



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**CARACTERIZACIÓN DEL SESTON EN
LAGOS DEL PARQUE NACIONAL “LAGUNAS
DE MONTEBELLO”, CHIAPAS, MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Orientación en Ciencias Acuáticas

P R E S E N T A:

MARIANA VARGAS SÁNCHEZ



DIRECTOR DE TESIS:

DR. JAVIER ALCO CER DURAND

Ciudad Universitaria, CDMX, Octubre 2016



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.

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno

Vargas
Sánchez
Mariana
044 55 34654098
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
309344629

2. Datos del tutor

Dr.
Javier
Alcocer
Durand

3. Datos del sinodal 1

Dr.
Martín
Merino
Ibarra

4. Datos del sinodal 2

Dr.
Luis Alberto
Oseguera
Pérez

5. Datos del sinodal 3

Dr.
Jorge Alberto
Ramírez
Zierold

6. Datos del sinodal 4

Dr.
Rafael Antonio
López
Martínez

7. Datos del trabajo escrito.

Caracterización del seston en lagos del
Parque Nacional "Lagunas de Montebello",
Chiapas, México.
66 pp
2016



**CARACTERIZACIÓN DEL SESTON EN LAGOS DEL
PARQUE NACIONAL "LAGUNAS DE
MONTEBELLO", CHIAPAS, MÉXICO**

MARIANA VARGAS SÁNCHEZ



*...Caminante, son tus huellas
el camino y nada más;
Caminante, no hay camino,
se hace camino al andar.
Al andar se hace el camino,
y al volver la vista atrás
se ve la senda que nunca
se ha de volver a pisar.
Caminante no hay camino
sino estelas en la mar...*

Extracto de Proverbios y cantares (XXIX). Antonio Machado.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme una formación integral y multidisciplinaria a lo largo de mis estudios profesionales.

Al Dr. Javier Alcocer Durand, por el conocimiento compartido, por las lecciones, por el tiempo dedicado a este trabajo, pero sobre todo por ser un ejemplo a seguir en mi formación académica.

A la Dra. Vilma Ardiles por todas y cada una de las observaciones al escrito, por los regaños, porque la dedicación con la que comparte su conocimiento me ha impulsado hacia el camino de la investigación limnológica.

Al Dr. Luis Oseguera por cada uno de sus comentarios, por los consejos, por el apoyo y enseñanzas en campo y laboratorio, pero sobre todo por ser una excelente persona.

A los Dres. Martín Merino y Jorge Ramírez por sus comentarios al escrito pero sobre todo por su apoyo durante mi estancia en el laboratorio de Biogeoquímica Acuática.

Al Dr. Rafael López por sus acertadas correcciones a mi trabajo.

A mis nuevos amigos Daniela, Daniel, Jerónimo, Montse, Rigel y Rene, por todas las risas y experiencias en campo.

Al Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua (CONAGUA-COCONACYT) 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 (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.

DEDICATORIA

¡A mis héroes!

A quienes todos los días me enseñan de que va la vida. A ustedes que son mi más grande ejemplo a seguir. A ustedes que me han visto crecer en todos los aspectos. A ustedes que me han dado todo lo que está en sus manos y mucho más. A ustedes las mejores personas del mundo; Male, Luis y Jorge. ¡Gracias por siempre estar ahí, gracias por tanto amor!

¡A la familia que elegí!

A ustedes que siempre tienen las palabras precisas en los momentos exactos. Gracias por hacerme la vida mucho más amena y demostrarme que hay lazos que jamás se romperán. Gracias por cada uno de los momentos vividos, risas compartidas y sueños cumplidos. Gracias; Adri, Alejandro, Alex, Andrés, Atzin y Eduardo.

¡A mis geocientíficos!

Gracias por hacer de mi paso por la Facultad de Ciencias una de las etapas más bonitas de mi vida. Ustedes me enseñaron que las lecciones más importantes de vida se dan fuera del salón de clases. Gracias por tanto; Amanda, Eduardo, Fanny, Héctor, Layla, Mafer, Mitsui, Monchis, Raúl y Silvana.

¡A mis hawamigas!

Porque con ustedes todo es más bonito. Gracias por compartir conmigo el amor a la danza y hacer mi vida infinitamente más divertida. Mahalo; Ana, Andrea, Christina, Lilia, Nayely y Tania.

Gracias a todos, la felicidad de cumplir una meta, un sueño, no valdría la pena si no tuviera con quien compartirlo.

¡Los amo!

CONTENIDO

1	Resumen	9
2	Abstract	11
3	Introducción	12
4	Antecedentes	16
5	Justificación	18
	- Hipótesis	19
	- Objetivo general	20
	- Objetivos particulares	20
6	Área de estudio	21
7	Metodología	24
	- Preparación de materiales	24
	- Trabajo de campo	24
	- Trabajo de laboratorio	28
	- Trabajo de gabinete	29
8	Resultados	30
	- Parámetros fisicoquímicos	30
	- Seston	38
	- Carbono	45
9	Discusión	51
10	Conclusiones	60
11	Referencias	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Extremos en la coloración que presentan actualmente los lagos de Montebello. A la izquierda el color azul “original” ejemplificado por el lago Pojoj y a la derecha el color verde-amarillento observado en los lagos “impactados” que mostraron cambio de coloración como en Bosque Azul.	19
Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y del complejo lacustre “Lagunas de Montebello” (Tomada de Oseguera y Alcocer, 2015).	22
Figura 3. Equipos utilizados para la obtención del registro <i>in situ</i> de variables ambientales y muestras de agua durante el trabajo en campo. De izquierda a derecha: equipo multisensor de calidad de agua Hydrolab DS5X, perfilador de fluorescencia natural Biospherical PNF-300 y botella muestreadora de agua UWITEC.	26
Figura 4. Imágenes satelitales de los lagos de Montebello estudiados (Tomados de Google Earth). Nota: los lagos están a diferentes escalas.	27
Figura 5. Equipo de filtración.	29
Figura 6. Temperatura (T) promedio \pm d.e. durante la estratificación (2014, rojo) y la circulación (2015, azul) en los lagos estudiados del PNLM.	31
Figura 7. Concentración promedio de oxígeno disuelto (OD) \pm d.e. durante la estratificación (2014, amarillo) y la circulación (2015, anaranjado) en los lagos estudiados del PNLM.	32
Figura 8. Conductividad (K_{25}) promedio \pm d.e. durante la estratificación (2014, morado) y la circulación (2015, verde) en los lagos estudiados del PNLM.	32
Figura 9. De izquierda a derecha, perfiles verticales de T, OD y K_{25} para ambas temporadas de muestreo (estratificación, línea roja y circulación, línea azul) registrados en Chaj Chaj ejemplificando un lago impactado-somero.	35
Figura 10. De izquierda a derecha, perfiles verticales de T, OD y K_{25} para ambas temporadas de muestreo (estratificación, línea roja y circulación, línea azul) registrados en Bosque Azul ejemplificando un lago impactado-profundo.	36
Figura 11. De izquierda a derecha, perfiles verticales de T, OD y K_{25} para ambas temporadas de muestreo (estratificación, línea roja y circulación, línea azul) registrados en San José ejemplificando un lago prístino-somero.	37
Figura 12. De izquierda a derecha, perfiles verticales de T, OD y K_{25} para ambas temporadas de muestreo (estratificación, línea roja y circulación, línea azul) registrados en Tziscaco ejemplificando un lago prístino-profundo.	38

Figura 13. Concentración promedio (\pm d.e.) del seston durante el verano (color oscuro) y el invierno (color claro) en los lagos estudiados del PNLM. En verde se muestran los lagos considerados impactados y en azul los prístinos. (Chaj Chaj no presenta barras de d.e. ya que por su someridad sólo se muestreó a una profundidad).	39
Figura 14. Distribución vertical del seston en Liquidambar y Chaj Chaj, lagos ‘impactados-someros’, (a) durante la estratificación.	40
Figura 15. Distribución vertical del seston en Bosque Azul, lago ‘impactado-profundo’; (a) durante la estratificación y (b) durante la circulación.	41
Figura 16. Distribución vertical del seston en los lagos “prístinos-someros” (Agua Tinta Montebello, San José y Yalalush), (a) durante la estratificación y (b) durante la circulación.	43
Figura 17. Distribución vertical del seston en lagos ‘Prístinos-Profundos’: Pojoj (línea azul) y Tziscaco (línea roja); (a) durante la estratificación y (b) durante la circulación.	44
Figura 18. Concentración promedio (\pm d.e.) del COP durante el verano (color oscuro) y el invierno (color claro) en los lagos estudiados del PNLM. En verde se muestran los lagos considerados impactados y en azul los prístinos.	45
Figura 19. Distribución vertical del COP en Liquidambar y Chaj Chaj, lagos ‘impactados-someros’, (a) durante la estratificación.	47
Figura 20. Distribución vertical del COP en Bosque Azul, lago ‘impactado-profundo’; (a) durante la estratificación y (b) durante la circulación.	48
Figura 21. Distribución vertical del COP en los lagos “prístinos-someros” (Agua Tinta Montebello, San José y Yalalush), (a) durante la estratificación y (b) durante la circulación.	49
Figura 22. Distribución vertical del COP en lagos ‘prístinos-profundos’: Pojoj (línea azul) y Tziscaco (línea verde); (a) durante la estratificación y (b) durante la circulación.	50
Figura 23. Relación de la profundidad de la zona eufótica (ZEU) y la concentración del seston (S) y el COP durante el verano en los lagos del PNLM. En verde los lagos impactados y en azul los prístinos.	57
Figura 24. Relación de la profundidad de la zona eufótica (ZEU) y la concentración del seston (S) y el COP durante el invierno en los lagos del PNLM. En verde los lagos impactados y en azul los prístinos.	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación geográfica de los lagos en estudio del PNLM y clasificación a priori del grado de impacto. (Zmáx = profundidad máxima, Zmed = profundidad media, Som = somero, Prof = profundo; P = prístino, I = impactado). (En azul los lagos prístinos y en verde los impactados)	25
Tabla 2. Profundidad de la zona eufótica (ZEU) y capa de mezcla (ZMIX). (Zmáx = profundidad máxima, Zmed = profundidad media, * = Toda la columna de agua; - = sin datos). En azul los lagos prístinos y en verde los impactados)	34
Tabla 3. Concentraciones promedio (X), desviación estándar (d.e.), mínima y máxima de seston en la columna de agua de los lagos en estudio del PNLM.(Z profundidad media, - = sin datos). (En azul los lagos prístinos y en verde los impactados)	39
Tabla 4. Concentraciones promedio (X) en µg/L, desviación estándar (d.e.), mínima y máxima de COP en la columna de agua de los lagos en estudio del PNLM.(- = sin datos). (En azul los lagos prístinos y en verde los impactados)	46
Tabla 5. Masa total del seston (mg/L) en distintos lagos con diferente ubicación latitudinal y estado trófico. (En azul los lagos prístinos y en verde los impactados)	54
Tabla 6. Concentración de COP (mg/L) en distintos lagos con diferente latitud y estado trófico. (En rosa, lagos de otros estudios, en azul los lagos prístinos y en verde los impactados)	55
Tabla 7. Profundidad de la ZEU y las concentraciones de seston y COP en los lagos en estudio pertenecientes al PNLM. (En azul los lagos prístinos y en verde los impactados)	59

1. RESUMEN

En el año 2003 se reportó un cambio en la coloración y transparencia del agua en algunos de los lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM), Chiapas. La necesidad de reconocer el origen de este cambio impulsó a estudiar a fondo las características limnológicas del sistema acuático, así como la problemática registrada. Para lo anterior, se midió la concentración y variación temporal y en el perfil vertical del seston y el carbono orgánico particulado, así como la transparencia de la columna de agua en un conjunto de nueve lagos que representan los distintos grados de impacto presentes en los cuerpos acuáticos del PNLM.

Los muestreos se llevaron a cabo en dos épocas hidrodinámicas contrastantes: estratificación (mayo de 2014, verano) y circulación (febrero de 2015, invierno). Se midieron perfiles verticales de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD) y conductividad (K_{25}). Para la evaluación del seston y carbono orgánico particulado (COP) se tomaron entre una y cinco muestras de agua a lo largo de la columna de agua dependiendo de la profundidad del lago. Posteriormente, se estimó la concentración del seston por métodos gravimétricos. La medición del COP se realizó con un analizador elemental Carlo Erba® modelo NC2100.

Durante el verano se registraron concentraciones de seston en la columna agua que oscilaron entre 0.1 mg/L y 15.5 mg/L, con un promedio de 4.1 ± 1.8 mg/L. Durante el invierno la concentración de seston osciló entre 0.2 mg/L y 11.0 mg/L con un promedio de 3.9 ± 0.9 mg/L. En cuanto al COP, el promedio de la concentración durante el verano fue de 930 ± 962 μ g/L y se registraron concentraciones que oscilaron entre 193 - 3,969 μ g/L. Así mismo, durante el invierno la concentración promedio de COP fue $839 \pm 1,006$ μ g/L y se registraron concentraciones que oscilaron entre 239 - 3,596 μ g/L. Los lagos impactados muestran una mayor concentración del seston (7.7 ± 2.6 mg/L versus 1.6 ± 0.36 mg/L en lagos prístinos) y de COP ($2,556.5 \pm 1,383.5$ μ g/L versus

342.7 ± 201.8 µg/L en lagos prístinos) y, por lo tanto, una menor transparencia de sus aguas (Z_{EU} de 2.6 ± 1.6 m versus 23.2 ± 12.9 m en lagos prístinos), respecto a los prístinos. 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.

2. ABSTRACT

In 2003 a change was reported in the color and transparency of water in some of the lakes of “Lagunas de Montebello” National Park (PNLM), Chiapas. The need to recognize the origin of this change impelled to study thoroughly the limnological characteristics of the water system and the problems registered. For this, the seston and particulate carbon concentration and its temporal and vertical variation was studied in a set of nine lakes that represent the different degrees of impact in aquatic bodies of the PNLM.

The samplings were carried out in two contrasting hydrodynamic periods: stratification (May 2014, summer) and circulation (February 2015, winter). Vertical profiles of temperature (T), dissolved oxygen (DO) and conductivity (K₂₅) were measured. For the evaluation of seston and particulate carbon (COP) between one and five water samples were collected throughout the water column, depending on the depth of the lake. Subsequently, the concentration of seston was estimated by gravimetric methods. The COP determination was performed in an Carlo Erba® elemental analyzer model NC2100.

During the summer, seston concentrations in the water column ranged from 0.1 mg/L to 15.5 mg/L, with an average of 4.1 ± 1.8 mg/L were recorded. During the winter the average concentration of COP was 839 ± 1.006 mg/L and concentrations ranged 239 - 3,596 mg/L. Impacted lakes show a higher concentration of seston (7.7 ± 2.6 mg/L versus 1.6 ± 0.36 mg/L) and COP (2556.5 ± 1383.5 mg/L versus 342.7 ± 201.8 mg/L) and, therefore, less transparency of its water (2.6 ± 1.6 m versus 23.2 ± 12.9 m) compared to the pristine. The vertical profiles of seston and COP differ between pristine and impacted lakes, which exhibited higher concentrations of seston and COP on or near the surface, while the pristine showed their maximum concentration in middle waters.

3. INTRODUCCIÓN

Los lagos tropicales son aquellos cuerpos de agua lénticos que se ubican geográficamente dentro de los límites marcados por los trópicos de Cáncer y Capricornio ($23^{\circ} 26' 16''$ N y S). La “tropicalidad”, o sea las propiedades fundamentales de los lagos tropicales, están dadas por tres condiciones básicas, todas ellas relacionadas con su ubicación latitudinal (Straskraba, 1980): a) la mayor cantidad de radiación solar anual, b) la menor variación anual en la radiación solar y c) un menor efecto de Coriolis. De estos factores la radiación solar es la que se considera de mayor importancia en los estudios limnológicos. Estas tres condiciones afectan directamente a los lagos tropicales en diversas características, entre las cuales destacan la temperatura, la estabilidad de la estratificación, el espesor de la capa de mezcla, la eficiencia en el reciclamiento de nutrientes, el agotamiento de oxígeno disuelto hipolimnético, la producción primaria y la diversidad de especies (Lewis, 1987).

Existen diversos factores que regulan la estructura y dinámica de las comunidades de los ambientes lacustres, algunos de los más importantes son la luz, la temperatura, la hidrodinámica del lago y su estructura térmica, todos ellos son afectados por efectos primarios de la cantidad y variación de la radiación solar relativos a la posición geográfica del lago (Lewis, 1987). Así, la intensidad lumínica que recibe una zona o región está determinada por distintas variables que actúan en diferentes escalas temporales y espaciales, como la estación del año, la hora del día, nubosidad, así como la absorción del agua y las partículas en ella suspendidas que afectan la radiación subacuática (Cervantes et al., 2005).

Por otra parte, respecto a la distribución espacial y la atenuación de la luz en la columna de agua, se ha observado que se forma un gradiente lumínico en las distintas profundidades, de tal manera que se distinguen tres zonas en relación con el crecimiento fitoplanctónico: 1) zona de fotoinhibición, presente en la capa superficial donde la alta

radiación solar inhibe parcialmente la fotosíntesis; 2) la zona de producción máxima, la que la radiación disponible permite la tasa máxima de fotosíntesis, y 3) la zona de declive progresivo, en la cual la radiación disminuye conforme se profundiza, hasta alcanzar cantidades muy bajas que imposibilitan la fotosíntesis (Horne, 1994). En este sentido, las variaciones en la intensidad de la radiación tienen importantes consecuencias en el proceso de la fotosíntesis y en las tasas de crecimiento del fitoplancton, aunque éstas son diferentes en cada especie.

Por otro lado, un aspecto fundamental de los sistemas acuáticos son las características abióticas del agua, que generalmente están influenciadas por la naturaleza de sus cuencas; sin embargo, algunas de estas características pueden tener variaciones relacionadas con el incremento antropogénico de la materia orgánica. Estos parámetros inciden en las condiciones bióticas, ya que se presentan organismos tanto autótrofos como heterótrofos que son susceptibles a las variaciones de conductividad, temperatura del agua y oxígeno disuelto, entre otros, presentándose una relación entre los organismos y las variaciones ambientales. Tales parámetros ayudan a la interpretación de la capacidad productiva de los recursos acuáticos y su comportamiento en el tiempo y el espacio (Margalef, 1983).

Dicha materia orgánica existente en los ecosistemas acuáticos puede encontrarse en forma disuelta y/o particulada. Al conjunto de material particulado presente en la columna de agua se le denomina seston. La materia particulada de origen alóctono tiene una gran importancia en la biogeoquímica de los océanos y sistemas epicontinentales (Rutten et al., 2000, Torres-Padrón et al., 2002). Los sistemas epicontinentales están sujetos a una entrada importante de partículas alóctonas tanto litogénicas (p.ej., arcillas, material volcánico) como biogénicas (p.ej., polen, hojas y ramas). Este tipo de partículas tienen también un papel relevante en la ecología y calidad del agua de los sistemas acuáticos, ya que muchas de ellas constituyen alimento y/o presentan superficies

activas que intervienen en procesos metabólicos de los organismos; del mismo modo, producen una mayor turbidez en la columna de agua (Peng et al., 2004).

El seston tiene un papel importante dentro de los ecosistemas acuáticos, pues sus componentes, además de formar parte de las redes tróficas, determinan la profundidad de la zona fótica o eufótica (Z_{EU}), que es la zona donde hay suficiente radiación fotosintéticamente activa (PAR por sus siglas en inglés) como para que se pueda llevar a cabo la fotosíntesis, por lo que también se denomina la zona productiva y por lo tanto, influye en la tasa de producción de la zona pelágica y bentónica (Lenz, 1977). Por ello la Z_{EU} constituye la capa de la columna de agua desde la superficie y hasta donde el PAR alcanza el 1% de la PAR que llega en la superficie (SPAR por sus siglas en inglés).

Por otro lado, el estudio de la masa y composición del seston cobra importancia en el entendimiento de la circulación de la materia orgánica y mineral en los sistemas lénticos (Punning et al., 2003). Uno de los principales elementos que integran el seston es el carbono, elemento fundamental para la vida. El carbono particulado puede tener tres fuentes: alóctona, autóctona y la resuspensión de material del fondo y de la zona litoral de los lagos. La porción que cada uno de ellos aporta a la masa del seston varía dependiendo de la profundidad, de la morfometría de la cuenca, del régimen de vientos y del estado trófico del lago y determinará si el carbono que se está aportando es predominantemente orgánico o inorgánico (Eckert et al., 2003).

Por otro lado, el flujo vertical de la materia particulada desde la Z_{EU} hacia el fondo representa un proceso central en el ciclo del carbono. Este proceso en particular constituye la componente principal de la bomba biológica responsable de “secuestrar” el dióxido de carbono atmosférico, esto es, retirar el carbono fuera de la circulación por un plazo > 100 años (García-Pámanes et al., 2011).

Tradicionalmente, los sistemas acuáticos epicontinentales habían sido considerados como componentes menores en el ciclo del carbono global. Sin embargo, Cole et al. (2007) mostraron que estos ecosistemas reciben anualmente, a partir de la suma de los aportes del ambiente y fuentes antropogénicas, aproximadamente 1.9 Pg C/año, de los cuales alrededor de 0.2 Pg C/año está enterrado en los sedimentos acuáticos, al menos 0.8 Pg C/año regresan a la atmósfera y 0.9 Pg C/año llega a los océanos.

4. ANTECEDENTES

Debido a los problemas de contaminación en el estado de Chiapas, la Gerencia Regional Frontera Sur de La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) junto con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), impulsaron en el año 2007 el programa “Proyecto de Transferencia de Tecnologías de Conservación del Suelo y Agua en Microcuencas Rurales”, el cual está inscrito el marco del Programa de Manejo del Agua y Preservación de Suelos (MAPS) que la CONAGUA ha estado Instrumentado desde mediados de la década de los noventas.

