5.70	0.72	6.70	7.14	6.98	0.17

En cuanto a la concentración de OD los valores se muestran en la Tabla 3. En primavera el OD mostró un perfil clinogrado (con una disminución brusca en el metalimnion –oxiclina-) y con hipolimnion anóxico en el fondo en la mayoría de los lagos, excepto Yalalush (Fig. 3) que presentó 4.40 mg L^{-1} de OD en el fondo por encontrarse circulando. En Tzisco (Fig. 5) hay la presencia de dos pequeños máximos de OD. En el caso de Cinco Lagos y Pojoj (Fig. 5) el perfil fue heterogrado (con un máximo profundo de OD ubicado en el metalimnion y

con hipolimnion anóxico), en el caso de Cinco Lagos, el máximo de OD coincide con una clina de conductividad (Fig. 5).

Durante el invierno el OD mostró perfiles homogéneos en la mayoría de los lagos (Fig. 6, 7 y 8). En los casos de Dos lagos permaneció estratificado térmicamente y con un hipolimnion anóxico (Fig. 7), mientras que San José se encuentra estratificado térmicamente pero con un perfil homogéneo de OD. Las concentraciones de OD en la columna de agua variaron de 0.5 mg L⁻¹ en Dos Lagos a 7.53 mg L⁻¹ en Montebello.

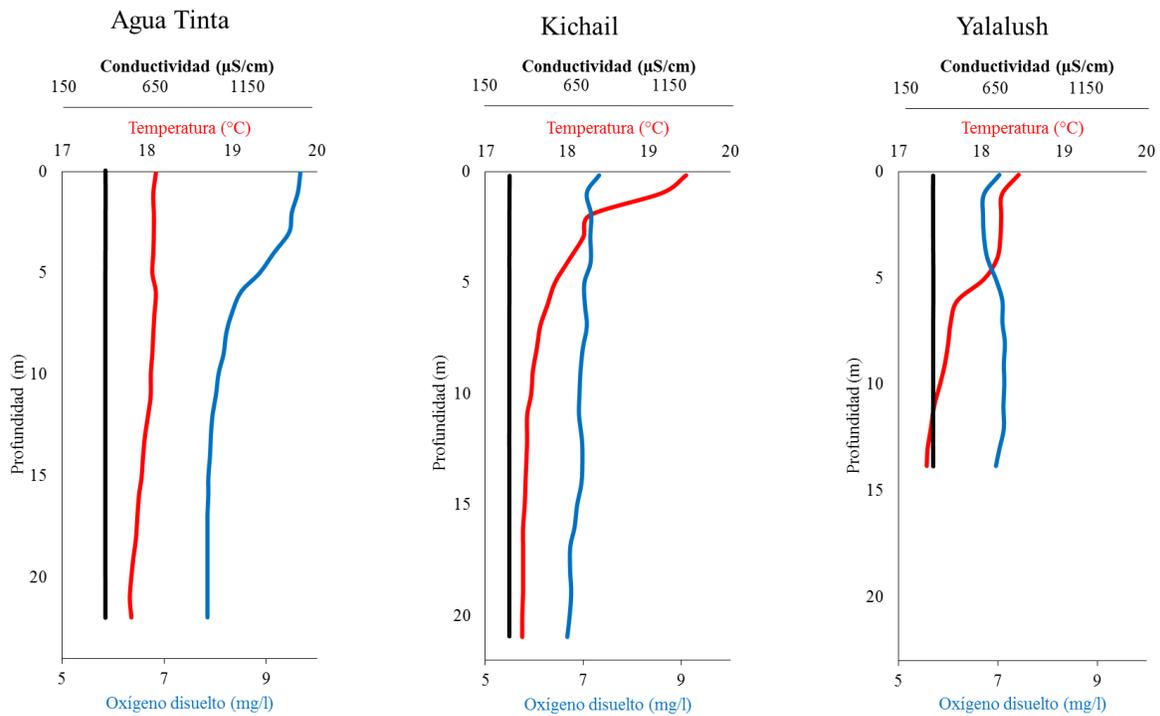


Fig. 6 Perfiles de temperatura, OD y conductividad de tres lagos con menor profundidad (Agua Tinta, Kichail y Yalalush) en el muestreo del 2015 (invierno).

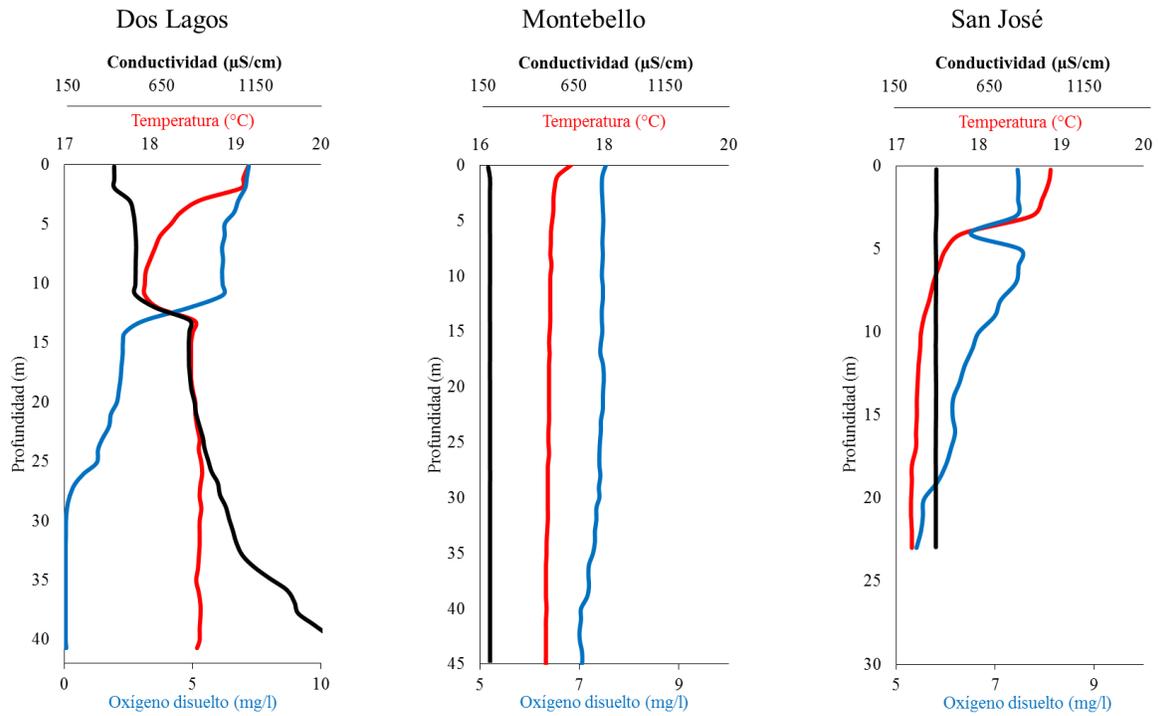


Fig. 7 Perfiles de temperatura, OD y conductividad de Dos Lagos, Montebello y San José en invierno.

