



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Carbono particulado y materia total particulada en nueve  
lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”,  
Chiapas**

**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:**

**Erika Montserrat Rivera Herrera**



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

Ciudad Universitaria, CD. MX., 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Hoja de Datos del Jurado

1. Datos del alumno  
Rivera  
Herrera  
Erika Montserrat  
15 53 06 87  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
306117879
2. Datos del tutor  
Dr.  
Javier  
Alcocer  
Durand
3. Datos del sinodal 1  
Dr.  
Jorge Alberto  
Ramírez  
Zierold
4. Datos del sinodal 2  
Dr.  
Luis Alberto  
Oseguera  
Pérez
5. Datos del sinodal 3  
Dr.  
Bruno Manuel  
Chávez  
Vergara
6. Datos del sinodal 4  
M. en C.  
Gabriela  
Gómez  
Rodríguez
7. Datos del trabajo escrito  
Carbono particulado y materia total  
particulada en nueve lagos del Parque  
Nacional "Lagunas de Montebello", Chiapas  
56 pp  
2017



Cinco Lagos, PNLM, Chiapas

*"If there is magic on this planet,  
it is contained in water."*

*Loren Eiseley*

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme las herramientas para desarrollarme en lo profesional y personal.

Al Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua (CONAGUA-CONACYT) proyecto 167603 “Estudio hidrológico y de calidad del agua del sistema Lagunar de Montebello, en el estado de Chiapas” y a la DGAPA (PAPIIT IN219215) proyecto “Factores que determinan el estado trófico de los lagos de Montebello, Chiapas”.

Al Parque Nacional "Lagunas de Montebello", Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Protegidas (CONANP) (Jesús A. León y Roberto Castellanos), comunidad local y Comisarios Ejidales de Antelá, Cárdenas, Miguel Hidalgo, Ojo de Agua y Tzisco por facilitar el acceso a los lagos.

Al Comité de Administración de Tzisco (Sergio Marcos y Miguel A. Tomas), al presidente del Comité de Turismo de Tzisco (Armando Hernández), Comisario Ejidal de Tzisco (Enrique M. Hernández), personal del Hotel Villas Tzisco (Rosemberg F. Jorge, Juan G. Espinoza y Gemuel P. Hernández) por su apoyo y facilidades ofrecidas para el desarrollo de este estudio.

A Daniela, Daniel, Jeronimo, Mariana, Rene y Rigel por la ayuda en los muestreos y las buenas experiencias en campo.

Al Dr. Javier Alcocer Durand por su guía y apoyo para la realización de este trabajo, además de las enseñanzas en el aula y su entusiasmo transmitido por la investigación.

Al Dr. Luis A. Oseguera Pérez por su dedicación y conocimiento brindado en campo y en laboratorio, además de su constante ayuda a lo largo de este trabajo.

Al Dr. Jorge A. Ramírez Zierold por las enseñanzas en el laboratorio de biogeoquímica acuática y su amable ayuda en la revisión al presente escrito.

A la M. en C. Gabriela Gómez Rodríguez por la orientación desde el principio de la licenciatura y formar ahora parte de la finalización de ésta.

Al Dr. Bruno M. Chávez Vergara por la atención y disposición en la revisión de este trabajo.

A la Dra. Vilma S. Ardiles Gloria por acercarme al mundo de la Limnología además de sus comentarios realizados a este trabajo.

A mi familia y amigos, por su apoyo.

# CONTENIDO

1. Resumen	8
2. Abstract	9
3. Introducción	10
4. Antecedentes	12
5. Justificación	13
6. Hipótesis	13
7. Objetivos	13
7.1 Objetivo general	13
7.2 Objetivos particulares	14
8. Área de estudio	15
8.1 Geografía	15
8.2 Clima	16
8.3 Edafología	17
8.4 Hidrología	18
8.5 Vegetación	20
9. Materiales y métodos	21
9.1 Trabajo de campo	21
9.2 Trabajo de laboratorio	22
9.2.1 Carbono Particulado	22
9.2.2 Materia Total Particulada	23
10. Resultados	24
10.1 Parámetros fisicoquímicos	24
10.1.1 Temperatura, Oxígeno disuelto y Conductividad	24
a) Lagos no impactados	25
i. Profundos	26
ii. Somero	27
b) Lagos impactados	29

i.	Profundos	29
ii.	Somero	29
10.1.2	Zona eufótica y capa de mezcla	32
10.2	Materia total particulada	32
a)	Lagos no impactados	35
i.	Profundos	35
ii.	Somero	36
b)	Lagos impactados	36
i.	Profundos	36
ii.	Somero	36
10.3	Carbono Particulado: CTP, COP y CIP	37
a)	Lagos no impactados	42
i.	Profundos	42
ii.	Somero	43
b)	Lagos impactados	44
i.	Profundos	44
ii.	Somero	45
11.	Discusión	46
12.	Conclusiones	52
13.	Referencias	53

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1.</b> Localización del área de estudio, polígono del PNLM.	15
<b>Fig. 2.</b> Tipos de climas del municipio La Trinitaria, Chiapas.	16
<b>Fig. 3.</b> Tipos de suelos en el PNLM.	17
<b>Fig. 4.</b> Mapa de Unidades Geomorfológicas del PNLM, Chiapas.	18
<b>Fig. 5.</b> Sistema lacustre de Montebello.	19
<b>Fig. 6.</b> Vegetación y uso de suelo en el PNLM.	20
<b>Fig. 7.</b> Perfiles verticales de temperatura y concentración de oxígeno disuelto en Cinco Lagos durante el inicio de la época de lluvias y época de secas como ejemplo de un lago no impactado profundo.	26
<b>Fig. 8.</b> Perfil vertical de conductividad en Cinco Lagos durante el inicio de la época de lluvias y época de secas como ejemplo de un lago no impactado profundo.	27
<b>Fig. 9.</b> Perfiles verticales de temperatura, concentración de oxígeno disuelto y conductividad en Esmeralda durante el inicio de la época de lluvias y época de secas como ejemplo de un lago no impactado somero.	28
<b>Fig. 10.</b> Perfiles verticales de temperatura, concentración de oxígeno disuelto y conductividad en San Lorenzo durante el inicio de la época de lluvias y época de secas como ejemplo de un lago impactado profundo.	30
<b>Fig. 11.</b> Perfiles verticales de temperatura, concentración de oxígeno disuelto y conductividad en Balantetic durante el inicio de la época de lluvias y época de secas como ejemplo de un lago impactado somero.	31
<b>Fig. 12.</b> Concentración de MTP en los lagos de estudio no impactados e impactados del PNLM durante el inicio de la época de lluvias y época de secas.	34
<b>Fig. 13.</b> Concentración de CTP en los lagos de estudio no impactados e impactados del PNLM durante el inicio de la época de lluvias y época de secas.	39
<b>Fig. 14.</b> Concentración de COP en los lagos de estudio no impactados e impactados del PNLM durante el inicio de la época de lluvias y época de secas.	40
<b>Fig. 15.</b> Concentración de CIP en los lagos de estudio no impactados e impactados del PNLM durante el inicio de la época de lluvias y época de secas.	41

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ubicación geográfica de los lagos de estudio del PNLM, así como altitud, profundidad máxima, profundidad media, Área, Volumen y Estado.	21
<b>Tabla 2.</b> Número de muestras tomadas en los lagos de estudio del PNLM durante el inicio de la época de lluvias y época de secas.	22
<b>Tabla 3.</b> Rango y promedio con desviación estándar de temperatura, concentración de oxígeno disuelto y conductividad en la columna de agua de los lagos de estudio del PNLM durante el inicio de la época de lluvias.	24
<b>Tabla 4.</b> Rango y promedio con desviación estándar de temperatura, concentración de oxígeno disuelto y conductividad en la columna de agua de los lagos de estudio del PNLM durante la época de secas.	25
<b>Tabla 5.</b> Zona eufótica y capa de mezcla en los nueve lagos de estudio durante el inicio de la época de lluvias y época de secas.	32
<b>Tabla 6.</b> Rango y promedio con desviación estándar de MTP en la columna de agua de los lagos de estudio del PNLM durante el inicio de la época de lluvias y época de secas.	33
<b>Tabla 7.</b> Rango y promedio con desviación estándar de CTP, COP y CIP en la columna de agua de los lagos de estudio del PNLM durante el inicio de la época de lluvias.	37
<b>Tabla 8.</b> Rango y promedio con desviación estándar de CTP, COP y CIP en la columna de agua de los lagos de estudio del PNLM durante la época de secas.	38
<b>Tabla 9.</b> Concentración de COP en distintos lagos con diferente latitud.	50
<b>Tabla 10.</b> Concentración de MTP en distintos lagos con diferente latitud.	51

# 1. RESUMEN

Desde el año 2003 se empezaron a notar cambios significativos en la coloración de los lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM), debido a que la coloración pasó de azules cristalinos a amarillentos y/o cafés, además de emitir olores desagradables, lo cual ha derivado que las actividades que se realizan en el parque sean afectadas. Como una manera de aproximarse a las causas de estos cambios, en este estudio se analizaron las fracciones del carbono particulado (CP) y la materia total particulada (MTP), ya que permiten reconocer el tipo de material suspendido presente en los cuerpos acuáticos, brindando información relevante sobre éstos y con ello poder entender el origen de los cambios de algunos lagos del PNLM.

Se comparó la distribución vertical y concentración del CP y MTP en dos épocas contrastantes, inicio de la época de lluvias y época de secas, además de relacionarlos con variables ambientales tales como temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y penetración de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en los lagos del estudio. Se seleccionaron 9 lagos, de los cuales 3 fueron clasificados visualmente como impactados (Balantetic, Encantada y San Lorenzo) y 6 como no impactados (Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Esmeralda, Kichail y Patianú).

La concentración del carbono total particulado (CTP) y sus fracciones orgánica (COP) e inorgánica (CIP) fueron entre 3 y 6 veces mayor en los lagos impactados que en los no impactados. Los intervalos de CTP, COP y CIP fueron 2.6-3.3 mg/L, 1.7-2.5 mg/L y 0.4-1.0 mg/L respectivamente en los lagos impactados mientras que en los lagos no impactados fueron de 0.5-1.1 mg/L, 0.3-0.7 mg/L y 0.0-0.4 mg/L para el CTP, COP y CIP respectivamente. La concentración de MTP fue en promedio cinco veces mayor en los lagos impactados que en los lagos no impactados, con un intervalo de 4.3-21.1 mg/L en los lagos impactados y de 0.4-6.3 mg/L en los lagos no impactados.

Respecto a la distribución, el carbono particulado, independientemente del estado trófico de los lagos, presentó dos tipos de distribución vertical en el inicio de la época de lluvias: 1) máxima concentración en superficie o 2) máxima concentración a media agua; y en época de secas: 1) máxima concentración cerca de la superficie o 2) máxima concentración cerca del fondo. La MTP presentó diferentes tipos de distribución vertical en los lagos no impactados y los lagos impactados, en ambas épocas de muestreo; los impactados presentaron la máxima concentración cerca de la superficie y los no impactados cerca del fondo.

Los cambios que han experimentado los lagos en su coloración están asociados a un incremento de la MTP y CP. Probablemente, lo anterior esté vinculado a un aumento en la disponibilidad de materia orgánica y nutrientes alóctonos.

## 2. ABSTRACT

Since 2003, significant changes in the color of the lakes of the Lagunas de Montebello National Park (PNLM) began to be noticed, going from crystal blue to yellow/coffee colors, besides of emitting unpleasant odors, which has caused that the activities that are realized in the park are affected. As a way of approaching the causes of these changes, in this study particulate carbon (PC) fractions and total particulate matter (TPM) were analyzed, which allows to recognize the type of suspended material present in the aquatic bodies, providing relevant information on these and with it to be able to understand the origin of the changes of some PNLM lakes.

Vertical distribution and concentration of PC and TPM was compared in two contrasting seasons, the beginning of the rainy and the dry periods, in addition to relating them to environmental variables such as temperature, dissolved oxygen, conductivity and photosynthetically active radiation (PAR) penetration in the study lakes. Nine lakes were selected, of which 3 were classified visually as impacted (Balantetic, Encantada and San Lorenzo) and 6 as non-impacted (Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Esmeralda, Kichail and Patianú).

The particulate total carbon (PTC) concentration, and its organic (POC) and inorganic (PIC) fractions, were between 3 and 6 times higher in impacted lakes than in non-impacted ones; the range of PTC, POC and PIC was 2.6-3.3 mg/L, 1.7-2.5 mg/L and 0.4-1.0 mg/L respectively in impacted lakes and in the non-impacted ones the range was 0.5-1.1 mg/L, 0.3-0.7 mg/L and 0.0-0.4 mg/L of PTC, POC and PIC respectively. The TPM concentration was on average five times higher in impacted lakes than in non-impacted ones, with a range of 4.3-21.1 mg/L in impacted lakes and 0.4-6.3 mg/L in non-impacted ones.

Regarding the distribution, particulate carbon, regardless of the trophic state of the lakes, presented two types of vertical distribution in the beginning of the rainy season: 1) concentration maxima on surface or 2) concentration maxima on mid-water; and in the dry season: 1) concentration maxima near the surface or 2) concentration maxima near the bottom. The TPM presented different types of vertical distribution in the non-impacted lakes and the impacted ones, in both seasons of sampling; the impacted lakes had the concentration maxima near the surface and the non-impacted ones near the bottom.

The changes that the lakes have experienced in their coloration are associated to an increase of MTP and CP. Probably the above is linked to an increase in the availability of allochthonous organic matter and nutrients.

### 3. INTRODUCCIÓN

Los sistemas acuáticos epicontinentales son componentes potencialmente importantes en el ciclo del carbono tanto a escala regional como global a pesar de que cubren una pequeña fracción de la superficie de la Tierra. Se ha estimado que del total de carbono que entra a los sistemas acuáticos epicontinentales (1.9 Pg C/año), solamente 0.2 Pg C/año es secuestrado en sus sedimentos, mientras que el resto es liberado a la atmósfera (0.8 Pg C /año) o transportado hacia los océanos (0.9 Pg C/año) (Cole *et al.*, 2007). El transporte y/o secuestro del carbono particulado es llamado “bomba biológica”, que es el proceso por el cual el CO<sub>2</sub> atmosférico es fijado a través de la fotosíntesis y posteriormente transportado (exportación) al interior del sistema acuático y como consecuencia, el carbono se almacenará temporal o permanente en el sedimento (Karl *et al.*, 1991).

El carbono orgánico particulado es un componente de la materia orgánica particulada que junto con la materia inorgánica particulada constituyen la materia total particulada (MTP) (Lenz, 1977; Karl *et al.*, 1991). Las partículas demasiado grandes para estar en verdadera solución, pero suficientemente pequeñas para permanecer suspendidas en contra de la fuerza de gravedad, comprenden la materia particulada suspendida en el agua. El término colectivo para denominar toda esta materia particulada en el agua libre es “**seston**”, el cual puede ser retenido en un filtro de tamaño de poro de 0.45 µm e incluye tanto a la materia orgánica (viva o muerta) como a la inorgánica (Wetzel, 2001; Paterson *et al.*, 2003).

A la primera fracción, la orgánica, se le denomina “**bioseston**” e incluye al plancton, así como los restos de éstos y otros organismos; a la segunda fracción se le conoce como “**abioseston**” o “**tripton**” e incluye detritos y partículas de suelo o rocas (Boyd, 2015; Wetzel, 2001).

Al igual que el seston, el “**carbono particulado**” (CP) puede ser clasificado como “**carbono orgánico particulado**” (COP) y “**carbono inorgánico particulado**” (CIP). El carbono particulado presente en los sistemas acuáticos puede tener tres orígenes: alóctono, autóctono y procedente de la resuspensión del material del fondo (Eckert *et al.*, 2003).

El CP alóctono tiene fuentes y composiciones muy variadas, influidas fuertemente por el entorno del cuerpo acuático (Wetzel, 2001). Para el CIP alóctono las principales fuentes son la erosión de la cuenca debido a la precipitación y escorrentía, así como por la erosión de las orillas de los sistemas acuáticos. En cuanto al COP alóctono, éste puede ser aportado por la vegetación terrestre de la cuenca, en forma de hojas y ramas, que caen y son acarreadas hacia el sistema acuático, por la suspensión de partículas orgánicas provenientes de la cuenca a través del escurrimiento, así como restos de organismos procedentes de la cuenca (Boyd, 2015).

Por otro lado, el CP autóctono es aquél que se produce en el cuerpo acuático mismo y representa todo el carbono fijado por los organismos autótrofos que viven en el ecosistema

acuático, menos aquel utilizado para la respiración (Wetzel *et al.*, 1972). El fitoplancton convierte el CO<sub>2</sub> disuelto en el agua en biomasa; mucha de esta materia es reciclada en las capas superficiales del cuerpo acuático, pero cuando estos organismos mueren, sus restos se hunden hacia el fondo. Un gran porcentaje del COP, tanto vivo como muerto, es consumido por el zooplancton en capas más profundas y cuando estos organismos mueren, al igual que partículas de minerales carbonatados precipitados (CIP) y otros detritos, se acumulan en el fondo (Myrbo, 2012). Una fracción menor del COP es mineralizada manteniendo así la actividad biológica bentónica (Eppley y Peterson, 1979; Lutz *et al.*, 2007).

El material particulado afecta las propiedades químicas y ópticas de los cuerpos de agua, determina la profundidad a la que penetra la luz – y, por tanto, la profundidad de la zona fótica o eufótica (Z<sub>EU</sub>)- y con ello la distribución de los productores primarios. Por otra parte, forma parte de la dieta de los organismos planctónicos y bentónicos. Ofrece también, un sustrato para que las poblaciones de bacterias se asienten y mejoren sus condiciones de crecimiento. Finalmente, el material particulado que se sedimenta afecta las condiciones de vida de la fauna bentónica (Lenz, 1977).

Las condiciones que prevalecen en la interface sedimento-agua, tanto en la columna de agua como en la parte más baja de ésta dependen del flujo del material particulado (Myrbo, 2012), que a su vez depende de factores como el viento, la luz, la temperatura, la conductividad y la carga de nutrientes hacia el sistema. Por ejemplo, la formación de la termoclina funciona como barrera física que retrasa la exportación de partículas al fondo (Stemmann *et al.*, 2002), mientras que el aporte de luz incentiva la actividad fitoplanctónica, que tiene gran relevancia como fuente de aporte de COP, la presencia del material particulado determina la profundidad de la zona eufótica (Z<sub>EU</sub>), esto es, la profundidad hasta donde hay suficiente radiación fotosintéticamente activa (PAR por sus siglas en inglés) para llevar a cabo la fotosíntesis.

El viento también juega un papel importante en la sedimentación de las partículas, ya que cuando éste es de gran intensidad, produce turbulencia en la zona de mezcla, lo que puede propiciar la agregación o desagregación de partículas que van a ser remineralizadas o exportadas, dependiendo de su tamaño final (MacIntyre y Jellison, 2001; Pesant *et al.*, 1998). Otro efecto de los vientos fuertes es la ruptura parcial (atelomixis) o total de la termoclina, permitiendo la liberación de las partículas retenidas en ella (Lewis, 1996; Doyon *et al.*, 2000); además, puede causar una resuspensión de sedimentos, la cual puede tener un aporte sustancial de partículas a la columna de agua; particularmente es importante la actividad del oleaje cerca de la zona litoral (Evans, 1994).