En 2010, El gobierno del estado de Chiapas, solicitó al CONACyT la demanda tecnológica, a través del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua. Área 2, Sistema Hidrológico Nacional Estudios de Calidad del Agua el “Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello, en el estado de Chiapas”. CONACyT declaró desierta la solución de la demanda (CFE-GEIC, 2012a).

En el 2011, la Secretaria del Medio Ambiente e Historia Natural del Gobierno de Chiapas (SEMAHN), solicitó apoyo a Comisión Federal de Electricidad (CFE) para la realización de este estudio. La CFE presentó una propuesta técnica del proyecto denominado “Visión general de la problemática del cambio de coloración desde la laguna de Chinkultic hasta la Laguna Vuelta del Agua en el Parque Nacional Lagunas de Montebello en Chiapas”, Primera Etapa (CFE-GEIC, 2012a).

Para atender la problemática del sistema lagunar de Montebello, el Departamento de Modelos Matemáticos, perteneciente a la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la CFE, propuso la construcción de un modelo de calidad del agua integral, basado en mediciones de parámetros físico-químicos en la zona de estudio. Dichos modelos se generaron a partir de mediciones sistemáticas en los cuerpos lagunares, tanto hidrodinámicas como de calidad del agua (CFE-GEIC, 2012c).

Adicionalmente, Juárez (2014) realizó diversos análisis hidrogeoquímicos en la cuenca del Rio Grande de Comitán y propuso que el origen de la composición química del agua se debe a los iones que componen a las rocas sedimentarias en las que se localiza la cuenca como el calcio y el magnesio que son aportados por rocas calizas y dolomías. Las aguas con mayor concentración de nitratos se ubicaron en zonas de cultivo, por lo que es fácil deducir la presencia de aguas contaminadas por agroquímicos, ya que por lo general, los fertilizantes contienen sulfatos, nitratos y fosfatos.

Además, Almeida (2014) estudió la estructura funcional y taxonómica del fitoplancton presente en 17 lagos del sistema lacustre (Balantetik, Chaj Chaj, Chojib, Chotojovel, Tierra Colorada, Liquidámbar, Vuelta de Agua, Peñasquito, Peineta, Chilpotrero, Bosque Azul, La Encantada, Esmeralda, San José, Montebello, Tzisco y Pojoj) concluyendo que los grupos funcionales más importantes por su aporte a la biomasa en los lagos están mayormente relacionados con características de ambientes eutróficos. Aunado a lo anterior describe que los cuerpos de agua muestran heterogeneidad espacial en la vertical en su composición taxonómica y funcional del fitoplancton, a pesar de que se encuentran muy cercanos entre sí, mostrando que hay lagos con diferente grado de deterioro.

Recientemente se reconoció que algunos cuerpos de agua del PNLM se han visto afectados por procesos de eutrofización; el estado trófico de los lagos prístinos del PNLM es ultraoligotrófico, mientras que los lagos impactados resultan mesotróficos, eutróficos o incluso hipereutróficos (Hernández, 2016). El proceso de eutrofización si bien es natural, puede ser acelerado significativamente por factores antrópicos (Juárez, 2014). Por tal motivo, el PNLM ha sido objeto de varias investigaciones científicas que buscan conocer sus características, así como determinar las causas de la severa afectación a los cuerpos de agua y, con ello, poder proponer alternativas de mitigación y/o remediación (González et al., 2005).

5. JUSTIFICACIÓN

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) es reconocido como uno de los escenarios naturales más hermosos de Chiapas y constituye un sitio icónico para el estado; enmarcado por un paisaje boscoso. El PNLM toma su nombre del complejo hidrológico constituido por más de 60 cuerpos lacustres, que varían en la extensión, forma y tonalidad del agua, con colores que -originalmente- van desde el azul pálido al esmeralda y el turquesa (CONANP, 2007).

En el año 2003 se reportó un cambio en la coloración y transparencia de las aguas en algunos de los lagos del PNLM, de azul y transparente (de aquí en adelante lagos prístinos) a amarillo-verdoso y turbio (de aquí en adelante lagos impactados) (Fig. 1), así como la presencia de natas blancas-amarillentas en las orillas, un olor desagradable (posiblemente por la presencia de compuestos azufrados) y mortandad de peces.

La necesidad de reconocer el origen de este cambio impulsó a estudiar a fondo las características del sistema acuático, así como la problemática registrada. Para determinar las condiciones de los lagos, diferentes dependencias de gobierno han realizado muestreos aislados en el PNLM encontrando en general sulfatos y sulfuros en concentraciones elevadas (CFE-GEIC, 2012). El deterioro de los sistemas se ve reflejado en la fragmentación del paisaje, una acelerada erosión hídrica del suelo, contaminación de las aguas por residuos sólidos, inundaciones y una grave disminución de los avistamientos de fauna silvestre asociada a estos ecosistemas (SEMARNAT, 2008).

Dado que existen muy pocos estudios limnológicos de los lagos del PNLM y ninguno se ha llevado a cabo con una visión integral ni comparativa, en el presente trabajo se planteó estudiar la concentración y distribución del seston para reconocer si existen diferencias entre los lagos prístinos e impactados y como esto ha afectado la penetración de la luz (transparencia) en la columna de agua. Adicionalmente, se analizó la



Figura 1. Extremos en la coloración que presentan actualmente los lagos de Montebello. A la izquierda el color azul “original” ejemplificado por el lago Pojoj y a la derecha el color verde-amarillento observado en los lagos “impactados” que mostraron cambio de coloración como en Bosque Azul.

contribución del carbono particulado a la masa del seston y se compararon los lagos prístinos y los impactados. Lo anterior se empleó como una herramienta descriptiva del estado de salud de los lagos. Se discutieron las diferencias registradas entre los lagos prístinos y los impactados en términos de los posibles cambios acaecidos y el posible origen de los mismos.

HIPÓTESIS

H1: Los lagos impactados mostrarán una mayor concentración y diferente distribución vertical del seston así como una menor transparencia de sus aguas derivados de la mayor cantidad de seston, respecto a los prístinos.

H2: Los lagos impactados mostrarán una mayor concentración y diferente distribución vertical del carbono orgánico particulado así como una menor transparencia de sus aguas derivados de la mayor cantidad de carbono orgánico particulado, respecto a los prístinos.

OBJETIVO GENERAL

Conocer la variación vertical de la concentración del seston y del carbono orgánico particulado (COP) en un conjunto de nueve lagos (impactados y prístinos) del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas durante dos épocas hidrodinámicas contrastantes: estratificación (2014) y circulación (2015). Así mismo establecer cómo influyen estas componentes en la transparencia de la columna de agua con el fin de reconocer los cambios acaecidos en los lagos impactados al compararlos con los prístinos.

OBJETIVOS PARTICULARES

- I. Medir perfiles de temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y radiación fotosintéticamente activa (PAR) en cada uno de los lagos en estudio.
- II. Determinar la zona fótica (Z_{EU}) y capa de mezcla (Z_{MIX}) en los lagos.
- III. Determinar distribución en la columna de agua de la concentración del seston y carbono orgánico particulado en los nueve lagos seleccionados del PNLM en dos periodos hidrodinámicos contrastantes: estratificación y circulación.
- IV. Relacionar las variables ambientales con la cantidad y distribución del seston, el carbono orgánico particulado y la transparencia del agua.

6. ÁREA DE ESTUDIO

LOCALIZACIÓN

El PNLM se encuentra en la región sureste del Estado de Chiapas, en la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre de Chiapas, en la frontera con Guatemala (Fig. 2). Se ubica a los 16° 04' - 16° 10' N y 91° 37' - 91° 47' O, a una altitud de 1,500 m s.n.m. (CONANP, 2007).

CLIMA

El PNLM posee un clima templado húmedo con lluvias todo el año [C(fm)] y en el extremo noroeste del mismo un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano [A(cm)]. Los meses más calurosos del año son abril y mayo y los meses más lluviosos se presentan entre junio y septiembre. La temperatura media mensual es de 23.6°C; el mes más frío es enero con 20.9°C de temperatura promedio y el más cálido es abril con un promedio de 25.6°C. La dirección del viento es principalmente del sur. La región no presenta heladas comúnmente (CONAGUA, 2009).

La precipitación anual varía de 1,200 a 1,400 mm con un promedio de 90-119 días de lluvia durante el año. Se presentan dos periodos climáticos bien definidos, uno de alta humedad y otro de relativa sequía. Durante el periodo húmedo (de mayo a diciembre) llueve en promedio el 92% de la precipitación total anual, mientras que el restante 8% se distribuye en el periodo seco. La evapotranspiración media anual en la zona es de 827 mm (CONANP, 2011).

HIDROLOGÍA

El sistema se encuentra en la Región Hidrológica Nacional No. 30 Grijalva-Usumacinta, formando parte de la subcuenca del Río Grande de Comitán (CONANP, 2009). Los lagos del PNLM forman parte de un complejo lacustre de origen kárstico. La alimentación de las aguas lacustres es principalmente subterránea (Vásquez y Méndez, 1994).

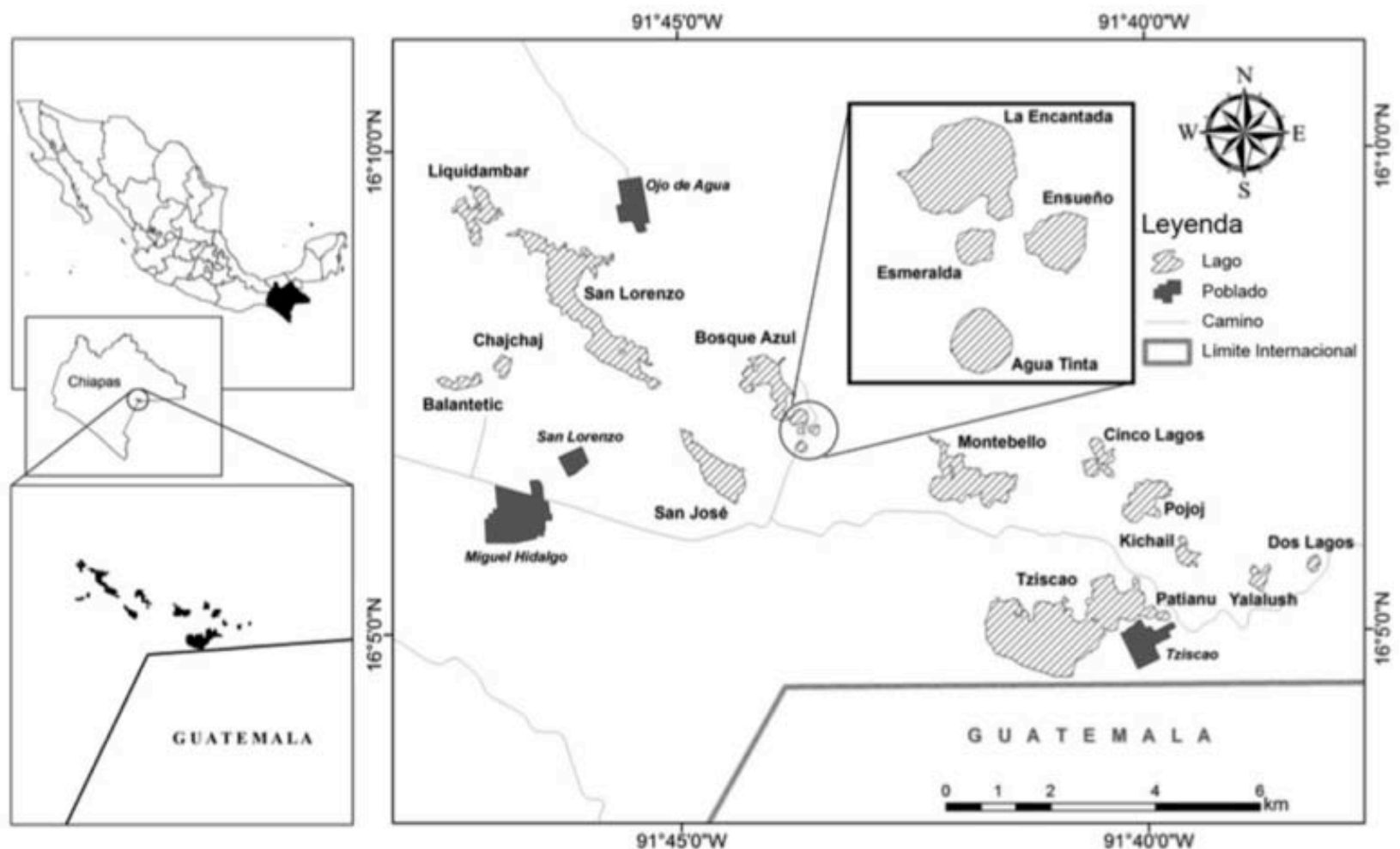


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y del complejo lacustre "Lagunas de Montebello" (Tomada de Oseguera y Alcocer, 2016).

GEOLOGÍA

La zona de interés se ubica fisiográficamente en la zona comprendida en la provincia denominada Meseta Central, a la cual también se le ha denominado Altiplanicie ó Altos de Chiapas (CFE-GEIC, 2012b).

Los cuerpos lagunares se desarrollaron sobre unidades estratigráficas del Cretácico, principalmente, sobre el grupo Sierra Madre del Cretácico Superior y las formaciones Malpaso y Chinameca del Cretácico Inferior (Durán, 2014). En el área lagunar se encuentran aflorando rocas constituidas por dolomitas y calizas de la Formación Sierra Madre de edad Albiano-Cenomaniano, de color café a gris blanquecino, de aspecto sacaroide, fracturadas, con estratificación en capas gruesas a masiva. Las calizas son de color gris claro a café, de grano grueso, con capas de textura litográfica (CFE-GEIC, 2012b). En el PNLN existe una relativa heterogeneidad morfológica y de origen del relieve, a pesar de la existencia de homogeneidad litológica, lo cual podría explicarse por la interacción de los procesos kársticos (i.e. exógenos) y tectónicos (i.e. endógenos) que tienen lugar en la zona. Los procesos kársticos quedan latentes por el gran número de unidades geomorfológicas relacionadas con la disolución, como son las uvalas, dolinas, poljes y valles ciegos. En el caso de la tectónica, su expresión está representada por estructuras plegadas y por sistemas de fallas y fracturas (Durán, 2014).

7. METODOLOGÍA

PREPARACIÓN DE MATERIALES PREVIO DEL MUESTREO

Seston: se utilizaron filtros marca Whatman tipo GF/F de 47 mm de diámetro (0.7 μm de apertura nominal de poro), estos fueron previamente combustionados a 500°C por cuatro horas en una mufla marca Thermolyne modelo 48000 y posteriormente envueltos en papel aluminio con el lado opaco hacia los filtros, con el fin de eliminar cualquier material que pudiera estar presente en ellos. Los filtros fueron pesados en una balanza analítica marca Sartorius modelo CP 124 (“Peso 1”) y, posteriormente, almacenados en un desecador hasta su uso.

Carbono particulado: se utilizaron filtros Whatman GF/F de 13 mm (0.7 μm de retención nominal) previamente combustionados por cuatro horas en una mufla marca Thermolyne modelo 48000 a 550°C y, posteriormente, envueltos en papel aluminio con el lado opaco hacia los filtros, con el fin de eliminar cualquier material que pudiera estar presente en ellos.

TRABAJO DE CAMPO

Se seleccionaron 9 lagos que representaran distintos grados de impacto presente en los cuerpos acuáticos del PNLM. Estos fueron: Agua Tinta, Bosque Azul, Chaj Chaj, Liquidambar, Montebello, Pojoj, San José, Tzisco y Yalalush (Tabla 1, Fig. 4). Los muestreos se llevaron a cabo en dos épocas hidrodinámicas contrastantes con el fin de tener una visión más integral de la problemática: estratificación (mayo de 2014, verano) y circulación (febrero de 2015, invierno).

Los 9 lagos en estudio se dividieron a priori en dos grupos: 1) prístinos (azules, transparentes): Agua Tinta, Montebello, Pojoj, San José, Tzisco y Yalalush y 2) impactados (verdes, turbios): Bosque Azul, Chaj Chaj y Liquidambar. Adicionalmente, Alcocer *et al.* (2016) dividieron los lagos en someros: Agua Tinta, Chaj Chaj, Montebello, Liquidambar, San José y Yalalush y profundos: Pojoj, Tzisco y Bosque Azul, tomando como criterio de clasificación la profundidad promedio de cada lago (Tabla 1).

En la parte central y más profunda de los lagos se midieron perfiles verticales metro a metro de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD) y conductividad (K₂₅) mediante una sonda multiparamétrica de calidad de agua marca Hydrolab modelo DS5X acoplado a un sistema de captura de información modelo SVR4a. Para determinar la zona eufótica (Z_{EU}) a partir de la penetración de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) se utilizó un perfilador de fluorescencia natural marca Biospherical modelo PNF-300 (Fig. 4).

Tabla 1. Ubicación geográfica de los lagos en estudio del PNLM y clasificación a priori del grado de impacto. (Z_{máx} = profundidad máxima, Z_{med} = profundidad media, Som = somero, Prof = profundo; P = prístino, I = impactado). (En azul los lagos prístinos y en verde los impactados).

Lago	Localización			Z _{máx} (m)	Z _{med} (m)	Estado	
	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Altitud (m s.n.m.)				
Chaj Chaj	16°07'53.4"	91°46'58.8"	1,426	12	5.3	Som	I
Liquidambar	16°09'1.8"	91°46'52.3"	1,461	24	11.2	Som	I
Bosque Azul	16° 07'7.1"	91°43'44.4"	1,458	58	20.0	Prof	I
Yalalush	16°05'30.3"	91°38'47.8"	1,452	23	9.9	Som	P
San José	16°06'34.0"	91°44'29.2"	1,454	30	10.3	Som	P
Montebello	16°06'32.0"	91°40'57.5"	1,490	45	12.3	Som	P
Agua Tinta	16°06'25.5"	91°41'19.8"	1,465	24	14.7	Som	P
Tzisco	16°04'59.0"	91°40'46.8"	1,490	86	28.9	Prof	P
Pojoj	16°06'22.2"	91°40'03.3"	1,499	198	35.2	Prof	P

Para la evaluación del seston y carbono orgánico particulado se tomaron entre una y cinco muestras de agua a lo largo de la columna de agua, dependiendo de la profundidad de cada lago y con base en los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto que se emplearon para reconocer la presencia de clinas (termo y/u oxiclina). Las muestras fueron tomadas con una botella muestreadora de agua marca UWITEC de 5 litros de capacidad (Fig. 3). Dichas muestras fueron filtradas in situ a través de una malla de 100 μm de apertura para eliminar al zooplancton grande o “nadador” y no afectar la precisión de la evaluación del seston (Jellison y Melack, 2001; Karl et al., 1991). Posteriormente, las muestras fueron colocadas en frascos limpios de polietileno previamente etiquetados y se mantuvieron en oscuridad y a baja temperatura (dentro de una hielera con una cama de hielo) para evitar su alteración durante su transporte al laboratorio (máximo 4 horas).

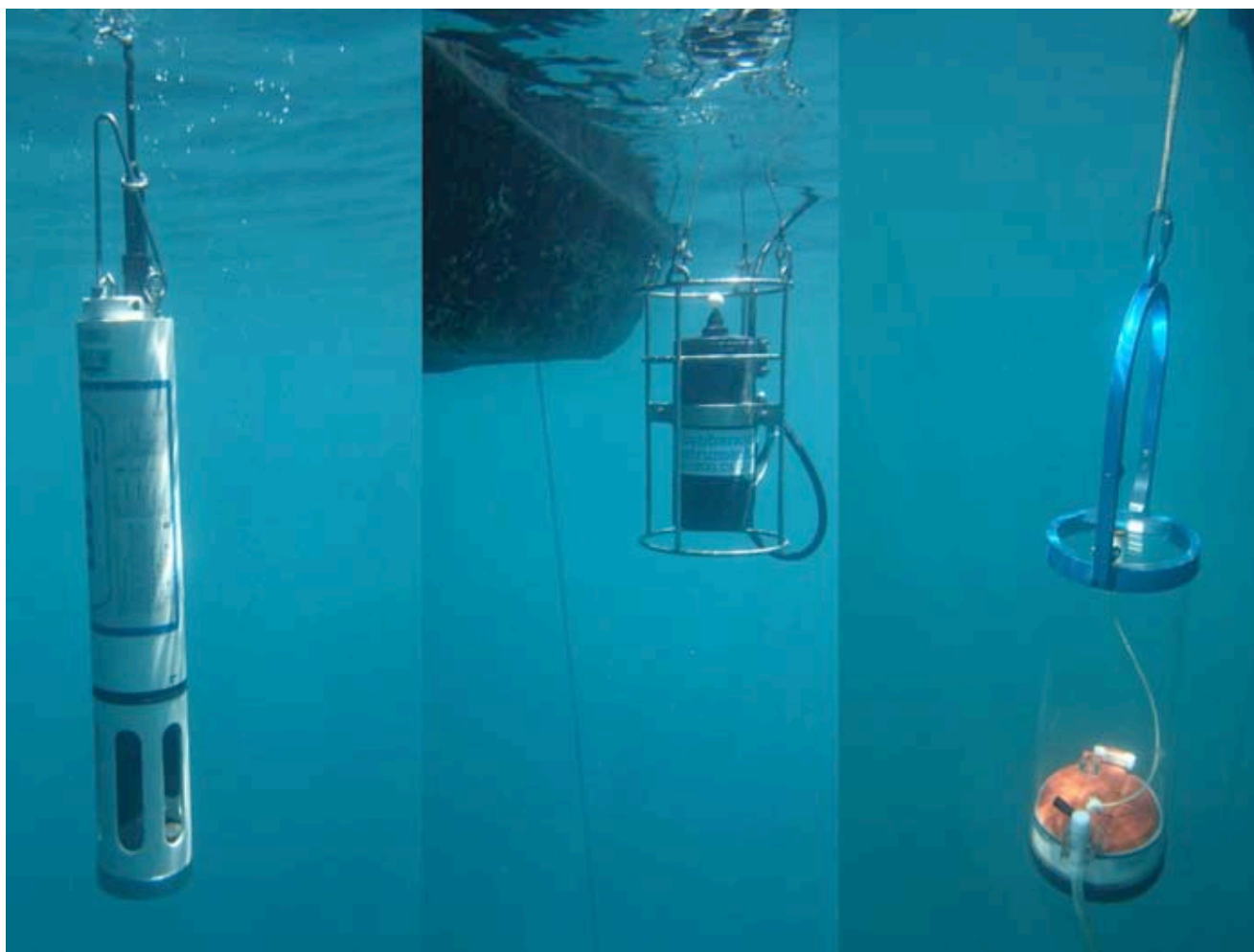


Figura 3. Equipos utilizados para la obtención del registro in situ de variables ambientales y muestras de agua durante el trabajo en campo. De izquierda a derecha: equipo multisensor de calidad de agua Hydrolab DS5X, perfilador de fluorescencia natural Biospherical PNF-300 y botella muestreadora de agua UWITEC.