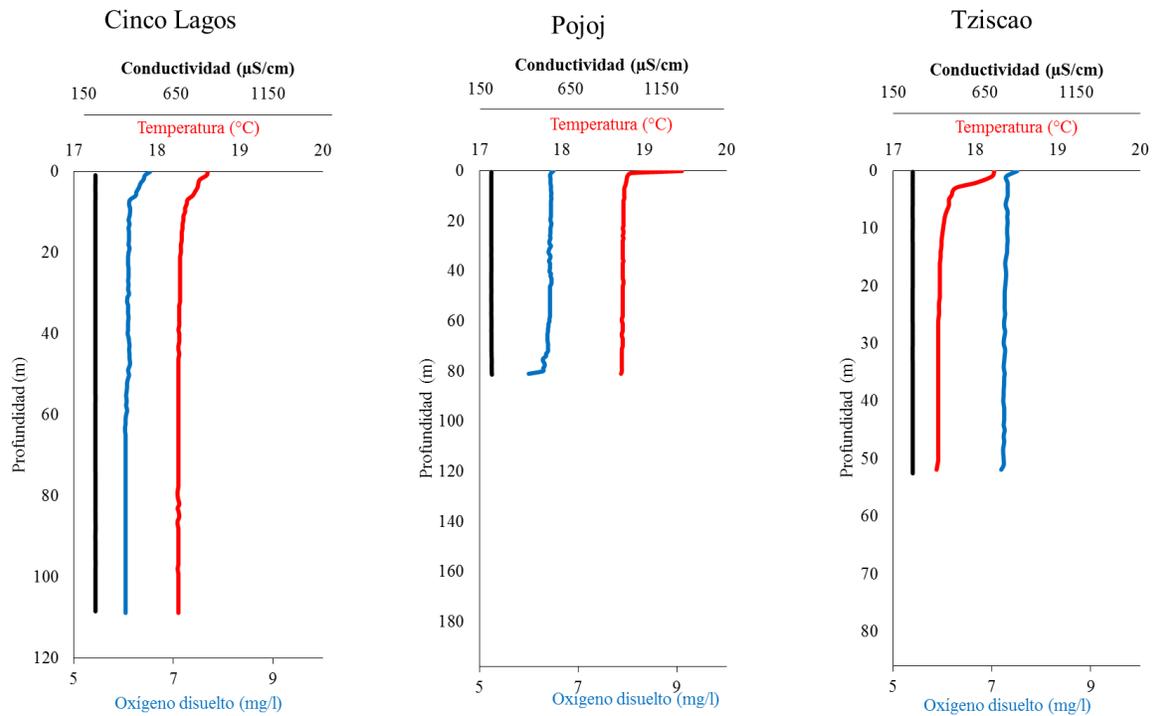


Fig. 8 Perfiles de temperatura, OD y conductividad de tres lagos profundos (Cinco Lagos, Pojoj y Tziscoo) durante el invierno.

En primavera los valores mínimos de pH fueron de 6.93 en Dos Lagos y 6.97 en Cinco Lagos y los valores máximos de 8.36 en Pojoj. En invierno los valores de pH oscilaron entre 7.24 (Dos Lagos) y 8.47 (San José), respectivamente (Tabla 4).

Tabla 4. Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de pH durante primavera e invierno en los lagos de estudio.

Lago	pH							
	Primavera				Invierno			
	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.
Agua Tinta	7.26	8.27	7.75	0.29	8.24	8.35	8.34	0.03
Cinco Lagos	6.97	8.25	7.72	0.44	8.31	8.34	8.32	0.01
Dos Lagos	6.93	7.83	7.11	0.25	7.24	8.09	7.53	0.26
Kichail	7.14	8.16	7.76	0.40	8.11	8.22	8.15	0.02
Montebello	7.04	8.12	7.58	0.47	8.26	8.37	8.34	0.03
Pojoj	7.02	8.36	7.78	0.49	8.33	8.46	8.41	0.03
San José	7.27	8.10	7.66	0.35	8.31	8.47	8.38	0.06
Tziscoa	7.20	8.23	7.75	0.40	8.31	8.33	8.32	0.01
Yalalush	7.44	7.72	7.60	0.09	8.06	8.30	8.23	0.08

Los valores de conductividad eléctrica mínima y máxima en ambos periodos de muestreo se registraron en Montebello y Dos Lagos, respectivamente. Durante primavera variaron entre 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1,429 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en invierno los valores se encontraron entre 179 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1,545 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 5).

Tabla 5. Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de conductividad eléctrica (K_{25} , $\mu\text{S}/\text{cm}$) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.

Lago	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)							
	Primavera				Invierno			
	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.
Agua Tinta	325	373	344	21	379	380	379	0
Cinco Lagos	192	246	204	15	212	213	212	0
Dos Lagos	351	1,429	869	282	397	1,545	858	322
Kichail	263	288	269	7	284	285	284	0
Montebello	160	170	165	5	179	190	189	2
Pojoj	193	323	227	48	212	215	212	1
San José	320	360	338	16	367	371	368	1
Tziscoa	238	250	243	3	257	257	257	0
Yalalush	269	274	272	2	303	305	303	1

En primavera los valores de conductividad se encuentran distribuidos de forma relativamente homogénea (Fig. 3, 4 y 5) excepto en Cinco Lagos y Pojoj (Fig. 5) donde la porción superior

presenta valores bajos en comparación a la porción profunda, mientras que en invierno todos los lagos presentaron perfiles homogéneos (Fig. 6, 7 y 8) lo que sugiere que estaban circulando. En el caso de Dos Lagos los valores de conductividad muestran un incremento hacia los 6 m de profundidad durante la primavera (Fig. 4) mientras que en invierno esta diferencia se encuentra a los 12 m (Fig. 7) permitiendo diferenciar dos estratos: uno menos denso con valores en torno a los $\leq 600 \mu\text{S}/\text{cm}$ y otro inferior de conductividad y, por tanto, de salinidad mucho más elevada, que llega a ser hasta de $1545 \mu\text{S}/\text{cm}$ en las proximidades del fondo. Esta diferencia presente en ambos periodos de muestreo permite calificarla como meromítica, es decir, hay existencia de un monimolimnion (capa profunda de aguas más saladas) separada por una quimioclina de la capa suprayacente conocida como mixolimnion (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2001).

b) Zona eufótica (Z_{EU})

La Z_{EU} se calculó hasta el 0.1% PAR y ésta varió ampliamente (Tabla 6). En el primavera la profundidad de Z_{EU} fluctuó entre los 13.3 m en Yalalush y los 73.3 m en Pojoj. Durante el invierno la profundidad de la Z_{EU} se registró entre los 12.1 en San José y 57.3 m en Pojoj.

En el caso de Pojoj, San José y Tzisco la profundidad de la Z_{EU} fue mayor durante primavera, disminuyendo durante el invierno. Por el contrario, en Cinco Lagos y Montebello la Z_{EU} aumentó en profundidad durante el invierno con respecto a primavera. En los casos de Agua Tinta, Dos Lagos, Kichail y Yalalush la Z_{EU} fue similar en ambos periodos de muestreo.

Tabla 6. Valores promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de Z_{EU} (m) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.

Lago	Z_{EU} (m)			
	Primavera		Invierno	
	Prom.	d.e.	Prom.	d.e.
Agua Tinta	21.8	0.3	21.5	0.1
Cinco Lagos	36.1	0.5	47.7	0.9
Dos lagos	27.7	0.4	27.6	0.2
Kichail	19.3	0.4	19.8	0.2
Montebello	18.3	0.7	38.7	0.7
Pojoj	73.3	0.4	57.3	--
San José	20.2	0.2	12.1	0.3
Tzisco	42.8	4.4	36.8	0.4
Yalalush	13.3	0.1	13.7	1.3

c) Clor-a

Las concentraciones de clor-a en primavera variaron entre 0.15 $\mu\text{g L}^{-1}$ (San José y Yalalush) y 4.57 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Dos lagos). En invierno los valores de clor-a oscilaron entre 0.14 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Yalalush) y 2.34 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Dos Lagos) (Tabla 7).

Las concentraciones mínimas y máximas de clor-a integrada tanto en primavera como en invierno se registraron para Yalalush y Pojoj, respectivamente. Durante el primavera (2014) variaron entre 3.69 mg m^{-2} y 39.27 mg m^{-2} , mientras que en invierno (2015) los valores fluctuaron entre 6.48 mg m^{-2} y 24.81 mg m^{-2} (Tabla 8).

