



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**DESCRIPCIÓN AMBIENTAL DE UN CONJUNTO  
DE LAGOS KÁRSTICOS EN EL TRÓPICO  
HÚMEDO MEXICANO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**Orientación en Ciencias Ambientales**

**P R E S E N T A:**

**STEPHANY JOSEFINA HERNÁNDEZ FLORES**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. JAVIER ALCO CER DURAND**

**CIUDAD DE MÉXICO, 2019**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## **Hoja de datos del jurado**

### 1. Datos del alumno

Apellido Paterno: Hernández  
Apellido materno: Flores  
Nombre (s): Stephany Josefina  
Tel: 55 49 15 08 81  
Universidad Nacional Autónoma  
de México  
Facultad de Ciencias  
Carrera: Ciencias de la Tierra  
Número de cuenta: 308181252

### 2. Datos del tutor

Grado: Dr.  
Nombre(s): Javier  
Apellido paterno: Alcocer  
Apellido materno: Durand

### 3. Datos del sinodal 1

Grado: Dra.  
Nombre(s): Margarita Erna  
Apellido paterno: Caballero  
Apellido materno: Miranda

### 4. Datos del sinodal 2

Grado: Dra.  
Nombre(s): Vilma Soledad  
Apellido paterno: Ardiles  
Apellido materno: Gloria

### 5. Datos del sinodal 3

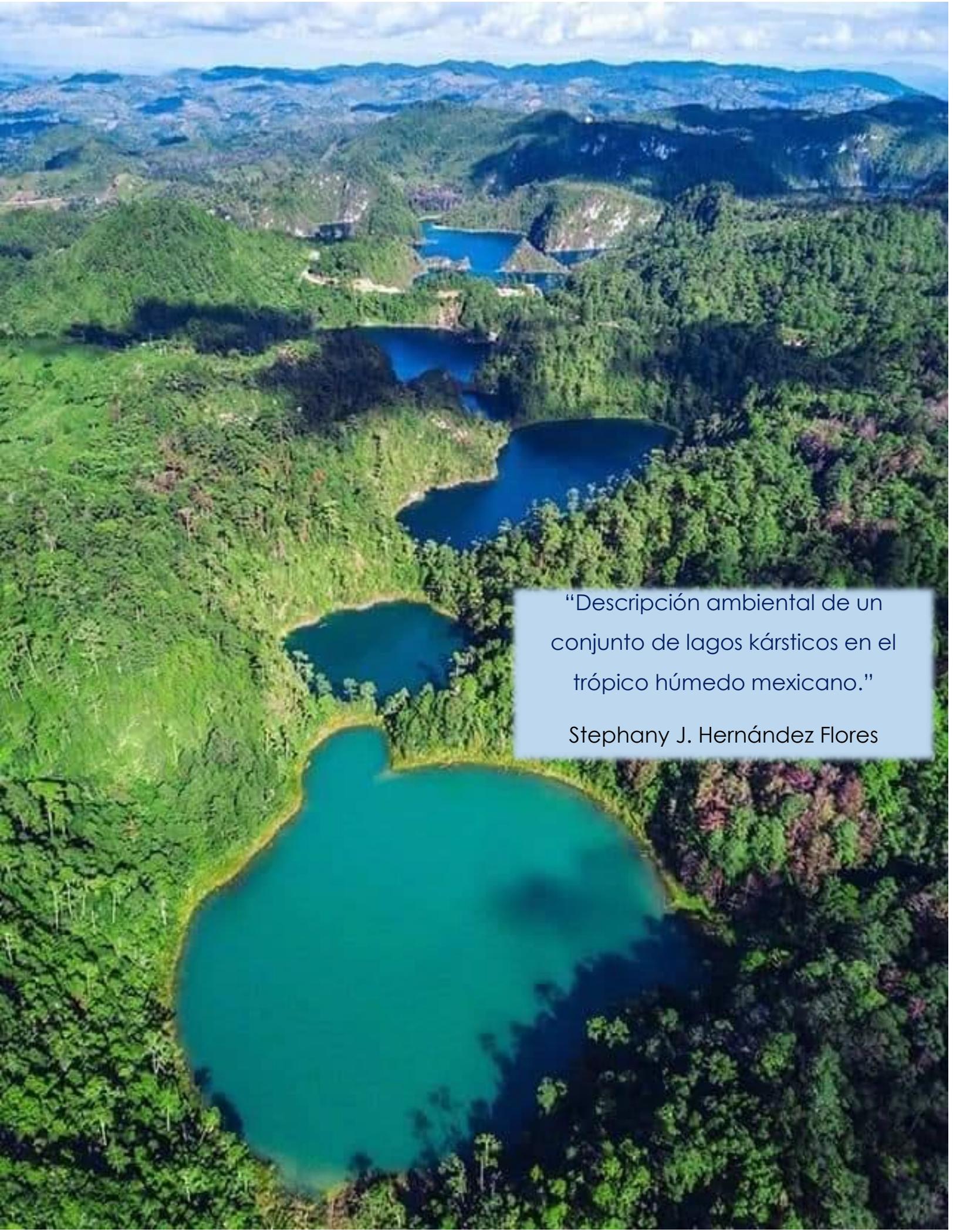
Grado: Dr.  
Nombre(s): Jorge Alberto  
Apellido paterno: Ramírez  
Apellido materno: Zierold