Así el estudio del material particulado y la relación que tiene con los factores fisicoquímicos mencionados anteriormente conforman una información valiosa para el entendimiento de procesos fisicoquímicos y biológicos que se llevan a cabo en los cuerpos de agua.

## 4. ANTECEDENTES

Se han realizado pocos estudios limnológicos en el Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM), Chiapas, la mayoría de ellos relacionados con el conocimiento de su biodiversidad. Recientemente, Sosa (2014) comparó la estructura de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en lagos con diferente grado de perturbación estimada con base en la transparencia del disco de Secchi. Concluyó que la estructura de la comunidad es diferente en los lagos perturbados con respecto a otros dos tipos de lagos que denominó conservados y semiconservados. En los lagos perturbados, los quironómidos fueron dominantes, mientras que los anfípodos (género *Hyaella*) son los que dominaron en los lagos conservados y semiconservados. Las familias que se encuentran en los lagos conservados y semiconservados no son las mismas, ni se encuentran en la misma abundancia en comparación con los lagos perturbados.

Por otro lado, Almeida (2014) realizó un estudio sobre la estructura funcional y taxonómica del fitoplancton, del cual concluyó que hay lagos con diferente grado de deterioro, a pesar de que se encuentran cercanos entre sí, debido a la heterogeneidad espacial. Los lagos situados en el extremo noroeste presentaron a Heterokontophyta como grupo taxonómico más importante, cuyo género dominante fue *Stephanocyclus*. De acuerdo a la clasificación funcional, son diatomeas de lagos someros y turbios. Otro grupo de lagos presentó a las Cyanobacteria como grupo taxonómico importante, con la especie dominante *Plankthotrix suspensa* la que se caracteriza por tolerar deficiencia de luz y habitar lagos turbios. Se identificó otro tipo de lagos que presentan un grupo taxonómico dominante (Heterokontophyta) pero con especies que pertenecen a diferente clasificación funcional (organismos de lagos someros con materia orgánica y organismos de lagos claros, profundos y mezclados), de esta manera se revela heterogeneidad dentro de éstos.

Villalpando (2015) estimó el índice trófico de diferentes lagos del PNLM a través de percepción remota, detectando las concentraciones de clorofila. Encontró que el estado trófico de los cuerpos de agua, en general, es de eutrofia, concluyendo que los lagos de Montebello se encuentran en deterioro ambiental. Cabe destacar que los lagos que estudió son solo lagos ubicados en la zona NW los cuales se encuentran impactados por lo que la conclusión no aplica para todos los lagos del PNLM.

En cuanto a los suelos de la cuenca del río Grande, Martínez (2015) realizó una caracterización para entender la dinámica de los contaminantes que llegan al sistema lacustre. Este estudio concluye que la mayoría de los perfiles de suelos presentó susceptibilidad a la erosión, independientemente de la unidad geomorfológica a la que pertenecen.

La escasez de estudios sobre la materia total particulada y el carbono particulado en ambientes tropicales conlleva al desconocimiento del papel que estos juegan en los ecosistemas lacustres, en particular de latitudes tropicales.

## 5. JUSTIFICACIÓN

México es un país con una gran diversidad climática y fisiográfica que provoca que el agua epicontinental esté distribuida de manera desigual. Chiapas es un estado localizado en la zona tropical húmeda, donde la precipitación es mayor que en otras zonas del país (Alcocer y Bernal-Brooks, 2010) y cuenta con cuerpos acuáticos de gran importancia.

El PNLM es un área natural protegida que provee de diversos servicios ambientales, tanto económicos (turismo y agricultura) como culturales (belleza escénica y recreación). Desde el año 2003 se empezaron a notar cambios significativos en la coloración de los lagos, pasando de azules cristalinos a amarillentos y/o cafés, además de emitir olores desagradables. Este deterioro ha afectado las actividades que se realizan en el parque y, por ende, también a las familias que dependen económicamente de él. Por lo anterior, en este estudio se analizó el carbono particulado (CP) y la materia total particulada (MTP), ya que permiten reconocer el tipo de material suspendido presente en los cuerpos acuáticos, brindando información relevante sobre éstos y con ello poder entender el origen de los cambios de algunos lagos del PNLM.

## 6. HIPÓTESIS

- En los lagos impactados las concentraciones del CP y MTP serán mayores, en comparación con los lagos no impactados.
- La distribución en el perfil vertical del CP y MTP será diferente en los lagos impactados y no impactados.

## 7. OBJETIVOS

### 7.1 Objetivo general:

Conocer la variación temporal y la distribución vertical de la concentración del carbono particulado, tanto su fracción orgánica como inorgánica, así como de la materia total particulada en nueve lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello.

## **7.2 Objetivos particulares:**

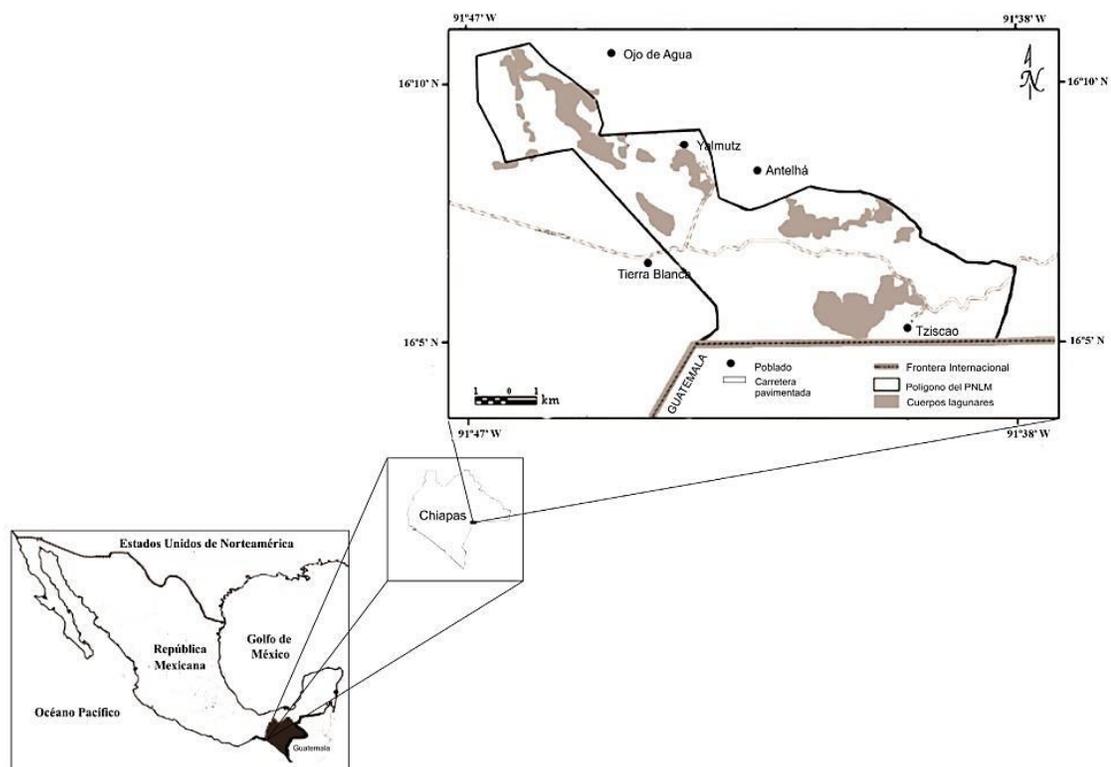
- Determinar la concentración del carbono particulado (total, orgánico e inorgánico) y la materia total particulada en la columna de agua en 9 lagos del PNLM.
- Comparar la distribución vertical de la concentración del carbono particulado (total, orgánico e inorgánico) y la materia total particulada en dos épocas contrastantes: inicio de la época de lluvias y época de secas.
- Medir perfiles de temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y penetración de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) en los lagos del estudio.
- Relacionar la concentración y distribución del carbono particulado y materia total particulada en los lagos con las variables ambientales evaluadas que pueden determinar la calidad del agua en los lagos del PNLM.

## 8. ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Nacional Lagunas de Montebello (Fig. 1) es un Área Natural Protegida desde 1959, a partir del Decreto Presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación el 16 de diciembre de ese año. Es una zona que provee de diversos servicios ambientales, entre ellos: vaso de captación de agua, regulación del clima regional, conservación de suelos y belleza escénica (CONANP, 2007), debido a su densa vegetación y a los múltiples cuerpos de agua, producto de la actividad kárstica y tectónica en la región (Durán *et al.*, 2014).

### 8.1 Geografía

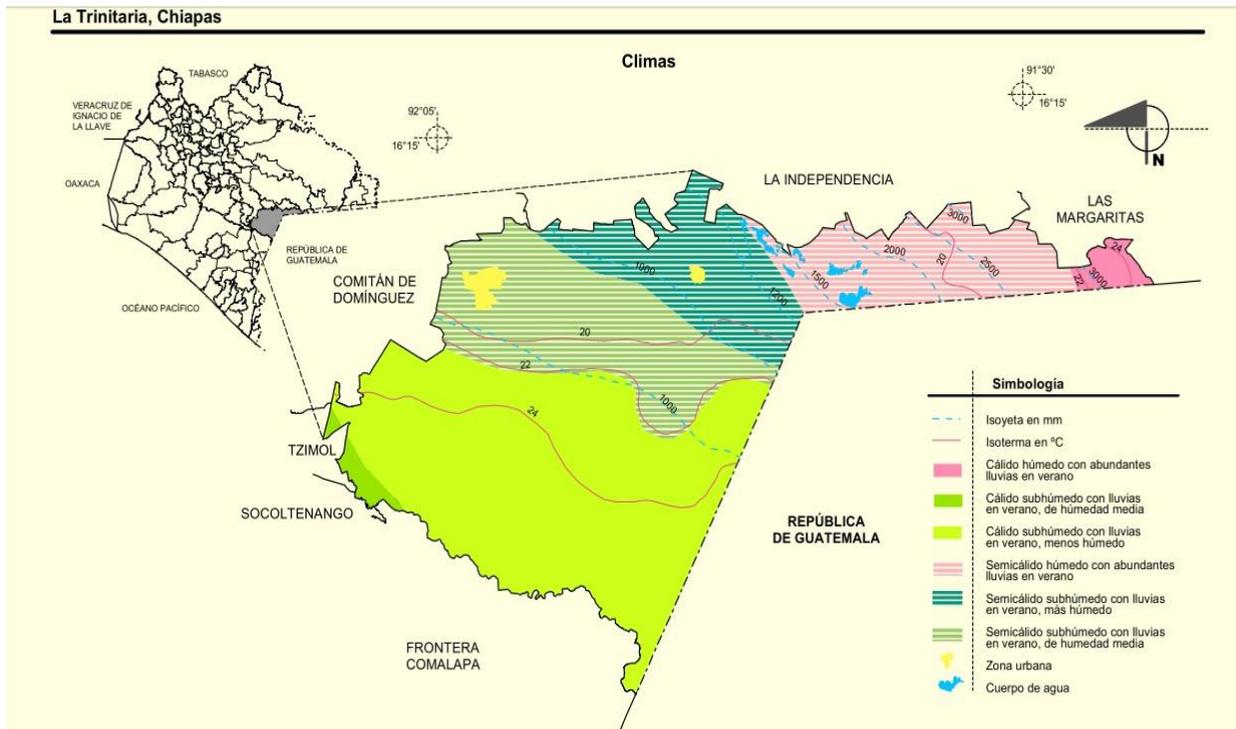
El PNLM se encuentra en la región sur-sureste del estado de Chiapas, en los municipios de La Independencia (con el 5% del área total) y La Trinitaria (con 95% del área total); abarca una superficie de 6,425 hectáreas (CONANP, 2007). Se localiza entre los 16° 5' y 16° 10' latitud norte y 91° 38' y 91° 47' de longitud oeste (Durán *et al.*, 2014).



**Figura 1.** Localización del área de estudio, polígono del PNLM (Tomado de Durán *et al.*, 2014).

## 8.2 Clima

Los climas predominantes son templado húmedo a subhúmedo con lluvias todo el año (García-Amaro, 1981), así como semi-cálido húmedo (zona este y noroeste) a subhúmedo (noroeste) con abundantes lluvias en verano (INEGI, 2005) (Fig. 2).

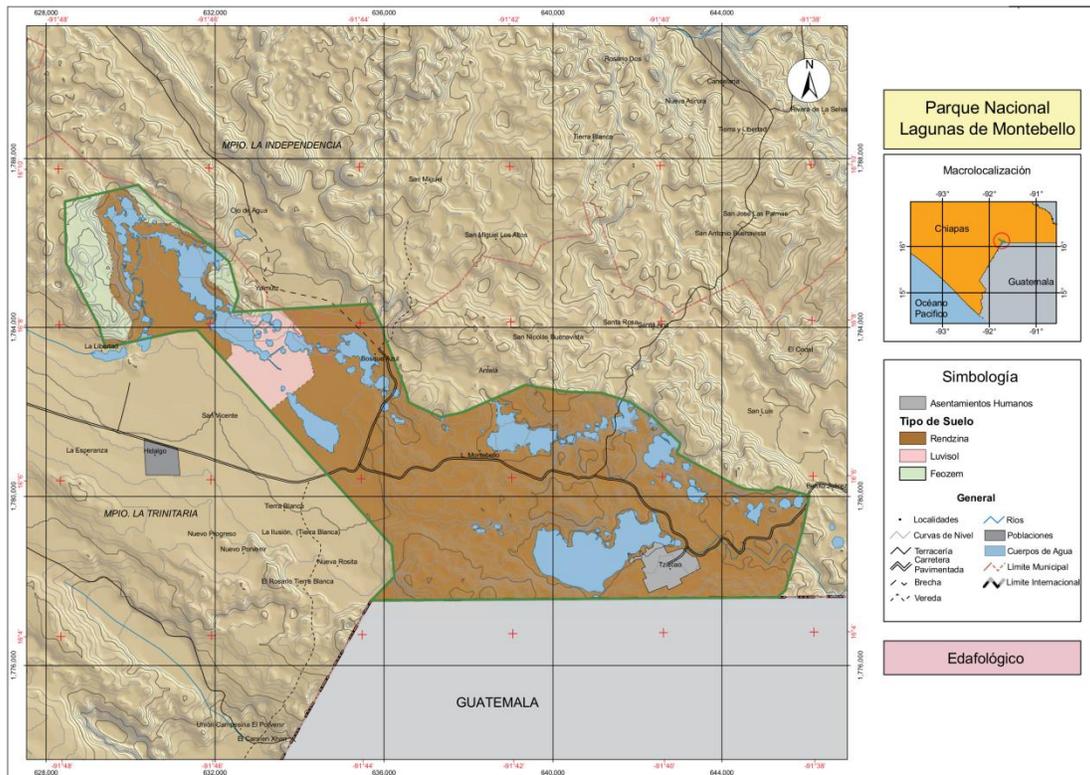


**Figura 2.** Tipos de climas del municipio La Trinitaria, Chiapas (Tomado de INEGI, 2005).

La precipitación total anual es de 1,750 mm. La época con mayor precipitación se observa a partir de mayo y hasta enero, con un total de lluvia de 1,625 mm, siendo los meses de julio y septiembre los que presentan máximos valores; mientras que la época de secas ocurre de febrero a abril, con una precipitación de 116 mm (CFE, 2012).

### 8.3 Edafología

La mayor parte de los suelos del PNLM se ha desarrollado de las calizas o de sedimentos fluviales y lacustres (Fig. 3). Destacan tres principales tipos de suelo: rendzina, luvisol y feozem (CONANP, 2007).

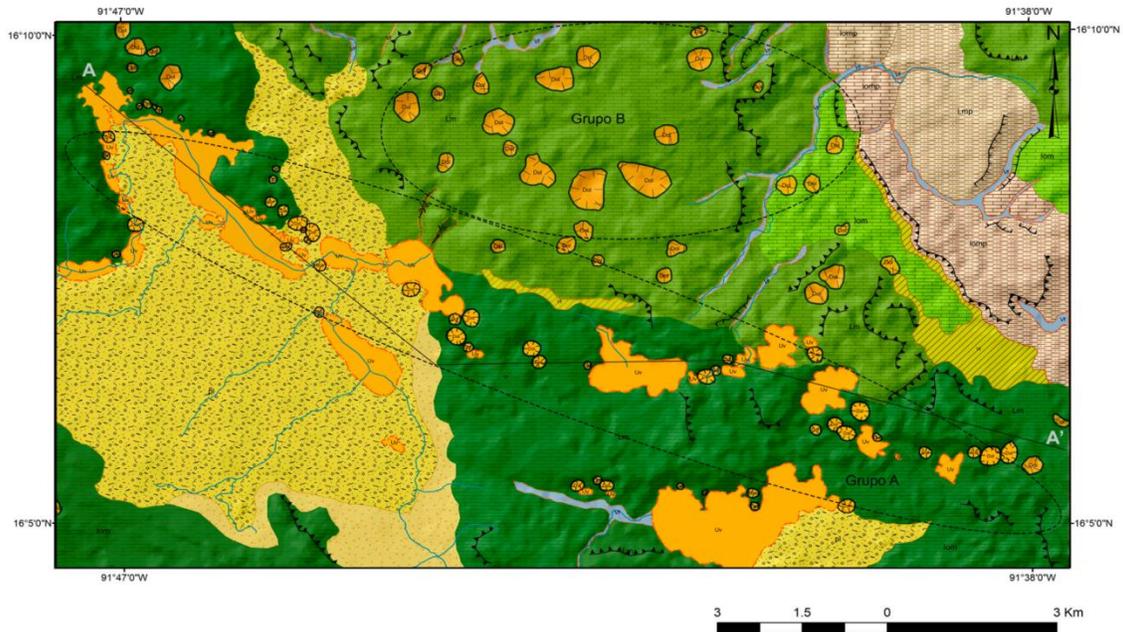


**Figura 3.** Tipos de suelos en el PNLM (Tomado de CONANP, 2007).

Las rendzinas se encuentran en las laderas menos escarpadas, a lo largo de todo el PNLM (CONANP, 2007). El luvisol se ubica en la zona noroeste del PNLM y en la parte sureste del lago San Lorenzo. El feozem se localiza en la parte noroeste del PNLM en las cercanías de los lagos Balantetic, Liquidambar y San Lorenzo.

## 8.4 Hidrología

Los lagos del PNLM constituyen un complejo lacustre de origen kárstico, extendido entre territorio mexicano y guatemalteco. La alimentación de las aguas es principalmente subterránea (Vásquez y Méndez, 1994). El desarrollo kárstico del PNLM está condicionado por dos factores: 1) la composición litológica basada en materiales carbonatados susceptibles a la disolución y 2) la configuración estructural, consecuencia de la tectónica en la zona, es decir, sistemas de fallas con dirección NW-SE (Durán *et al.*, 2014) mostrados en la figura 4.