Tabla 7. Valores mínimos (Mín.) máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de las concentraciones de clor-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.

Lago	Clor-a ($\mu\text{g L}^{-1}$)							
	Primavera				Invierno			
	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.
Agua Tinta	0.18	0.74	0.37	0.17	0.58	1.02	0.76	0.14
Cinco Lagos	0.19	2.32	0.59	0.71	0.18	0.40	0.30	0.07
Dos Lagos	0.23	4.57	1.49	1.33	0.26	2.34	0.89	0.75
Kichail	0.68	2.35	1.32	0.46	0.44	0.91	0.75	0.16
Montebello	0.39	0.82	0.57	0.15	0.31	0.53	0.40	0.06
Pojoj	0.17	2.36	0.67	0.82	0.31	0.57	0.44	0.08
San José	0.15	1.21	0.49	0.33	0.34	0.82	0.59	0.16
Tziscoa	0.23	1.09	0.50	0.27	0.30	0.70	0.57	0.10
Yalalush	0.15	0.33	0.26	0.06	0.14	0.31	0.22	0.06

Tabla 8. Valores promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de clor-a integrada (mg m^{-2}) durante primavera e invierno en los lagos de estudio.

Lago	Z _{máx} (m)	Clor-a integrada (mg m^{-2})			
		Primavera		Invierno	
		Z _{EU}	Clor-a integrada	Z _{EU}	Clor-a integrada
Agua Tinta	24	21.81	7.48	21.51	12.58
Cinco Lagos	162	36.10	14.57	47.70	14.56
Dos lagos	42	27.66	37.38	27.63	17.50
Kichail	22	19.30	27.80	19.83	16.10
Montebello	45	18.33	9.64	38.68	16.48
Pojoj	198	73.29	39.27	57.34	24.81
San José	30	20.24	11.09	12.10	7.57
Tziscoa	86	42.80	26.90	36.70	21.50
Yalalush	23	13.32	3.69	13.66	6.48

Con respecto a la clor-a integrada, en Agua Tinta, Montebello y Yalalush la concentración fue mayor durante el invierno, en cambio en Dos Lagos, Kichail, Pojoj, San José y Tziscaco la concentración fue mayor durante la primavera. Cinco Lagos mantuvo una concentración similar en ambas estaciones de muestreo (Fig. 9)

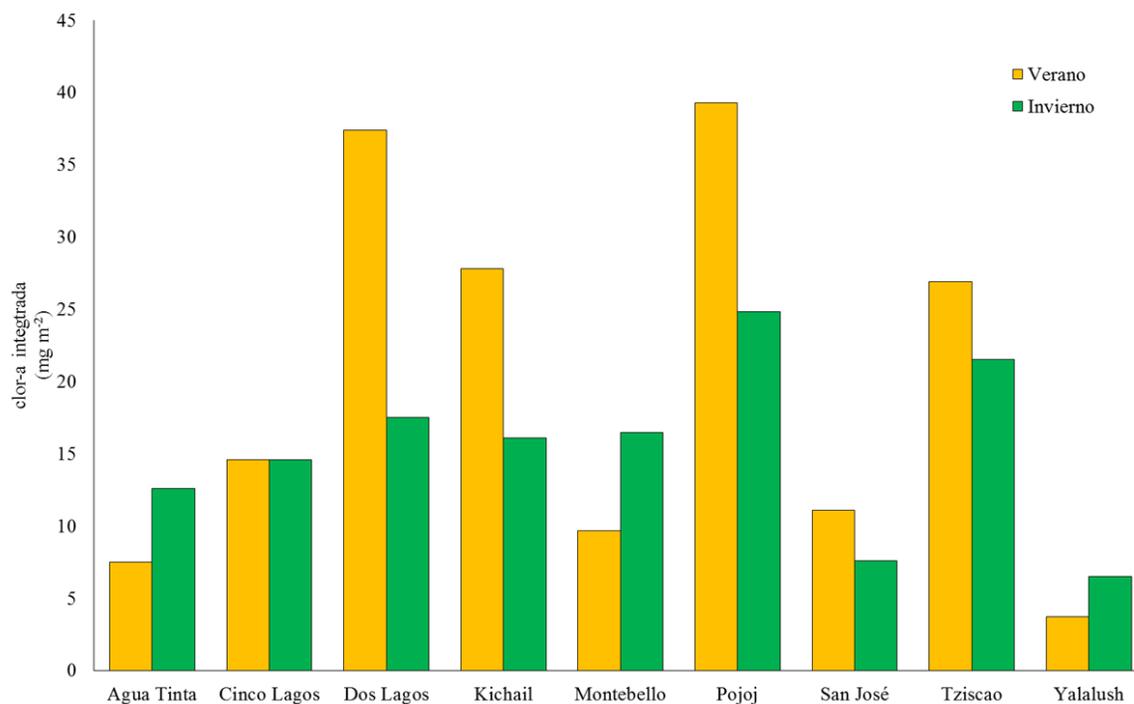


Fig. 9 Variación de la clor-a integrada (mg m⁻²) en la columna de agua de los lagos muestreados en ambos periodos de estudio. El color amarillo representa la primavera y verde el invierno.

De acuerdo con la clasificación trófica propuesta por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1982) (Tabla 9), los lagos son clasificados como ultra oligotróficos en ambos periodos de muestreo.

Tabla 9. Estado trófico propuesto por la OCDE basados en la concentración de clor-a ($\mu\text{g L}^{-1}$).

Estado trófico	Concentración de clor-a ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Ultra oligotrófico	< 2.5
Oligotrófico	2.5-8.0
Mesotrófico	8.0-25
Eutrófico	25-75
Hipereutrófico	> 75

Se encontró la presencia de DCMs en todos los lagos salvo en Yalalush. La figura 10 muestra todos los perfiles de clor-a de los lagos en primavera y donde se aprecia de forma gráfica la presencia de DCM.

La posición del DCM en la columna de agua correspondió a la base del metalimnion en el caso de Kichail y Tzisco, en la parte media del mismo para San José, mientras que en Agua Tinta, Cinco Lagos, Dos Lagos, Montebello y Pojoj se encuentra en el techo del hipolimnion (Fig. 10).

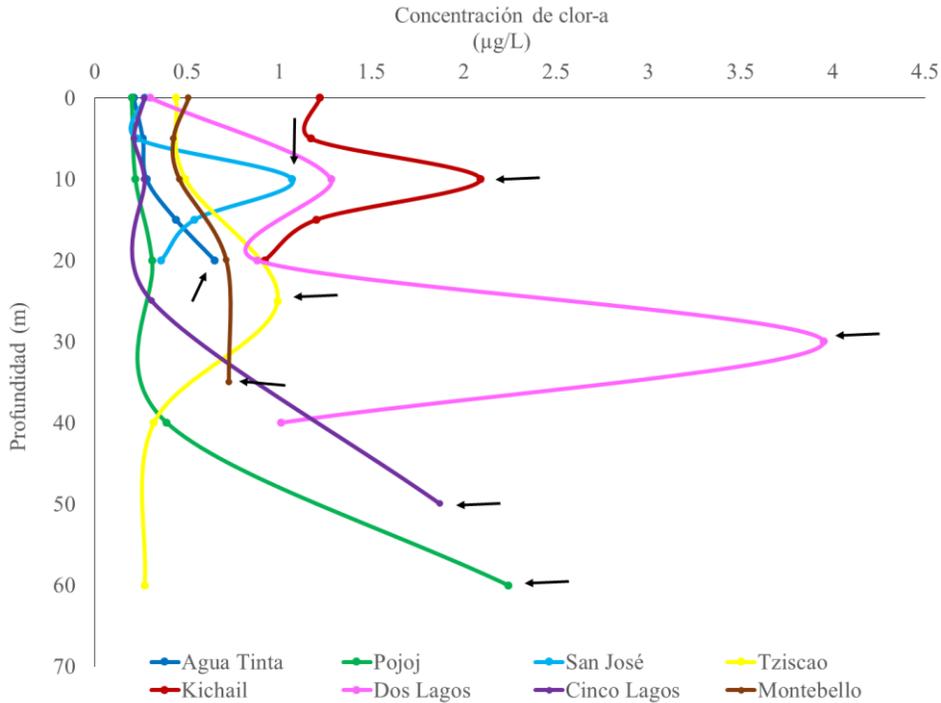


Fig. 10 Distribución vertical de la clor-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) de los lagos en primavera. Las flechas indican los DCM.