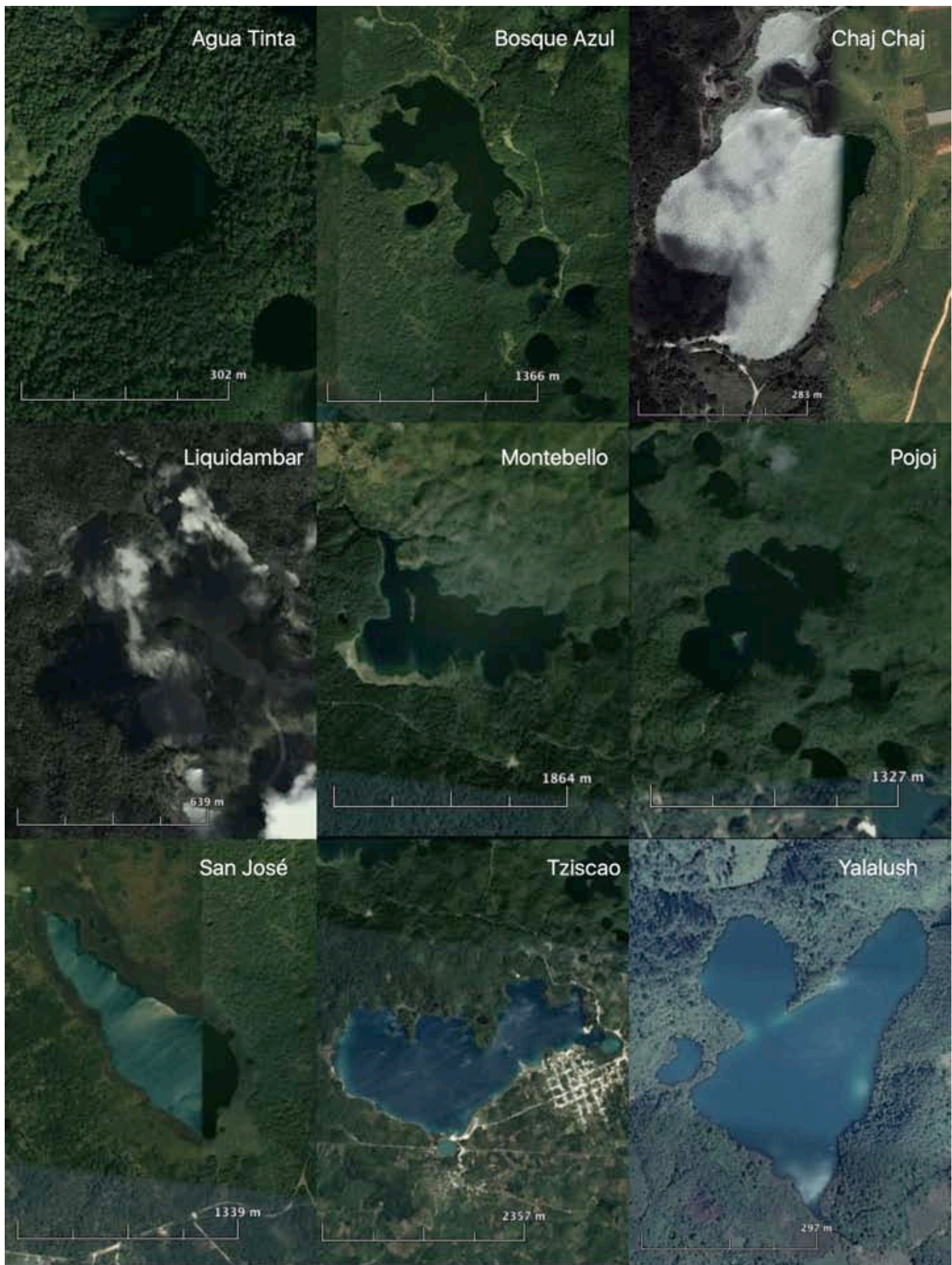


Figura 4. Imágenes satelitales de los lagos de Montebello estudiados (Tomados de Google Earth). Nota: los lagos están a diferentes escalas.

TRABAJO DE LABORATORIO

Seston: las muestras de agua de cada profundidad se filtraron a través de filtros marca Whatman tipo GF/F de 47 mm de diámetro previamente preparados. El volumen de muestra filtrado varió entre 800 y 1,200 mL dependiendo de cada lago (menos volumen en lagos de aguas turbias y mayor volumen en lagos con aguas claras). Para la filtración de las muestras se usaron equipos de vidrio Pyrex con soporte de vidrio sinterizado marca Millipore. El filtrado de las muestras se llevó a cabo con ayuda de una bomba de vacío. Para determinar y corregir la posible contaminación por manipulación y almacenamiento de las muestras, así como la retención de sales en la matriz del filtro se utilizó un filtro como blanco. Este filtro se colocó debajo del filtro en el que se retuvo la muestra.

Carbono: las muestras para el análisis de carbono orgánico particulado (COP) de cada profundidad se filtraron a través de filtros Whatman GF/F de 13 mm previamente preparados. El volumen de muestra filtrado fue de entre 20 y 300 mL dependiendo de cada lago. Para la filtración de las muestras se usaron equipos de acero inoxidable marca Millipore (Fig. 5). El filtrado de las muestras se llevó a cabo con una bomba de vacío, a una presión de entre 0.3 y 0.5 atms para evitar la pérdida de material orgánico. Los filtros se acidificaron con HCl al 10 % para eliminar la fracción inorgánica del carbono (carbonatos) en la muestra.

La gravimetría del seston retenido en los filtros se estimó en los filtros completamente secos pesados en el mismo comparador de masas, hasta alcanzar peso constante (peso seco, "Peso 2"). La medición del COP se realizó en un analizador elemental Carlo Erba® modelo NC2100 (Veronesi et al., 2002) en el Center for Marine Sciences de la University of North Carolina at Wilmington.



Figura 5. Equipo de filtración Millipore.

TRABAJO DE GABINETE

Seston: La diferencia entre el Peso 1 y el Peso 2 se relacionó primero al volumen filtrado y después se estandarizó a un litro de agua, representando así la masa total de seston (MT en mg/L).

$$MT = \frac{((\text{Peso 2} - \text{Peso 1}) - \text{blanco})}{\text{Volumen filtrado} \times 1000}$$

Posteriormente se obtuvieron las medias y la desviación estándar (D.E).

8. RESULTADOS

Por problemas ejidales no se permitió el acceso a Liquidambar en el invierno (2015), por lo que no se pudo realizar el muestreo respectivo en ese lago.

PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

TEMPERATURA, OXÍGENO DISUELTO Y CONDUCTIVIDAD

Durante la primera temporada de muestreo (verano) se registraron temperaturas en el agua que oscilaron entre 17.8°C y 26.1°C con un promedio de $20.4 \pm 2.0^\circ\text{C}$. La temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$) se registró en Montebello mientras que la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) tuvo lugar en Liquidambar. Por otro lado, durante el invierno la $T_{\text{mín}}$ fue 17.1°C y $T_{\text{máx}}$ fue 19.6°C, estas fueron registradas en Montebello y Agua Tinta, respectivamente. La temperatura promedio en invierno fue de $17.9 \pm 0.7^\circ\text{C}$ (Fig. 6).

A excepción de Yalalush, los lagos se encontraron estratificados térmicamente en el muestreo de verano. Por otro lado, durante el invierno todos los lagos presentaron temperaturas homogéneas a lo largo de toda la columna de agua sugiriendo que estaban circulando. San José mostró una leve estratificación térmica ($< 1^\circ\text{C}$) sugiriendo que no estaba circulando.

La concentración de OD en el agua de los lagos durante el verano se registró en un intervalo desde cero hasta 24.3 mg/L con un promedio de 4.2 ± 3.5 mg/L. La condición de anoxia se presentó en el fondo de todos los lagos a excepción de Yalalush donde fue de 4.4 mg/L, lo que confirmó que este lago estaba circulando aún en el verano. La concentración máxima de oxígeno disuelto ($\text{OD}_{\text{máx}}$) se obtuvo en el epilim-

nion de Liquidambar. El OD en invierno se registró en un intervalo de 2.2 a 9.1 mg/L, con un promedio de 6.3 ± 1.5 mg/L. La $OD_{m\acute{a}x}$ se obtuvo en la superficie de Chaj Chaj, mientras que la $OD_{m\acute{i}n}$ se obtuvo en el fondo de Bosque Azul (Fig. 7). San José que por temperatura sugería estar estratificado en invierno, mostró una columna totalmente oxigenada lo que confirmó que estaba circulando en invierno como el resto.

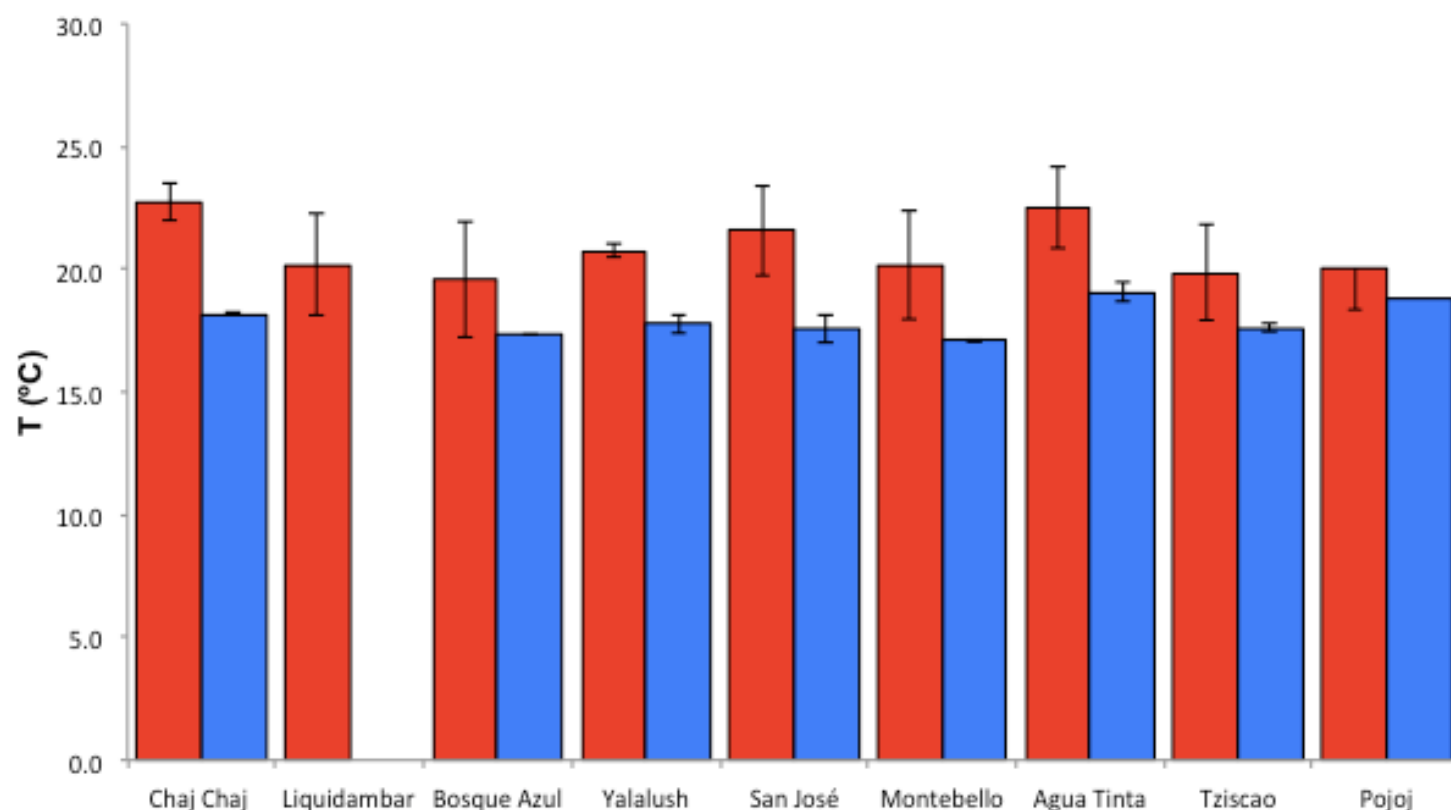


Figura 6. Temperatura (T) promedio \pm d.e. durante la estratificación (2014, rojo) y la circulación (2015, azul) en los lagos estudiados del PNLM.

La conductividad máxima ($K_{25m\acute{a}x}$) registrada en verano tuvo lugar en Liquidambar con un valor de $1,118 \mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que la mínima fue registrada en Montebello con un valor de $156 \mu\text{S}/\text{cm}$. El valor promedio de la K_{25} durante el verano fue de $325 \pm 216 \mu\text{S}/\text{cm}$. En la temporada invernal el valor promedio de K_{25} fue de $312 \pm 158 \mu\text{S}/\text{cm}$. El valor máximo fue de $1,027$ (Chaj Chaj), mientras que el valor mínimo fue de $179 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Montebello) (Fig. 8).

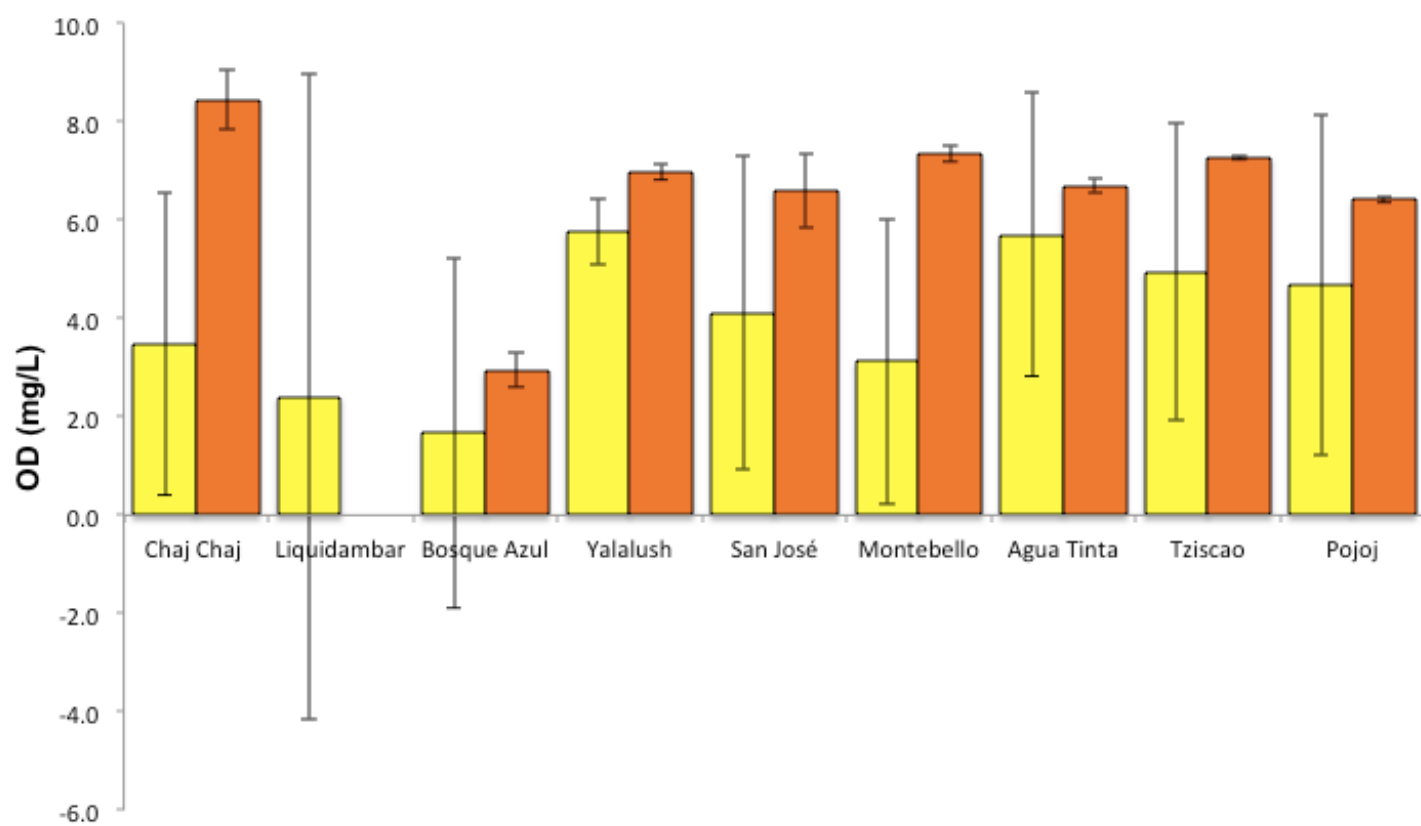


Figura 7. Concentración promedio de oxígeno disuelto (OD) \pm d.e. durante la estratificación (2014, amarillo) y la circulación (2015, anaranjado) en los lagos estudiados del PNLM.

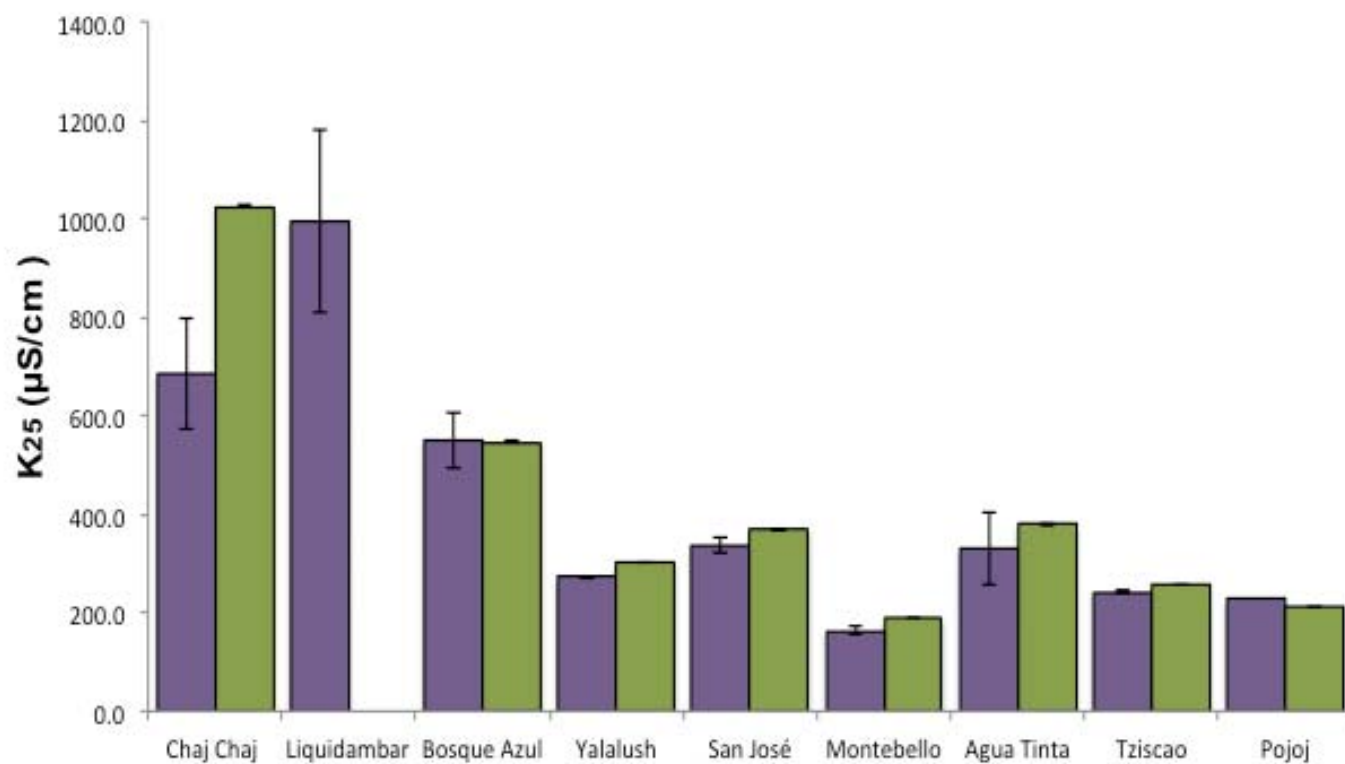


Figura 8. Conductividad (K25) promedio \pm d.e. durante la estratificación (2014, morado) y la circulación (2015, verde) en los lagos estudiados del PNLM.

Con base en la conductividad los lagos se pueden dividir en dos grupos: a) los “concentrados” (Chaj Chaj, Bosque Azul y Liquidambar) con valores mayores a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y b) los “diluidos” (Agua Tinta, Montebello, Pojoj, San José, Tzisco y Yalalush) con valores menores a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 8).