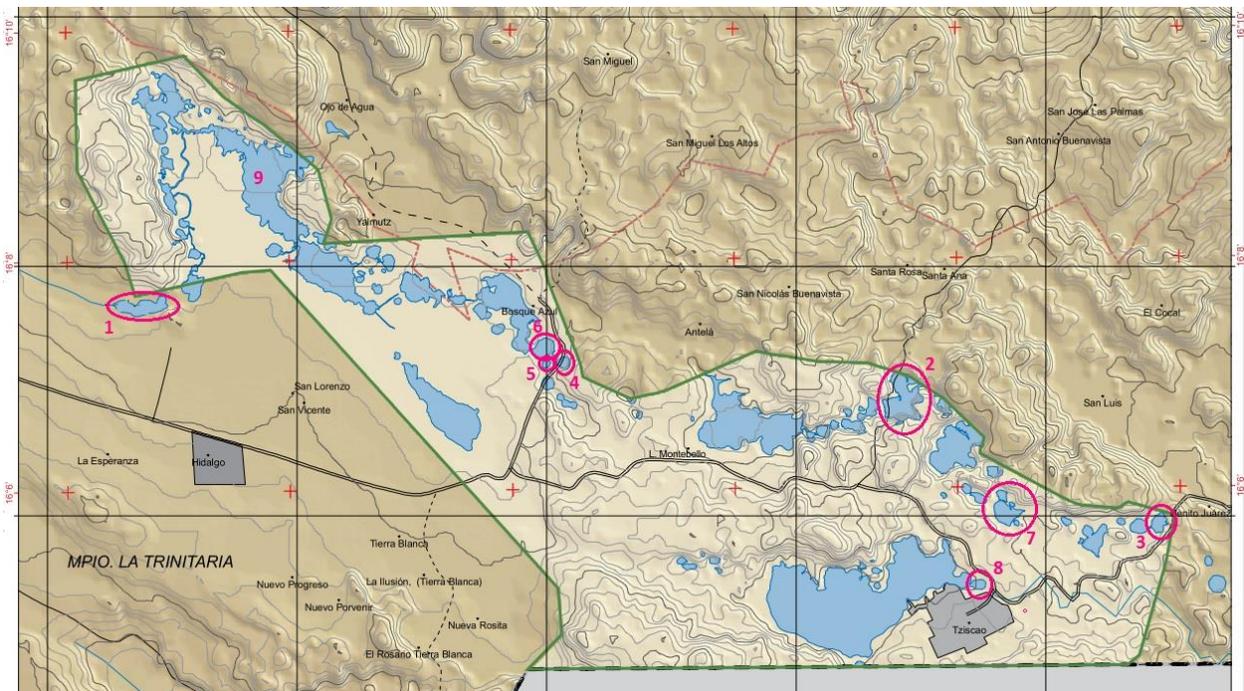
UNIDAD MORFOGENÉTICA	GRUPO	SUBUNIDADES, ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS	EDAD	UNIDAD MORFOGENÉTICA	GRUPO	SUBUNIDADES, ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS	EDAD
<b>1. ENDÓGENO ESTRUCTURAL PLEGADO</b>				<b>3. EXÓGENO DENUDATIVO FLUVIO-KÁRSTICO</b>			
Lmp	1a. Laderas montañosas del Paleógeno	Laderas montañosas	Paleógeno	Vt	3a. Valle tectónico	Valle fondo plano	Holoceno
Lm			Cretácico inferior	Vf		3b. Valle fluvial	Valle en forma de V
Lm	1b. Laderas montañosas del Cretácico	Laderas montañosas	Cretácico superior	Vs	3c. Valle seco	Valle en forma de U	Holoceno
Lomp			Paleógeno	Vc		3d. Valle ciego	Valle en forma de U
Lomp	1c. Lomerios del Paleógeno	Lomerio	Paleógeno	Dol	4a. Dolina		
Lom			Paleógeno	Uv		4b. Úvala	
Lom	1d. Lomerios del Cretácico	Lomerio	Cretácico inferior	Polje	4c. Polje		
Lom			Cretácico superior				
<b>2. EXÓGENO ACUMULATIVO</b>				<b>4. EXÓGENO DENUDATIVO KÁRSTICO</b>			
pl	2a. Planicies aluviales	Planicie	Holoceno				
pdm	2b. Piedemonte	Piedemonte	Holoceno				
<b>Simbología complementaria</b>							
Escarpe							
Escarpe de erosión fluvial							
Ríos principales							

Figura 4. Mapa de Unidades Geomorfológicas del PNLM, Chiapas (Tomado de Durán *et al.*, 2014).

Existen dos grupos de dolinas y uvalas que sugieren una génesis y evolución diferente. Los cuerpos del grupo A presentan morfologías alargadas e irregulares y están ocupados por agua, lo que indica que el nivel freático presente se ubica a una altitud similar a la que se encuentra la base de las dolinas y uvalas; mientras que los del grupo B tienen morfologías irregulares a circulares, topográficamente se encuentran a mayor altitud que los del grupo A y carecen de agua superficial (Durán *et al.*, 2014).

El PNLM está comprendido en la Región Hidrológica Nacional No. 30 Grijalva-Usumacinta y forma parte de la subcuenca del Río Grande de Comitán con 545 km<sup>2</sup>, que a su vez es parte de la cuenca del Río Lacantún (INEGI, 1988; CNA, 2005).

El Sistema Tepancoapan, también denominado San Lorenzo, está considerado como un cuerpo de agua continuo que reúne a varios lagos. Éstos se comunican por la inundación de sus áreas colindantes durante la época de lluvia. El desagüe parcial del sistema se realiza a través de un arroyo que se alimenta de las aguas de San Lorenzo y Bosque Azul, a través de un sumidero en el sitio denominado El Arco (CONANP, 2007) (Fig. 5).



**Figura 5.** Sistema lacustre de Montebello. (Lagos estudiados en este trabajo: 1= Balantetic, 2= Cinco Lagos, 3 = Dos Lagos, 4 = Ensueño, 5 = Esmeralda, 6 = Encantada, 7 = Kichail, 8 = Patianú y 9 = San Lorenzo).

## 8.5 Vegetación

La vegetación predominante del PNLM es bosque templado. Las principales asociaciones vegetales son: bosque de coníferas, bosque de latifoliadas, bosque mesófilo de montaña, vegetación riparia, vegetación secundaria y zonas de cultivo (INEGI, 2000; Inventario Forestal Nacional, 2000-2001) (Fig. 6).

La comunidad vegetal más importante es el bosque de coníferas. La especie más abundante es *Pinus oocarpa*, localizada en el centro y noroeste del Parque, se desarrolla sobre terrenos someros y en localidades con precipitación anual por debajo de los 1,200 mm. En lugares más húmedos, entre los lagos de Montebello y Tzisco, se distribuye *Pinus maximinoi*.

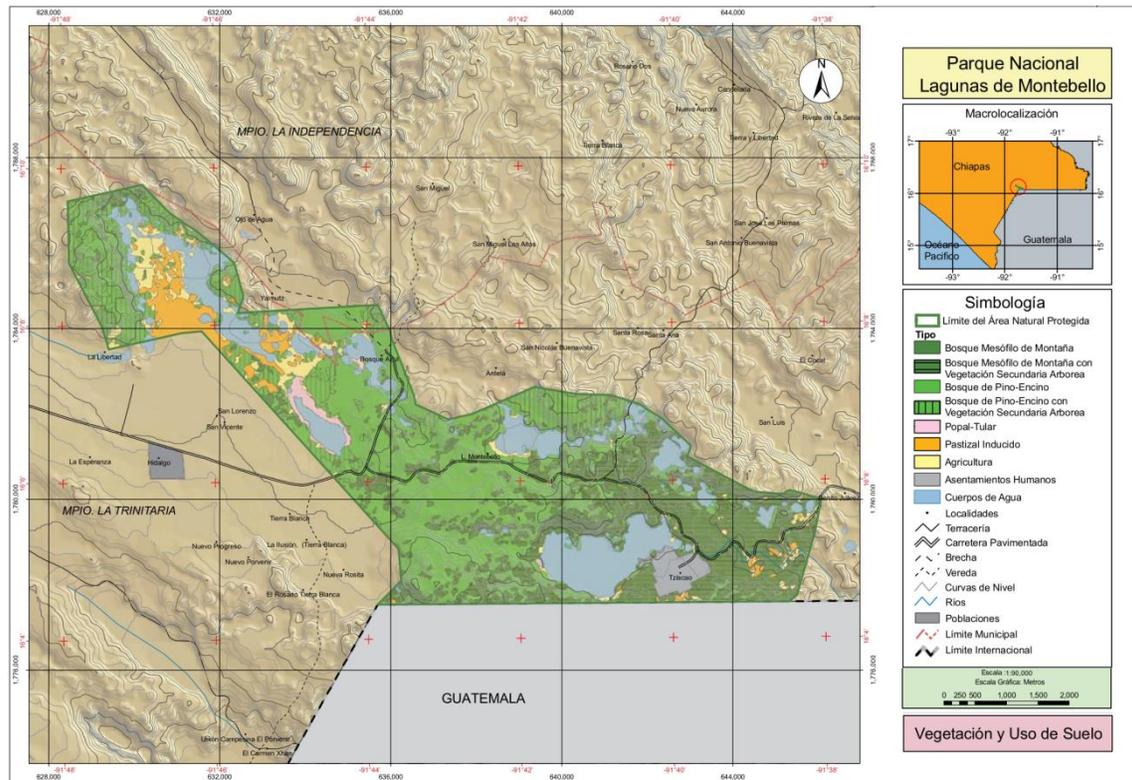


Figura 6. Vegetación y uso de suelo en el PNLM (Tomado de CONANP, 2007).

## 9. MATERIALES Y MÉTODOS

### 9.1 Trabajo de Campo

Se realizaron dos muestreos: el primero en mayo de 2014 (inicio época de lluvias) y el segundo en febrero de 2015 (época de secas). Se seleccionaron 9 lagos, de los cuales 3 fueron clasificados visualmente como impactados (Balantetic, Encantada y San Lorenzo) y 6 como no impactados (Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Esmeralda, Kichail y Patianú) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Ubicación geográfica de los lagos de estudio del PNLM, así como altitud, profundidad máxima (Zmax), profundidad media (Zmed), Área, Volumen (Vol) y Estado (I = Impactado, NI = No Impactado; S = Somero, P = Profundo) (Tomado de Alcocer *et al.*, 2016).

Lago	Lat (°N)		Long (°W)		Altitud (m s.n.m.)
Balantetic	16°7'31.8"	16°7'42.2"	91°47'35.5"	91°47'6.7"	1,466
Cinco Lagos	16°6'35.6"	16°6'59.4"	91°40'20.6"	91°40'41.2"	1,486
Dos Lagos	16°5'35.2"	16°5'45"	91°38'8.9"	91°38'17.5"	1,427
Ensueño	16°7'2.3"	16°7'8.8"	91°43'29.6"	91°43'36.5"	1,430
Esmeralda	16°7'3.4"	16°7'7"	91°43'39.2"	91°43'44"	1,461
Kichail	16°5'39.5"	16°5'58.2"	91°39'25.2"	91°39'41.4"	1,475
Encantada	16°7'8.1"	16°7'18.5"	91°43'37.2"	91°43'50.5"	1,454
Patianú	16°5'6.4"	16°5'12.1"	91°39'45.7"	91°39'54.4"	1,484
San Lorenzo	16°7'32.2"	16°9'11.9"	91°45'11.2"	91°46'50.5"	1,455
Lago	Zmax (m)	Zmed (m)	Área (ha)	Vol (km <sup>3</sup> )	Estado
Balantetic	3	1.7	13.6	0.00023	I/S
Cinco Lagos	162	42.5	23.7	0.1006	NI/P
Dos Lagos	42	25.2	5.2	0.00132	NI/P
Ensueño	35	21.6	2.7	0.00058	NI/P
Esmeralda	7	3.6	1.1	0.00004	NI/S
Kichail	22	9.5	12.5	0.00119	NI/P
Encantada	89	29.4	8.2	0.00241	I/P
Patianú	26	10.8	3.4	0.00037	NI/P
San Lorenzo	67	11.8	181.3	0.02147	I/P

En cada sitio se midieron temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica ( $K_{25}$ ) con una sonda multiparamétrica de calidad de agua marca Hydrolab modelo DS5X acoplado a un sistema de almacenamiento modelo SVR4a. Adicionalmente, para determinar la zona eufótica ( $Z_{EU} = 1\%$  de la PAR), se midió la radiación fotosintéticamente activa (PAR) con un perfilador de fluorescencia natural marca Biospherical modelo PNF-300.

Para la obtención del carbono particulado y de la MTP se tomaron entre una y cinco muestras a lo largo de la columna de agua dependiendo de la profundidad de cada lago (Tabla 2). Las muestras se tomaron con una botella muestreadora marca UWITEC de 5 L. Las muestras de agua fueron almacenadas en botellas de plástico y se mantuvieron en oscuridad y frío (dentro de una hielera) para ser transportadas al laboratorio y posteriormente ser filtradas (en un tiempo no mayor a 4 horas).

**Tabla 2.** Número de muestras tomadas en los lagos de estudio del PNLMDurante el inicio de la época de lluvias y época de secas. (- = no fue posible muestrearlo).

Lago	Número de muestras	
	Inicio época de lluvias	Época de secas
Balantetic	1	1
Cinco Lagos	5	5
Dos Lagos	5	5
Ensueño	5	5
Esmeralda	1	1
Kichail	5	5
Encantada	4	5
Patianú	5	5
San Lorenzo	-	5

## 9.2 Trabajo de Laboratorio

### 9.2.1 Carbono particulado

Las muestras de agua fueron filtradas el mismo día de la colecta a través de filtros Whatman tipo GF/F de 13 mm de diámetro ( $0.7 \mu\text{m}$  de apertura nominal de poro), previamente calcinados durante 4 h a una temperatura de  $550^{\circ}\text{C}$  en una mufla marca Thermolyne modelo 48000 para eliminar el carbono que pudieran contener. El volumen de agua filtrado fue distinto para cada lago, dependiendo si éstos eran de aguas turbias o claras (entre 20-300 mL). La filtración se realizó con una bomba de vacío a una presión de entre 0.3 y 0.5 atms. Este procedimiento fue el mismo para las muestras de CTP y COP, salvo que al final del filtrado, los

filtros para COP se acidificaron con HCl al 10% para eliminar la fracción inorgánica del carbono (Karl *et al.*, 1991; Veronesi *et al.*, 2002).

Los filtros se guardaron en sobres de papel aluminio y fueron secados en una estufa marca Lab-Line Instruments modelo 3512, a una temperatura de 60°C durante 48 h. Posteriormente los filtros fueron colocados en un desecador (Jellison y Melack, 2001; Wetzel y Likens, 2000). La medición del CTP y 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. El CIP se obtuvo de la diferencia entre CTP y COP, de acuerdo a  $CIP = CTP - COP$ .

### 9.2.2 Materia total particulada

Las muestras de agua fueron filtradas el mismo día de la colecta. Se utilizaron filtros Whatman tipo GF/F de 47 mm de diámetro (0.7  $\mu\text{m}$  de apertura nominal de poro), pre-calcinados (550°C durante 4 h) y previamente pesados, en la ciudad de México (**Peso 1**) en un comparador de masas marca Mettler Toledo modelo UMX5. El volumen filtrado también dependió del tipo de lago (entre 400 y 1,300 mL) y asimismo se llevó a cabo con una bomba de vacío a una presión de entre 0.3 y 0.5 atms. 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 como blanco un filtro por cada profundidad. Este filtro se colocó debajo del filtro en el que se retuvo la muestra (Karl *et al.* 1991).

Posteriormente, los filtros se guardaron en sobres de papel aluminio y fueron secados en una estufa de secado marca Lab-Line Instruments modelo 3512, a una temperatura de 60°C durante 48 horas. Posteriormente, los filtros fueron colocados en un desecador (Jellison y Melack, 2001; Wetzel y Likens, 2000).

Para determinar la MTP se pesaron nuevamente los filtros ya secos (**Peso 2**) en el mismo comparador de masas (Ciudad de México); la diferencia del Peso 2 y el Peso 1 se le restó el peso del blanco y dio como resultado la masa de MTP; este valor se relacionó con el volumen filtrado y después se estandarizó a un litro para obtener la concentración.

## 10. RESULTADOS

### 10.1 Parámetros fisicoquímicos

#### 10.1.1 Temperatura, oxígeno disuelto y conductividad

Durante el inicio de la época de lluvias la mayoría de los lagos presentaron estratificación térmica excepto Balantetic y Esmeralda debido a su someridad. La temperatura (T) promedio de los lagos fue de  $21.1 \pm 1.5^\circ\text{C}$  con un intervalo entre  $18.1$  y  $26.0^\circ\text{C}$ , la temperatura mínima se registró en Patianú a los 23 m de profundidad y la máxima se localizó en San Lorenzo a nivel superficial. La concentración de oxígeno disuelto (OD) varió desde los 0 mg/L hasta los 25.7 mg/L, con un promedio de  $4.5 \pm 3.6$  mg/L. El único lago que no presentó anoxia fue Esmeralda ya que es no impactado a diferencia de Balantetic que aún a pesar de también estar circulando, por ser impactado se encontró anóxico; la concentración máxima de OD se encontró en la superficie de San Lorenzo. Con respecto a la conductividad eléctrica ( $K_{25}$ ), en esta época el promedio fue de  $441 \pm 65$   $\mu\text{S/cm}$ , hallándose el mínimo ( $192$   $\mu\text{S/cm}$ ) en la superficie de Cinco Lagos y el valor máximo en el fondo de Dos Lagos con un valor de  $1,429$   $\mu\text{S/cm}$  (Tabla 3).

**Tabla 3.** Rango (Mín-Máx) y promedio con desviación estándar (d.e.) de temperatura (T), concentración de oxígeno disuelto (OD) y conductividad ( $K_{25}$ ) en la columna de agua de los lagos de estudio del PNLM durante el inicio de la época de lluvias.