La concentración de clor-a aportada por los DCM con respecto a la clor-a integrada del total de la columna de agua varió en cada lago: en Agua Tinta 70.6%, Cinco Lagos 82.3%, Dos Lagos 73.5%, Kichail 61.1%, Montebello 80.1% Pojoj 72.7%, San José 69.1% y Tzisco 67.0% (Fig. 11).

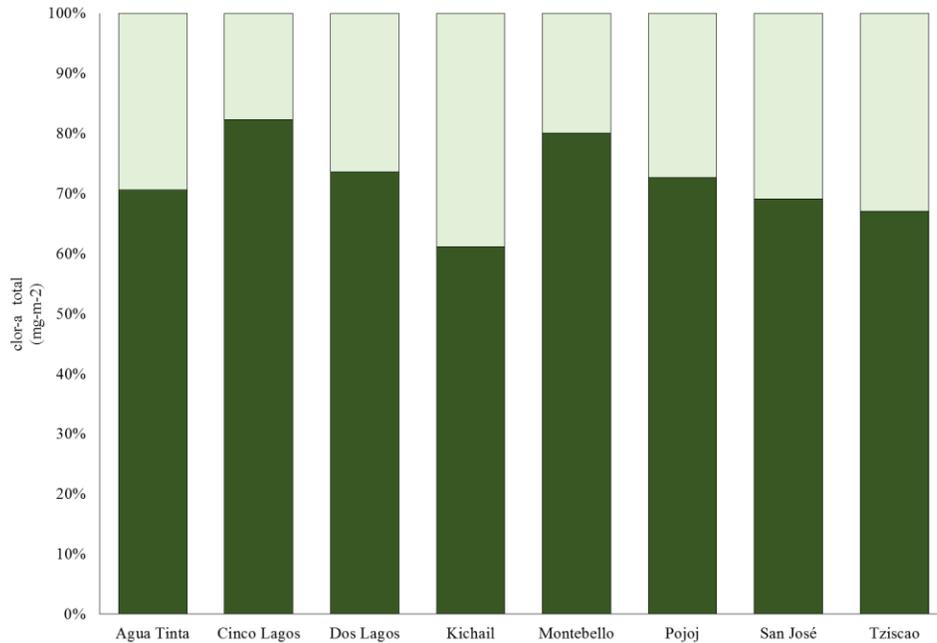


Fig. 11 Contribución de la concentración de clor-a en el DCM (verde oscuro) en relación a la concentración de clor-a total de la columna en los lagos Agua Tinta, Cinco Lagos, Dos Lagos, Kichail, Montebello, Pojoj, San José y Tzisco.

Hay diferencia significativa (ANOVA $p=0.000$) entre las concentraciones de clor-a para ambos periodos. Para el periodo de primavera, la prueba de comparaciones múltiples de Tukey encontró diferencias significativas entre los lagos Kichail y Dos lagos con respecto a los demás lagos. Mientras que los lagos con menor variabilidad son Agua Tinta, Cinco Lagos, Montebello, Pojoj, San José y Tzisco. Por otro lado, la prueba de comparaciones múltiples para el periodo de invierno no mostró diferencias significativas entre Agua Tinta y Kichail, entre Cinco Lagos y Yalalush, entre Pojoj y Montebello y entre Tzisco y San José.

Discusión

De acuerdo con Wetzel (2011), durante la estratificación (primavera) se produce una limitación del crecimiento fitoplanctónico como respuesta a la disminución de los nutrientes en la zona fótica, propiciando condiciones de oligotrofia. Durante la mezcla (invierno), en contraparte, los nutrientes disueltos en la zona profunda del lago se difunden hacia las zonas superficiales, lo que incrementa su concentración a lo largo de la columna de agua favoreciendo el crecimiento fitoplanctónico. Esto se ve reflejado en los lagos Agua Tinta, San José y Tzisco donde se aprecia una mayor concentración de clor-a durante el invierno en comparación a la primavera.

A pesar de lo anterior, los lagos Cinco Lagos, Dos Lagos, Kichail, Montebello, Pojoj y Yalalush presentaron un comportamiento diferente, es decir los valores promedio obtenidos de clor-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) durante la primavera fueron menores comparados con los del invierno; esto es parecido a lo encontrado en el lago Valencia, Venezuela, donde la mayor biomasa del año ocurrió durante la primera mitad de la temporada de estratificación; Lewis (1986) explica que durante el inicio de este periodo la estabilidad de la columna de agua es muy baja y la mezcla puede ocurrir en cualquier día cuando la fuerza del viento es sustancial (atelmixis) sacando de la zona afótica agua rica en nutrientes, lo que aumenta las concentraciones inorgánicas de nitrógeno en la superficie y alivia el agotamiento severo que se ha producido durante la temporada de crecimiento.

La diferencia de comportamiento puede deberse a diversos factores que influyen en la estacionalidad del fitoplancton, sin embargo para reconocer estos factores sería necesario realizar más estudios que permitieran conocer la distribución del fitoplancton en la columna de agua y los factores que la determinan.

Debido a las bajas concentraciones de clor-a, $0.70 \pm 0.42 \mu\text{g L}^{-1}$ en primavera y $0.55 \pm 0.23 \mu\text{g L}^{-1}$ en invierno y a lo propuesto por la OCDE, los lagos del PNLM fueron clasificados como ultra oligotróficos. Los valores encontrados son similares a lo reportado en los lagos de Stanley y Yellow Belly, Idaho, EU (Sawatzky *et al.*, 2006), en el cenote El Padre y Minicenote en Yucatán (Cervantes *et al.* 2009) y en el Cenote Azul en Quintana Roo (Cervantes *et al.* 2015) (Tabla 10). La presencia de sistemas kársticos oligotróficos en México permite tener referencias antes de la presencia de perturbaciones que alteren al ecosistema esto permite recalcar la importancia de realizar más estudios en los lagos del PNLM.

Respecto a la concentración de clor-a integrada, los valores variaron menos de un orden de magnitud, por ejemplo, Montebello de 9.64 a 16.48 mg m^{-2} y Agua Tinta de 7.48 a 12.58 mg m^{-2} ; lo anterior es similar a lo encontrado en el Lago Lanao, Filipinas (Lewis, 1978).

Tabla 10. Concentraciones de clor-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) y parámetros físico-químicos reportados para otros lagos. (Z = profundidad máxima (m), Oligo = oligotrófico, Meso = mesotrófico).