ZONA EUFÓTICA (Z_{EU}) Y CAPA DE MEZCLA (Z_{MIX})

Para el cálculo de la Z_{EU} se consideró la columna de agua desde la superficie y hasta la profundidad a la cual se alcanza el 1% de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) que llega a la superficie (SPAR). La Z_{EU} de los cuerpos acuáticos durante la estratificación (verano) se encontró en un intervalo de 1 a 49 m, en Chaj Chaj y Pojoj, respectivamente. El valor promedio durante la temporada fue 18.1 ± 17.8 m. Durante la circulación (2015), la Z_{EU} máxima se obtuvo en Montebello (26 m), mientras que la Z_{EU} mínima se registró en Bosque Azul (4.8 m) con un promedio de 17.2 ± 8.7 m (Tabla 2). Los lagos considerados prístinos presentaron valores superiores a 10 m mientras que los impactados tuvieron como máximo 2.3 m.

En cuanto a la Z_{MIX} en estratificación, Liquidambar fue el lago que presentó el valor mínimo (4 m) y Pojoj el lago con el valor más alto (24 m). El promedio durante la temporada fue 13.5 ± 8.2 m. Durante el invierno en todos los lagos Z_{MIX} abarca toda la columna. Por lo anterior el promedio durante la temporada invernal fue de 59.5 ± 60.7 m.

LAGOS IMPACTADOS-SOMEROS

Durante el verano, Chaj Chaj presentó estratificación térmica y un perfil clinogrado de OD, con un mínimo de 0 mg/L y un máximo de 7.5 mg/L. En cuanto a K_{25} , los valores mínimos se encuentran cerca de la superficie mientras que los máximos están cerca del fondo, con la presencia de una picnoclina entre los 4 y los 6 m de profundidad que

Tabla 2. Profundidad de la zona eufótica (Z_{EU}) y capa de mezcla (Z_{mix}). ($Z_{m\acute{a}x}$ = profundidad máxima, Z_{med} = profundidad media, * = Toda la columna de agua; - = sin datos). En azul los lagos prístinos y en verde los impactados).

Lago	$Z_{m\acute{a}x}$ (m)	Z_{med} (m)	Verano		Invierno	
			Z_{EU} (m)	Z_{mix} (m)	Z_{EU} (m)	Z_{mix} (m)
Chaj Chaj	12	5.3	1.2	5.3*	-	12*
Liquidambar	24	11.2	2.0	4	-	-
Bosque Azul	58	20	2.3	7	4.8	58*
Yalalush	23	9.9	11.5*	23*	23.0*	23*
San Jose	30	10.3	20.2	6.8	9.2	30*
Montebello	45	12.3	11.7	16	26.0*	45*
Agua Tinta	24	14.7	20.3*	12	15.7*	24*
Tziscoao	86	28.9	44.8*	23	24.3	86*
Pojoj	198	35.2	48.8*	24	-	198*

coincide con la oxiclina. Durante el invierno los tres parámetros (T , OD y K_{25}) son homogéneos por lo que se sugiere que el lago estaba en circulación (Fig. 9).

Por otro lado, Liquidambar durante verano también presentó estratificación térmica, teniendo como $T_{mín}$ 18.8C y como $T_{máx}$ 26.1C y un promedio de 20.2C \pm 2.1C. El OD presenta un perfil clinogrado con condiciones anóxicas en el fondo. Al igual que Chaj Chaj, la conductividad mostró una clara picnoclina con valores cercanos a los 600 μ S/cm en la capa superior elevándose a 1,100 μ S/cm en la capa profunda.

LAGOS IMPACTADOS-PROFUNDOS

Durante el verano, Bosque Azul mostró estratificación térmica con una termoclina aproximadamente entre los 2 y 9 m de profundidad. El valor mínimo fue registrado en el fondo (17.8C) y la $T_{máx}$ (24.6C) en superficie con un promedio de 19.6C \pm 2.4C . El OD

presenta un perfil clinogrado con un valor máximo de 11.5 mg/L y 0 mg/L a partir de los 6 m de profundidad y hasta el fondo. La conductividad muestra un patrón relativamente similar a la temperatura, con valores ligeramente mayores cerca de la superficie ($> 600 \mu\text{S/cm}$) para disminuir conforme aumenta la profundidad ($> 500 \mu\text{S/cm}$). En invierno la T, OD y K_{25} muestran perfiles homogéneos a lo largo de la columna de agua indicando que el lago se encontraba circulando (Fig. 10).

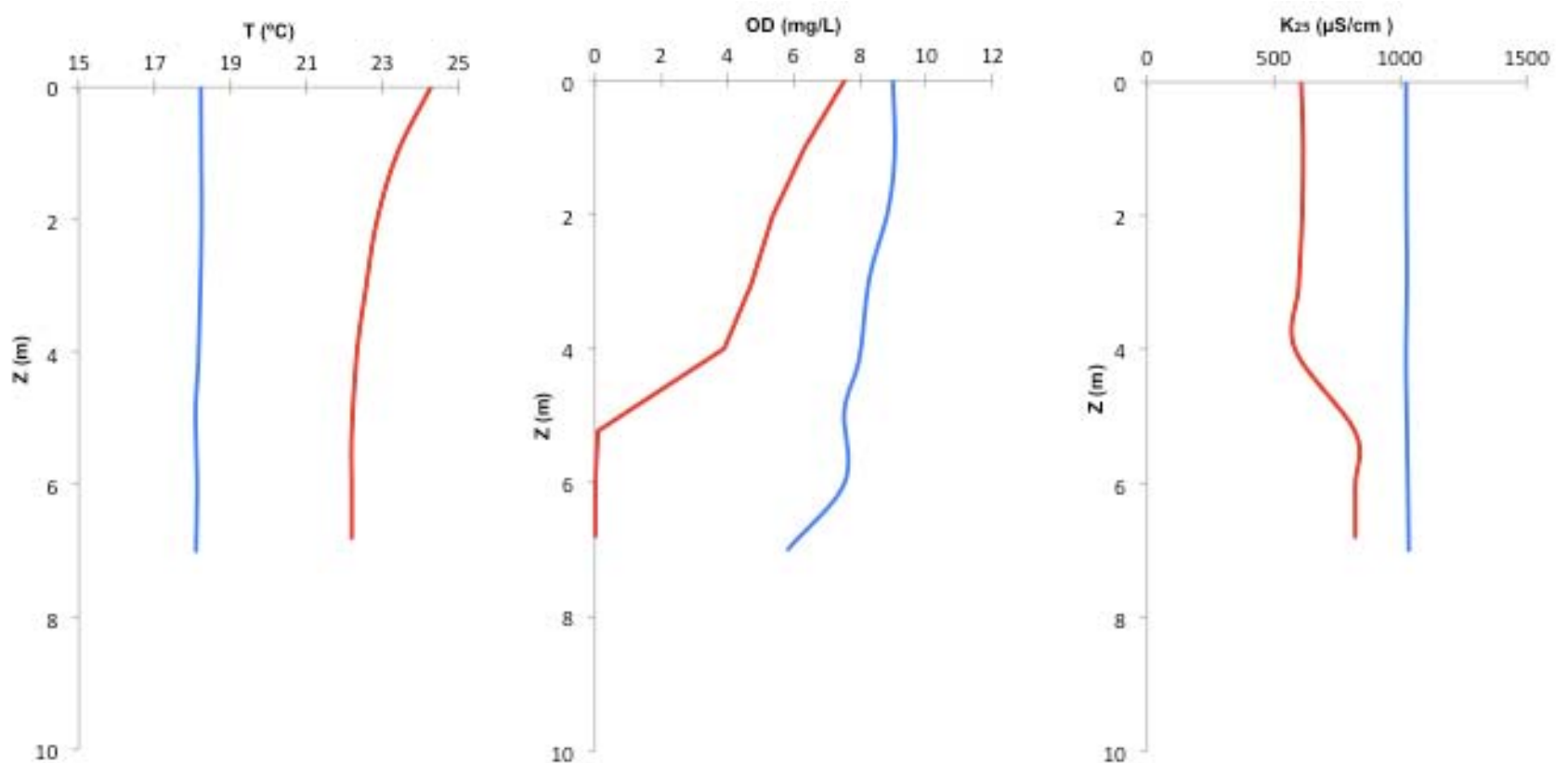


Figura 9. De izquierda a derecha, perfiles verticales de T, OD y K_{25} para ambas temporadas de muestreo (estratificación, línea roja y circulación, línea azul) registrados en Chaj Chaj ejemplificando un lago impactado-somero.

En general, los lagos impactados tanto someros como profundos tienen comportamientos similares.

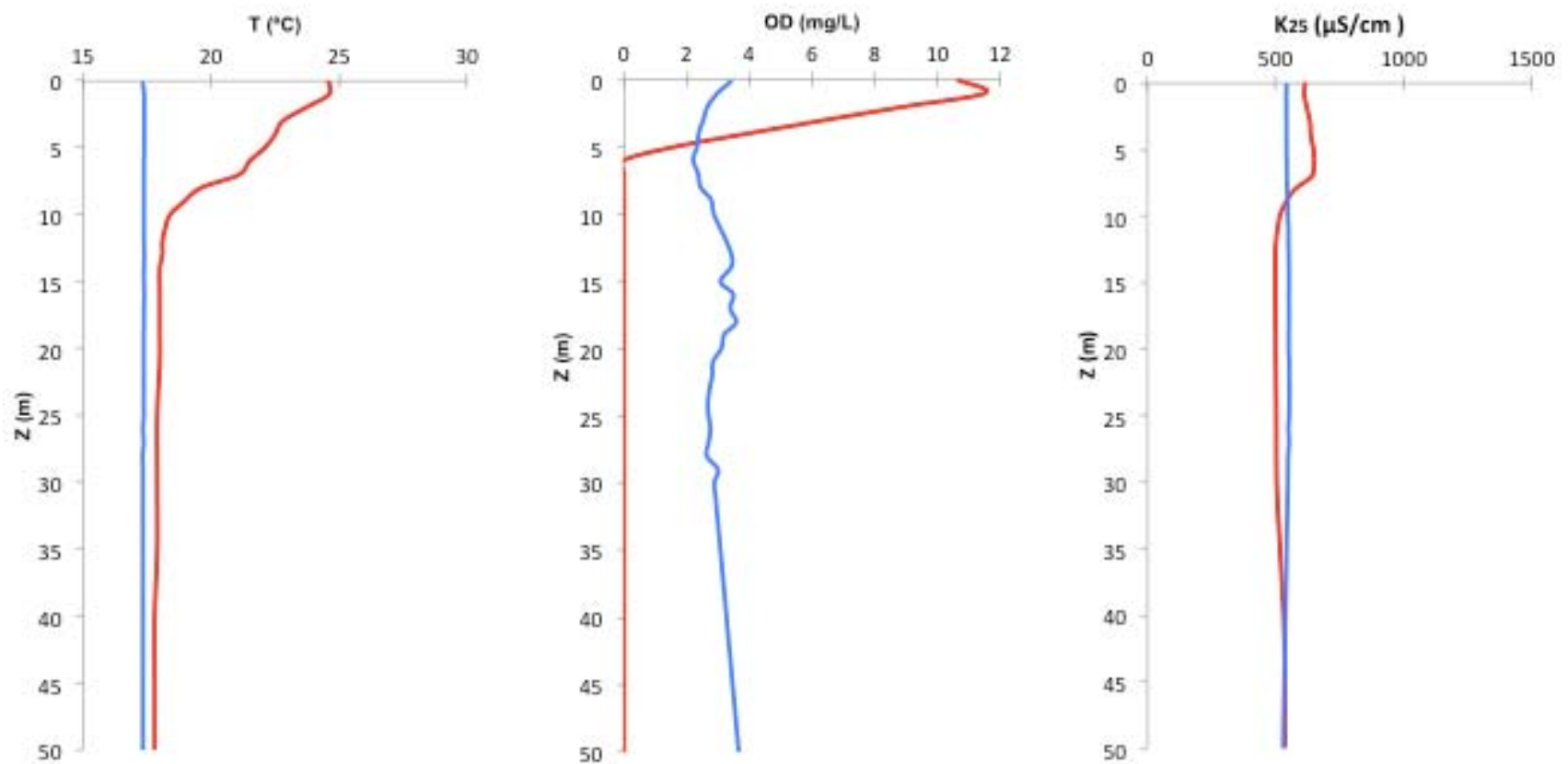


Figura 10. De izquierda a derecha, perfiles verticales de T, OD y K_{25} para ambas temporadas de muestreo (estratificación, línea roja y circulación, línea azul) registrados en Bosque Azul ejemplificando un lago impactado-profundo.

LAGOS PRÍSTINOS-SOMEROS

Durante el verano, Agua Tinta, Montebello y San José presentaron estratificación térmica mientras que Yalalush presentó una columna de agua homoterma. Salvo Yalalush, los lagos mostraron perfiles clinogrados de OD con condiciones anóxicas en el fondo; por otro lado, Yalalush presentó un perfil ortogrado con concentraciones > 4.4 mg/l en el fondo. Los perfiles de conductividad presentan condiciones relativamente homogéneos en toda la columna de agua.

Durante el invierno todos los lagos se encontraban en circulación con perfiles homogéneos de T, OD y K_{25} (Fig. 11).

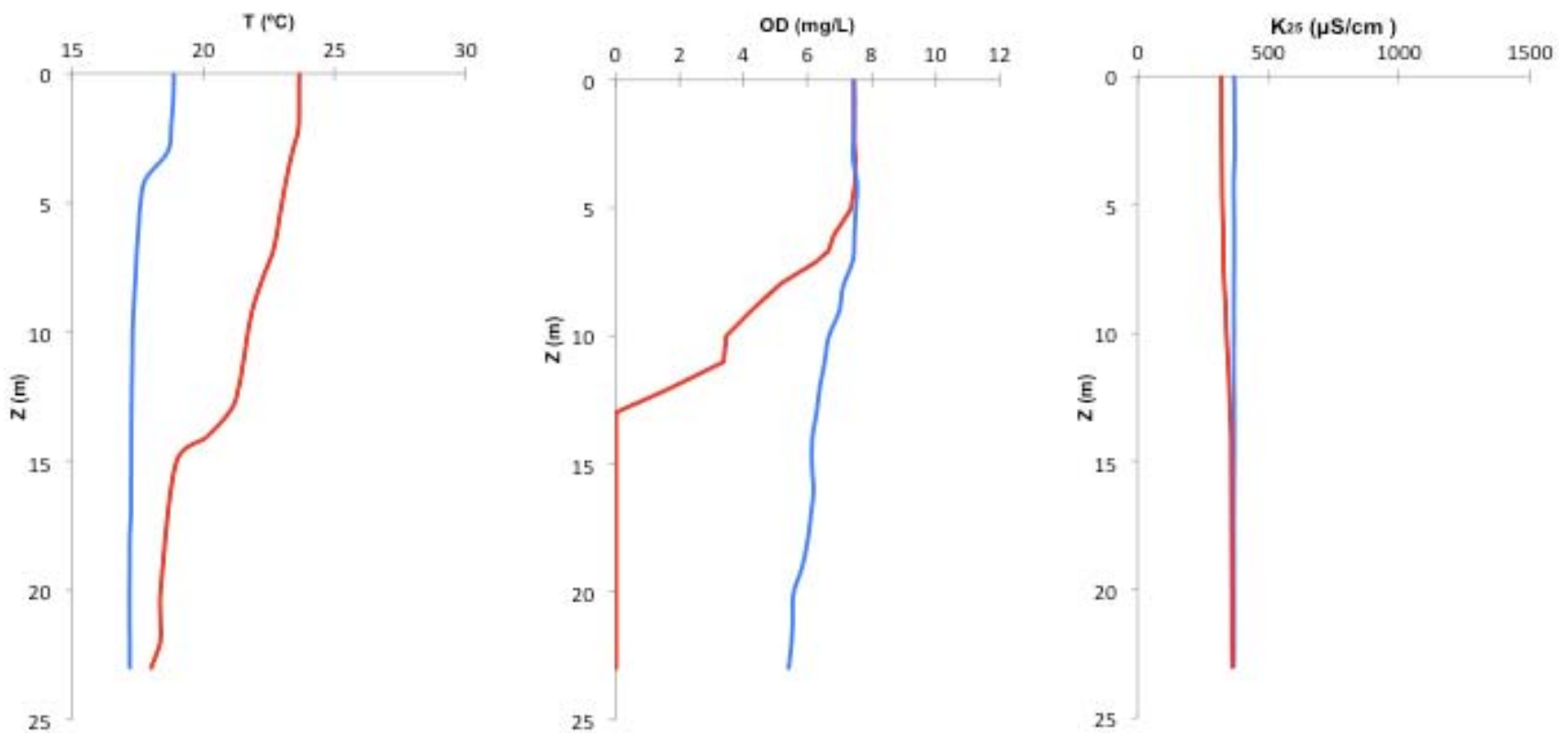


Figura 11. De izquierda a derecha, perfiles verticales de T, OD y K_{25} para ambas temporadas de muestreo (estratificación, línea roja y circulación, línea azul) registrados en San José ejemplificando un lago prístino-somero.

LAGOS PRÍSTINOS-PROFUNDOS

Los dos lagos, Pojoj y Tziscoa, presentaron estratificación térmica durante el verano (Fig. 12). Los perfiles de OD son clinogramas con condiciones anóxicas a partir de los 68 y 24 m de profundidad y hasta el fondo, respectivamente. La conductividad en Pojoj aumenta de alrededor de 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la porción superior a más de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la porción profunda. Durante el invierno los lagos presentan perfiles homogéneos lo que sugiere que estaban en circulación.

En general, los lagos prístinos (someros y profundos) tienen comportamientos similares. La excepción fue Yalalush que seguramente por su someridad durante el verano mostró perfiles de temperatura y oxígeno disuelto más o menos homogéneos a lo largo

de la columna de agua evidenciando que el lago estaba circulando en ambos muestreos.

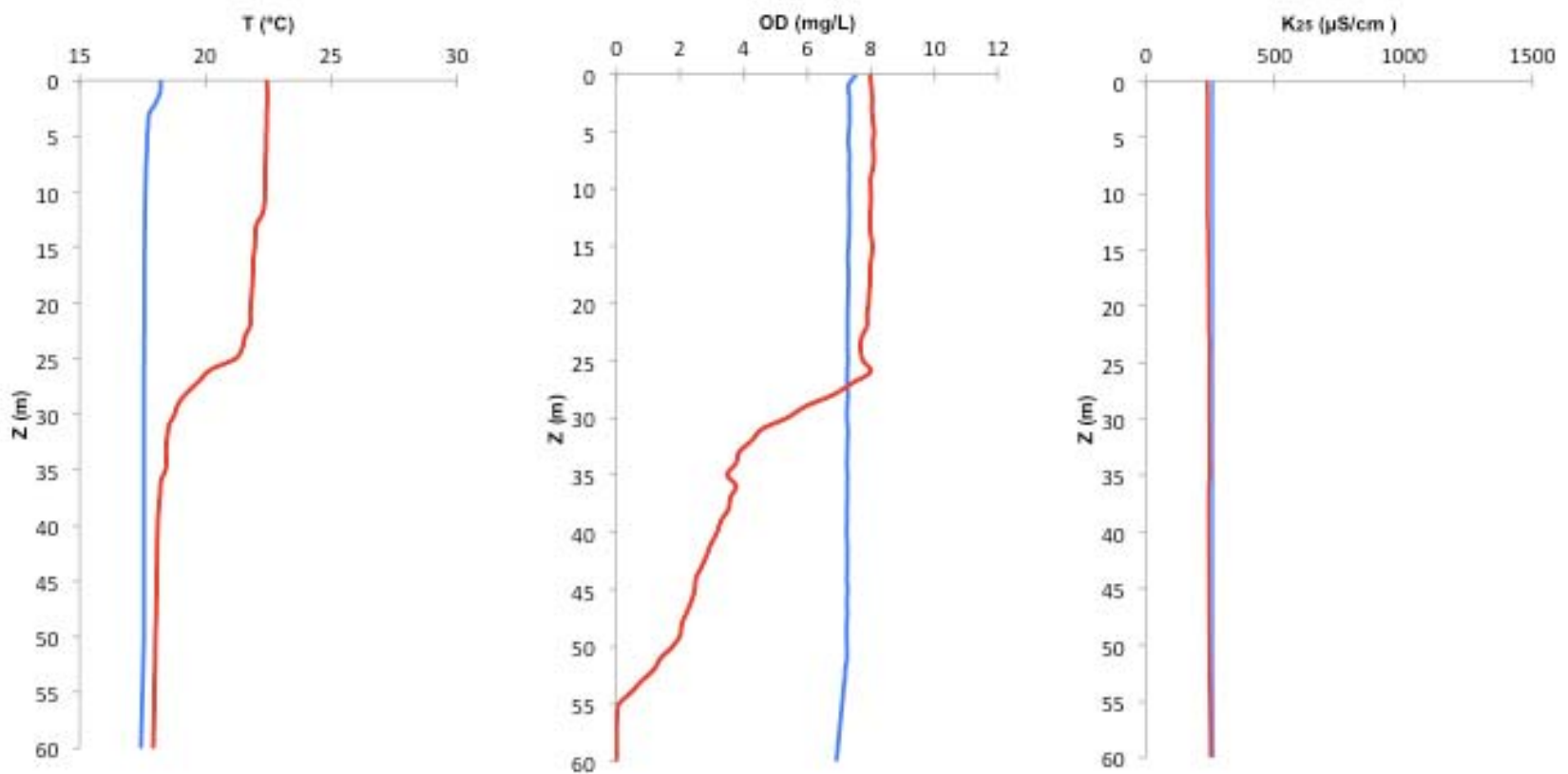


Figura 12. De izquierda a derecha, perfiles verticales de T, OD y K_{25} para ambas temporadas de muestreo (estratificación, línea roja y circulación, línea azul) registrados en Tziscoa ejemplificando un lago prístino-profundo.