Inicio época de lluvias	T ( $^\circ\text{C}$ )		OD (mg/L)		$K_{25}$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	
	LAGO	Mín-Máx	Promedio (d.e.)	Mín-Máx	Promedio (d.e.)	Mín-Máx
<b>No Impactados</b>						
Cinco Lagos	18.3-22.3	19.7 ( $\pm 1.4$ )	0.0-8.9	5.1 ( $\pm 3.2$ )	192-246	203 ( $\pm 15.3$ )
Dos Lagos	18.5-21.9	19.3 ( $\pm 1.0$ )	0.0-7.4	1.7 ( $\pm 2.5$ )	351-1,429	869 ( $\pm 282$ )
Ensueño	19.8-23.6	21.9 ( $\pm 1.5$ )	0.0-8.7	6.5 ( $\pm 2.4$ )	248-264	254 ( $\pm 6.1$ )
Esmeralda	22.7-23.9	23.4 ( $\pm 0.4$ )	4.5-6.3	5.8 ( $\pm 0.7$ )	339-351	342 ( $\pm 4.3$ )
Kichail	18.2-24.5	20.7 ( $\pm 2.3$ )	0.0-7.8	5.3 ( $\pm 3.3$ )	263-288	269 ( $\pm 7.2$ )
Patianú	18.1-22.9	20.6 ( $\pm 1.6$ )	0.0-7.7	4.6 ( $\pm 3.3$ )	243-279	257 ( $\pm 14.1$ )
<b>Impactados</b>						
Balantetic	21.6-25.6	23.3 ( $\pm 2.1$ )	0.0-9.2	5.2 ( $\pm 4.7$ )	583-770	654 ( $\pm 102$ )
Encantada	18.3-24.3	19.1 ( $\pm 1.6$ )	0.0-11.8	1.0 ( $\pm 3.2$ )	406-607	438 ( $\pm 51.8$ )
San Lorenzo	19.8-26.0	22.0 ( $\pm 2.0$ )	0.0-25.7	4.9 ( $\pm 9.4$ )	521-788	685 ( $\pm 102$ )

En época de secas, el promedio de temperatura fue de  $18.4 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$  en un intervalo de  $17.3$  a  $20.7^{\circ}\text{C}$ , donde la temperatura mínima se localizó a los 23 m de profundidad en Patianú y a los 18 m en San Lorenzo y la máxima se presentó en Balantetic. El promedio de la concentración de oxígeno disuelto fue  $6.3 \pm 1.1$  mg/L, siendo mayor que en el inicio de la época de lluvias. El mínimo de  $0-0.1$  mg/L se encontró a partir de los 42 m de profundidad en Encantada, de los 29 m en Dos Lagos y de los 12 m en San Lorenzo hasta el fondo de cada uno de ellos; mientras que el máximo de  $18.2$  mg/L se localizó en Balantetic. El valor promedio de la conductividad en esta época fue  $491 \pm 37$   $\mu\text{S/cm}$  con un intervalo entre 212 a  $1,545$   $\mu\text{S/cm}$ . El valor mínimo se presentó en Cinco Lagos a los 8 m de profundidad y el máximo en Dos Lagos a los 40 m (Tabla 4).

**Tabla 4.** Rango (Mín-Máx) y promedio con desviación estándar (d.e.) de temperatura (T), concentración de oxígeno disuelto (OD) y conductividad ( $K_{25}$ ) en la columna de agua de los lagos de estudio del PNLMDurante la época de secas.

Época de secas	T ( $^{\circ}\text{C}$ )		OD (mg/L)		$K_{25}$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	
	Lago	Mín-Máx	Promedio (d.e.)	Mín-Máx	Promedio (d.e.)	Mín-Máx
<b>No Impactados</b>						
Cinco Lagos	18.3-18.6	18.3 ( $\pm 0.1$ )	6.0-6.5	6.1 ( $\pm 0.1$ )	212-213	212 ( $\pm 0.1$ )
Dos Lagos	17.9-19.2	18.5 ( $\pm 0.3$ )	0.1-7.2	2.6 ( $\pm 2.7$ )	397-1,545	841 ( $\pm 307$ )
Ensueño	18.5-19.3	18.7 ( $\pm 0.3$ )	7.0-7.2	7.1 ( $\pm 0.1$ )	265-266	265 ( $\pm 0.3$ )
Esmeralda		19.0		6.4	374-375	374 ( $\pm 0.6$ )
Kichail	17.5-19.5	17.8 ( $\pm 0.6$ )	6.7-7.3	7.0 ( $\pm 0.2$ )	283-285	284 ( $\pm 0.4$ )
Patianú	17.3-18.0	17.6 ( $\pm 0.3$ )	3.7-7.1	5.8 ( $\pm 1.4$ )	264-277	272 ( $\pm 5.2$ )
<b>Impactados</b>						
Balantetic		20.7	18.0-18.2	18.1 ( $\pm 0.1$ )	944-946	945 ( $\pm 1.2$ )
Encantada	17.9-18.0	17.9	0.0-4.9	1.3 ( $\pm 1.6$ )	456-478	469 ( $\pm 6.7$ )
San Lorenzo	17.3-17.9	17.5 ( $\pm 0.3$ )	0.1-6.6	2.3 ( $\pm 2.9$ )	745-766	754 ( $\pm 8.4$ )

#### a) LAGOS NO IMPACTADOS

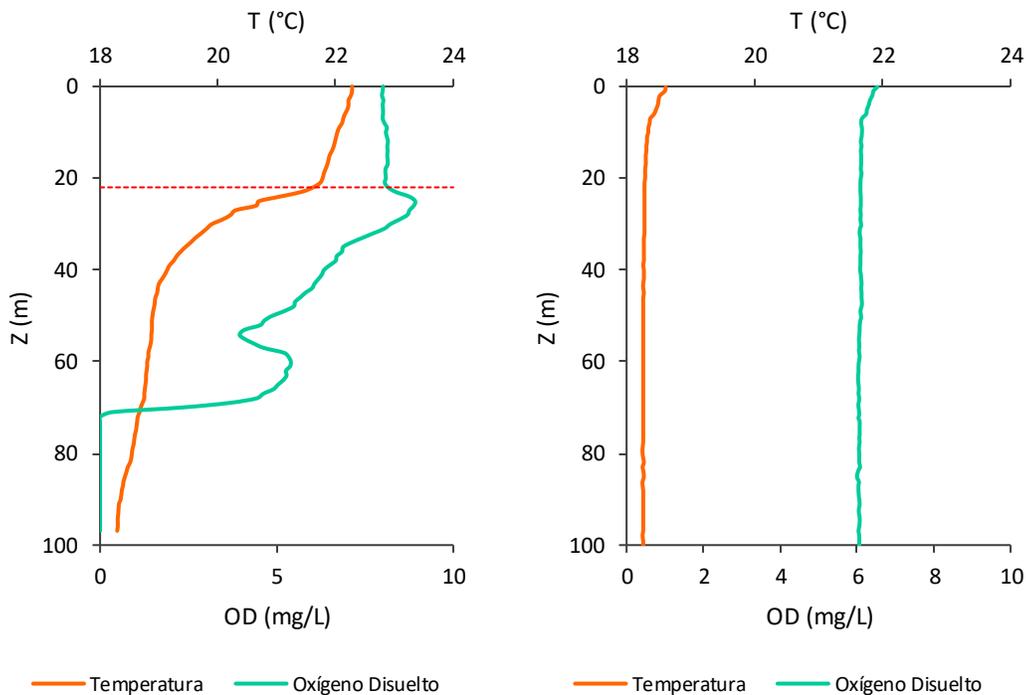
En el inicio de la época de lluvias, la temperatura promedio fue de  $20.9 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ , la concentración promedio de OD fue de  $4.8 \pm 1.7$  mg/L y el promedio de conductividad fue  $366 \pm 250$   $\mu\text{S/cm}$ . En la época de secas, los valores promedios fueron  $18.3 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  de T,  $5.8 \pm 1.7$  mg/L de OD y  $375 \pm 234$   $\mu\text{S/cm}$  de  $K_{25}$ .

Cinco de los seis lagos no impactados presentaron estratificación térmica durante el inicio de la época de lluvias (Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Kichail y Patianú) siendo Esmeralda fue

el único que no se estratificó debido a su someridad. En época de secas todos los lagos circularon salvo Dos Lagos como lo sugiere el perfil de OD el cual muestra condiciones de anoxia en el fondo.

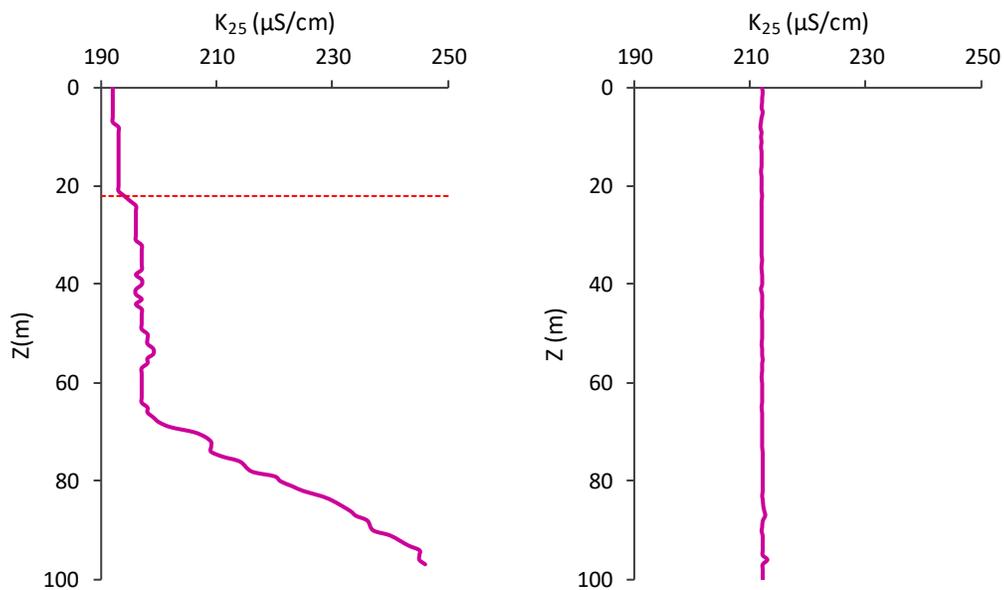
i) PROFUNDOS

Durante el inicio de la época de lluvias, estos lagos se encontraron estratificados, presentaron la temperatura máxima en la superficie y fue disminuyendo conforme aumentó la profundidad. El comportamiento de la concentración de OD fue distinto en estos lagos; en general concentraciones mayores se ubicaron en profundidades someras y fueron disminuyendo hacia el fondo (clinogrado), algunos lagos presentaron máximos en el metalimnion (Fig. 7). Los perfiles de conductividad ( $K_{25}$ ), en general, muestran un aumento desde la superficie y hasta el fondo (Fig. 8).



**Figura 7.** Perfiles verticales de temperatura (T) y concentración de oxígeno disuelto (OD) en Cinco Lagos durante el inicio de época de lluvias (izquierda) y época de secas (derecha) como ejemplo de un lago no impactado profundo. La línea punteada representa el límite del epilimnion.

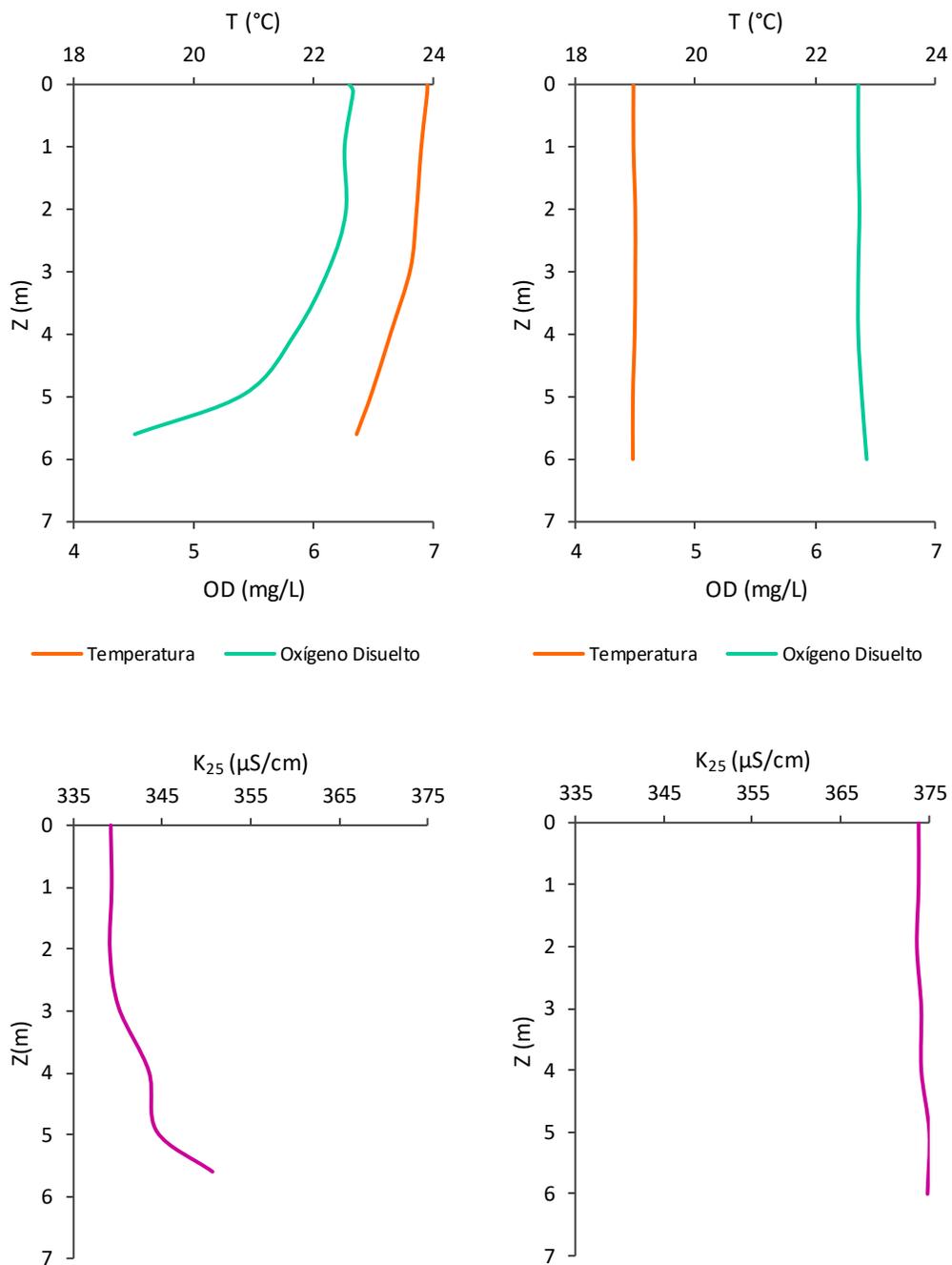
En época de secas, los perfiles de T, OD y  $K_{25}$  fueron homogéneos en la columna de agua en la mayoría de lagos (Figs. 7 y 8) a excepción de Dos Lagos y Patianú. El primero muestra una disminución de temperatura, de los 19.0 a los 18.0 °C entre los 2 y 13 m para a partir de esta profundidad mantenerse aproximadamente en los 18.5 °C hasta el fondo; el perfil de OD presenta grandes cambios a lo largo de toda la columna de agua, de igual manera que en el inicio de la época de lluvias muestra un perfil clinogrado y el perfil de conductividad muestra un aumento de superficie a fondo. En cuanto a Patianú, el OD y la T disminuyen en el fondo de la columna de agua; y la  $K_{25}$  presenta un aumento de la superficie hacia el fondo.



**Figura 8.** Perfil vertical de conductividad ( $K_{25}$ ) en Cinco Lagos durante el inicio de época de lluvias (izquierda) y época de secas (derecha) como ejemplo de un lago no impactado profundo. La línea punteada representa el límite del epilimnion.

## ii) SOMERO

En el inicio de la época de lluvias, a pesar de que Esmeralda no se estratificó, los valores tanto de T como de OD fueron disminuyendo desde la superficie hasta el fondo; mientras que el perfil de  $K_{25}$  tuvo un comportamiento opuesto, los valores menores se localizaron en la superficie y fueron aumentando hacia el fondo. En época de secas, la T, el OD y la  $K_{25}$  tuvieron un comportamiento homogéneo a lo largo de la columna de agua (Fig. 9).



**Figura 9.** Perfiles verticales de temperatura (T), concentración de oxígeno disuelto (OD) y conductividad ( $K_{25}$ ) en Esmeralda durante el inicio de la época de lluvias (izquierda) y época de secas (de derecha) como ejemplo de un lago no impactado somero.

## **b) LAGOS IMPACTADOS**

Durante el inicio de la época de lluvias los valores promedio para los lagos impactados fueron:  $21.5 \pm 2.2^{\circ}\text{C}$  de T,  $3.7 \pm 2.3$  mg/L de OD y  $592 \pm 135$   $\mu\text{S/cm}$  de  $K_{25}$ . Mientras que para la época de secas fueron de:  $18.7 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$  de T,  $7.2 \pm 9.4$  mg/L de OD y  $723 \pm 240$   $\mu\text{S/cm}$  de  $K_{25}$ .

Estos lagos presentan valores promedio mayores que los lagos no impactados de T y  $K_{25}$  para ambas épocas (a excepción de Dos Lagos, que presenta  $K_{25}$  similar a la de lagos impactados). Sin embargo, el promedio de OD es menor que el de los no impactados en el inicio de la época de lluvias y mayor en circulación. Se destaca que los valores máximos de OD de los lagos impactados es mucho mayor que los máximos de los lagos no impactados; San Lorenzo presentó el valor mayor en la superficie con una concentración de 25.7 mg/L durante el inicio de la época de lluvias.

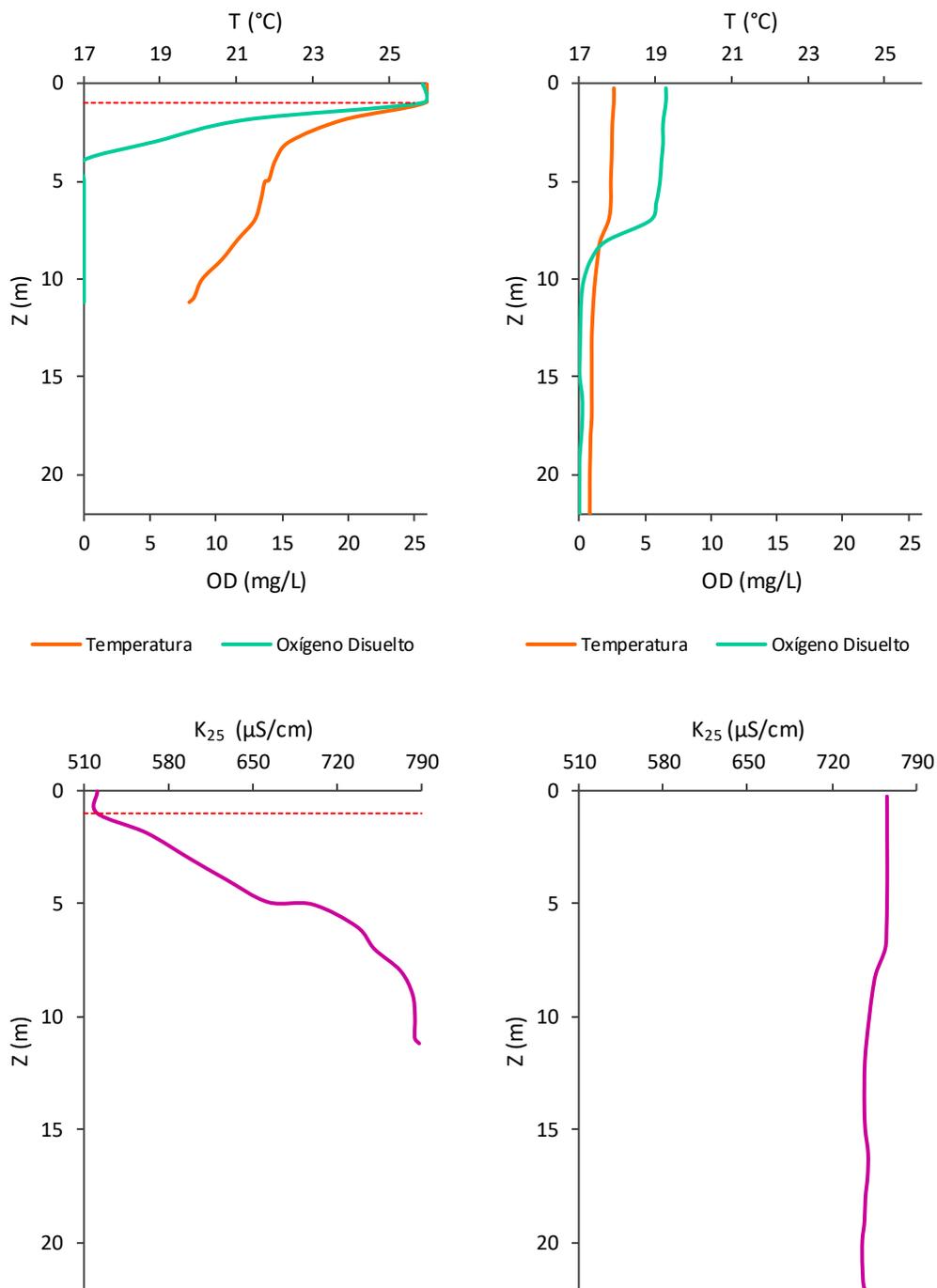
### **i) PROFUNDOS**

Ambos lagos, Encantada y San Lorenzo, se estratificaron en el inicio de la época de lluvias, los perfiles de OD fueron clinogrados y presentaron anoxia a partir de pocos metros de la superficie (3 m en Encantada y 3.9 m en San Lorenzo) a diferencia de los lagos no impactados en donde se inicia a mayor profundidad. La  $K_{25}$  presentó perfiles distintos entre lagos, mientras que San Lorenzo mostró un perfil como los demás lagos donde la  $K_{25}$  aumentó de superficie a fondo, Encantada fue el único lago que muestra un perfil de  $K_{25}$  donde ésta disminuye hacia el fondo desde la superficie.