Lago	Ubicación	Z	Clor-a	Estado trófico	Autor
Cenote El Padre	Yucatán, México	15	1.14 ± 0.92	Oligo	Cervantes-Martínez <i>et al.</i> , 2009
Cenote Minicenote	Yucatán, México	47	0.20 ± 0.14	Oligo	Cervantes-Martínez <i>et al.</i> , 2009
Cenote Azul	Quintana Roo, México	65	0.005 – 1.79	Oligo	Cervantes-Martínez y Gutiérrez-Aguirre, 2015
Lago de Montcortés	Lérida, España	30	0.4-19.7	Oligo-meso	Camps <i>et al.</i> , 1976
Lago Skadar	Albania	5	5.9	Meso	Rakocevic y Hollert, 2005
Lago Stanley	Idaho, EU	26	0.8	Ultra oligo	Sawatzky <i>et al.</i> , 2006
Lago Yellow Belly	Idaho, EU	26	2.5	Ultra oligo	Sawatzky <i>et al.</i> , 2006
Laguna del Tejo	Las Torcas de Cañada, España	28	2.12	Oligo-meso	Morata <i>et al.</i> , 1998

Además de las bajas concentraciones de clor-a, ocho de los nueve lagos –solo Yalalush se encontró circulando en ambos muestreos- presentaron la formación de un DCM. Camacho (2006) hizo una recopilación de las explicaciones para la formación de DCM como son el crecimiento *in situ* de fotótrofos (Fahnenstiel y Glime, 1983, Gasol *et al.*, 1992, Miracle *et al.*, 1992), favorecido por la mayor disponibilidad de nutrientes en la parte inferior del metalimnion y el hipolimnion superior o el aumento de la población de algas epilimnéticas que se puede restringir por la depredación (Massana *et al.*, 1996), mientras que una presión menor en el hipolimnion permitiría la acumulación de algas a estas profundidades (Camacho, 2006). Otra explicación menciona que el DCM no es un florecimiento *in situ*, sino que se forma por el hundimiento del fitoplancton epilimnético (Cullen, 1982), que posteriormente se acumulan progresivamente a una profundidad donde la densidad celular es igual a la densidad del agua (Camacho, 2006). Otra explica que la formación de DCM puede darse por la asociación simbiótica de protistas con algas, este último proporciona productos para la fotosíntesis, mientras que el protista puede proporcionar nutrientes inorgánicos y movimiento (Camacho, 2006), los protistas (principalmente ciliados) suelen ser muy abundantes en la interfase óxica-anóxica de los lagos estratificados (Finlay *et al.*, 1991, Esteban *et al.*, 1993, Massana y Pedrós-Alió, 1994). Una explicación más consiste en la fotoaclimación del fitoplancton que vive en capas profundas (Cullen, 1982), mediante el cual aumenta el contenido de clorofila (Falkowski y Raven, 1997) o el contenido específico de ficoeritrina

por célula (Gervais *et al.*, 1997, Camacho *et al.*, 2003) que permitiría el aprovechamiento óptimo de la escasa luz que alcanza dichas profundidades

En el caso de los lagos Agua Tinta, Kichail, Pojoj, San José y Tziscoa la formación de DCMs podría deberse a la acumulación de fitoplancton a una profundidad donde la densidad celular y la del agua se equilibran o, al menos, donde aumenta la densidad del agua, hasta que se produzcan cambios, usualmente asociados a la mezcla vertical y que eviten esta acumulación de fitoplancton. Esta ha sido la principal explicación para la formación de DCM por fitoplancton no móvil, como las diatomeas. Dado que estas algas carecen de regulación de flotabilidad activa y otros mecanismos para el movimiento activo, no pueden regular activamente su posición en la columna de agua.

Esta explicación se respalda por lo encontrado por Almeida (2014) que realizó un estudio durante el periodo de estratificación (primavera) y determinó que la composición de la biomasa de los lagos Pojoj, San José y Tziscoa se encuentra formada principalmente por Cyanoprokaryota, Dinophyceae, Bacillariophyceae y Charophyta siendo las diatomeas el phyla dominante tanto de la capa de mezcla como en el fondo del lago. Esto apoya la hipótesis de que la formación del DCM en algunos lagos este a cargo de diatomeas tal y como se encontró en Alchichica (González, 2013). Vargas (2016) encontró durante este periodo en los lagos prístinos concentraciones que van de 0.19 a 0.86 mg/L de COP que se encuentran a mayores profundidades y que muestra la fracción orgánica presente en esta profundidad y que muy bien podría formar parte del DCM.

En el caso de Cinco Lagos, Dos Lagos y Montebello los DCMs se encontraron por debajo del límite de la zona eufótica, en el caso de Dos Lagos asociada a una clina de conductividad que junto a Montebello se encuentran dentro de la zona anóxica. En el caso de Montebello el máximo profundo de clorofila no forma un pico agudo dentro de la columna de agua sino más bien un intervalo y que va de 20 a 30 m de profundidad, además que se encuentra dentro de la zona oxico-anóxica, en este caso tal vez el término "capa profunda de clorofila" (DCL) parece más apropiado (Pilati y Wurstbaugh, 2003).

Por otro lado, en Dos Lagos el máximo profundo se podría deber a sedimentación pasiva y retención por diferencias de densidad en el agua y a una mayor resistencia a la degradación de los individuos sedimentados; un ejemplo de esto son las diatomeas donde la composición de sílice de los frústulos y la pared celular altamente resistente compuesta por biopolímeros alifáticos no hidrolizables (Blokker *et al.*, 1998) permiten su preservación en las aguas profundas y en los sedimentos. Para conocer de forma precisa el origen de los máximos profundos se necesita reconocer la composición del fitoplancton. Algo similar a Dos Lagos se ha encontrado en la laguna Chica de Archidona, Málaga, España, un cuerpo acuático

meromórfico donde esta diferencia de densidad se encuentra asociado a la conductividad (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2001).

Aunque para el caso de Cinco Lagos este DCM se encuentra por debajo de la Z_{EU} 0.1% y podría deber su aparición a un cambio de densidad pero donde la disponibilidad de luz es todavía suficiente (Camacho y Vicente, 1998). En los lagos Ciso (Gasol *et al.*, 1991, 1992) y Arreo (Chicote, 2004) las especies de fitoplancton que forman el DCM son *Cryptomonas*, algas que pueden permanecer en la oscuridad durante períodos prolongados al consumir gránulos de almidón (Morgan y Kalff, 1975; Gervais, 1997), pero que migran a zonas óxicas donde evitan la inhibición del sulfuro a la fotosíntesis. Esto y muchas otras explicaciones o un conjunto de ellas pueden contribuir a la formación de DCM de los lagos de Montebello tal y como se ha reportado para muchos lagos españoles donde las características particulares de cada lago (estado de nutrientes, morfometría y patrones de mezcla, etc.) determinan la formación y mantenimiento de DCM (Camacho, 2006).

Durante el período de estratificación se tiene la presencia de un DCM, es decir el fitoplancton se encuentra en el metalimnion o el techo del hipolimnion que coincide con el límite de la Z_{EU} y que permite que la luz penetre a altas profundidades en la columna de agua, por lo que no existe una correlación entre Z_{EU} y la concentración de clor-a (Fig. 12).

Sin embargo, durante el periodo de mezcla estos máximos no ocurren y la clor-a se encuentra distribuida en la columna de agua por lo que la profundidad de la Z_{EU} en los lagos de estudio muestra una relación inversa a la concentración de clor-a (menor profundidad de Z_{EU} a mayor concentración de clor-a) (Fig. 13).

Esta relación no significativa entre Z_{EU} y la concentración de clor-a puede deberse a los aportes de material alóctono como arcillas y limos (turbidez terrígena) (Umaña-Villalobos, 2008) que incrementa la atenuación de la luz, disminuyendo la profundidad de la zona fótica y por lo tanto limita la eficiencia fotosintética (Hernández y García, 2007) por lo tanto las variaciones en la transparencia y en la turbidez no se deben únicamente a los cambios en la densidad del fitoplancton (turbidez biogénica).