SESTON

Durante la primera temporada de muestreo (verano) se obtuvieron concentraciones de seston en la columna agua que oscilaron entre 0.1 mg/L y 15.5 mg/L, con un promedio de 4.1 ± 1.8 mg/L. La concentración mínima (seston_{mín}) tuvo lugar en Pojoj y Yalalush (0.7 mg/L, a 40 y 5 m, respectivamente), mientras que la concentración máxima (seston_{máx}) se registró en Liquidambar (0 m). Por otro lado, durante el invierno la seston_{mín} fue de 0.2 mg/L y la seston_{máx} fue 11.0 mg/L. Estas fueron registradas en Yalalush

(13 m) y Chaj Chaj (1 m), respectivamente. La concentración promedio de seston durante esta temporada fue de 3.9 ± 0.9 mg/L (Fig. 13, Tabla 3).

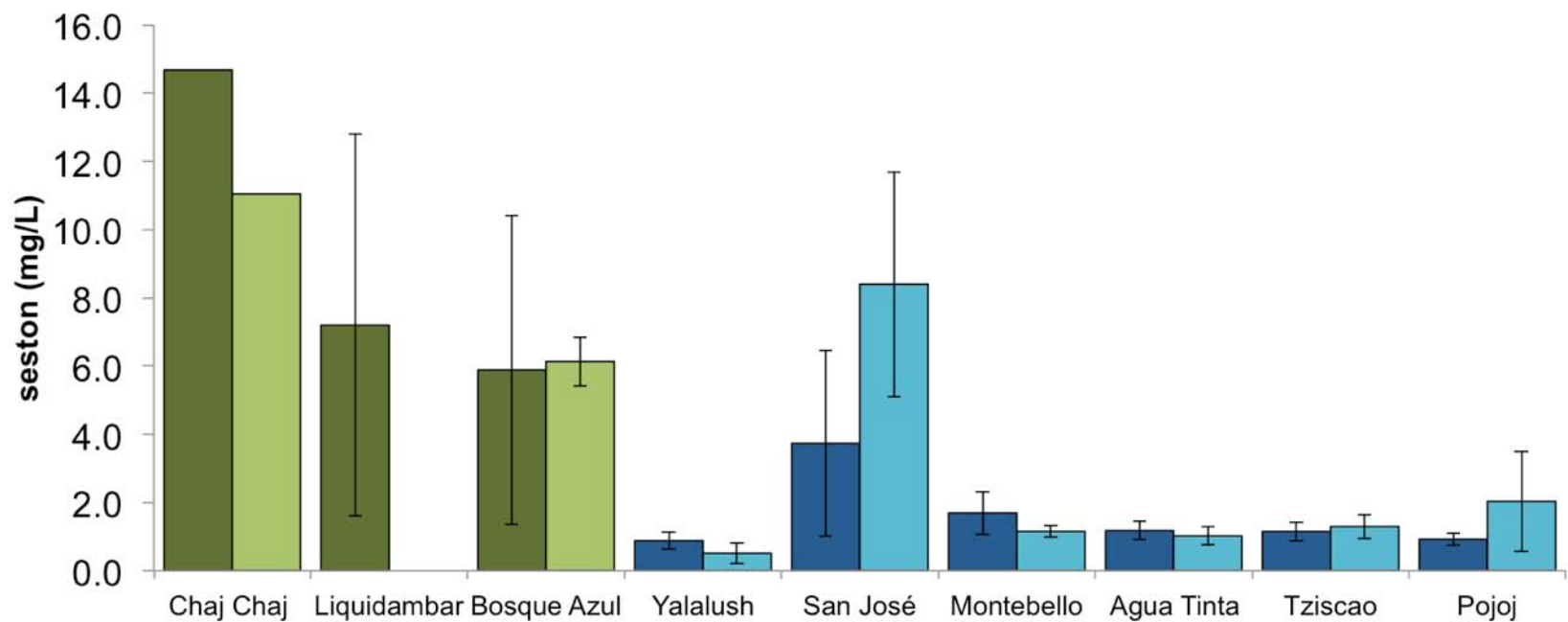


Figura 13. Concentración promedio (\pm d.e.) del seston durante el verano (color oscuro) y el invierno (color claro) en los lagos estudiados del PNLM. En verde se muestran los lagos considerados impactados y en azul los prístinos. (Chaj Chaj no presenta barras de d.e. ya

Tabla 3. Concentraciones promedio (\bar{X}), desviación estándar (d.e.), mínima y máxima de seston en la columna de agua de los lagos en estudio del PNLM. (Z profundidad media, - = sin datos). (En azul los lagos prístinos y en verde los impactados).

Lago	Z (m)	Verano				Invierno			
		Seston (mg/L)				Seston (mg/L)			
		X	d.e. (\pm)	Mín	Máx	X	d.e. (\pm)	Mín	Máx
Chaj Chaj	5.3	14.7	-	14.7	14.7	11.04	1.0	10.33	11.75
Liquidambar	11.2	7.2	5.6	3.7	15.5	-	-	-	-
Bosque Azul	20	5.9	4.5	0.1	10.4	6.1	0.7	5.3	6.8
Yalalush	9.9	0.9	0.2	0.7	1.3	0.5	0.3	0.2	0.7
San José	10.3	3.2	2.2	1	7.4	6.4	4.2	2.4	10.7
Montebello	12.3	1.6	0.6	1	2.4	1.3	0.2	0.9	1.4
Agua Tinta	14.7	1.2	0.3	0.8	1.4	1.0	0.3	0.8	1.4
Tzisco	28.9	1.2	0.3	0.8	1.5	1.3	0.4	1	1.9
Pojoj	35.2	0.9	0.3	0.7	1.4	2.0	1.3	0.8	3.9

LAGOS IMPACTADOS-SOMEROS

Chaj Chaj: Durante la estratificación la única concentración de seston medida fue 14.7 mg/L. En invierno la concentración promedio registrada fue de 11.04 ± 1.0 mg/L. El valor máximo obtenido fue 11.75 mg/L, mientras que el mínimo fue 10.33 mg/L.

Liquidambar: Durante la primera temporada de muestreo (verano), presentó un perfil vertical heterogéneo a lo largo de la columna de agua, la concentración promedio fue de 7.2 ± 5.6 mg/L. La seston_{mín} fue 3.7 mg/L y se registró en el fondo (15 m). Por otro seston_{máx} se registró en superficie, siendo esta 15.5 mg/L (Fig. 14).

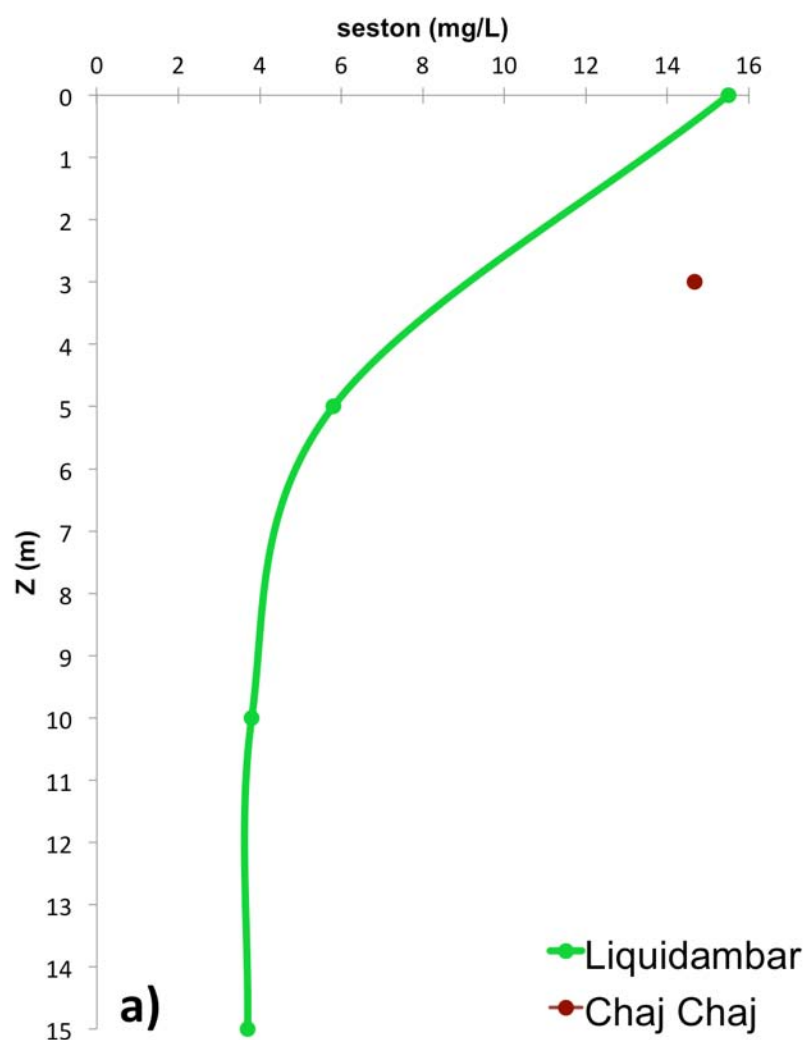


Figura 14. Distribución vertical del seston en Liquidambar y Chaj Chaj, lagos 'impactados-someros', durante la estratificación (a).

LAGOS IMPACTADOS-PROFUNDOS

Bosque Azul: durante el verano presentó un perfil heterogéneo, teniendo el mínimo de concentración cerca del fondo (0.1 mg/L) y el máximo en superficie (10.4 mg/L). El promedio de seston en esta temporada fue de 5.9 ± 4.5 mg/L. Durante la temporada invernal el perfil presentado un perfil homogéneo, seston_{mín} (5.3 mg/L) se registró en superficie y seston_{máx} (6.8 mg/L) se presentó aproximadamente a 20 m de profundidad. El promedio de seston durante el invierno fue de 6.1 ± 0.7 mg/L (Fig. 15).

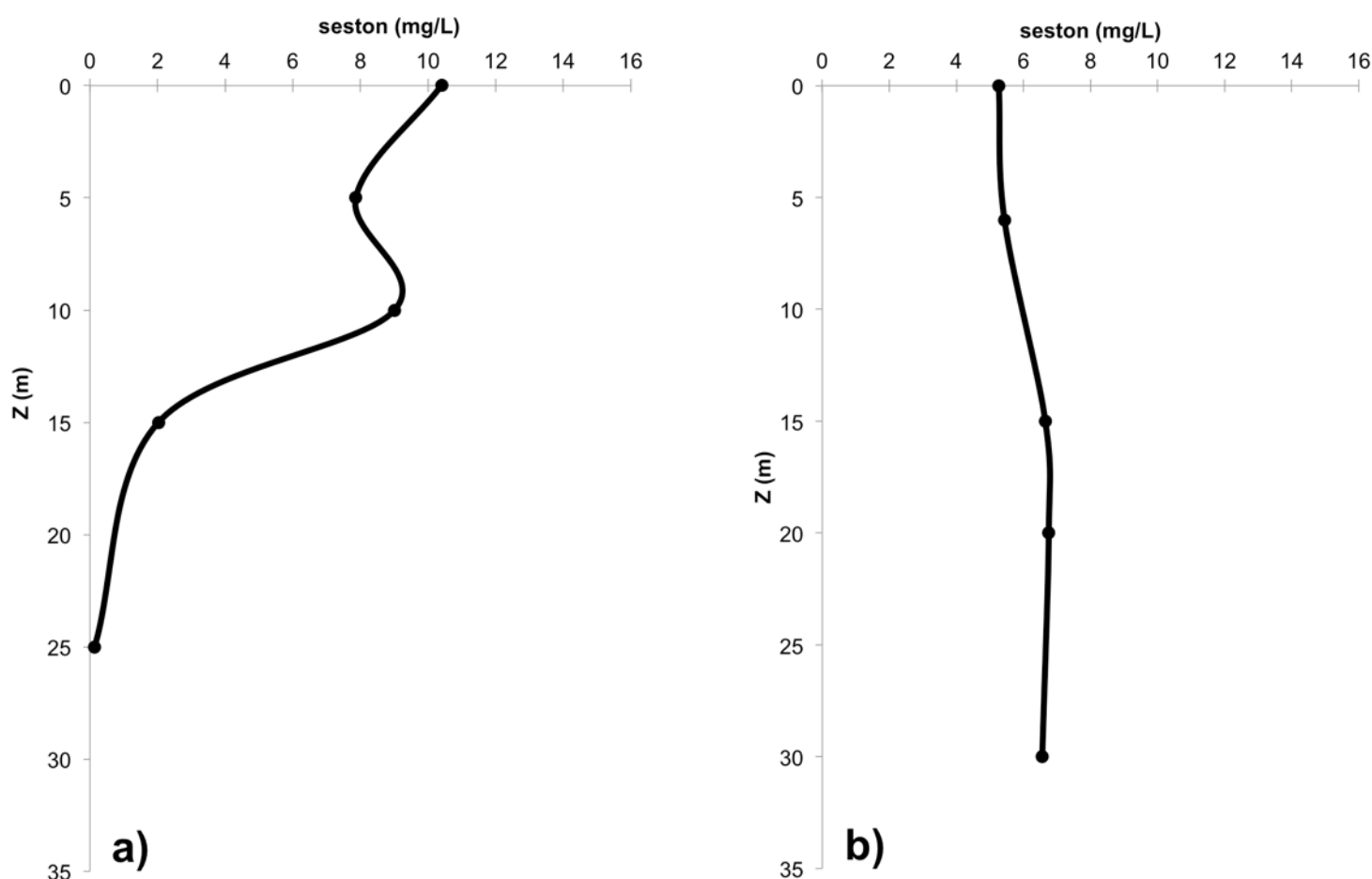


Figura 15. Distribución vertical del seston en Bosque Azul, lago 'impactado-profundo'; durante la estratificación (a) y la circulación (b).

LAGOS PRÍSTINOS-SOMEROS

Yalalush: durante la primera temporada de muestreo (verano) se presentó un perfil vertical homogéneo a lo largo de la columna de agua con una concentración prome-

dio de 0.9 ± 0.2 mg/L. La $\text{seston}_{\text{mín}}$ fue 0.7 mg/L y se registró en la superficie mientras que la $\text{seston}_{\text{máx}}$ se registró a 10 m de profundidad (1.3 mg/L). Durante el invierno se registró un perfil homogéneo, la concentración promedio fue 0.5 ± 0.3 mg/L, $\text{seston}_{\text{mín}}$ 0.2 mg/L y $\text{seston}_{\text{máx}}$ 0.7 mg/L, siendo estas últimas las concentraciones más bajas registradas de todos los lagos (Fig. 16, Tabla 3).

San José: durante el verano se presentó un perfil vertical heterogéneo a lo largo de la columna de agua; la concentración promedio fue de 3.2 ± 2.6 mg/L. La $\text{seston}_{\text{mín}}$ fue 1 mg/L y se registró a 5 m de profundidad. Por otro lado $\text{seston}_{\text{máx}}$ se registró en el fondo (7.4 mg/L). Durante el invierno se registró un perfil heterogéneo, la concentración promedio fue 6.4 ± 4.2 mg/L, $\text{seston}_{\text{mín}}$ 2.4 mg/L y $\text{seston}_{\text{máx}}$ 10.7 mg/L, siendo estas últimas las concentraciones más altas registradas en un lago prístino (Fig. 16, Tabla 3).

Montebello: en el verano se presentó un perfil vertical homogéneo a lo largo de la columna de agua, con valores máximos cerca de la superficie y con una concentración promedio de 1.6 ± 0.6 mg/L. La $\text{seston}_{\text{mín}}$ fue de 1 mg/L y se registró en la superficie y en el fondo, mientras que $\text{seston}_{\text{máx}}$ se encontró aproximadamente a los 5 m de profundidad, siendo ésta 2.4 mg/L. Durante el invierno el perfil fue homogéneo con una concentración promedio de 1.2 ± 0.2 mg/L, $\text{seston}_{\text{mín}}$ 0.9 mg/L y $\text{seston}_{\text{máx}}$ 1.4 mg/L (Fig. 16, Tabla 3).

Agua Tinta: en el verano se presentó un perfil homogéneo, teniendo el mínimo de concentración en superficie (0.8 mg/L) y el máximo en el fondo (1.4 mg/L). El promedio de seston en esta temporada fue de 1.2 ± 0.3 mg/L. Durante la temporada invernal el perfil fue relativamente homogéneo, el máximo de concentración se presentó aproximadamente a los 10 m de profundidad y el mínimo en el fondo. El promedio de seston durante el invierno fue de 1.0 ± 0.3 mg/L (Fig. 16, Tabla 3).

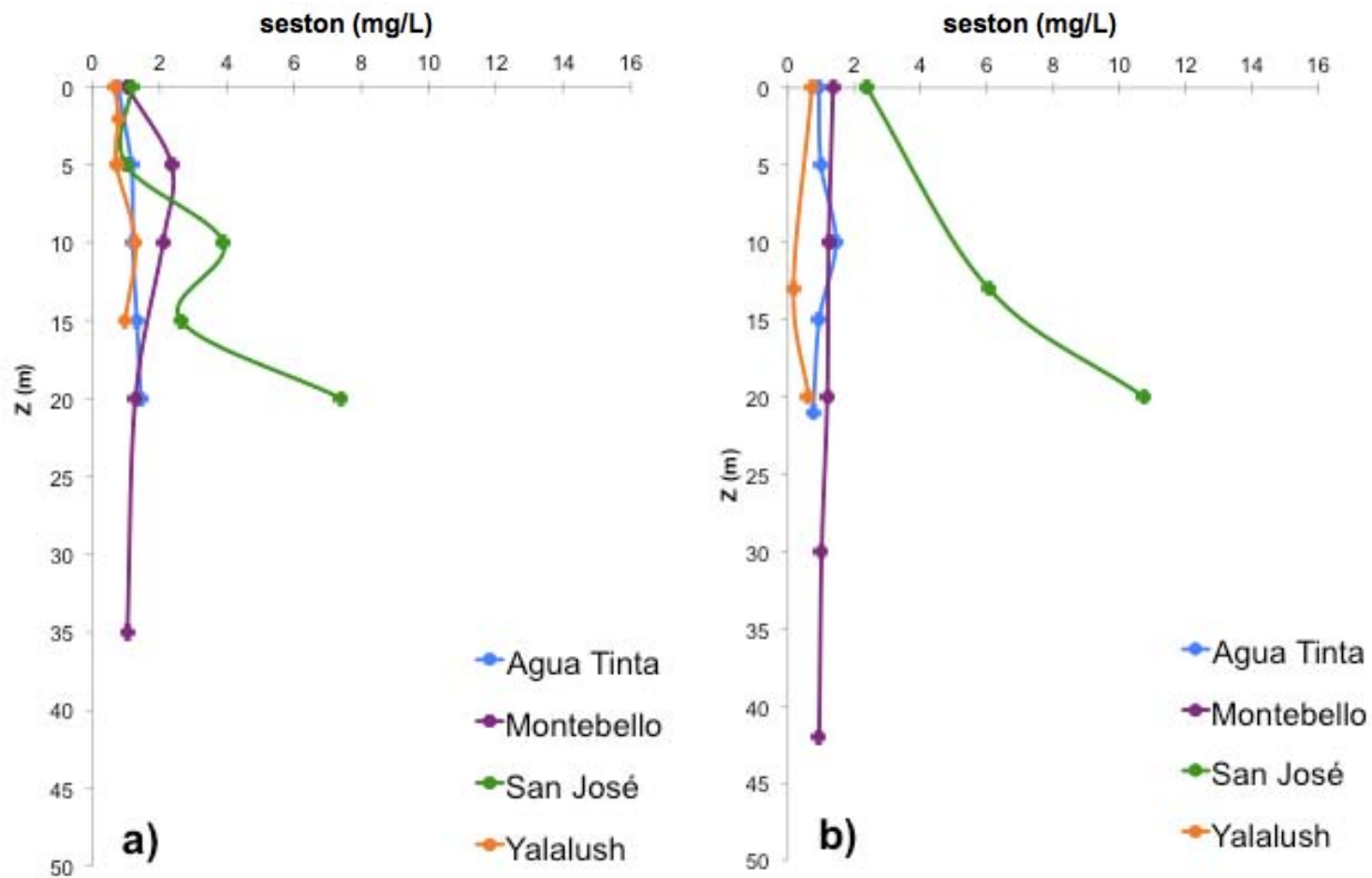


Figura 16. Distribución vertical del seston en los lagos “prístinos-someros” (Agua Tinta, Montebello, San José y Yalalush) durante la estratificación (a) y la circulación (b).

LAGOS PRÍSTINOS-PROFUNDOS

Tzisco: en el verano presentó un perfil homogéneo, teniendo el máximo de concentración en superficie (1.5 mg/L) y el mínimo a una profundidad de 60 m aproximadamente (0.8 mg/L). El promedio de seston en esta temporada fue de 1.2 ± 0.3 mg/L. Durante la temporada invernal el perfil presentado es homogéneo, el máximo de concentración (1.9 mg/L) se presentó en el fondo, aproximadamente a 50 m de profundidad y el mínimo (1 mg/L) se registró en superficie. El promedio de seston durante el invierno fue de 1.3 ± 0.4 mg/L (Fig. 17, Tabla 3).

Pojoj: durante el verano presentó un perfil homogéneo, teniendo seston_{mín} a una profundidad de 40 m aproximadamente (0.7 mg/L) y seston_{máx} en superficie (1.4 mg/L). El promedio de seston en esta temporada fue de 0.9 ± 0.3 mg/L. Durante la tempora-

da invernal el perfil presentado es heterogéneo, seston_{mín} (0.8 mg/L) se presentó aproximadamente a 60 m de profundidad y seston_{máx} (3.9 mg/L) a 30 m de profundidad. El promedio de seston durante el invierno fue de 2.0 ± 1.3 mg/L (Fig. 17).