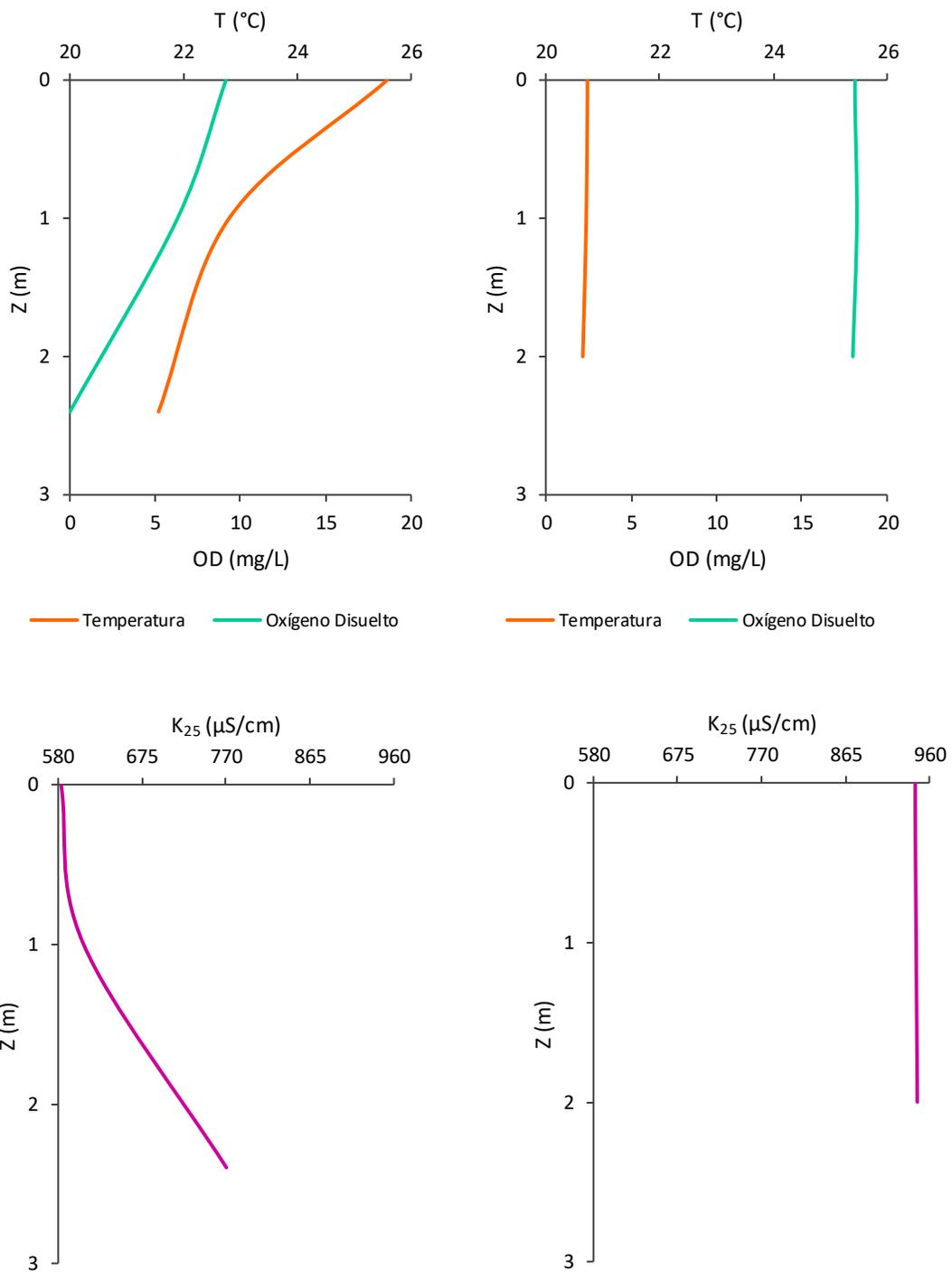
En la época de secas, la T se mantuvo constante en la columna, de igual forma para la conductividad. El perfil de OD presentó varios cambios a lo largo de la columna de agua y se registraron valores de anoxia, ahora a profundidades mayores, 44 m en Encantada y aproximadamente a los 10 m en San Lorenzo (Fig. 10).

### **ii) SOMERO**

Balantetic no se estratificó en el inicio de la época de lluvias, tanto la T como el OD descendieron desde la superficie y hacia el fondo. La concentración máxima de OD fue de 9.2 mg/L a nivel superficial, llegando a la anoxia a los 2.4 m de profundidad. La  $K_{25}$  aumentó de 583  $\mu\text{S/cm}$  en la superficie a 770  $\mu\text{S/cm}$  a los 4 m. En época de secas, los tres parámetros fueron homogéneos de superficie a fondo, sin presentarse anoxia (Fig. 11).



**Figura 10.** Perfiles verticales de temperatura (T), concentración de oxígeno disuelto (OD) y conductividad ( $K_{25}$ ) en San Lorenzo durante el inicio de la época de lluvias (izquierda) y la época de secas (derecha) como ejemplo de un lago impactado profundo. La línea punteada representa el límite del epilimnion.



**Figura 11.** Perfiles verticales de temperatura (T), concentración de oxígeno disuelto (OD) y conductividad ( $K_{25}$ ) en Balantetic durante el inicio de la época de lluvias (izquierda) y la época de secas (derecha) como ejemplo de un lago impactado somero.

### 10.1.2 Zona eufótica y capa de mezcla

La zona eufótica ( $Z_{EU}$ ) en los lagos no impactados fue casi 7 veces mayor en comparación con la de los lagos impactados. En el inicio de la época de lluvias, el promedio de la  $Z_{EU}$  de los lagos no impactados fue de  $17.3 \pm 10.1$  m y de los impactados fue de  $2.6 \pm 0.6$  m. Durante la época de secas, el promedio de la  $Z_{EU}$  de los lagos no impactados fue de  $20.6 \pm 12.2$  m y de los impactados fue de  $5.4 \pm 4.7$  m (Tabla 5).

La capa de mezcla ( $Z_{MIX}$ ) para los lagos no impactados fue 4 veces mayor que la de los lagos impactados. El promedio de  $Z_{MIX}$  de lagos no impactados es  $12.8 \pm 8.0$  m y para los impactados es de  $3.0 \pm 2.6$  m.

**Tabla 5.** Zona eufótica ( $Z_{EU}$ ) y capa de mezcla ( $Z_{MIX}$ ) en los nueve lagos de estudio durante el inicio de la época de lluvias y la época de secas. \* = la PAR alcanzó a penetrar hasta el fondo, — = no se tomaron muestras.

Lago	$Z_{EU}$ (m)		$Z_{MIX}$ (m)	
	Inicio lluvias	Secas	Inicio lluvias	Secas
<b>No impactados</b>				
Cinco Lagos	24.9	30.9	22.0	162.0*
Dos Lagos	19.6	19.4	5.0	11.0
Esmeralda	7.0*	7.0*	7.0*	7.0*
Ensueño	35.0*	35.0*	17.0	35.0*
Kichail	13.1	19.5	9.0	22.0*
Patianú	11.6	12.6	11.0	26*
<b>Impactados</b>				
Balantetic	2.1	—	3*	3.0*
Encantada	3.0	8.7	5.0	89*
San Lorenzo	—	2.0	1.0	67*

### 10.2 Materia total particulada

Las concentraciones de MTP en todos los lagos fueron mayores durante el inicio de la época de lluvias; los lagos no impactados presentaron concentraciones casi 5 veces menores que los lagos impactados (Fig. 12). El promedio en el inicio de la época de lluvias para los lagos no impactados fue de  $2.6 \pm 2.1$  mg/L y para los impactados fue de  $12.7 \pm 11.9$  mg/L. En época de secas, los lagos no impactados tuvieron un promedio de  $1.3 \pm 0.6$  mg/L y los impactados un promedio de  $9.1 \pm 3.9$  mg/L (Tabla 6).

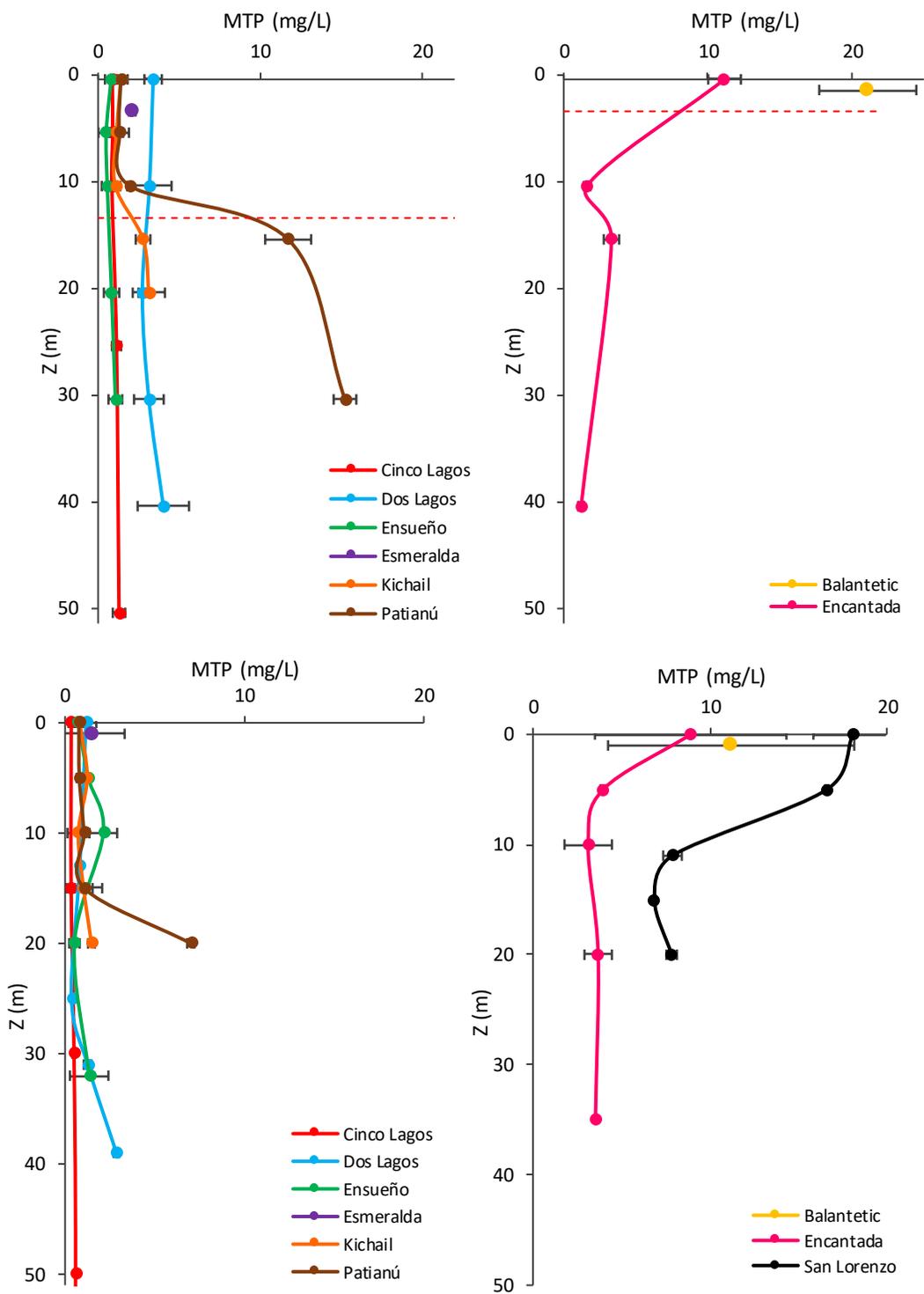
**Tabla 6.** Rango (Mín-Máx) y promedio con desviación estándar (d.e.) de MTP en la columna de agua de los lagos de estudio del PNLMDurante el inicio de la época de lluvias y la época de secas.

MTP (mg/L)				
Lago	Inicio época de lluvias		Época de secas	
	Mín-Máx	Promedio (d.e.)	Mín-Máx	Promedio (d.e.)
<b>No Impactados</b>				
Cinco Lagos	0.8-1.3	1.0 ( $\pm 0.2$ )	0.3-0.6	0.4 ( $\pm 0.1$ )
Dos Lagos	2.7-4.0	3.3 ( $\pm 0.5$ )	0.4-2.9	1.3 ( $\pm 0.9$ )
Ensueño	0.5-1.1	0.7 ( $\pm 0.2$ )	0.5-2.1	1.2 ( $\pm 0.6$ )
Esmeralda		2.1 ( $\pm 0.2$ )		1.5 ( $\pm 1.8$ )
Kichail	1.1-3.1	1.9 ( $\pm 1.0$ )	0.7-1.5	1.1 ( $\pm 0.3$ )
Patianú	1.3-15.2	6.3 ( $\pm 6.7$ )	0.8-7.0	2.1 ( $\pm 2.7$ )
<b>Impactados</b>				
Balantetic		21.1 ( $\pm 3.4$ )		11.2 ( $\pm 7.0$ )
Encantada	1.2-11.2	4.3 ( $\pm 4.6$ )	3.1-8.9	4.6 ( $\pm 2.4$ )
San Lorenzo	—	—	6.9-18.1	11.5 ( $\pm 5.4$ )

Durante el inicio de la época de lluvias, en los lagos no impactados la concentración mínima de MTP fue de  $0.5 \pm 0.5$  mg/L a los 5 m de profundidad en Ensueño. La concentración máxima se localizó en Patianú, a los 30 m, con un valor de  $15.2 \pm 0.7$  mg/L.

En época de secas, el valor mínimo ( $0.3 \pm 0.1$  mg/L) se encontró en Cinco Lagos en superficie y a los 15 m de profundidad, mientras que el máximo ( $7.0 \pm 0.2$  mg/L) se halló en Patianú a los 20 m. Patianú fue el lago no impactado que presentó los valores mayores de MTP (Fig. 12).

En los lagos impactados, durante el inicio de la época de lluvias, la concentración mínima fue de  $1.2 \pm 0.2$  mg/L en Encantada ( $Z = 40$  m); la concentración máxima fue de  $21.1 \pm 3.4$  mg/L y se localizó en Balantetic. En época de secas, el mínimo de  $3.1 \pm 1.3$  mg/L se encontró en Encantada ( $Z = 10$ ); y el máximo de  $18.1 \pm 2.2$  mg/L se presentó en la superficie de San Lorenzo.



**Figura 12.** Concentración de MTP en los lagos de estudio no impactados (izquierda) e impactados (derecha) del PNLM durante el inicio de la época de lluvias (arriba) y la época de secas (abajo). La línea punteada representa el límite promedio del epilimnion.

## a) LAGOS NO IMPACTADOS

En el inicio de la época de lluvias, todos los lagos presentaron un perfil con concentración creciente de MTP hacia el fondo, la concentración mínima se ubicó en la superficie para Cinco Lagos, Ensueño y Patianú; y a media agua para Dos Lagos y Kichail, la MTP fue aumentando hasta alcanzar su máximo en el fondo.

A excepción de Ensueño que presentó el máximo a media agua, todos los demás lagos durante la época de secas presentaron las concentraciones máximas de MTP en el fondo. Los perfiles muestran un comportamiento creciente conforme aumenta la profundidad.

### i) PROFUNDOS

**Cinco Lagos:** durante el inicio de la época de lluvias, el valor mínimo de MTP ( $0.8 \pm 0.3$  mg/L) se encontró en el epilimnion ( $Z = 10$  m) y el máximo ( $1.3 \pm 0.4$  mg/L) a los 50 m de profundidad. En la época de secas, el mínimo ( $0.3 \pm 0.1$  mg/L) se encontró en la capa de 0 a 15 m y el máximo ( $0.6 \pm 0.0$  mg/L) a los 50 m de profundidad.

**Dos Lagos:** el mínimo de MTP en el inicio de la época de lluvias fue de  $2.7 \pm 0.2$  mg/L ( $Z = 20$  m) y el máximo de  $4.0 \pm 1.6$  mg/L a los 40 m. En época de secas, el mínimo de  $0.4 \pm 0.0$  mg/L se halló a los 25 m y el máximo de  $2.9 \pm 0.2$  mg/L se presentó a los 39 m. Los perfiles muestran una disminución de MTP desde la superficie hacia los 20 y 25 metros de profundidad, donde se halló el valor mínimo. A partir de estas profundidades la concentración aumenta hasta llegar a su valor máximo en el fondo del lago.

**Ensueño:** la MTP mínima en el inicio de la época de lluvias fue de  $0.5 \pm 0.5$  mg/L ( $Z = 5$  m) y la máxima de  $1.1 \pm 0.4$  mg/L ( $Z = 30$  m). Ensueño presentó las concentraciones de MTP más bajas de todos los lagos en esta época. Durante la época de secas la MTP varió de  $0.5 \pm 0.3$  mg/L a los 20 m de profundidad a  $2.1 \pm 0.8$  mg/L a los 10 m.

**Kichail:** durante el inicio de la época de lluvias, la concentración de MTP varió muy poco en el epilimnion (de  $1.1 \pm 0.4$  a  $1.4 \pm 0.2$  mg/L). El mínimo de MTP se halló entre los 5 y 10 m ( $1.1 \pm 0.4$  mg/L) y el máximo a los 20 m ( $3.1 \pm 1.0$  mg/L). Durante la época de secas, el mínimo se halló a los 10 m ( $0.7 \pm 0.6$  mg/L) y el máximo de  $1.5 \pm 0.2$  mg/L se encontró en el fondo.