Vargas (2016) encontró que las concentraciones de seston en Agua Tinta, Montebello y Yalalush son mayores en estratificación (primavera) en comparación al periodo de mezcla (invierno) lo que probablemente indique que la Z_{EU} tiene una mayor influencia por la turbidez terrígena y no producto de la producción primaria fitoplanctónica. Por otro lado, también reportó que para los lagos de Pojoj, San José y Tzisco esta concentración disminuye durante la primavera. Comparando la menor transparencia presente en la columna de agua esta coincide con mayores valores de seston y clor-a en los lagos de Montebello, Pojoj, San José y Tzisco, en el caso de Agua Tinta y Yalalush donde la profundidad de la Z_{EU} fue similar

en ambos periodos de muestreo pero en el periodo donde los valores de seston son altos de igual forma los de clor-a, por lo anterior se puede decir que existe una relación entre la cantidad de seston y clor-a y que esta afecta la penetración de la luz.

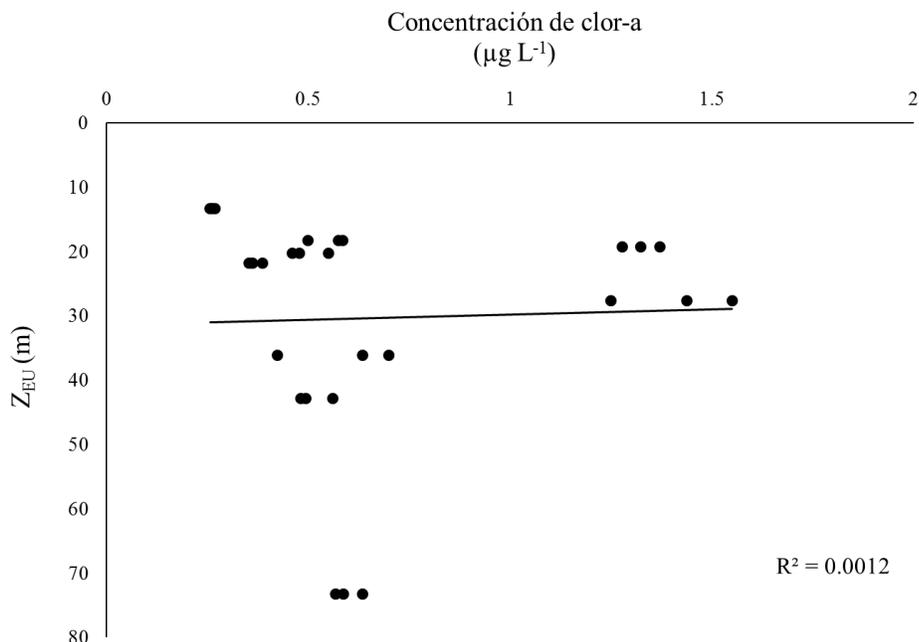


Figura 12. Relación de la profundidad de la zona eufótica (Z_{EU}) y la concentración de clor-a durante la primavera en los lagos del PNLM.

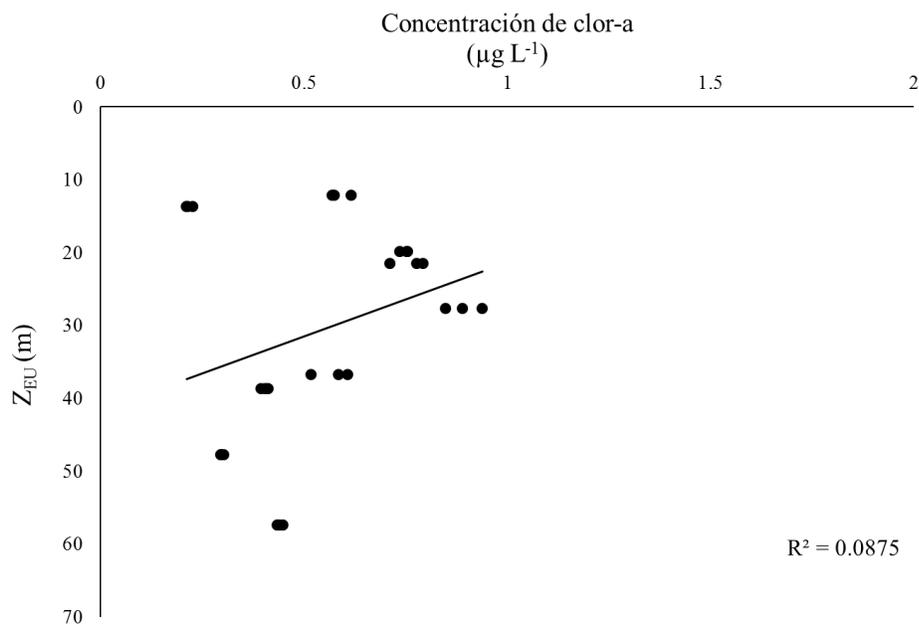


Figura 13. Relación de la profundidad de la zona eufótica (Z_{EU}) y la concentración de clor-a durante el invierno en los lagos del PNLM.

Esta relación no significativa entre Z_{EU} y la concentración de clor-a puede deberse a los aportes de material alóctono como arcillas y limos (turbidez terrígena) (Umaña-Villalobos, 2008) que incrementa la atenuación de la luz, disminuyendo la profundidad de la zona fótica y por lo tanto limita la eficiencia fotosintética (Hernández y García, 2007) por lo tanto las variaciones en la transparencia y en la turbidez no se deben únicamente a los cambios en la densidad del fitoplancton (turbidez biogénica).

Vargas (2016) encontró que las concentraciones de seston en Agua Tinta, Montebello y Yalalush son mayores en estratificación (primavera) en comparación al periodo de mezcla (invierno) lo que probablemente indique que la Z_{EU} tiene una mayor influencia por la turbidez terrígena y no producto de la producción primaria fitoplanctónica. Por otro lado, también reportó que para los lagos de Pojoj, San José y Tziscaco esta concentración disminuye durante la primavera. Comparando la menor transparencia presente en la columna de agua esta coincide con mayores valores de seston y clor-a en los lagos de Montebello, Pojoj, San José y Tziscaco, en el caso de Agua Tinta y Yalalush donde la profundidad de la Z_{EU} fue similar en ambos periodos de muestreo pero en el periodo donde los valores de seston son altos de igual forma los de clor-a, por lo anterior se puede decir que existe una relación entre la cantidad de seston y clor-a y que esta afecta la penetración de la luz.

Finalmente, lo encontrado en este trabajo concuerda con lo encontrado por Hernández (2016) donde la concentración de clor-a, valores entre 0.28 y 1.31 $\mu\text{g L}^{-1}$, permitió clasificar a los lagos en ultra oligotróficos además que presentan máximos profundos de clor-a.

Con base en lo anterior, se acepta la hipótesis del presente trabajo que plantea que los lagos seleccionados reflejarán su condición prístina a través de bajas concentraciones de clor-a, así como en aquellos suficientemente profundos para estratificarse, presentarán el desarrollo de un DCM, rasgo característico de ambientes acuáticos oligotróficos. A excepción de Yalalush que fue un lago que no presentó estratificación pero si bajas concentraciones de clor-a lo que permite clasificarlo como un lago oligotrófico.

Conclusiones

Las concentraciones de clor-a en los lagos prístinos del PNLM varían entre 0.14 y 4.57 $\mu\text{g L}^{-1}$; estas concentraciones son similares con lo reportado en otros lagos oligotróficos y ultra-oligotróficos, tanto tropicales como templados, por lo que la transparencia y coloración azul de sus aguas corresponde con su estado trófico.