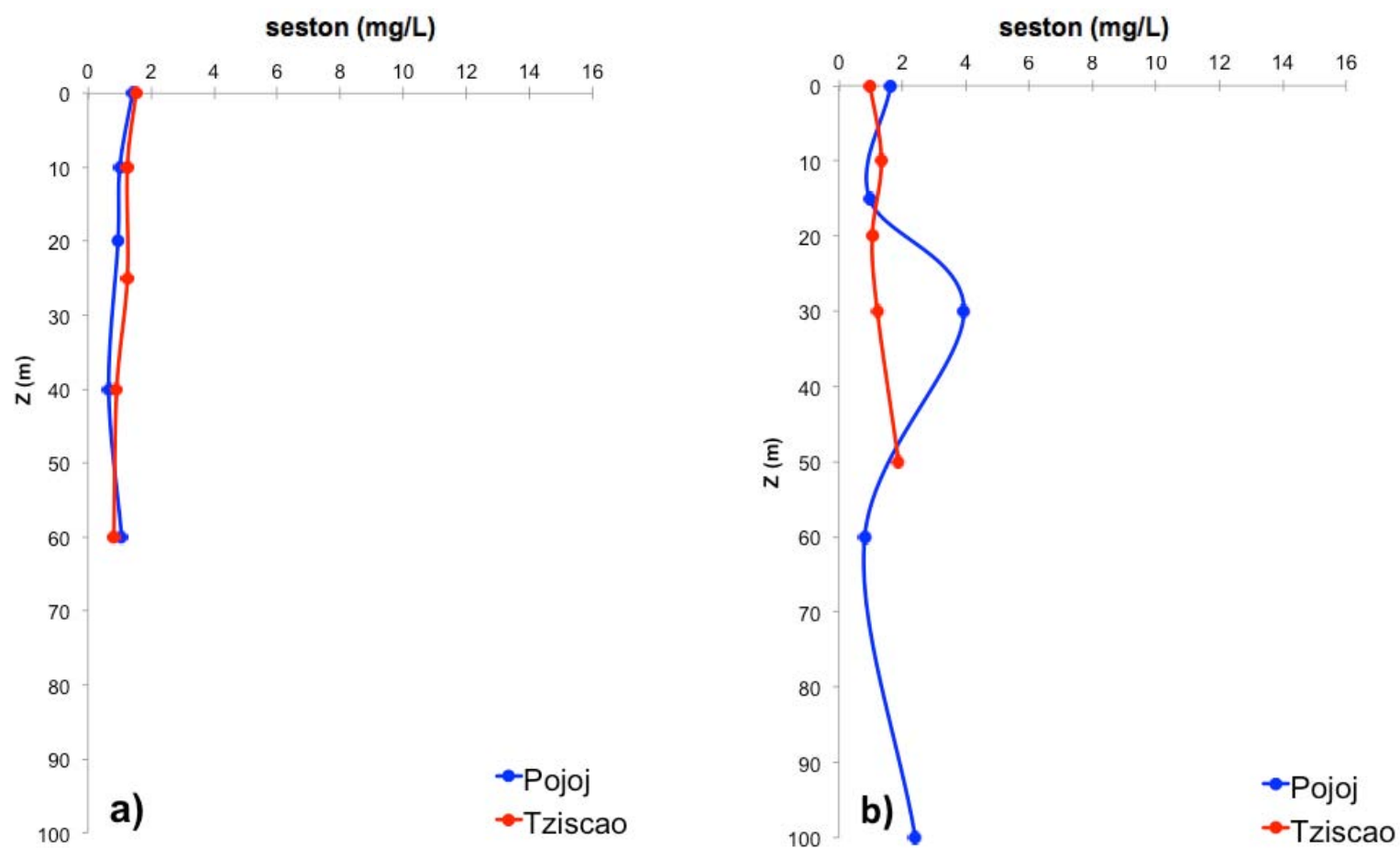


Figura 17. Distribución vertical del seston en los lagos “prístinos-profundos” (Pojoj y Tzisco) durante la estratificación (a) y la circulación (b).

Al comparar la distribución vertical del seston en los lagos prístinos con los impactados se puede observar que los impactados presentan la concentración máxima de seston en superficie. A diferencia, los prístinos muestran la concentración máxima a media agua.

CARBONO

En cuanto a la fracción orgánica del carbono particulado (COP) durante el verano (2014), la concentración mínima (COP_{\min}) fue 0.193 mg/L y la máxima (COP_{\max}) de 3.9 mg/L, estas concentraciones se midieron en Yalalush y Liquidambar, respectivamente. El promedio de la concentración de COP durante el verano fue de 0.93 ± 0.96 mg/L. Así mismo, durante el invierno la concentración promedio de COP fue 0.84 ± 1.01 mg/L, la COP_{\min} fue registrada en Pojoj (0.239 mg/L) y COP_{\max} fue registrada en Bosque Azul (3.6 mg/L) (Fig. 18).

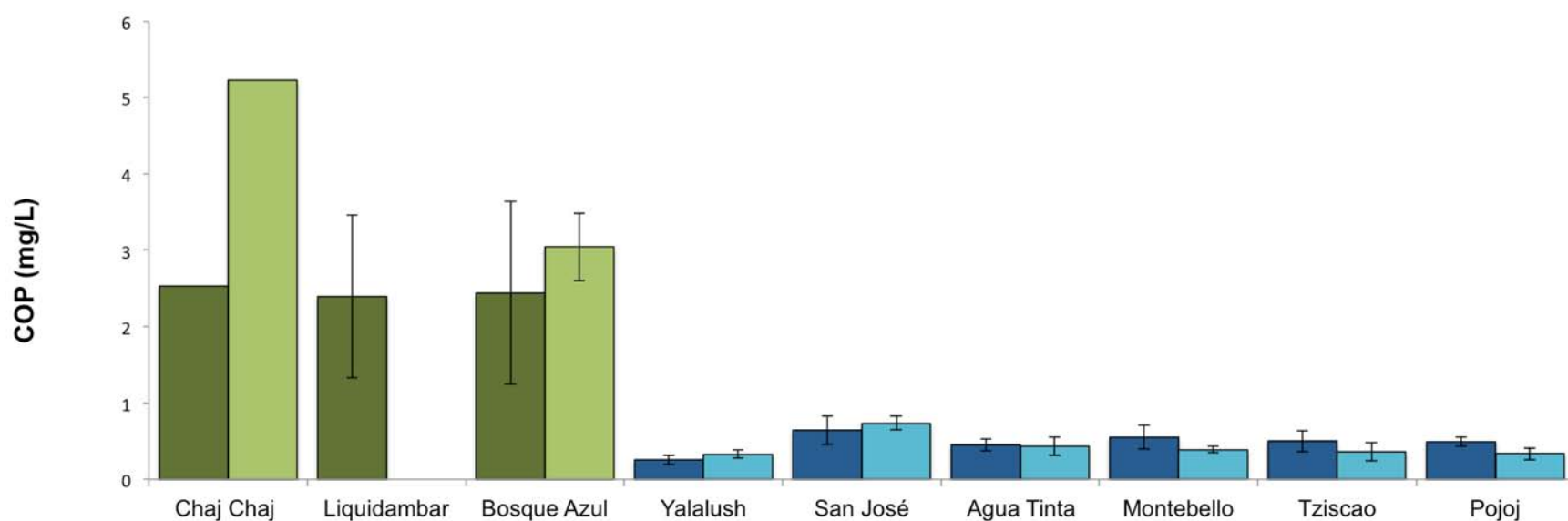


Figura 18. Concentración promedio (\pm d.e.) del COP durante el verano (color oscuro) y el invierno (color claro) en los lagos estudiados del PNLM. En verde se muestran los lagos considerados impactados y en azul los prístinos.

Tabla 4. Concentraciones promedio (X) en mg/L, desviación estándar (d.e.), mínima y máxima de COP en la columna de agua de los lagos en estudio del PNLM. (- = sin datos). (En azul los lagos prístinos y en verde los impactados).

Lago	Verano (2014)				Invierno (2015)			
	X	d.e	Mín	Máx	X	d.e.	Mín	Máx
Chaj Chaj	2.53	-			5.23	-	-	-
Liquidambar	2.33	1.06	2.09	3.97	-	-	-	-
Bosque Azul	2.44	1.20	0.88	3.63	3.04	0.44	2.40	3.60
Yalalush	0.28	0.06	0.19	0.35	0.33	0.05	0.29	0.39
San José	0.64	0.19	0.38	0.86	0.74	0.09	0.64	0.80
Montebello	0.55	0.15	0.49	0.82	0.39	0.04	0.34	0.43
Agua Tinta	0.45	0.08	0.37	0.57	0.43	0.12	0.29	0.57
Tziscoa	0.50	0.14	0.36	0.66	0.36	0.13	0.25	0.57
Pojoj	0.49	0.06	0.48	0.57	0.34	0.08	0.24	0.42

LAGOS IMPACTADOS-SOMEROS

Chaj Chaj: durante el verano presentó 2.53 mg COP/L. Por otro lado, durante la circulación presentó 5.23 mg COP/L (Fig. 19).

Liquidambar: la concentración promedio de COP fue 2.39 ± 1.06 mg/L, $COP_{\text{mín}}$ 1.71 mg/L y $COP_{\text{máx}}$ 3.97 mg/L, estos dos últimos se registraron en la capa de fondo y en superficie, respectivamente (Fig. 19).

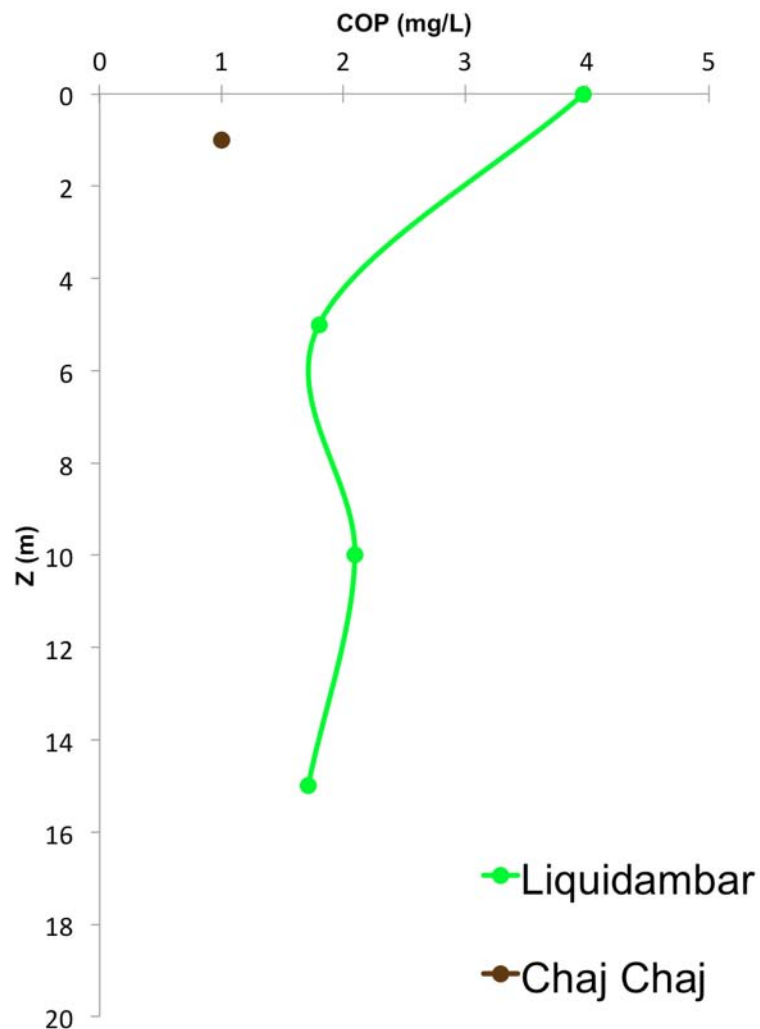


Figura 19. Distribución vertical del COP en Liquidambar y Chaj Chaj, lagos ‘impactados-someros’, durante la estratificación.

LAGOS IMPACTADOS-PROFUNDOS

Bosque Azul: durante el verano, la concentración promedio de COP fue 2.44 ± 1.20 mg/L con un intervalo de $COP_{\text{mín}} 0.88$ mg/L y $COP_{\text{máx}} 3.63$ mg/L, estos dos fueron medidos a 15 m (capa de fondo) y en superficie, respectivamente. Para el invierno los valores registrados fueron los siguientes: $COP_{\text{mín}} 2.40$ mg/L (capa de fondo), $COP_{\text{máx}} 3.60$ $\mu\text{g/L}$ (superficie) y con un promedio de 3.04 ± 0.44 mg COP/L (Fig. 20).

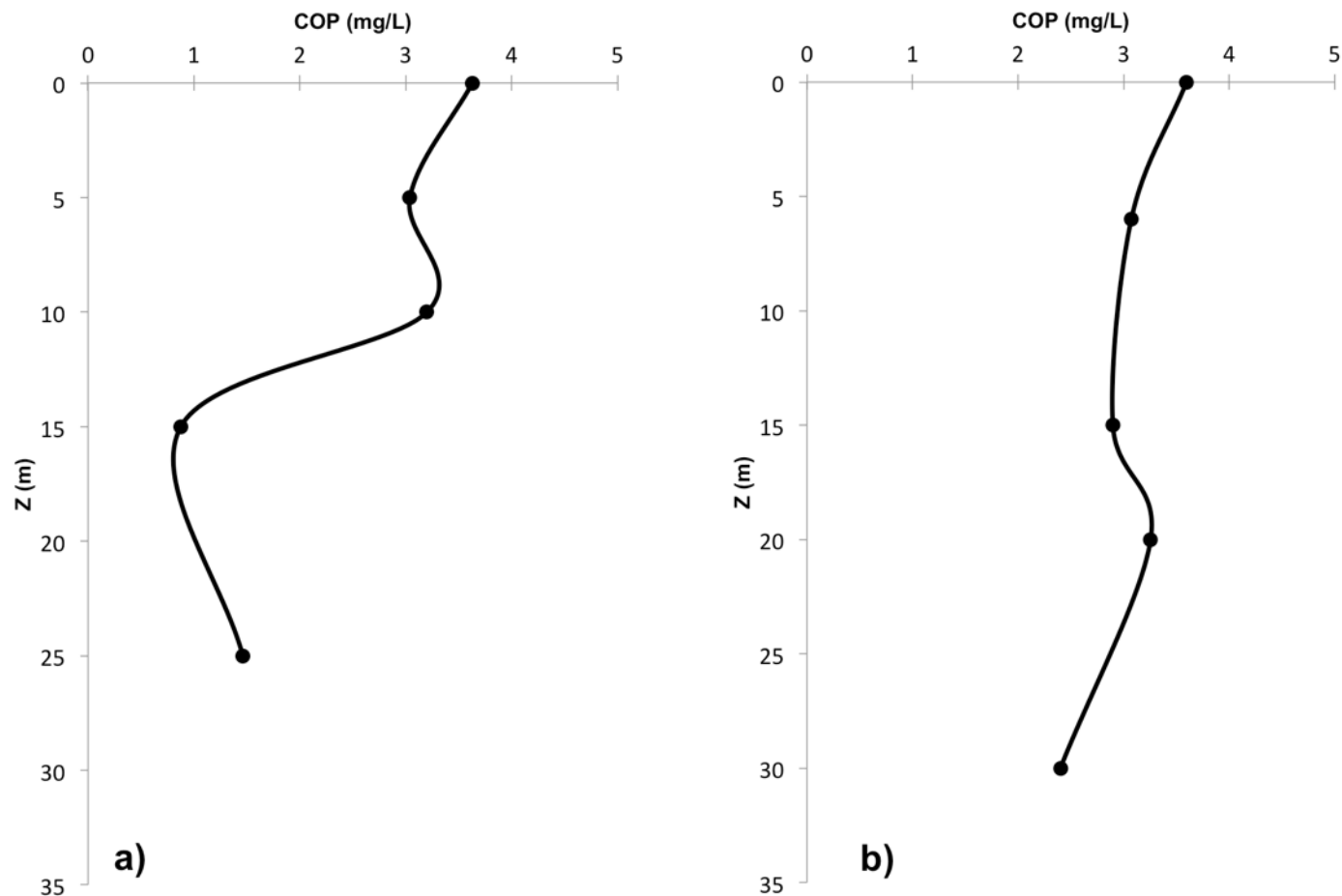


Figura 20. Distribución vertical del COP en Bosque Azul, lago 'impactado-profundo'; durante la estratificación (a) y la circulación (b).

LAGOS PRÍSTINOS-SOMEROS

Yalalush: la concentración promedio de COP durante el verano fue de 0.26 ± 0.06 mg/L, $COP_{\text{mín}}$ 0.19 mg/L, registrado a 10 m de profundidad (capa de fondo) y $COP_{\text{máx}}$ 0.35 mg/L, medido en superficie. Durante la temporada invernal a 12 m de profundidad (capa de fondo) fue registrado $COP_{\text{máx}}$ con 0.39 mg/L y a 5 m (media agua) $COP_{\text{mín}}$ con 0.29 $\mu\text{g/L}$; la concentración promedio de COP fue 0.33 ± 0.05 mg/L (Fig. 21).

San José: durante el verano el COP promedio fue 0.64 ± 0.19 mg/L, el $COP_{\text{mín}}$ de 0.38 mg/L en superficie y el $COP_{\text{máx}}$ de 0.89 mg/L a 10 m de profundidad (media agua). Durante la temporada invernal a 10 m de profundidad (media agua) fue medido el $COP_{\text{mín}}$

(0.34 mg/L) y a 20 m (capa de fondo) el COP_{máx} (0.43 mg/L), el promedio fue 0.39 ± 0.04 mg/L (Fig. 21).

Montebello: durante el verano se obtuvieron los siguientes valores para el COP: 0.55 ± 0.15 mg/L de concentración promedio, COP_{mín} 0.46 mg/L a 10 de profundidad (media agua) y el COP_{máx} 0.82 mg/L registrado a 20 m de profundidad (capa de fondo). Durante la temporada invernal a 10 m de profundidad (media agua) fue registrado el COP_{mín} (0.34 mg/L) y en superficie el COP_{máx} (0.43 mg/L), el promedio fue 0.39 ± 0.04 mg/L (Fig. 21).

Agua Tinta: la concentración promedio de COP durante la estratificación fue 0.45 ± 0.08 mg/L, el COP_{mín} fue medido en la superficie (0.38 mg/L) y el COP_{máx} en el fondo del lago (0.58 mg/L). Durante la circulación las concentraciones de COP fluctuaron entre un mínimo de 0.27 mg/L (5 m de profundidad) y un máximo de 0.57 mg/L a media agua. El promedio durante esta temporada fue 0.43 ± 0.12 mg COP/L (Fig. 21).

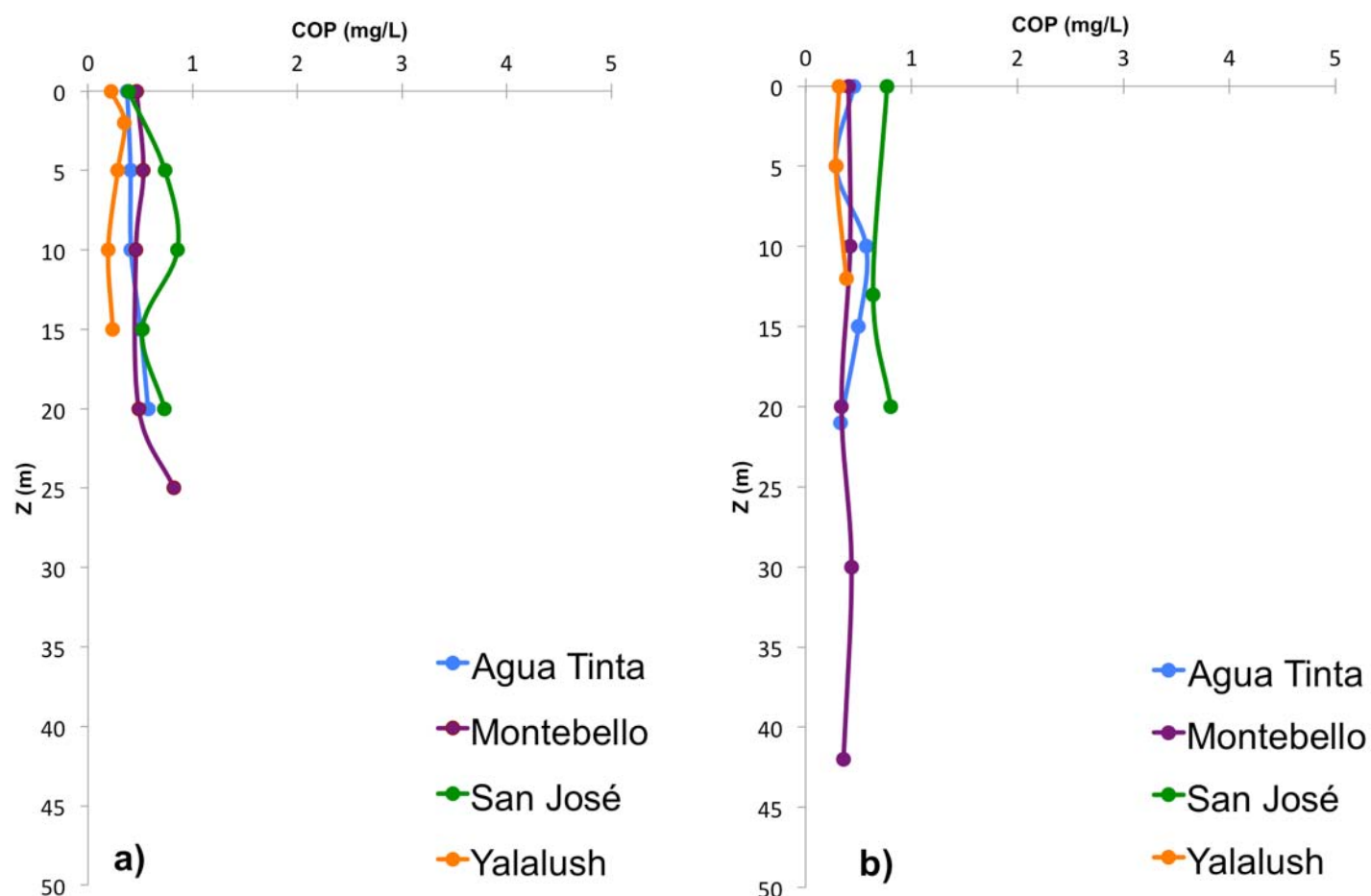


Figura 21. Distribución vertical del COP en los lagos “prístinos-someros” (Agua Tinta Montebello, San José y Yalalush) durante la estratificación (a) y la circulación (b).