**Patianú:** de los lagos no impactados, éste presentó las concentraciones mayores de MTP en las dos épocas. En el inicio de la época de lluvias, el valor mínimo fue de  $1.3 \pm 0.6$  mg/L a los 5 m y el máximo de  $15.2 \pm 0.7$  mg/L en el fondo. Durante la época de secas, la MTP se mantuvo relativamente constante en casi toda la columna de agua con incremento a los 20 m de profundidad ( $7.0 \pm 0.2$  mg/L).

i) SOMERO

**Esmeralda:** las concentraciones de MTP fueron mayores durante el inicio de la época de lluvias ( $2.1 \pm 0.2$  mg/L) que en la época de secas ( $1.5 \pm 1.8$  mg/L).

**b) LAGOS IMPACTADOS**

A diferencia de los lagos no impactados, los perfiles de los lagos impactados profundos, muestran una disminución de concentraciones de MTP de la superficie hacia el fondo para ambas épocas.

i) PROFUNDOS

**Encantada:** en el inicio de la época de lluvias, se presentó un mínimo de  $1.2 \pm 0.2$  mg/L (40 m) y un máximo de  $11.2 \pm 1.1$  mg/L en superficie. En la época de secas, el mínimo fue de  $3.1 \pm 1.3$  mg/L (10 m) y el máximo fue de  $8.9 \pm 5.4$  mg/L registrado nuevamente en superficie. Encantada fue el lago impactado con concentraciones promedio menores en ambas épocas.

**San Lorenzo:** no se pudieron obtener datos para el muestreo de 2014 de este lago debido a problemas ejidales. En la época de secas, la concentración mínima fue de  $6.9 \pm 0.1$  mg/L a los 15 m de profundidad y la máxima fue de  $18.1 \pm 2.2$  mg/L en superficie.

ii) SOMERO

**Balantetic:** en el inicio de la época de lluvias, la concentración de MTP fue de  $21.1 \pm 3.4$  mg/L siendo éste el mayor valor de MTP encontrado de los lagos impactados durante ambas épocas. En época de secas, la concentración fue de  $11.2 \pm 7.0$  mg/L a un metro de profundidad.

## 10.3 Carbono particulado

### CTP, COP Y CIP

En el inicio de la época de lluvias (Tabla 7), los promedios para CTP, COP y CIP fueron  $1,186 \pm 894 \mu\text{g/L}$ ,  $900 \pm 809 \mu\text{g/L}$ ,  $286 \pm 251 \mu\text{g/L}$ , respectivamente. La concentración mínima de CTP fue de  $373 \pm 11 \mu\text{g/L}$  en Dos Lagos ( $Z = 20 \text{ m}$ ) y la máxima fue  $4,792 \pm 428 \mu\text{g/L}$  en Encantada (en superficie). La concentración mínima de COP fue de  $237 \pm 55 \mu\text{g/L}$  en Dos Lagos y la máxima fue de  $4,420 \pm 79 \mu\text{g/L}$  en Encantada, ambas concentraciones en superficie. Para CIP la concentración mínima fue de  $24 \pm 1 \mu\text{g/L}$  en Ensueño ( $Z = 30 \text{ m}$ ) y la máxima de  $1,026 \pm 669 \mu\text{g/L}$  en Encantada ( $Z = 15 \text{ m}$ ).

**Tabla 7.** Rango (Mín-Máx) y promedio con desviación estándar (d.e.) de CTP, COP y CIP en la columna de agua de los lagos de estudio del PNLM durante el inicio de la época de lluvias.

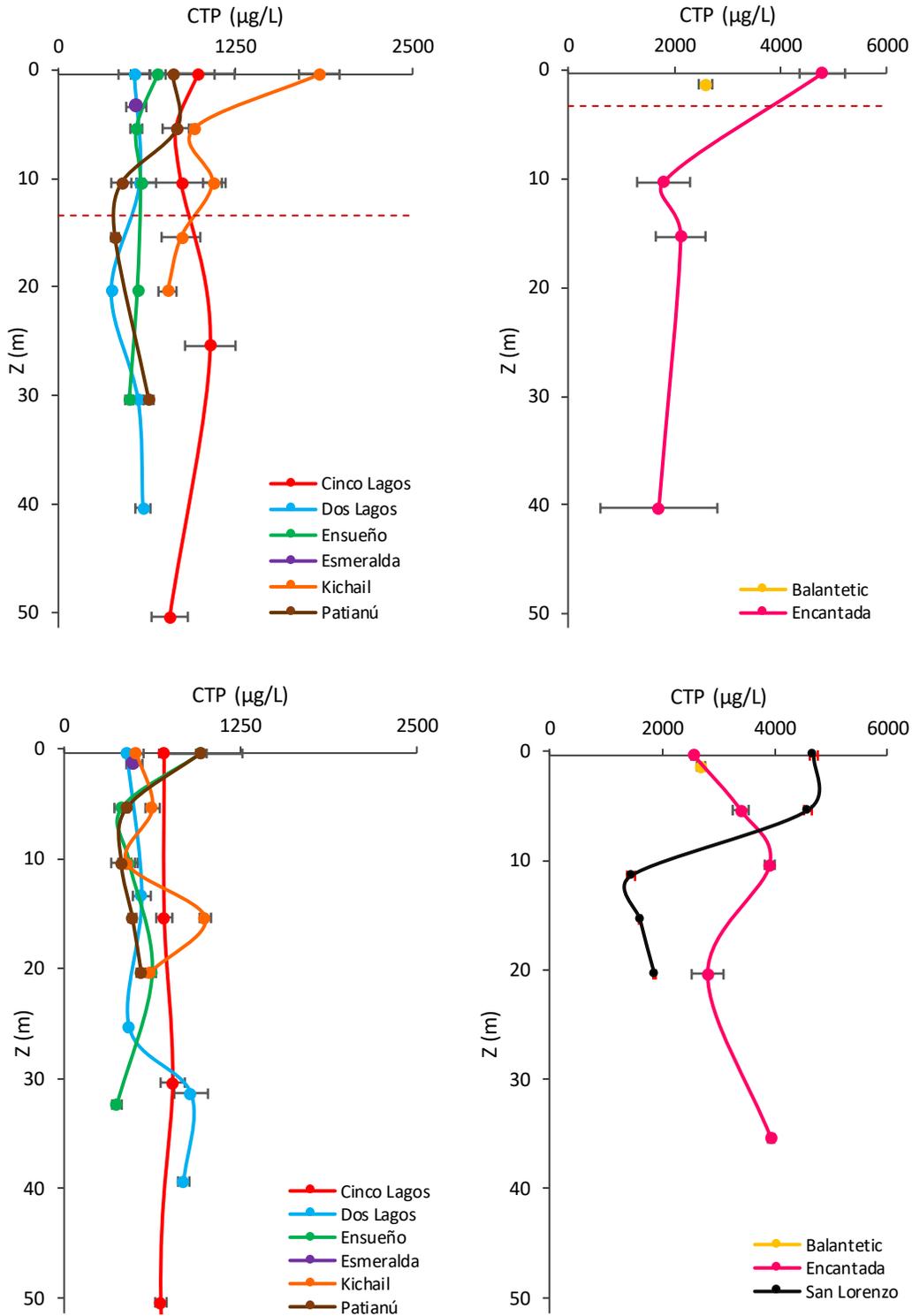
Inicio época de lluvias	CTP ( $\mu\text{g/L}$ )		COP ( $\mu\text{g/L}$ )		CIP ( $\mu\text{g/L}$ )	
	Lago	Mín-Máx	Promedio (d.e.)	Mín-Máx	Promedio (d.e.)	Mín-Máx
<b>No Impactados</b>						
Cinco Lagos	786-1072	907 ( $\pm 118$ )	307-715	507 ( $\pm 180$ )	109-560	400 ( $\pm 183$ )
Dos Lagos	373-597	528 ( $\pm 90$ )	237-394	332 ( $\pm 61$ )	52-299	196 ( $\pm 91$ )
Ensueño	500-700	577 ( $\pm 75$ )	476-638	535 ( $\pm 64$ )	24-62	43 ( $\pm 16$ )
Esmeralda		550 ( $\pm 71$ )		377 ( $\pm 25$ )		173 ( $\pm 45$ )
Kichail	770-1841	1104 ( $\pm 428$ )	503-831	666 ( $\pm 138$ )	164-1011	438 ( $\pm 330$ )
Patianú	400-838	626 ( $\pm 201$ )	276-624	456 ( $\pm 158$ )	62-309	170 ( $\pm 95$ )
<b>Impactados</b>						
Balantetic		2590 ( $\pm 127$ )		2520 ( $\pm 170$ )		70 ( $\pm 42$ )
Encantada	1711-4792	2606 ( $\pm 1468$ )	724-4420	1806 ( $\pm 1750$ )	372-1026	800 ( $\pm 300$ )
San Lorenzo	—	—	—	—	—	—

En época de secas, los promedios para CTP, COP y CIP fueron  $1,392 \pm 1,186 \mu\text{g/L}$ ,  $981 \pm 962 \mu\text{g/L}$ ,  $411 \pm 280 \mu\text{g/L}$ , respectivamente (Tabla 8). La concentración mínima de CTP fue de  $374 \pm 34 \mu\text{g/L}$  en Ensueño ( $Z = 32 \text{ m}$ ) y la máxima fue de  $4,700 \pm 71 \mu\text{g/L}$  en San Lorenzo ( $Z = 0 \text{ m}$ ). La concentración mínima de COP fue de  $249 \pm 57 \mu\text{g/L}$  en Ensueño ( $Z = 10 \text{ m}$ ) y Kichail ( $Z = 5 \text{ m}$ ) y la concentración máxima fue de  $4,250 \pm 75 \mu\text{g/L}$  en San Lorenzo ( $Z = 0 \text{ m}$ ). El CIP mínimo se encontró en la superficie de Encantada ( $10 \pm 67 \mu\text{g/L}$ ) y la concentración máxima fue de  $2,166 \pm 91 \mu\text{g/L}$  también en Encantada (en el fondo).

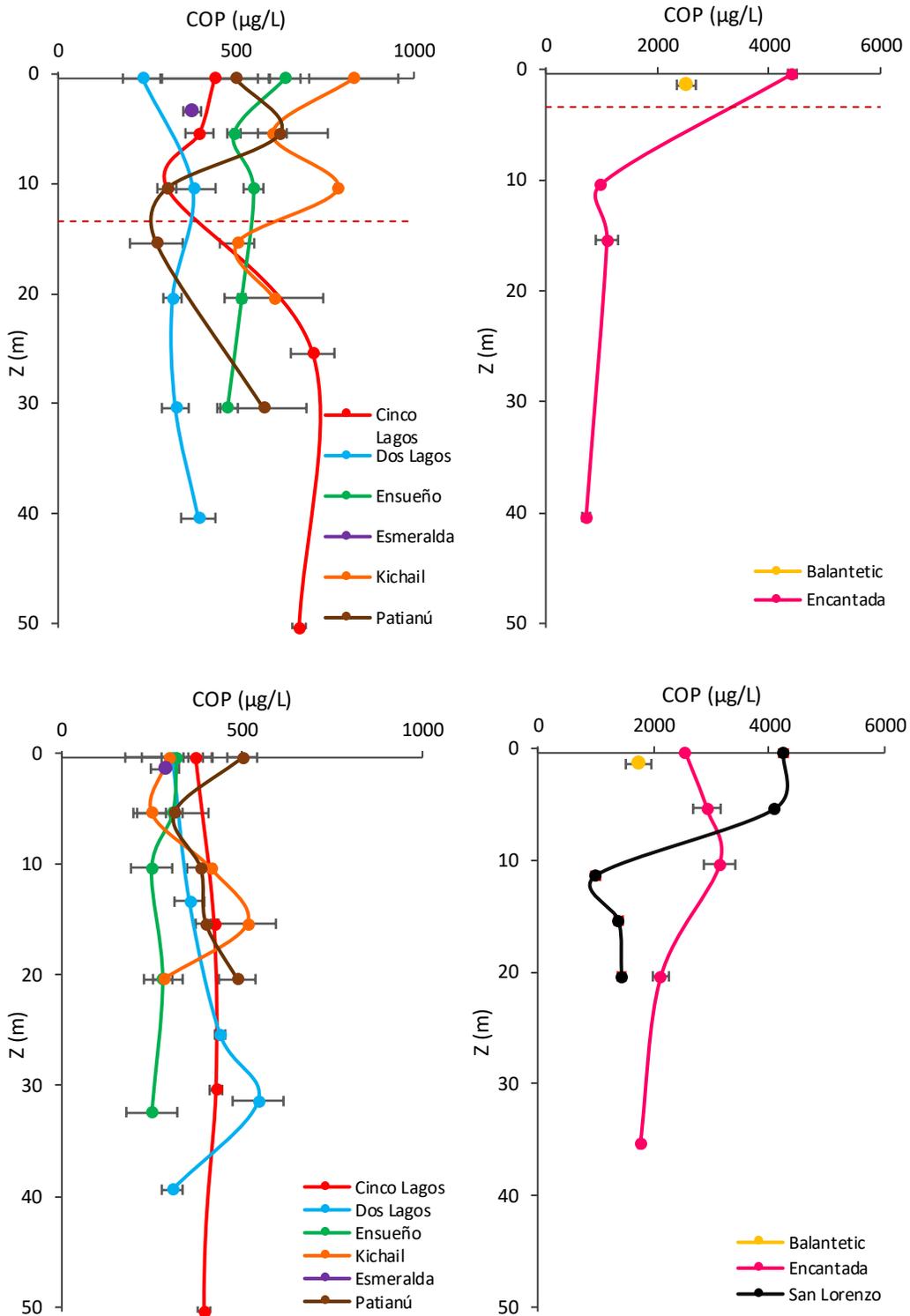
**Tabla 8.** Rango (Mín-Máx) y promedio con desviación estándar (d.e.) de CTP, COP y CIP en la columna de agua de los lagos de estudio del PNLM durante la época de secas.

Época de secas	CTP (µg/L)		COP (µg/L)		CIP (µg/L)	
	Lago	Mín-Máx	Promedio (d.e.)	Mín-Máx	Promedio (d.e.)	Mín-Máx
<b>No Impactados</b>						
Cinco Lagos	686-869	748 (±74)	371-439	411 (±28)	288-430	338 (±57)
Dos Lagos	445-900	641 (±217)	306-544	390 (±102)	23-541	250 (±202)
Ensueño	374-972	568 (±246)	249-319	281 (±32)	99-653	287 (±226)
Esmeralda		498 (±57)		286 (±39)		212 (±19)
Kichail	443-1001	637 (±216)	249-514	351 (±110)	30-487	286 (±174)
Patianú	404-968	569 (±229)	312-500	417 (±78)	19-468	152 (±181)
<b>Impactados</b>						
Balantetic		2694 (±73)		1744 (±221)		950 (±148)
Encantada	2567-3940	3327 (±627)	1774-3145	2506 (±562)	0010-2166	820 (±808)
San Lorenzo	1451-4700	2845 (±1653)	1000-4250	2440 (±1594)	211-495	405 (±112)

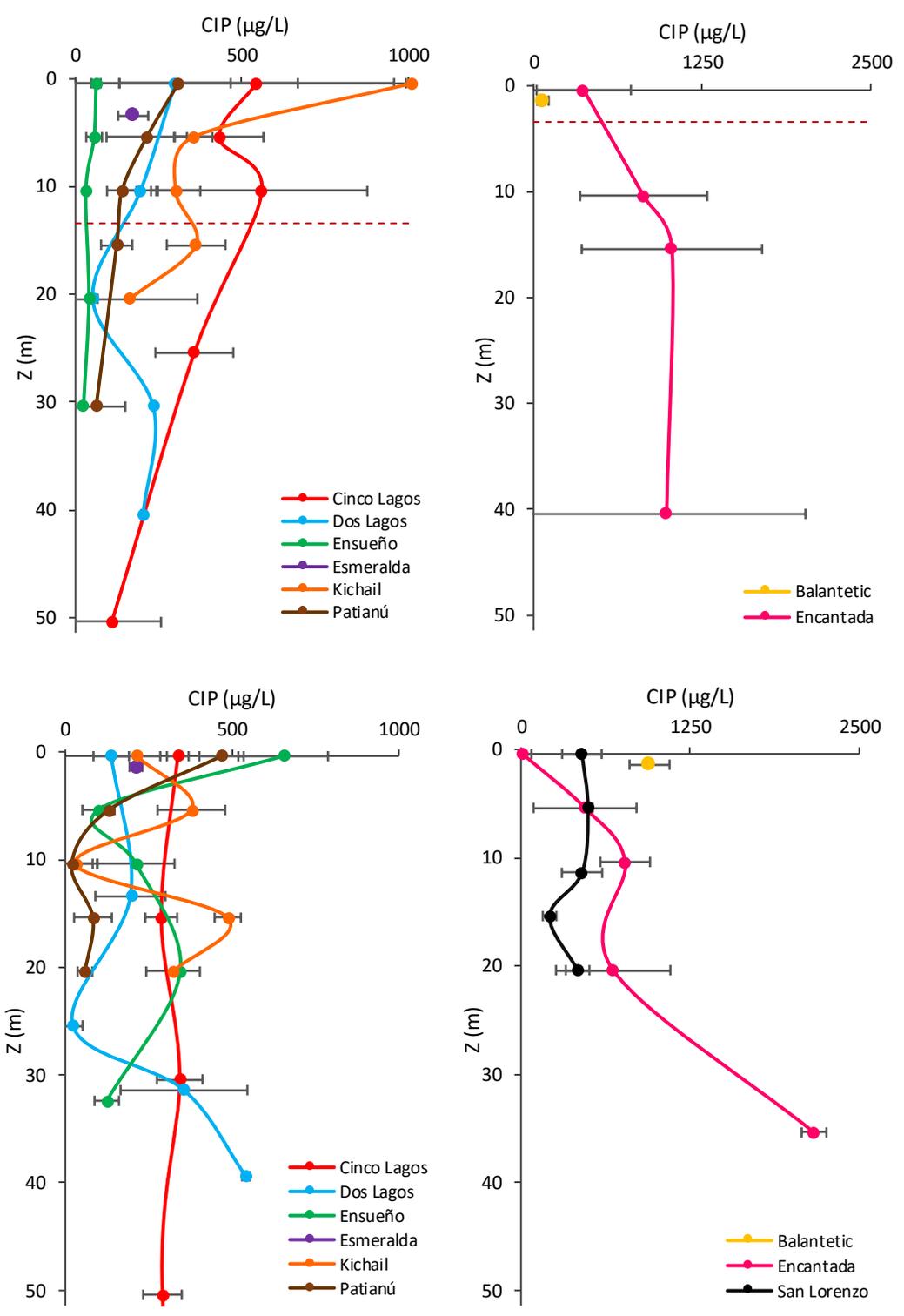
Tanto para el inicio de la época de lluvias como para la época de secas los valores de CTP (Fig. 13), COP (Fig. 14) y CIP (Fig. 15) fueron de 3 a 6 veces mayores en los lagos impactados que en los lagos no impactados. En los lagos no impactados el CTP y el COP fueron mayores de 1.2-1.3 veces en el inicio de la época de lluvias, en época de secas, únicamente el CIP fue similar en ambas épocas. En los lagos impactados el CTP y sus dos fracciones fueron ligeramente mayores (1.1-1.7 veces) en época de secas que en el inicio de la época de lluvias.