La distribución y concentración de clor-a en aquellos lagos que se encontraron térmicamente estratificados, está relacionada con la dinámica estacional (mezcla-estratificación); durante la estratificación de primavera se forma un máximo profundo de clorofila, mientras que durante la mezcla de invierno, la clor-a se encuentra más o menos homogéneamente distribuida a lo largo de la columna de agua.

Se registró la presencia de DCM en ocho de los nueve lagos oligotróficos durante el periodo de estratificación (primavera) característica que confirma el estado oligotrófico de éstos. El lago que no presentó DCM fue Yalalush y se debió a que se encontró circulando en ambos muestreos.

El DCM se encontró ubicado entre la base del metalimnion y el tope del hipolimnion, en el límite de la $Z_{\text{EU}} 0.1\% \text{ PAR}$; lo anterior ha sido reportado para otros lagos oligotróficos. La ubicación de DCM se encontró asociado a cambios de densidad por un incremento en la conductividad, la presencia de la oxiclina y termoclina.

Los resultados encontrados permiten asegurar que la condición prístina de los lagos del PNLM es de la ultra oligotrofia a la oligotrofia.

Bibliografía

- Alcocer, J., L. A. Oseguera, G. Sánchez, C. G. González, J. R. Martínez y R. González. 2016. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *J. Limnol.*, 75 (s1): 56-65.
- Almeida, T. 2014. *Heterogeneidad espacial en el sistema lacustre de Montebello: estructura funcional y taxonómica del fitoplancton*. Tesis de Licenciatura en Biología, UNAM, México. 68 p.
- Álvarez-Cobelas, M. (1992). Temperature and heat in a hyper-trophic, gravel pit lake. *Arch. Hydrobiol.* 125: 279-294.
- Arar, E. J. y G. B. Collins. 1997. In vitro determination of chlorophyll a and pheophytinain marine and freshwater algae by fluorescence (445.0). US Environmental Protection Agency. 22 p.
- Arocena, R. y D. Conde. 1999. *Métodos en Ecología de Aguas Continentales*. Instituto de Biología. Sección Limnología. Edición D.I.R.A.C. Facultad de Ciencias. Montevideo. Cap. 4.
- Barnes, R. S. K. y K. H. Mann. 1991. *Fundamentals of Aquatic Systems*. Blackwell Scientific Publications. Oxford. 347 p.
- Blokker, P., S. Schouten, H. Van Den Ende, J. W. De Leeuw, P. G. Hatcher y J. S. S. Damste. 1998. Chemical structure of algaeans from the fresh water algae *Tetraedron minimum*, *Scenedesmus communis* and *Pediastrum boryanum*. *Org. Geochem.* 29: 1453-1468.
- Camacho, A. y E. Vicente. 1998. Carbon photoassimilation by sharply stratified phototrophic communities at the chemocline of Lake Arcas (Spain). *FEMS Microbiol. Ecol.*, 25: 11-22.
- Camacho, A., W. A. Wurtsbaugh, M. R. Miracle, X. Armengol y E. Vicente. 2003. Nitrogen limitation of phytoplankton in a Spanish karst lake with a deep chlorophyll maximum: a nutrient enrichment bioassay approach. *J. Plankton Res.* 25(4): 397-404.
- Camacho, A. 2006. On the occurrence and ecological features of deep chlorophyll maxima (DCM) in Spanish stratified lakes. *Limnetic.* 25: 453-478.

- Camacho, A., C. Borja, B. Valero-Garcés, M. Sahuquillo, S. Cirujano, S., J. M. Soria, E. Rico, A. De La Hera, A. C. Santamans, A. García De Domingo, A., Chicote y R.U. Gosálvez. 2009. 3190 Lagos y lagunas kársticas sobre yesos. En: VV.AA., *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. 37 p.
- Camps J., I. Gonzalvo, J. Guell, P. López, A. Tejero, X. Toldra, F. Vallespinos, M. Vicens. 1976. El lago de Montcortés, descripción de un ciclo anual. *Oecología* 2: 99-110.
- Cervantes-Martínez A. y M. A. Gutiérrez-Aguirre. 2015. Physicochemistry and zooplankton of two karstic sinkholes in the Yucatan Peninsula, Mexico. *J. Limnol.* 74(2): 382-393.
- Cervantes-Martínez A., M. Mezeta-Barrera y M.A. Gutiérrez-Aguirre. 2009. Limnología básica del lago cárstico turístico Cenote Azul en Quintana Roo, México. *Hidrobiológica* 19(2): 177-180.
- Chicote, A. 2004. *Limnología y ecología microbiana del Lago de Arreo (Álava, España)*. Ph. D. Thesis, Universidad Autónoma de Madrid, Cantoblanco, 296 pp.
- Cole, G.A. (1983). *Textbook of Limnology*. (3ra Ed). Saint Louis: The Mosby Co.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2007. *Programa de conservación y manejo. Parque Nacional Lagunas de Montebello. México*. 194 p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2011. Estudio para monitorear los parámetros de calidad de agua de las lagunas comunicadas con el sistema lagunar Tepancoapan. Comitán de Domínguez, Chiapas. 4 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). 2011. Estudio hidrológico y de Calidad del Agua del sistema Lagunar de Montebello, en el estado de Chiapas. México. 4 p.
- Cullen, J. J. 1982. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll a. *Can. CJE. FSish. Aquat. Sci.* 39: 791-803.
- Cullen, J. J. y R. W. Eppley. 1981. Chlorophyll maximum layers of the Southern California Bight and possible mechanisms of their formation and maintenance. *Acta Oceanol.* 4: 23-32.

-
- Dubois, J. T. 1958. Evolution de la temperature de l'oxygene dissous et de la transparence dans la baie Nord du lac Tanganika. *Hydrobiologia*. 10: 215-240.
- Dupuis, A. P. y B. J. Hann. 2009. Climate change, diapauses termination and zooplankton population dynamics: an experimental and modeling approach. *Freshw. Biol.* 54: 221-235.
- Esteban, G., B. J. Finlay y T. M. Embley. 1993. New species double the diversity of anaerobic ciliates in a Spanish lake. *FEMS Microbiol. Lett.*, 109: 93-100.
- Falkowski, P. G. y J. A. Raven. 1997. Aquatic photosynthesis. *Blackwell Science*, Malden Massachusetts. 375 pp.
- Fahnenstiel, G. L. y J. M. Glime. 1983. Subsurface chlorophyll maximum and associated Cyclotella pulse in Lake Superior. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* 68: 605-616.
- Finlay, B. J., K. J. Clarke, E. Vicente y M. R. Miracle. 1991. Anaerobic ciliates from a sulphide-rich solution lake in Spain. *Eur. J. Protistol.*, 27: 148-159.
- Galicía, V. 2012. *Cambio de color en las lagunas de Montebello: las atonalidades de un problemática tonal*. Tesis de licenciatura Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México. 153 p.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM: 217 p.
- Gasol, J. M., J. Garcia-Cantizano, R. Massana, F. Peters, R. Guerrero y C. Pedrós-Alió. 1991. Diel changes in the microstratification of the metalimnetic community in lake Cisó. *Hydrobiologia*, 211: 227-240.
- Gasol, J. M., R. Guerrero y C. Pedrós-Alió. 1992. Spatial and temporal dynamics of a metalimnetic Cryptomonas peak. *J. Plankton Res.* 14: 1565-1580.
- Gervais, F. 1997. Light-dependent growth, dark survival, and glucose uptake by cryptophytes isolated from a freshwater chemocline. *J. Phycol.* 33: 18-25.
- Gervais F., J. Padisák y R. Koschel. 1997. Do light quality and low nutrient concentration favour picocyanobacteria below the thermocline of the oligotrophic Lake Stechlin? *J. Plankton Res.*, 19: 771-781.