Tziscoa: en verano, la concentración promedio de COP fue 0.50 ± 0.14 mg/L, COP_{\min} 0.36 mg/L, registrado en la capa de fondo y COP_{\max} 0.66 mg/L, registrado en superficie. Durante la temporada invernal los valores obtenidos fueron menores, a 25 m de profundidad (media agua) fue medida COP_{\max} (0.57 mg/L) y en superficie COP_{\min} (0.252 mg/L), la concentración promedio fue 0.36 ± 0.13 mg COP/L (Fig. 22).

Pojoj: durante el verano presentó los siguientes valores: concentración promedio de 0.49 ± 0.06 mg COP/L, COP_{\min} 0.47 mg/L y COP_{\max} 0.57 mg/L, estos dos últimos medidos en la superficie y en media agua, respectivamente. Durante la temporada invernal el los valores registrados fueron los siguientes, COP_{\max} 0.42 mg/L (capa de fondo) y COP_{\min} 0.24 mg/L (media agua) y la concentración promedio fue 0.34 ± 78 mg COP/L (Fig. 22).

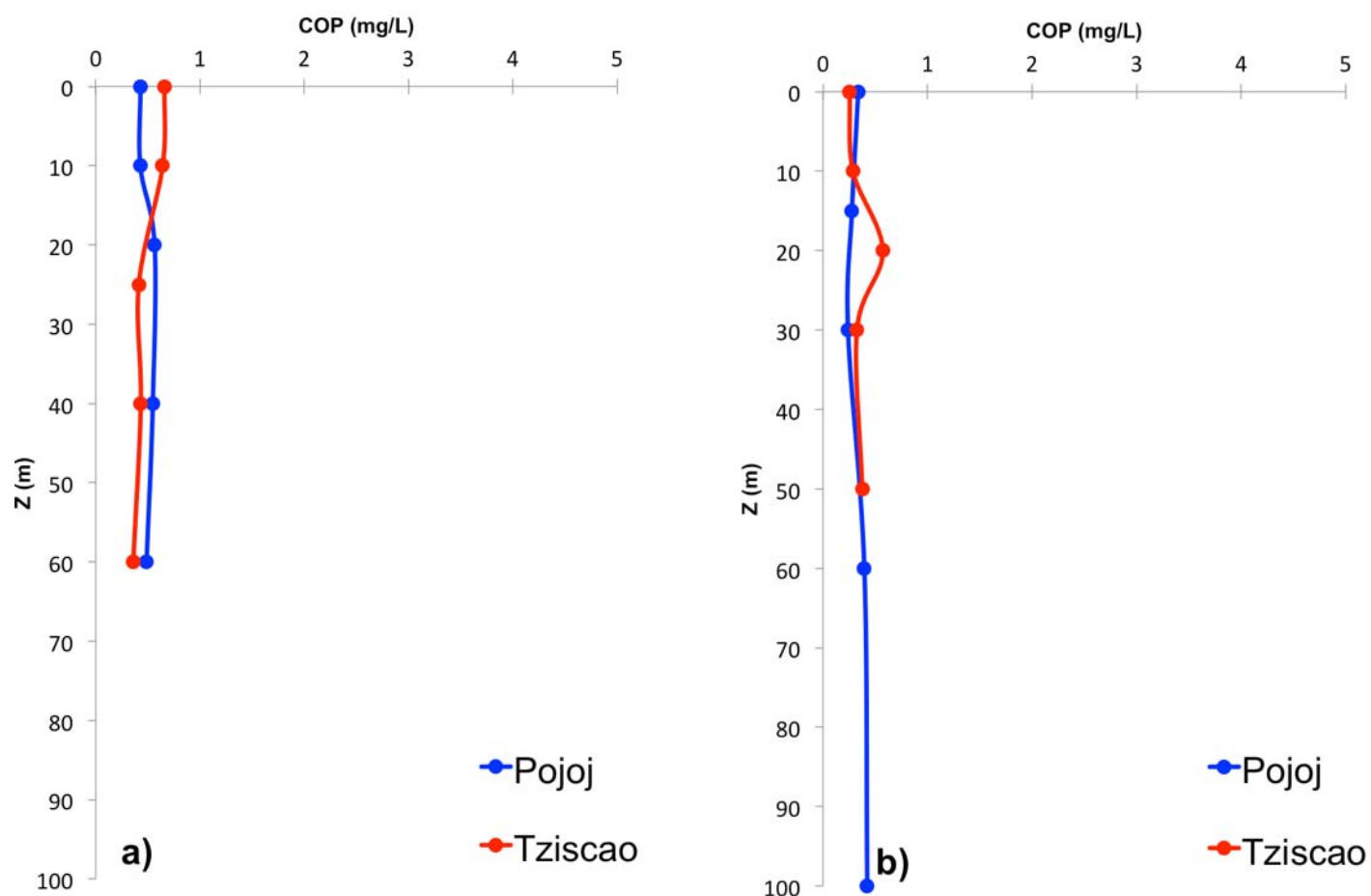


Figura 22. Distribución vertical del COP en lagos 'prístinos-profundos': Pojoj (línea azul) y Tziscoa (línea verde); durante la estratificación (a) y la circulación (b).

9. DISCUSIÓN

Al comparar las variables ambientales medidas en los lagos prístinos e impactados se reconocieron diferencias en los perfiles de T y OD, ya que los primeros, cuando están estratificados, muestran clinas profundas y amplias con capas de mezcla extensas, mientras que en los impactados las clinas son más superficiales y estrechas y la capa de mezcla es menor. Lo anterior, posiblemente, está relacionado con que los lagos impactados al presentar una mayor cantidad de material particulado, resultan más turbios ocasionando una rápida absorción de la luz, con el resultado de una menor penetración de la radiación solar y por ende la formación de termoclinas más superficiales.

De acuerdo con Alcocer et al. (2000), los patrones de mezcla de los lagos mexicanos se pueden dividir en dos: monomícticos cálidos, los que son profundos y de superficie reducida y polimícticos cálidos que son someros y extensos. A pesar de que sólo se cuenta con dos muestreos estos están ubicados en épocas estratégicas del ciclo anual (verano e invierno) los lagos profundos, tanto impactados como prístinos, resultaron ser monomícticos cálidos, así como algunos de los lagos clasificados *a priori* como someros (Agua Tinta, Chaj Chaj, Montebello y San José), concordando con la definición de Lewis (1996) quién menciona que los lagos monomícticos cálidos son aquellos en donde la estratificación térmica es estable la mayor parte de un ciclo anual y se mezclan una vez por año en coincidencia con el invierno hemisférico. Por otro lado, se consideró polimíctico cálido únicamente a Yalalush dado que de acuerdo a sus perfiles de T y OD estuvo circulando en ambas temporadas de muestreo.

En cuanto a la concentración de OD, durante el verano todos los lagos presentaron anoxia en el fondo, excepto Yalalush porque se encontró circulando todo el tiempo. Lewis (1996) afirma que el desarrollo de un hipolimnion anóxico es más común en lagos tropicales debido a que presentan temperaturas hipolimnéticas más elevadas, oca-

sionando una menor reserva de oxígeno disuelto así como una tasa de descomposición de materia orgánica y metabolismo microbiano acelerados. Por lo anterior, a excepción de Yalalush que presentó un perfil vertical ortogrado, todos los demás lagos presentaron en verano perfiles verticales de distribución clinogrados, condición caracterizada por un contenido mayor de oxígeno cerca de la superficie, donde se desarrolla la actividad fotosintética y un hipolimnion anóxico. Durante la circulación, todos los lagos presentaron perfiles verticales homogéneos.

En general e independientemente de su profundidad, los valores de K_{25} son más elevados en los lagos impactados que en los lagos prístinos. Durante el invierno, los lagos presentaron perfiles homogéneos a lo largo de la columna de agua lo que indica que la mezcla de la columna fue eficiente. Por otro lado, en el verano, en algunos lagos (Agua Tinta, Montebello y Pojoj) se puede observar un incremento de K_{25} conforme la profundidad aumenta, lo que probablemente indique la presencia de dos fuentes de abastecimiento de agua diferentes: una procedente de la lluvia por superficie y otra profunda vía subterránea/subacuática. Se pudo observar que el grosor de la ZEU es aproximadamente 10 veces menor en los lagos impactados en comparación a los prístinos, independientemente de su profundidad. Lo anterior seguramente está asociado, como se mencionó anteriormente, con la mayor turbidez de los impactados.

Se ha encontrado que ZEU disminuye durante la época de mezcla en algunos lagos, por ejemplo, en el Lago Valencia, Venezuela; la disminución es tal que rara vez se encuentra por debajo de los 6 m, por lo que no se puede desarrollar el fitoplancton, de esta manera la turbidez presentada es de origen terrígena (Lewis, 1986). Un comportamiento similar fue observado en Tzisco, San José y Agua Tinta, lo que probablemente indique que la turbidez en esta época es, por lo menos en parte, de origen terrígeno.

En los lagos monomícticos cálidos, normalmente en invierno cuando circulan aumenta la turbidez biogénica posiblemente asociada a que la producción primaria es favoreci-

da por la recirculación de nutrientes; sin embargo, en Bosque Azul, Montebello y Yalalush la ZEU aumentó durante el invierno presentando una ZEU más amplia.

La distribución del seston en los lagos es el resultado de la interacción de procesos biológicos, tales como la producción y descomposición de materia orgánica, y de procesos físicos como la sedimentación, la resuspensión y el transporte horizontal (Callieri et al., 1991).

Al comparar los lagos considerados prístinos (Agua Tinta, Montebello, Pojoj, San José, Tzisco y Yalalush) con los impactados (Bosque Azul, Chaj Chaj y Liquidambar), en ambas temporadas se puede observar que la concentración de seston en la columna de agua es cerca de diez veces mayor en los lagos impactados, siendo Chaj Chaj el lago que presenta la mayor concentración. A pesar de que San José fue clasificado a priori como prístino por su color azul turquesa, presentó concentraciones de seston muy similares a los registrados en los lagos impactados. Sin embargo, la concentración de COP en San José solo es apenas mayor que en lagos prístinos y mucho menor que en lagos impactados. Lo anterior confirma que en San José el seston que se presenta es esencialmente de origen terrígeno y no producto de la producción primaria fitoplanctónica como en los otros lagos impactados.

Existen pocas investigaciones sobre el seston de lagos tropicales; por lo anterior, se realizaron comparaciones con lagos de origen, nivel trófico y ubicación latitudinal diferente. En la tabla 5 se puede observar que los lagos considerados prístinos (profundos y someros) poseen valores de concentración de seston similares a lagos ultra-oligotróficos y oligotróficos (a excepción de San José por las razones mencionadas). En cambio, los lagos impactados (profundos y someros) tienen concentraciones superiores a lagos considerados eutróficos. Por ello se puede pensar que los lagos prístinos poseen un estado trófico cercano a la ultraoligotrofia-oligotrofia y los lagos impactados a la eutrofia-hipereutrofia, siempre y cuando se considere que el seston presenta una composición esencialmente biológica (i.e., fitoplancton).

Tabla 5. Masa total del seston (mg/L) en distintos lagos con diferente ubicación latitudinal y estado trófico. (En azul los lagos prístinos y en verde los impactados).

Lago	Nivel Trófico	Región	Seston (mg/L)	Referencia
Alchichica (México)	Oligotrófico	Tropical	5.7	Alcocer <i>et al.</i> , 2007
El Sol (México)	Oligotrófico	Tropical	0.73 - 3.39	Hernández, 2008
La Luna (México)	Ultra-oligotrófico	Tropical	0.25 - 1.53	Hernández, 2008
Grande (Chile)	Eutrófico	Templado	3.0	Parra <i>et al.</i> , 2003
Lanahue (Chile)	Eutrófico	Templado	4.9	Parra <i>et al.</i> , 2003
Maggiorie (Italia)	Oligo-mesotrófico	Templado	0.3 - 2.2	Callieri, 1997
Chaj- Chaj (México)	Eutrófico	Tropical	11.0 – 14.68	Este estudio
Liquidambar (México)	Eutrófico	Tropical	7.2	Este estudio
Bosque Azul (México)	Eutrófico	Tropical	5.9 - 6.1	Este estudio
Yalalush (México)	Oligotrófico	Tropical	0.5 – 0.9	Este estudio
San José (México)	Oligotrófico	Tropical	3.7 – 8.4	Este estudio
Montebello (México)	Oligotrófico	Tropical	1.2 – 1.7	Este estudio
Agua Tinta (México)	Oligotrófico	Tropical	1.0 - 1.2	Este estudio
Tzisco (México)	Oligotrófico	Tropical	1.2 – 1.3	Este estudio
Pojoj (México)	Oligotrófico	Tropical	0.9 – 2.0	Este estudio

El COP juega un papel importante en el ciclo biogeoquímico del carbono en los sistemas lacustres y se vincula estrechamente con la producción, transferencia y descomposición de la materia orgánica en el ecosistema (Longhurst y Pauly 1997), además presenta una relación cercana a la dinámica del fitoplancton (Punning *et al.*, 2003). Por lo anterior, dado que el fitoplancton contribuye en gran medida a la masa de la materia particulada de origen biogénico, la concentración de COP en los lagos impactados es mayor.

Los resultados de COP evidencian dos tipos de distribución vertical: 1) los lagos cuya concentración máxima estuvo cerca de la superficie y 2) los lagos cuya concentración máxima se presenta a media profundidad.

Durante el verano los lagos que presentan $COP_{m\acute{a}x}$ en la superficie son Bosque Azul, Liquidambar y San José. Estos lagos son los que probablemente tienen el fitoplancton en la capa superficial dada su condición, impactados. Mientras que en los lagos que presentan $COP_{m\acute{a}x}$ a mayor profundidad (Pojoj, Montebello, Agua Tinta, Tzisco y Yalalush), ésta podría asociarse a un máximo profundo de clorofila (DCM) común en lagos oligotróficos con una Z_{EU} que llega hasta el metalimnion y en donde se acumula el fitoplancton (Gervais et al., 1997).

Existe información escasa acerca de la variación del COP en lagos tropicales; entre los que están disponibles en la literatura (Tabla 6). Las concentraciones estimadas en los lagos prístinos (someros e impactados) son similares o menores a las concentraciones de COP registradas en lagos oligo y mesotróficos. Por otro lado las concentraciones de COP de los lagos impactados (someros y profundos) son superiores a las concentraciones de los lagos oligotróficos. Esto aunado a la elevada concentración de seston conduce a pensar que los lagos impactados poseen estados tróficos cercanos a la eutrofia.

Tabla 6. Concentración de COP (mg/L) en distintos lagos con diferente latitud y estado trófico. (En rosa, lagos de otros estudios, en azul los lagos prístinos y en verde los

Lago	Nivel Trófico	Región	COP (mg/L)	Referencia
Alchichica (México)	Oligotrófico	Tropical	0.1 – 4.0	Alcocer et al., 2007
Di Mergozzo (Italia)	Oligo-mesotrófico	Templado	0.2 – 0.9	Callieri, 1997
Maggiorie (Italia)	Oligo-mesotrófico	Templado	0.1 – 0.8	Callieri, 1986
Chaj- Chaj (México)	Eutrófico	Tropical	2.5 – 5.2	Este estudio
Liquidambar (México)	Eutrófico	Tropical	2.7	Este estudio
Bosque Azul (México)	Eutrófico	Tropical	2.4 – 3.0	Este estudio
Yalalush (México)	Oligotrófico	Tropical	0.3 – 0.4	Este estudio
San José (México)	Oligotrófico	Tropical	0.6 – 0.7	Este estudio
Montebello (México)	Oligotrófico	Tropical	0.4 – 0.6	Este estudio
Agua Tinta (México)	Oligotrófico	Tropical	0.4 – 0.5	Este estudio
Tzisco (México)	Oligotrófico	Tropical	0.4 – 0.5	Este estudio
Pojoj (México)	Oligotrófico	Tropical	0.3 – 0.5	Este estudio

Salvo Yalalush (polimíctico cálido), la dinámica del COP en los lagos está muy relacionada con su patrón térmico de monomixis cálida. Durante el periodo de estratificación, el COP se concentra fundamentalmente dentro del epilimnion-metalimnion. Lo anterior confirma que en lagos tropicales una diferencia pequeña de temperatura induce la formación de una termoclina funcional que constituye una barrera efectiva contra la exportación de carbono orgánico - y de seston en general - al hipolimnion (Alcocer et al., 2007). Durante el periodo de circulación la distribución vertical del COP prácticamente fue homogénea a lo largo de la columna de agua (a excepción de Bosque Azul).

En ambas temporadas de muestreo la concentración de COP en los lagos impactados fue cerca de cinco veces mayor en comparación con los lagos prístinos. Este incremento en la concentración de COP en los lagos impactados, (muy probablemente asociado a productores primarios) indica que la afectación de los lagos impactados tiene que ver con un incremento en la fertilidad de sus aguas y por lo tanto en el estado trófico de los mismos.

Por último, la profundidad de la ZEU en los lagos en estudio muestra un patrón inverso a la concentración del seston y el COP (menor profundidad de ZEU a mayor concentración de seston y COP), siendo dicha ZEU mucho menor en los lagos impactados (2.6 ± 1.6 m) en contraste con los prístinos (23.2 ± 12.9 m), evidenciando una menor transparencia en sus aguas (Fig. 23 y 24, tabla 7).

Con base en lo anterior, se aceptan las hipótesis del presente trabajo que plantean que los lagos impactados muestran una mayor concentración del seston y de carbono particulado y, por lo tanto, menor transparencia de sus aguas, respecto a los prístinos. Asimismo, se acepta la hipótesis de que la distribución de ambas variables en el perfil vertical difiere entre los lagos prístinos e impactados siendo los impactados los que presentan la concentración máxima de seston y COP en superficie a diferencia de los prístinos que muestran la concentración máxima a media agua.