**Figura 13.** Concentración de CTP en los lagos de estudio no impactados (izquierda) e impactados (derecha) del PNLM durante el inicio de la época de lluvias (arriba) y la época de secas (abajo). La línea a punteada representa el límite promedio del epilimnion.



**Figura 14.** Concentración de COP en los lagos de estudio no impactados (izquierda) e impactados (derecha) del PNLM durante el inicio de la época de lluvias (arriba) y la época de secas (abajo). La línea a punteada representa el límite promedio del epilimnion.



**Figura 15.** Concentración de CIP en los lagos de estudio no impactados (izquierda) e impactados (derecha) del PNLM durante el inicio de la época de lluvias (arriba) y la época de secas (abajo). La línea punteada representa el límite promedio del epilimnion.

## a) LAGOS NO IMPACTADOS

### ii) PROFUNDOS

Para las tres fracciones del carbono, en general, las concentraciones máximas se encontraron en la superficie, durante el inicio de la época de lluvias, salvo en Cinco Lagos y Dos Lagos que se localizaron en el metalimnion, éstas fueron disminuyendo hasta alcanzar el mínimo en el metalimnion y el hipolimnion.

En la época de secas, en Cinco Lagos los perfiles fueron homogéneos; para Dos Lagos y Kichail las concentraciones mínimas se localizaron en profundidades superficiales y fueron aumentando hasta alcanzar las concentraciones máximas en el fondo; mientras que para Ensueño y Patianú, los perfiles de COP se mantuvieron homogéneos, los de CTP y CIP presentaron concentraciones máximas en superficie y fueron disminuyendo hacia profundidades mayores (Fig. 13-15).

**Cinco Lagos:** en el inicio de la época de lluvias, el promedio para CTP, COP y CIP fue  $907 \pm 118$   $\mu\text{g/L}$ ,  $507 \pm 180$   $\mu\text{g/L}$  y  $400 \pm 183$   $\mu\text{g/L}$  respectivamente, mientras que durante la época de secas fue  $748 \pm 74$   $\mu\text{g/L}$  para CTP,  $411 \pm 28$   $\mu\text{g/L}$  para COP y  $338 \pm 57$   $\mu\text{g/L}$  para CIP. Los valores de CTP, COP y CIP fueron 1.2 veces mayores durante el inicio de la época de lluvias. El valor máximo de CTP fue de  $1,072 \pm 178$   $\mu\text{g/L}$  en  $Z = 25$  m y el mínimo fue de  $786 \pm 128$   $\mu\text{g/L}$  en  $Z = 50$  m. Para COP el máximo fue de  $715 \pm 61$   $\mu\text{g/L}$  (25 m) y el mínimo de  $307 \pm 3$  (10 m). El CIP tuvo valores de  $109 \pm 148$  a  $560 \pm 317$   $\mu\text{g/L}$  en 50 m y 10 m respectivamente.

En época de secas, el cambio en las concentraciones de CTP ( $686 \pm 40$  -  $869 \pm 126$   $\mu\text{g/L}$ ), COP ( $371 \pm 20$  -  $439 \pm 20$   $\mu\text{g/L}$ ) y CIP ( $288 \pm 48$  -  $430 \pm 106$   $\mu\text{g/L}$ ) fue pequeño, de tan solo 1.3-1.5 veces.

**Dos Lagos:** en el inicio de la época de lluvias, la concentración máxima de CTP ( $597 \pm 53$   $\mu\text{g/L}$ ) y COP ( $394 \pm 48$   $\mu\text{g/L}$ ) se encontró a una profundidad de 40 m. El máximo de CIP ( $299 \pm 167$   $\mu\text{g/L}$ ) se presentó en la superficie. La concentración mínima de CTP ( $373 \pm 11$   $\mu\text{g/L}$ ) y CIP ( $52 \pm 15$   $\mu\text{g/L}$ ) se registraron a una profundidad de 20 m y la de COP ( $237 \pm 55$   $\mu\text{g/L}$ ) en la superficie.

En época de secas, los valores máximos de CTP ( $900 \pm 120$   $\mu\text{g/L}$ ) y COP ( $544 \pm 71$   $\mu\text{g/L}$ ) se presentaron a los 31 m de profundidad y el de CIP ( $541 \pm 12$   $\mu\text{g/L}$ ) en el fondo, mientras que los valores mínimos se localizaron en la superficie para CTP ( $445 \pm 23$   $\mu\text{g/L}$ ), a los 0 y 39 m para COP ( $306 \pm 29$   $\mu\text{g/L}$ ) y a los 25 m para CIP ( $23 \pm 29$   $\mu\text{g/L}$ ).

**Ensueño:** durante el inicio de la época de lluvias, los valores máximos de todas las fracciones del carbono (CTP =  $700 \pm 57$   $\mu\text{g/L}$ , COP =  $638 \pm 43$   $\mu\text{g/L}$  y CIP =  $62 \pm 14$   $\mu\text{g/L}$ ) se encontraron en la superficie y los valores mínimos (CTP =  $500 \pm 28$   $\mu\text{g/L}$ , COP =  $476 \pm 29$   $\mu\text{g/L}$  y CIP =  $24 \pm 1$

$\mu\text{g/L}$ ) se presentaron en el fondo. Este lago presentó los valores más bajos de CIP de todos los lagos durante el inicio de la época de lluvias.

En la época de secas también se presentaron las concentraciones máximas (CTP =  $972 \pm 37 \mu\text{g/L}$ , COP =  $319 \pm 97 \mu\text{g/L}$  y CIP =  $653 \pm 134 \mu\text{g/L}$ ) en la superficie. Además, en comparación con los demás lagos, en Ensueño se registraron las concentraciones mínimas de COP ( $249 \pm 57 \mu\text{g/L}$ ), mientras que el mínimo para CTP y CIP fue de  $374 \pm 34 \mu\text{g/L}$  y  $99 \pm 48 \mu\text{g/L}$  respectivamente en la época de secas.

**Kichail:** las mayores concentraciones de todas las fracciones del carbono particulado se encontraron en el inicio de la época de lluvias, es decir casi el doble que durante la época de secas. El intervalo para el CTP fue de  $770 \pm 63$  a  $1,841 \pm 143$  (superficie)  $\mu\text{g/L}$ . Para el COP fue de  $503 \pm 48$  a  $831 \pm 125 \mu\text{g/L}$  y para el CIP fue de  $164 \pm 202$  a  $1,011 \pm 18 \mu\text{g/L}$ . Para las tres fracciones de carbono las mayores concentraciones se registraron en superficie.

Durante la época de secas, el intervalo para CTP fue de  $443 \pm 59$  (Z = 10 m) a  $1,001 \pm 40 \mu\text{g/L}$  (Z = 15 m). Para el COP fue de  $249 \pm 51$  (Z = 5 m) a  $514 \pm 80$  (Z = 15 m)  $\mu\text{g/L}$  y para el CIP fue de  $30 \pm 52$  (Z = 10 m) a  $487 \pm 39 \mu\text{g/L}$  (Z = 15 m).

**Patianú:** se presentaron concentraciones máximas de CTP ( $838 \pm 13 \mu\text{g/L}$ ) y COP ( $624 \pm 134 \mu\text{g/L}$ ) en el inicio de la época de lluvias, a una profundidad de 5 m y las mínimas para estas mismas fracciones (CTP =  $400 \pm 27 \mu\text{g/L}$  y COP =  $276 \pm 74 \mu\text{g/L}$ ) a los 15 m. El CIP mostró su máximo ( $309 \pm 359 \mu\text{g/L}$ ) en la superficie y el mínimo ( $62 \pm 88 \mu\text{g/L}$ ) en el fondo.

En época de secas, los máximos se encontraron en la superficie (CTP =  $968 \pm 25 \mu\text{g/L}$ , COP =  $500 \pm 41 \mu\text{g/L}$  y CIP =  $468 \pm 67 \mu\text{g/L}$ ). Las concentraciones mínimas de CTP ( $404 \pm 39 \mu\text{g/L}$ ) y CIP ( $19 \pm 77 \mu\text{g/L}$ ) se hallaron a los 19 m, mientras que el mínimo del COP fue de  $312 \pm 23 \mu\text{g/L}$  a los 5 m de profundidad.

### iii) SOMERO

**Esmeralda:** durante el inicio de la época de lluvias los valores de CTP ( $550 \pm 71 \mu\text{g/L}$ ) y COP ( $377 \pm 25 \mu\text{g/L}$ ) fueron 1.2 veces mayores que en época de secas (CTP =  $498 \pm 57 \mu\text{g/L}$  y COP =  $286 \pm 39 \mu\text{g/L}$ ). En contraste, las concentraciones de CIP fueron mayores, también 1.2 veces, en la época de secas ( $212 \pm 19 \mu\text{g/L}$ ) que en el inicio de la época de lluvias ( $173 \pm 45 \mu\text{g/L}$ ).

## b) LAGOS IMPACTADOS

### i) PROFUNDOS

Durante el inicio de la época de lluvias, la distribución del CTP y COP en Encantada (ya que San Lorenzo no se muestreó, por problemas ejidales) fue heterogénea, es decir, las concentraciones máximas se encontraron en la superficie y fueron disminuyendo hasta alcanzar las mínimas en el fondo, respecto al CIP la concentración mínima se ubicó en superficie y la máxima a media agua.

En época de secas, Encantada y San Lorenzo presentaron diferentes patrones en su distribución vertical de COP y CTP, ya que mientras el primero presentó concentraciones mínimas en superficie y las máximas a media agua, el segundo mostró concentraciones máximas a nivel superficial y fueron disminuyendo hasta alcanzar las mínimas a media agua. En relación con el perfil del CIP, éste fue homogéneo (Figs. 13-15).

**Encantada:** es el lago impactado que presenta mayores concentraciones máximas de CTP ( $4,792 \pm 428 \mu\text{g/L}$ ) y COP ( $4,420 \pm 79 \mu\text{g/L}$ ) durante el inicio de la época de lluvias, presentándose ambos valores en la superficie. El mínimo de CTP ( $1,711 \pm 1,102 \mu\text{g/L}$ ) y COP ( $724 \pm 72 \mu\text{g/L}$ ) se localizó a 40 m de profundidad. En cuanto al CIP, la concentración máxima ( $1,026 \pm 669 \mu\text{g/L}$ ) se presentó a los 15 m y la mínima ( $372 \pm 350 \mu\text{g/L}$ ) en superficie.

Durante la época de secas, las concentraciones máximas de CTP ( $3,940 \pm 56 \mu\text{g/L}$ ) y CIP ( $2,166 \pm 91 \mu\text{g/L}$ ) se encontraron a los 35 m y sus mínimos (CTP =  $2,567 \pm 47 \mu\text{g/L}$  y CIP =  $10 \pm 67 \mu\text{g/L}$ ) se localizaron a nivel superficial. Las concentraciones de COP se presentaron en un intervalo de  $1,774 \pm 35$  a  $3,145 \pm 272 \mu\text{g/L}$  a los 35 y 10 m, respectivamente.

**San Lorenzo:** durante el inicio de la época de lluvias no se pudieron obtener muestras. En la época de secas, las concentraciones máximas de CTP y COP se encontraron en la superficie con valores de  $4,700 \pm 71 \mu\text{g/L}$  y  $4,250 \pm 75 \mu\text{g/L}$  respectivamente, el valor máximo de CIP fue  $495 \pm 35 \mu\text{g/L}$  a los 5 m de profundidad. Las concentraciones mínimas de CTP ( $1,451 \pm 71 \mu\text{g/L}$ ) y COP ( $1,000 \pm 78 \mu\text{g/L}$ ) se encontraron a los 11 m de profundidad, mientras que el valor mínimo de CIP fue de  $211 \pm 50 \mu\text{g/L}$  a los 15 m.

ii) SOMERO

**Balantetic:** durante el inicio de la época de lluvias este lago presentó concentraciones menores de CTP ( $2,590 \pm 127 \mu\text{g/L}$ ) y CIP ( $70 \pm 42 \mu\text{g/L}$ ), en comparación con la época de secas: CTP ( $2,694 \pm 73 \mu\text{g/L}$ ) y CIP ( $950 \pm 148 \mu\text{g/L}$ ). El COP fue mayor en el inicio de la época de lluvias ( $2,520 \pm 170 \mu\text{g/L}$ ) que en la época de secas ( $1,744 \pm 221 \mu\text{g/L}$ ).

## 11. DISCUSIÓN

Durante el inicio de la época de lluvias todos los lagos se encontraron estratificados a excepción de Balantetic y Esmeralda los cuales, debido a su someridad, se encontraron circulando. En la época de secas los lagos se encuentran circulando a excepción de Dos Lagos, ya que a pesar de que éste presentó un perfil homotermo de superficie a fondo indicando condiciones propicias para circular, se encontró una capa anóxica en el fondo, así como un perfil heterogéneo de  $K_{25}$  lo que sugiere que el viento no ha podido iniciar el proceso de circulación.

Se identifican diferencias entre lagos impactados y no impactados en T, OD y  $K_{25}$ . Los lagos impactados presentan valores de T más altos en ambas temporadas y a inicio de la época de lluvias los perfiles muestran clinas someras y estrechas, mientras que los no impactados presentan valores menores de T en ambas épocas y clinas más profundas y extensas durante el inicio de la época de lluvias. Debido a que los componentes particulados regulan la atenuación de la luz en la mayoría de aguas continentales (Effler *et al.*, 2002), a mayor material particulado, como en el caso de los lagos impactados, mayor atenuación de la luz y menor penetración de ésta en la columna de agua, y como resultado las temperaturas son mayores y las clinas más someras.

En cuanto al OD al inicio de la época de lluvias, los lagos impactados tienen valores promedio menores que los no impactados, ya que la capa anóxica es mayor, y durante la época de secas los promedios son mayores. Aunque tanto al inicio de la época de lluvias como durante la época de secas los valores máximos se encuentran en la superficie de los lagos impactados, lo que sugiere una mayor actividad fitoplanctónica, debido a que la concentración de nutrientes presentes en éstos es mayor. Además, los lagos impactados presentaron porcentajes de sobresaturación de OD en superficie lo que confirma lo anteriormente mencionado.

En el inicio de la época de lluvias y a excepción de Esmeralda (somero y no impactado), los lagos presentan anoxia, independientemente de su clasificación como impactados o no; la diferencia es que el oxígeno se agota en los primeros metros en los lagos impactados, y en los no impactados se agota a profundidades mayores. Durante la época de secas, las mayores diferencias se encuentran entre los lagos profundos, ya que los someros circulan, los lagos impactados tienen perfiles heterogéneos y presentan anoxia en las aguas profundas, lo que indica que se consume rápidamente el OD en el fondo al oxidar la materia orgánica que reciben; los lagos no impactados tienen perfiles homogéneos a excepción de Patianú que tiene una ligera oxiclina y Dos Lagos que además es el único lago no impactado en donde se encontró anoxia en el fondo en ambos muestreos sugiriendo que aún no circulaba en el muestreo de la época de secas.

Acerca de la  $K_{25}$ , los lagos impactados presentan valores promedio mayores que los no impactados en ambas épocas, aunque es preciso señalar que Dos Lagos, a pesar de ser un lago no impactado, tiene los valores más elevados de  $K_{25}$  de los 9 lagos estudiados y que esta sea la posible explicación por la que no se encontró circulando totalmente en época de secas, es decir, a causa de una estratificación derivada no de la temperatura sino de la conductividad (haloclina). En el inicio de la época de lluvias, los perfiles muestran valores menores en superficie y mayores hacia el fondo a excepción de Encantada. Una disminución en la  $K_{25}$  en el epilimnion podría estar asociada con un incremento de la fotosíntesis por el fitoplancton si los principales iones son nutrientes (Wetzel, 2001). Durante la época de secas, Dos lagos y Patianú son los únicos lagos que no presentaron perfiles homogéneos de conductividad lo que indica como se ha mencionado antes, que Dos Lagos no estaba circulando; respecto al aumento de la  $K_{25}$  a media agua en Patianú puede deberse a la entrada de aguas subterráneas o a una descomposición de la materia orgánica, ya que las aguas subterráneas generalmente presentan salinidad alta y los valores de conductividad aumentan cuando se descompone la materia orgánica (Wetzel, 2001).

La profundidad de la zona eufótica ( $Z_{EU}$ ) y de la capa de mezcla ( $Z_{MIX}$ ) en ambas temporadas es mayor en los lagos no impactados que en los impactados, debido a que éstos últimos tienen mayor presencia de material particulado y esto impide –atenúa– la penetración de la luz a mayores profundidades como se mencionó anteriormente. La  $Z_{EU}$  aumentó en época de secas en todos los lagos dado que la mezcla distribuye el material particulado en la columna y puede penetrar más luz.

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, así como de procesos físicos tales como la sedimentación, la resuspensión y el transporte horizontal (Callieri *et al.*, 1991).

En el inicio de la época de lluvias, los resultados del CP muestran dos tipos de distribución vertical: 1) aquellos lagos cuya concentración máxima se encontró cerca de la superficie y 2) los que presentaron la concentración máxima a media agua, independientemente de su clasificación como impactados o no impactados. Para CTP y COP, Dos Lagos, Ensueño, Kichail, Patianú y Encantada presentaron el máximo cerca de superficie, mientras que Cinco Lagos lo hizo a media agua; para CIP, Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Kichail y Patianú presentaron la concentración máxima cerca de superficie y Encantada a media agua.

En época de secas únicamente Cinco Lagos presentó una distribución homogénea de CP, para los demás lagos los resultados muestran dos tipos de distribución vertical: 1) aquellos lagos cuyas concentraciones máximas se encuentran cerca de la superficie y 2) los lagos que la presentaron en el fondo, salvo Encantada que presentó su máximo de COP a media agua. Para CTP y CIP, Ensueño, Patianú y San Lorenzo presentan la concentración máxima cerca de

superficie, mientras que Kichail, Dos Lagos y Encantada la presentaron en el fondo; para COP, Ensueño, Patianú y San Lorenzo presentaron la concentración máxima cerca de superficie, mientras que Kichail y Dos Lagos en el fondo.

El hecho de que el CP se concentre principalmente en los primeros metros de la columna de agua, es debido a la termoclina que se forma en estos lagos y que funciona como una barrera efectiva contra la exportación del CP al hipolimnion (Alcocer *et al.*, 2007) y en el caso de Cinco Lagos que presentó la máxima concentración a media agua, puede deberse a un máximo profundo de clorofila que coincide con un máximo de OD. En cambio, durante la época de secas, el CP principalmente se concentra en el fondo, debido a la resuspensión de sedimentos.

Aunque los perfiles no mostraron distribuciones distintas del CP entre los lagos impactados y no impactados, las concentraciones sí presentaron diferencias.