- González Contreras, C. 2013. *Variación a largo plazo de la concentración y distribución vertical de la clorofila a fitoplanctónica en el lago Alchichica, Puebla*. Tesis de Maestría en Limnología, UNAM, México. 68 p.
- Gregor, J., y B. Marsálek. 2004. Freshwater Phytoplankton Quantification by Chlorophyll a: A Comparative Study of in vitro, in vivo and in situ Methods. *Water Res.* 38: 517-522.
- Hernández P. 2016. *Concentración y distribución vertical de clorofila a fitoplanctónica de los lagos de Montebello, Chiapas, México*. Tesis que para obtener el título de Licenciatura en Biología, UNAM México. 55 páginas.
- Hernández, A. J. S. y J. L.C. García. 2007. Diferencias limnológicas entre lagos y presas. In: Arredondo, F. J. L., G. Z. Díaz y J. T. P. Ponce (Comps.). *Limnología de presas mexicanas. Aspectos teóricos y prácticos*. AGT Editor, S.A. y Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México. pp. 63-74.
- Horne, A. y C. Goldman. 1994. *Limnology*. McGraw-Hill. Segunda edición. Nueva York. 576 p.
- Hutchinson, G. 1957. *A treatise on limnology*. 1. J. Wiley y Sons, New York: 1015 pp.
- IBM Corp. Publicado en 2012. Estadísticas de IBM SPSS para Windows, Versión 21.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- Instituto Nacional de estadística y Geografía (INEGI). 1988. Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Las Margaritas. 1:250 000.
- Instituto Nacional de estadística y Geografía (INEGI). 2000. Conjuntos de Datos Vectoriales Edafológicos. 1:250,000. Las Margaritas. 1: 250 000.
- Kalff, J. 2002. *Limnology: Inland water ecosystems*. Prentice Hall, New Jersey. 592 p.
- Lee M. M. y R. G. Williams 2000. The role of eddies in the isopycnic transfer of nutrients and their impact on biological production. *J. Marine Res.* 58: 895-917.
- Lewis, Jr. W. M. 1978. Dynamics and succession of the phytoplankton in a tropical Lake Lanao, Philippines. *J. Ecol.* 66: 849-880.
- Lewis, Jr. W. M. 1986. Phytoplankton Succession in Lake Valencia, Venezuela. *Hydrobiologia.* 138: 189-203.

-
- Lewis, W. M. 1987. Tropical limnology. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 18: 59-84.
- Litchman, E. 2000. Growth rates of phytoplankton under fluctuating light. *Freshw. Biol.* 44: 223-235.
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Ediciones Omega. Barcelona, España. 1010 p.
- Massana, R. y C. Pedrós-Alió. 1994. Role of anaerobic ciliates in planktonic food webs: abundance, feeding, and impact on bacteria in the field. *Appl. Environ. Microbiol.*, 60: 1325-1334.
- Massana, R., J. García-Cantizano y C. Pedrós-Alió. 1996. Components, structure and fluxes of the microbial food web in a small, stratified lake. *Aquat. Microb. Ecol.*, 11: 279-288.
- Miracle, M. R., E. Vicente y C. Pedrós-Alió. 1992. Biological studies of Spanish meromictic and stratified lakes. *Limnetic.* 8: 59-77.
- Miracle, M. R., M. J. Dasí, y E. Vicente. 1998. Forced phytoplankton vertical migration due to lake water "whiting". *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26: 1749-1754.
- Morata S., A. Camacho, M. Miracle, E. Vicente. 1998. Asociaciones fitoplanctónicas y su periodicidad en un lago marcadamente estratificado. Universidad de Valencia, España. 52 pp.
- Morata, S. M., A. Camacho, M. R. Miracle y E. Vicente. 2003. Asociaciones fitoplanctónicas y su periodicidad en un lago marcadamente estratificado. *Limnetic.* 22 (3-4): 35-52
- Morgan, R. y J. Kalf. 1975. The winter dark survival of an algal flagellate, *Cryptomonas erosa* (Skuja). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 19: 2734-2740.
- NMX-AA-115-SCFI-2000. Análisis de agua. Criterios generales para el control de la calidad de resultados analíticos.
- NOM-001-ECOL-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). 1982. The OCDE Listo Social Indicators, Paris. 28-30.
- Payne, A. I. 1986. *The ecology of tropical lakes and rivers*. Wiley. Chichester. 301 p.

- Pilati, A. y W. A. Wurtsbaugh. 2003. Importance of zooplankton for the persistence of a deep chlorophyll layer: A limnocorral experiment. *Limnol. Oceanogr.* 48:249-260.
- Pinel-Alloul, B., A. Ghadouani y M. Gélina. 2008. Development and persistence of Deep Chlorophyll máxima in oligotrophic lakes over the summer season. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 30: 409-415.
- Rakocevic-Nedovic H., H. Hollert. 2005. Phytoplankton community and chlorophyll a as trophic state indices of lake Skadar (Montenegro, Balkan). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 12(3): 146-152.
- Reynolds, C. S. 1984. *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press Cambridge. 384 p.
- Reynolds, C. S. 1992. Dynamics, selection and composition of phytoplankton in relation to vertical structure in lakes. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* 35: 12-31.
- Reynolds, C. S. 1994. The long, the short and the stalled: on the attributes of phytoplankton selected by physical mixing in lakes and rivers. *Hydrobiology* 289: 9-21.
- Reynolds, C. S. 1996. *Plant life of the pelagic. Proceedings of the International Association for Theoretical and Applied Limnology* 26: 97-113.
- Reynolds, C. S. 2006. *Ecology of phytoplankton*. Cambridge University Press. 535 p.
- Rodríguez-Rodríguez, M., L. Cruz-Pizarro, J. J. Cruz-San Julián, J. Benavente Herrera y C. Almécija Ruiz. 2001. Caracterización limnológica de dos lagunas saladas del sur de la península Ibérica. *Limnetic.* 20(2): 233-243.
- Sawatzky, C. L., W. A. Wurtsbaugh y C. Luecke. 2006. The spatial and temporal dynamics of deep chlorophyll layers in high-mountain lakes: effects of nutrients, grazing, and herbivore nutrient recycling as growth determinants. *J. Plankton Res.*, 28: 65-86.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2002. Inventarios forestales y tasas de deforestación. (http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe-04/02-vegetacion/recuadros/c_rec3_02.htm)

-
- Signoret, M., C. Bulit y R. Pérez. 1998. Patrones de distribución de clorofila a y producción primaria en aguas del Golfo de México y del Mar Caribe. *Hidrobiológica* 8(2): 81-88.60
- Signoret, M., M. A. Monreal-Gómez, J. Adelco y D. A. Salas-de-León. 2006. Hydrography, oxygen saturation, suspended particulate matter and chlorophyll-a fluorescence in an oceanic region under freshwater influence. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 69:153-164.
- Umaña-Villalobos, G. 2008. Limnología básica del Embalse Angostura, Turrialba, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 56:215-220.
- Vargas S. M. 2016. *Caracterización del seston en lagos del parque nacional "Lagunas de Montebello, Chiapas, México*. Tesis que para obtener el título de Licenciatura en Ciencias de la Tierra, UNAM México. 66 p.
- Vásquez, M. A. y E. Méndez. 1994. Aspectos generales de la región: Lagos de Montebello. Reporte del trabajo para el curso de conservación de naturaleza y recursos naturales, Maestría en Ciencias: Recursos Naturales y Desarrollo Rural, ECOSUR Chiapas. San Cristóbal de las Casas, Chiapas. México, 109 p.
- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. Academic Press. San Diego.1006 p.

*Pisas el camino y si no
controlas tus pies nunca sabes
adónde te pueden llevar*



J. R. R. Tolkien