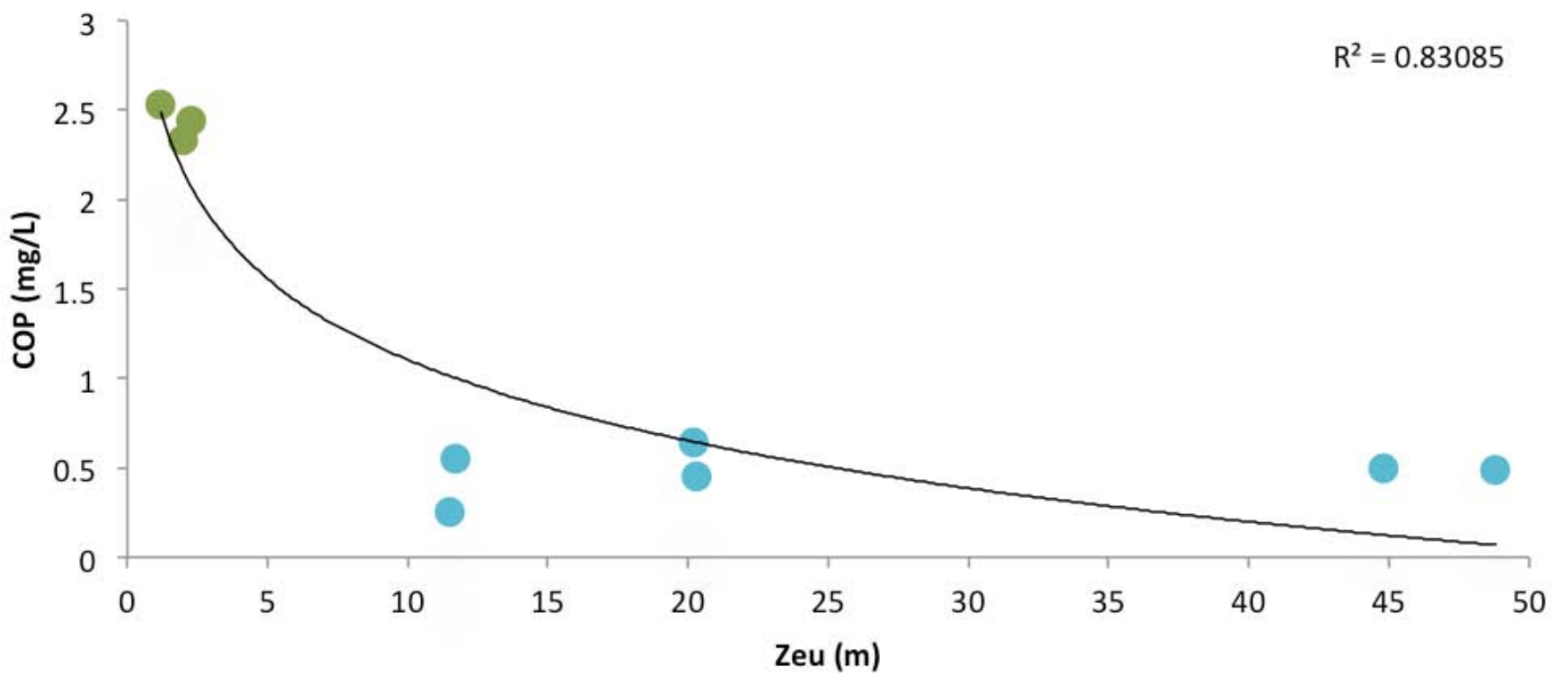
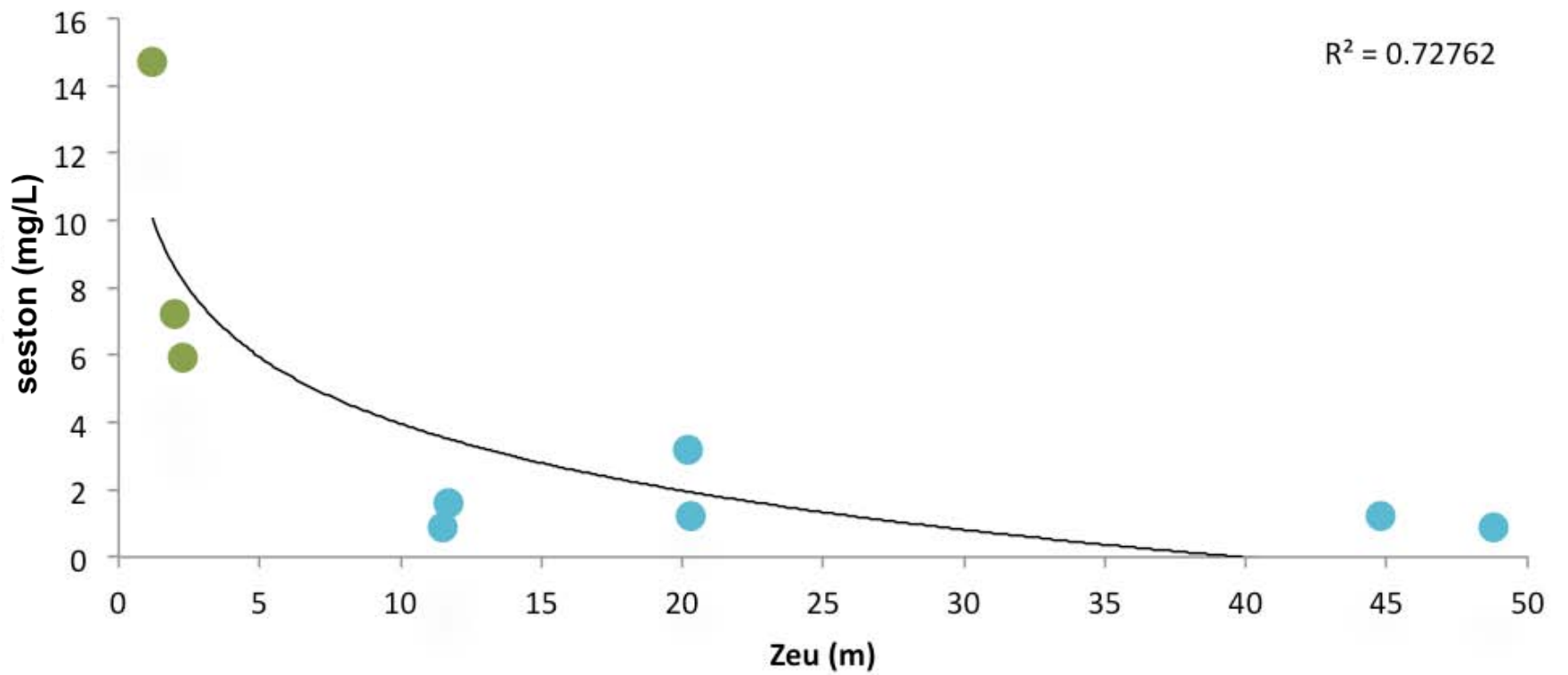


Figura 23. Relación de la profundidad de la zona eufótica (Z_{EU}) y la concentración del seston y el COP durante el verano en los lagos del PNLM. En verde los lagos impactados y

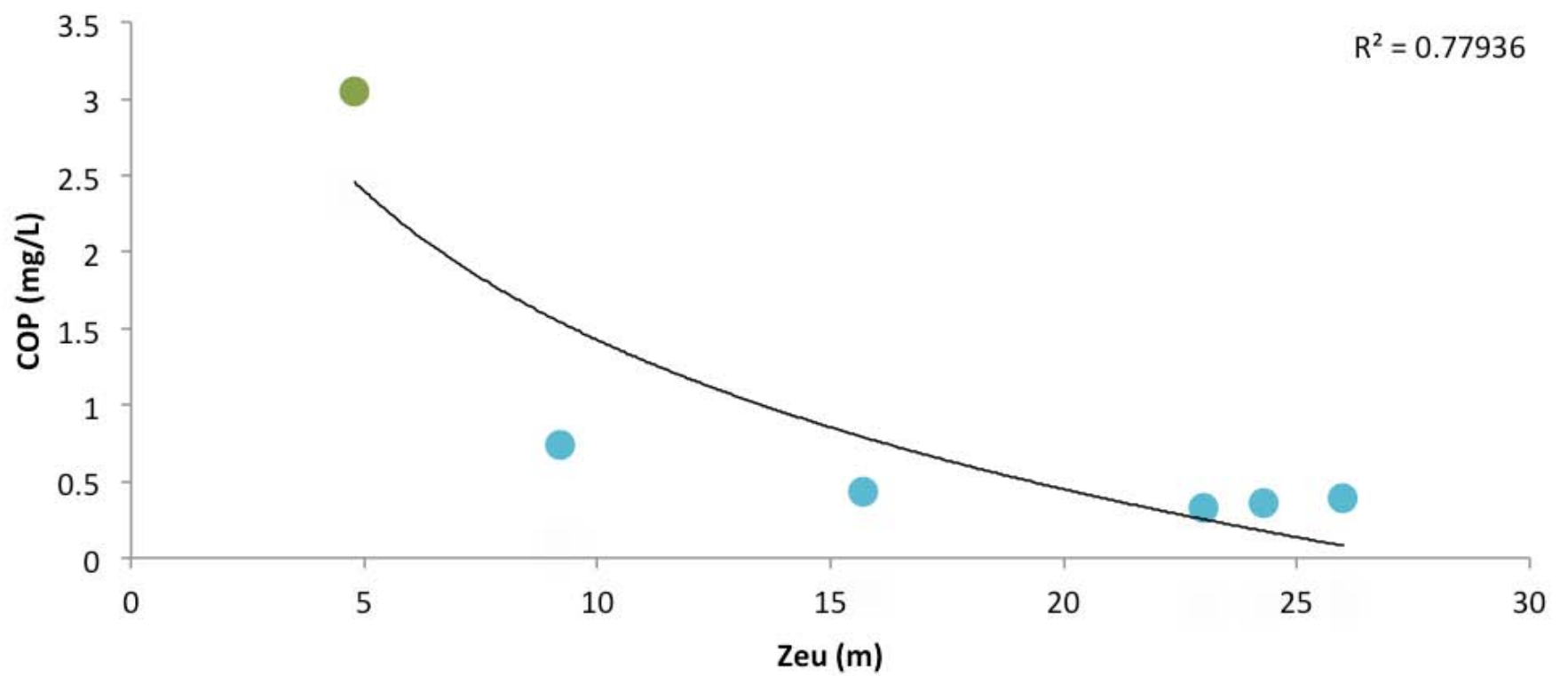
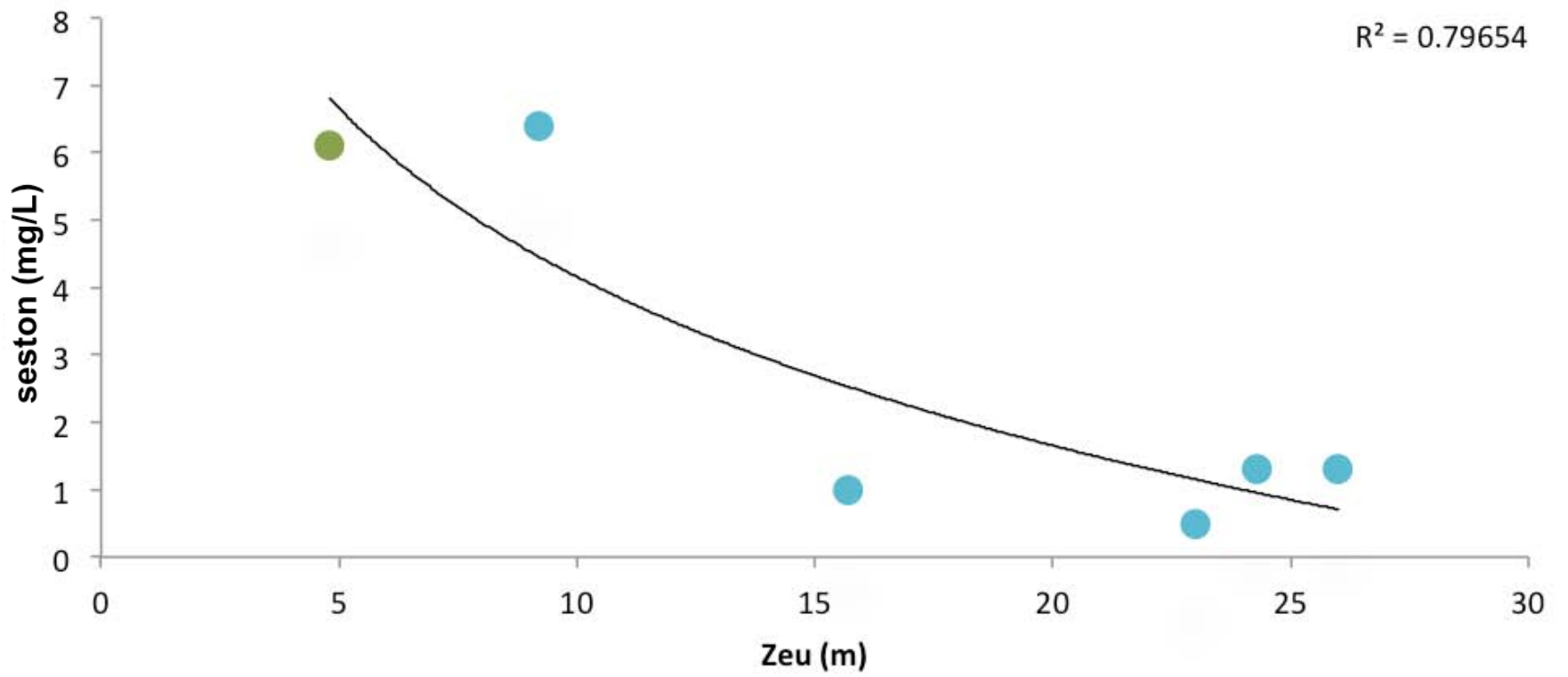


Figura 24. Relación de la profundidad de la zona eufótica (Z_{EU}) y la concentración del seston y el COP durante el invierno en los lagos del PNLM. En verde los lagos impactados y

Tabla 7. Profundidad de la Z_{EU} y las concentraciones de seston y COP en los lagos en estudio pertenecientes al PNLM. (En azul los lagos prístinos y en verde los impactados).

Lago	Verano (2014)			Invierno (2015)		
	Z _{EU} (m)	Seston (mg/L)	COP (µg/L)	Z _{EU} (m)	Seston (mg/L)	COP (µg/L)
Chaj Chaj	1.2	14.7	2530	-	11.04	5227
Liquidambar	2.0	7.2	2329	-	-	-
Bosque Azul	2.3	5.9	2440	4.8	6.1	3044
Yalalush	11.5*	0.9	257	23.0*	0.5	330
San José	20.2	3.2	644	9.2	6.4	736
Montebello	11.7	1.6	551	26.0*	1.3	391
Agua Tinta	20.3*	1.2	453	15.7*	1.0	429
Tziscoao	44.8*	1.2	501	24.3	1.3	362
Pojoj	48.8*	0.9	492	-	2.0	335

10. CONCLUSIONES

- I. Las concentraciones de seston en los lagos prístinos del PNLM varían entre 0.51 y 2.3 mg/L; estas concentraciones son similares a las encontradas en otros lagos oligotróficos y ultraoligotróficos de México.
- II. Las concentraciones de seston en los lagos impactados del PNLM están en el rango de 5.9 a 14.8 mg/L; éstas concentraciones son similares o superiores a las encontradas en otros lagos eutróficos del mundo.
- III. Las concentraciones de COP en los lagos prístinos del PNLM varían entre 0.3 y 0.7 mg/L; estas concentraciones son similares a las encontradas en otros lagos oligotróficos y meso-oligotróficos de México y el mundo.
- IV. Las concentraciones de COP en los lagos impactados del PNLM varían entre 2.4 y 5.2 mg L/1; estas concentraciones son similares o superiores a las encontradas en otros lagos oligotróficos de México y el mundo.
- V. La profundidad de la Z_{EU} en los lagos muestra un patrón inverso a la concentración del seston y carbono particulado (menor profundidad de Z_{EU} implica una mayor concentración de seston y COP), siendo dicha Z_{EU} mucho menor en los lagos impactados en contraste con los prístinos, evidenciando menor transparencia en sus aguas.
- VI. 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 ó cerca de la superficie a diferencia de los prístinos que muestran la concentración máxima a media agua.

11. REFERENCIAS

- Alcocer, J., A. Lugo, E. Escobar, M. Sánchez, G. Vilaclara. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, México. *Verhandlungen Internationalis Vereinigung Limnologie*. 27: 3166-3169 pp.
- Alcocer, J., A. Lugo, E. Escobar, M. Sánchez, G. Vilaclara. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, México. *Verhandlungen Internationalis Vereinigung Limnologie*. 27: 3166-3169 pp.
- Alcocer, J., D. López, L. Oseguera. 2007. Dinámica del carbono particulado en un lago tropical profundo. En: Hernández de la Torre B., G. Gaxiola (eds). *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. Instituto Nacional de Ecología y CICESE. México. 239-247 pp.
- Alcocer, J., L. Oseguera, G. Sánchez, C. González, J. Martínez y R. González. 2016. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *Journal of Limnoogy*. 75(s1): 56-65 pp.
- Almeida, T. 2014. Heterogeneidad en el sistema lacustre de Montebello: estructura funcional y taxonómica del fitoplancton. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Estado de México. 52-56 pp.
- Callieri, C., R. Bertoni y M. Contesini. 1986. Settling rates of particulate matter in Lago di Mergozzo (Northern Italy). *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia* 44: 147-164 pp.
- Callieri C. 1997. Sedimentation and aggregate dynamics in Lake Maggiore, a large deep lake in Northern Italy. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*, 56, 37-50 pp.

- Cervantes, D.R., Verdugo, D. G. y Valdez, H. J.E. 2005. Modelo estacional de producción primaria estimada mediante fluorescencia natural en una región costera del Golfo de California, México. *Hidrobiológica*. 15(1): 79-87 pp.
- Cervantes, A., M. Mezeta, M. Gutiérrez. 2009. Limnología básica del lago cárstico turístico Cenote Azul en Quintana Roo, México. *Hidrobiológica* 19(2): 177-180 pp.
- CFE-GEIC. 2012a. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas: Tomo I Hidrometeorología. Comisión Federal de Electricidad. México. 11 pp.
- CFE-GEIC. 2012b. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas: Tomo II Geohidrología. Comisión Federal de Electricidad. México. 13 pp.
- CFE-GEIC. 2012c. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas: Tomo III Modelos matemáticos. Comisión Federal de Electricidad. México. 14 pp.
- Cole, J., Y. Prairie, N. Caraco, W. McDowell, L. R. Tranvik, Striegl, C. Duarte, P. Kortelaine, J. Downing, J. Middelburg y J. Melack. 2007. Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosystems* 10: 171–184 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2009. Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero de Comitán, Chiapas. 4-7 pp. Consultado el 27 de abril de 2015 en: www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR_0707.pdf
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2007. Programa de conservación y manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello, México. 9-10 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2011. Programa de Monitoreo de Calidad del Agua, Estudio para monitorear los parámetros de calidad del agua de las lagunas de Montebello. 17-29 pp.

- Eckert, W., J. Didenko, E. Uri. y D. Eldar. 2003. Spatial and temporal variability of particulate phosphorus fractions in seston and sediments of Lake Kinneret under changing loading scenario. *Hydrobiologia* 494:223-229 pp.
- García-Pámanes, J., A. Trasvania, J.R. Lara y C. Bazan. 2011. Variaciones estacionales del flujo vertical de materia orgánica particulada en la región central del Golfo de California. *Cienc. Mar.* 37(1): 33–49 pp.
- González, M., N. Ramírez. y L. Ruiz. 2005. *Diversidad Biológica en Chiapas*. Plaza y Valdés, México, D.F. Plaza y Valdés S.A. 25-29 pp.
- Hernández, B. 2008. Dinámica del seston y clorofila “a” en dos lagos tropicales de alta montaña, El Sol y La Luna, Nevado de Toluca, México. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 23-44 pp.
- Hernández, P. 2016. Concentración y distribución vertical de la clorofila a fitoplanctónica de los lagos de Montebello, Chiapas, México. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 49-50 pp.
- Horne, A. 1994. *Limnology*. Ed. McGraw Hill. U.S.A. 578 p.
- Instituto Nacional de Geografía e Historia (INEGI). 2008. Anuario estadístico del estado de Chiapas. 4-5 pp. Consultado el 20 de abril de 2015 en: www.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825201203.
- Jellison R., J. M. Melack. 2001. Nitrogen limitation and particulate elemental ratios of seston in hypersaline Mono Lake, California, U.S.A. *Hydrobiologia* 466: 1-12 pp.
- Juárez, E. 2014. Análisis hidrogeoquímico de la cuenca del Río Grande de Comitán. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 12-93 pp.
- Karl D. M., D. V. Hebel, C. Winn C. 1991. Procedures for particulate carbon, nitrogen, phosphorus and total mass analysis used in the US-JGOFS Hawaii ocean time-series program. In: *Marine particles: Analysis and characterization Geophysical Monograph 63*. American Geophysical Union, Washington. pp. 71-77 pp.

- Lenz J. 1977. Seston and its main components. In: Rheinhermer G Ed., Microbial ecology of brackish water environmental. Ecological studies 25, Springer Verlag.
- Lewis W. M. 1987. Tropical Limnology. Annual Review of Ecology and Systematics 18:159-184 pp.
- Lewis, W. M. 1996. Tropical lakes: how latitude makes a difference. In Schiemer F. y K. Boland (eds). Perspectives in Tropical Limnology. Academic Publishing.43-64 pp.
- Lewis, W. M. 2000. Basis for the protection and management of tropical lakes. Lakes and Reservoirs: Research and Management. 5:35-48 pp.
- Longhurst A. y J. Pauly. 1987. Ecology of tropical oceans. Academic Press. San Diego, California. 407 pp.
- Margalef, R. 1983. Limnología. Ed. Omega. España. 1010 pp.
- Oseguera L.A. 2011. Variación temporal y espacial del flujo de materia total particulada en un lago monomíctico cálido. Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 7-10 pp.
- Oseguera L.A. y J. Alcocer. 2015. Concentración y distribución vertical del carbono particulado (total y orgánico) en los lagos de Montebello, Chiapas. 457-463 pp. En: Paz, F., J. Wong y R. Torres (editores). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C y el Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Texcoco, Estado de México, México. ISBN en trámite.
- Parra O., Valdovinos C., Urrutia R., Cisternas M., Habit E. & Mardones, M. 2003. Caracterización y tendencias tróficas de cinco lagos costeros de Chile Central. Limnetica, 22 (1-2), 51-83.

- Peng D, Johnson DL y Effler S. 2004. Characterization of inorganic particles in selected reservoirs and tributaries of the New York City water supply. *Journal of the American Water Resources Association* S/N:663-676
- Punning, J.A., T. Jaanus, T. Koff y T. Alliksaar. 2003. Seasonal fluxes of particulate matter in a small closed lake in northern Estonia. *Water, Air, and Soil Pollution* 149:77-92 pp.
- Rutten A, de Lange GJ, Ziveri P, Thomson J, Van Santvoort PJM, Colley S y Corselli C. 2000. Recent terrestrial and carbonate fluxes in the pelagic eastern Mediterranean; a comparison between sediment trap and surface sediment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 158: 197–213 pp.
- Sánchez, O., M. Herzig, E. Peters, R. Márquez y L. Zambrano. 2007. Ecosistemas Acuáticos: diversidad, procesos, problemática y conservación. Sánchez, O. (Ed.), *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 11-35 pp.
- Straskraba M. 1980. The effects of physical variables on freshwater production: Analyses based on models. In *The Functioning of Freshwater Ecosystems*, ed. E. D. Le Cren, R. H. Lowe-Mc Connell. Londres: Cambridge Univ. Press. 13-84 pp.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2008. Catálogo tipológico de humedales lacustres y costeros del estado de Chiapas. pp 7-41 pp.
- Torres-Padrón ME, Gelado-Caballero MD, Collado-Sánchez C, Siruela-Matos VF, Cardona-Castellano PJ y Hernández-Brito JJ. 2002. Variability of dust inputs to the CANIGO zone. *Deep-Sea Research II* 49: 3455-3464
- 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 pp.

- Vera-Franco M.N., P.P. Hernández-Victoria, J. Alcocer, V. Ardiles-Gloria y L.A. Oseguera. 2015. Concentración y distribución vertical de la clorofila-a fitoplanctónica en los lagos de Montebello, Chiapas. 107-114 pp. En: Alcocer J., M. Merino-Ibarra, E. Escobar-Briones. (Editores). Tendencias de investigación en Limnología tropical: Perspectivas universitarias en Latinoamérica. Asociación Mexicana de Limnología, A.C., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM y Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología. México. ISBN 978-607-02-7199-1
- Veronesi M. L., A. Barbieri y W. Hanselmann. 2002. Phosphorus, carbon and nitrogen enrichment during sedimentation in a seasonally anoxic lake (Lake Lugano, Switzerland). *Journal of Limnology* 61: 215-223 pp.