Independientemente de la época, los lagos impactados presentan mayores concentraciones de CP (3-6 veces) que los lagos no impactados para todas las fracciones. Los lagos no impactados tienen concentraciones promedio y máximas más grandes de CTP y COP en el inicio de la época de lluvias que en época de secas, en caso del CIP el valor promedio mayor se presenta en época de secas mientras que la concentración máxima se presenta en el inicio de la época de lluvias en el lago Kichail. Los valores más altos de COP durante el inicio de la época de lluvias se relacionan con una mayor productividad del fitoplancton. Por otro lado, en los lagos calcáreos como los estudiados, el carbonato de calcio forma un constituyente mayor del seston durante los periodos de circulación por la resuspensión de sedimentos (Wetzel, 2001).

Cabe destacar que de los lagos no impactados fue Kichail el que presenta valores mayores de CP sólo durante el inicio de la época de lluvias sobre todo el CIP que puede ser lo que le dé el valor tan alto al CTP; en época de secas sus concentraciones ya no son tan altas como para sobresalir de los demás lagos no impactados. Si se toma en cuenta que la fracción inorgánica del carbono tiene valores altos en este lago, tal vez la causa por la cual en el inicio de la época de lluvias tenga valores tan grandes a comparación con los lagos que también son considerados como no impactados sea el aporte de sedimentos, ya que la escorrentía aumenta además de que había material que se estaba extrayendo a unos cuantos metros del cuerpo de agua.

Los lagos impactados tienen valores promedio y máximos de CTP, COP y CIP mayores durante la época de secas que en el inicio de la época de lluvias. En época de secas el CP se incrementa debido a la resuspensión de sedimentos (Wetzel, 2001).

Los lagos ubicados en la parte NW del PNLM son los primeros que reciben la descarga del río Grande de Comitán, que contienen aguas residuales provenientes del poblado de Comitán y que se puede verificar por la alta concentración de sulfatos que éstas contienen (Juárez, 2014), de hecho, los lagos que están en la parte NW son los considerados como impactados.

Respecto a la MTP, los resultados en la distribución vertical muestran una diferencia entre los lagos impactados y los no impactados, los primeros mostraron la concentración máxima cerca de la superficie y los segundos cerca del fondo, tanto en el inicio de la época de lluvias como en la época de secas, sólo con la excepción de Ensueño que durante la época de secas presentó la concentración máxima cerca de la superficie.

Al igual que lo encontrado para el CP, las concentraciones de la MTP en los lagos impactados son mayores (3-5 veces) que en los no impactados. Aunque es en el inicio de la época de lluvias que se presentan concentraciones más grandes a diferencia de la época de secas, seguramente porque es en el inicio de la época de lluvias, que aumenta la escorrentía y por ende el aporte de material hacia los lagos.

Las concentraciones tan altas de COP pueden deberse a la actividad fitoplanctónica, debido a que forma parte integral de la anatomía de los organismos (Wetzel *et al.*, 1972).

Por otro lado, la mayoría de lagos obtiene una cantidad significativamente alta de CO y nutrientes de fuentes terrestres de la cuenca que los rodea (Wetzel, 2001) y por supuesto, de otro tipo de materiales incluyendo el particulado, así que, lo que explica que los lagos impactados del PNLM tengan mayores concentraciones de CTP, COP, CIP y MTP se debe también a fuentes alóctonas, ya que según Duran *et al.* (2014) Balantetic y San Lorenzo se encuentran dentro de la unidad clasificada como planicie aluvial, en la que se deposita diferente tipo de material que puede ser arrastrado a los cuerpos de agua (Fig. 4).

Patianú es un lago no impactado que presentó concentraciones de COP Y MTP mayores a los otros lagos no impactados y se encuentra dentro de una planicie aluvial. Hernández (2016) estudió la clorofila *a* de algunos lagos del PNLM, entre ellos Patianú y concluyó que éste presentaba un DCM (máximo profundo de clorofila) en el inicio de la época de lluvias que no coincide con el máximo de COP del presente estudio, lo que sugiere que el material alóctono conforma buena parte del material particulado de éste y tal vez de los demás lagos dentro de la planicie aluvial (impactados). En apoyo de lo anterior, Hessen *et al.* (2003) encontraron que en 109 lagos del sureste de Noruega el detrito constituye más de 50% del COP, mientras que el fitoplancton menos del 40%.

Además, los lagos impactados se encuentran rodeados de suelos tipo luvisol y feozem (Fig. 3) (Martínez, 2015; CONANP, 2007) que tienen una alta susceptibilidad a la erosión, en particular el feozem se caracteriza por tener una capa rica en materia orgánica y nutrientes y generalmente se utiliza para la agricultura coincidiendo con el tipo de uso de suelo del que están rodeados que es de agricultura y pastizal inducido (Fig. 6) (CONANP, 2007).

De esta manera, es muy probable que la cantidad elevada de material particulado, biótico y abiótico, en los lagos impactados se debe al incremento de su producción fitoplanctónica

relacionada a un aumento en la disponibilidad de nutrientes a través del río Comitán y los drenes agrícolas, así como por el material derivado de la erosión de la cuenca de drenaje.

La concentración de COP de los lagos no impactados estudiados es similar a la de los lagos templados Di Mergozzo, Maggiore (Italia) y Lawrence (Estados Unidos). Los lagos impactados presentan concentraciones de COP semejantes a Chaj-Chaj, Liquidambar y Bosque Azul (Tabla 9). Alchichica presenta un intervalo de concentraciones de COP más amplio que el de los 18 lagos estudiados del PNL M.

**Tabla 9.** Concentración de COP (mg/L) en distintos lagos con diferente latitud.

Lago	COP (mg/L)	Estado trófico	Región	Referencia
Alchichica	0.1-4.0	Oligotrófico	Tropical	Alcocer <i>et al.</i> , 2007
Di Mergozzo	0.2-0.9	Oligo-mesotrófico	Templado	Callieri, 1997
Maggiore	0.1-0.8	Oligo-mesotrófico	Templado	Callieri, 1986
Lawrence	0.05-1.7	Oligotrófico	Templado	Wetzel <i>et al.</i> , 1972
Chaj Chaj	2.5-5.2	Eutrófico	Tropical	Vargas, 2016
Liquidambar	2.7	Eutrófico	Tropical	Vargas, 2016
Bosque Azul	2.4-3.0	Eutrófico	Tropical	Vargas, 2016
Yalalush	0.3-0.4	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
San José	0.6-0.7	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
Montebello	0.4-0.6	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
Agua Tinta	0.4-0.5	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
Tzisco	0.4-0.5	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
Pojoj	0.3-0.5	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
Balantetic	1.7-2.5	Eutrófico	Tropical	Este estudio
Encantada	1.8-2.5	Eutrófico	Tropical	Este estudio
San Lorenzo	2.4	Eutrófico	Tropical	Este estudio
Cinco Lagos	0.4-0.5	Oligotrófico	Tropical	Este estudio
Dos Lagos	0.3-0.4	Oligotrófico	Tropical	Este estudio
Ensueño	0.3-0.5	Oligotrófico	Tropical	Este estudio
Esmeralda	0.3-0.4	Oligotrófico	Tropical	Este estudio
Kichail	0.4-0.7	Oligotrófico	Tropical	Este estudio
Patianú	0.4-0.5	Oligotrófico	Tropical	Este estudio

Vargas (2016) estudió la concentración de seston y COP en otros nueve lagos del PNL M tanto impactados (Bosque Azul, Chaj Chaj y Liquidambar) como no impactados (Yalalush, San José, Montebello, Agua Tinta, Tzisco y Pojoj). Considerando los lagos del presente trabajo y los estudiados por Vargas, los lagos impactados del PNL M presentaron concentraciones de COP por encima de 1.7 mg/L y los lagos no impactados/prístinos se encontraron en el rango de 0.3-0.7 mg/L.

De manera similar al COP, los lagos de este estudio presentan concentraciones de MTP semejantes a los estudiados por Vargas (2016). Los lagos impactados del PNLN, considerando este estudio y el del 2016, tienen concentraciones de MTP similares dentro de un intervalo de 4.3-21.1 mg/L, los no impactados presentan similitudes con concentraciones de 0.4 a 3.3 mg/L, salvo Patianú y San José cuyo intervalo es 2.1-8.4 mg/L.

**Tabla 10.** Concentración de MTP (mg/L) en distintos lagos con diferente latitud.

Lago	MTP (mg/L)	Estado trófico	Región	Referencia
Alchichica	2.2-4.7	Oligotrófico	Tropical	López-Anaya <i>et al.</i> , 2010
El Sol	0.7-3.4	Oligotrófico	Tropical	Hernández, 2008
La Luna	0.3-1.5	Ultra-oligotrófico	Tropical	Hernández, 2008
Chaj Chaj	11.0-14.7	Eutrófico	Tropical	Vargas, 2016
Liquidambar	7.2	Eutrófico	Tropical	Vargas, 2016
Bosque Azul	5.9-6.1	Eutrófico	Tropical	Vargas, 2016
Yalalush	0.5-0.9	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
San José	3.7-8.4	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
Montebello	1.2-1.7	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
Agua Tinta	1.0-1.2	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
Tzisco	1.2-1.3	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
Pojoj	0.9-2.0	Oligotrófico	Tropical	Vargas, 2016
Balantetic	11.2-21.1	Eutrófico	Tropical	Este estudio
Encantada	4.3-4.6	Eutrófico	Tropical	Este estudio
San Lorenzo	11.5	Eutrófico	Tropical	Este estudio
Cinco Lagos	0.4-1.0	Oligotrófico	Tropical	Este estudio
Dos Lagos	1.3-3.3	Oligotrófico	Tropical	Este estudio
Ensueño	0.7-1.2	Oligotrófico	Tropical	Este estudio
Esmeralda	1.5-2.1	Oligotrófico	Tropical	Este estudio
Kichail	1.1-1.9	Oligotrófico	Tropical	Este estudio
Patianú	2.1-6.3	Oligotrófico	Tropical	Este estudio

Comparando los lagos de este trabajo con otros lagos tropicales, El Sol, La Luna y Alchichica (México), se observa que estos tres tienen mayor semejanza de concentración de MTP con los lagos no impactados que con los impactados, salvo Alchichica que alcanza 4.7 mg/L, dentro del rango de los lagos impactados del PNLN.

Con base en lo anterior, se acepta la hipótesis que plantea que los lagos impactados tendrán concentraciones mayores de CP y MTP en comparación con los lagos no impactados. De lo contrario, se rechaza la hipótesis que plantea que la distribución en el perfil vertical de CP y MTP será diferente entre los lagos impactados y no impactados.

## 12. CONCLUSIONES

- La concentración del carbono particulado, es sus tres fracciones CTP, COP y CIP, fue de 3-6 veces mayor en los lagos impactados que en los no impactados; con un intervalo de 2.6-3.3 mg/L, 1.7-2.5 mg/L y 0.4-1.0 mg/L de CTP, COP y CIP respectivamente en los lagos impactados y con un intervalo de 0.5-1.1 mg/L, 0.3-0.7 mg/L y 0.0-0.4 mg/L de CTP, COP y CIP respectivamente en los lagos no impactados.
- La concentración de materia total particulada fue cinco veces mayor en los lagos impactados que en los lagos no impactados, con un intervalo de 4.3-21.1 mg/L en los lagos impactados y de 0.4-6.3 mg/L en los lagos no impactados.
- El carbono particulado presentó dos tipos de distribución vertical en el inicio de la época de lluvias, independientemente del estado trófico de los lagos: 1) máxima concentración en superficie ó 2) máxima concentración a media agua.
- El carbono particulado presentó dos tipos de distribución vertical en época de secas independientemente del estado trófico de los lagos: 1) máxima concentración cerca de la superficie ó 2) máxima concentración cerca del fondo.
- La materia total particulada presentó diferentes tipos de distribución vertical en los lagos no impactados y los lagos impactados, en ambas épocas de muestreo; los impactados presentaron la máxima concentración cerca de la superficie y los no impactados cerca del fondo.

Los cambios que han experimentado en su coloración los lagos ubicados en la zona NW del PNLM están asociados a un incremento del MTP y CP. Probablemente, lo anterior esté vinculado a un aumento en la disponibilidad de materia orgánica y nutrientes alóctonos.

## 13. REFERENCIAS

- Alcocer, J.; D. López y 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. México: Instituto Nacional de Ecología y CICESE. pp. 239-247.
- Alcocer, J. y F.W. Bernal-Brooks. 2010. Limnology in México. *Hydrobiologia* 644:15-68.
- Alcocer, J.; L.A. Oseguera; G. Sánchez; C.G. González; J.R. Martínez y R. González. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. 2016. *Journal of Limnology* 75(s1): 56-65.
- Almeida, B. T. 2014. Heterogeneidad espacial en el sistema lacustre de Montebello: estructura funcional y taxonómica del fitoplancton. Tesis, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. 66 p.
- Boyd, C.E. 2015. Particulate Matter, Color, Turbidity, and Light. En: *Water Quality*. Switzerland: Springer International Publishing. pp. 101-112.
- 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.
- Callieri, C.; R. Bertoni; C. De Marco y M. Contesini. 1991. Settling flux and sinking velocity of Seston in Lago di Mergozzo (Northern Italy) and influence of microbial activity on the decomposition of entrapped organic material. *Hydrobiologia*. 213: 155-165.
- 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.
- Cole, J. J.; Y. T. Prairie; N. F. Caraco; W. H. McDowell; L. J. Tranvik; R. G. Striegl; C. M. Duarte; P. Kortelainen; J. A. Downing; J. J. Middelburg y J. Melack. 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems* 10: 171-184.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2005. En CONANP 2007, Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello. 195 p.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2012. Estudio para Conocer la Calidad del Agua de las Lagunas de Montebello, Chiapas. Tomo 1, Hidrometeorología. 264 p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales protegidas (CONANP). 2007. Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello. 195 p.
- Doyon, P.; B. Klein; R.G. Ingram; L. Legendre; J.E. Tremblay y J.C. Therriault. 2000. Influence of wind mixing and upper-layer stratification on phytoplankton biomass in the Gulf of St. Lawrence. *Deep-Sea Research II* 47:415-433.
- Durán, C.I.; F.O. Escolero; S.E. Muñoz; R.M. Castillo y R.G. Silva. 2014. Cartografía geomorfológica a escala 1:50000 del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66(2):263-277.

- 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.
- Effler, S.W.; M. Perkins; N. Ohrazda; D.A. Matthews; R. Gelda; F. Peng; D.L. Johnson y C.L. Stepchczuk. 2002. Tripton, transparency and light penetration in seven New York reservoirs. *Hydrobiologia*. 468: 213-232.
- Eppley, R. y B. Peterson. 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature* 282: 677– 680.
- Evans, R.D. 1994. Empirical evidence of the importance of sediment resuspension in lakes. *Hydrobiologia* 284: 5–12.
- García-Amaro, E. 1981. En CONANP 2007, Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello. 195 p.
- Hernández, H.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, Facultad de Ciencias, UNAM. 65 p.
- Hernández, V.P.P. 2016. Concentración y distribución vertical de la clorofila a fitoplanctónica de los lagos de Montebello, Chiapas, México. Tesis, Facultad de Ciencias, UNAM. 54 p.
- Hessen, D. O.; T. Andersen; P. Brettum y B.A. Faafeng. 2003. Phytoplankton contribution to sestonic mass and elemental ratios in lakes: implications for zooplankton nutrition. *Limnol. Oceanogr.* 48: 1289–1296.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1988. En CONANP 2007, Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello. 195 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2005. Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos, La Trinitaria, Chiapas. 9p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2000. En CONANP 2007, Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello. 195 p.
- Inventario Forestal Nacional, 2000-2001. En CONANP 2007, Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello. 195 p.
- Jellison, R. y J.M. Melack. 2001. Nitrogen limitation and particulate elemental ratios of seston in hypersaline Mono Lake, California, U.S.A. *Hydrobiologia* 466: 1-12
- Juárez, H.E.L. 2014. Análisis hidrogeoquímico de la cuenca del río Grande Comitán. Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM. 107 p.
- Karl, D.M.; J.E. Dore; D.V. Hebel y C. Winn. 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

- 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. Jr. 1996. Tropical lakes: how latitude makes a difference. En: Schiemer F. y K.T., Boland (Eds.), Perspectives in Tropical Limnology. Netherlands: SPB Academic Publishing. pp. 43-64.
- López-Anaya, D.P.; J. Alcocer; L.A. Oseguera y G. Vilaclara. 2010. Seston dynamics in a saline Mexican lake. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 30: 1445-1448.
- Lutz, M.J.; K. Caldeira; R.B. Dunbar y M.J. Behrenfeld. 2007. Seasonal rhythms of net primary production and particulate organic carbon flux to depth describe the efficiency of biological pump in the global ocean. *Journal of Geophysical Research*, 112: C10011.
- Martínez, A.M. 2015. Caracterización de los suelos de la cuenca del río Grande, como soporte para entender la dinámica de contaminantes que llegan al sistema lagunar de Montebello, Chiapas. Tesis, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. 138 p.
- McIntyre, S. y R. Jellison. 2001. Nutrient fluxes from upwelling and enhanced turbulence at the top of the pycnocline in Mono Lake, California. *Hydrobiologia* 466: 13-29
- Myrbo, A. 2012. Carbon cycle in lakes. En Bengtsson, L.; R.W., Herschy y R.W. Fairbridge (Eds.), *Encyclopedia of Lakes and reservoirs*. USA: Springer Science+Business Media. pp. 121-125.
- Paterson, K.J.; M. Schreider y K.D. Zimmerman. 2003. Effect of catchment disturbance on seston quality and quantity in Brisbane Water, NSW. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56: 355-368.
- Pesant, S.; I. Legendre; M. Gosselin; C. Ashjian; B. Booth; K. Daly; L. Fortier; H-J. Hirche; J. Michaud; S. Smith y W.O. Smith Jr. 1998. Pathways of carbon cycling in the euphotic zone: The fate of large sized phytoplankton in the Northeast Water Polynya. *Journal of Plankton Research* 20: 1267-1291.
- Stemmann, L.; G. Gorsky; J.C. Marty; M. Picheral y J.C. Miquel. 2002. Four-year study of large-particle vertical distribution (0-1000 m) in the NW Mediterranean in relation to hydrology, phytoplankton, and vertical flux. *Deep-Sea Research II* 49: 2143-2162.
- Sosa, A.I. 2014. Comparación de la estructura de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos del Parque Nacional Lagunas de Montebello. Tesis, Facultad de Ciencias, UNAM. 55 p.
- Vargas, S.M. 2016. Caracterización del Seston en lagos del Parque Nacional "Lagunas de Montebello", Chiapas, México. Tesis, Facultad de Ciencias, UNAM. 65 p.
- Vázquez, S.M.A. y G.E. Méndez. 1994. En CONANP 2007, Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello. 195 p.
- 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.
- Villalpando, A.L.B. 2015. Uso de percepción remota para la estimación del índice trófico de las lagunas del Parque Nacional Lagunas de Montebello. Tesis, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. 67 p.

Wetzel, R.G.; P.H. Rich; M.C. Miller y H.L. Allen. 1972. Metabolism of dissolved and particulate detrital carbon in a temperate hard-water lake. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia* 29: 185-273.

Wetzel, R.G. y G.E. Likens. 2000. *Limnological Analyses*. Springer, Nueva York. 360 p.

Wetzel, R.G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems (3ra Ed.)*, San Diego, California, USA: Academic Press. 1006p.