### 6. Datos del sinodal 4

Grado: Dra.  
Nombre(s): Ana Cecilia  
Apellido paterno: Espinosa  
Apellido materno: García

### 7. Datos del trabajo escrito

Título: "Descripción ambiental de un conjunto de lagos kársticos en el trópico húmedo mexicano"  
Número de páginas: 69  
Año: 2019



“Descripción ambiental de un conjunto de lagos kársticos en el trópico húmedo mexicano.”

Stephany J. Hernández Flores

## **AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES**

Al Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua (CONAGUA-CONACYT) proyecto “*Estudio hidrológico y de calidad del agua del sistema Lagunar de Montebello, en el estado de Chiapas*” y a la DGAPA por los proyectos IN219215 “*Factores que determinan el estado trófico de los lagos de Montebello, Chiapas*” e IV200319 “*Área Experimental de Lagos Tropicales*”.

Al Parque Nacional "Lagunas de Montebello", Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (Jesús A. León y Roberto Castellanos), comunidad local y Comisarios Ejidales de Antelá, Cárdenas, Miguel Hidalgo, Ojo de Agua y Tzisco por facilitar el acceso a los lagos. Al Comité de Administración de Tzisco (Sergio Marcos y Miguel A. Tomas), al presidente del Comité de Turismo de Tzisco (Armando Hernández), Comisario Ejidal de Tzisco (Enrique M. Hernández), personal del Hotel Villas Tzisco (Rosemberg F. Jorge, Juan G. Espinoza y Gemuel P. Hernández) por su apoyo y facilidades ofrecidas para el desarrollo de este estudio.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme una formación multidisciplinaria e integral en todos mis estudios desde la educación medio superior hasta en lo profesional.

Al Dr. Alcocer por sus enseñanzas en el salón de clases y su entusiasmo compartido hacia la investigación y la Limnología.

A la Dra. Vilma Ardiles por todas las observaciones y correcciones a mi trabajo, por su tiempo dedicado a apoyarme en este trabajo.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, mi hermano y mi abuelo Salomón por su gran apoyo incondicional.

A mis amigos de la universidad, sin ellos no habría sido una de las mejores épocas de mi vida, llena de diversión y aprendizajes.

To my little boy.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. ANTECEDENTES.....	14
3. JUSTIFICACIÓN.....	15
4. HIPÓTESIS.....	15
5. OBJETIVOS.....	16
5.1 Objetivo General.....	16
5.2 Objetivos Particulares.....	16
6. ÁREA DE ESTUDIO.....	17
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
7.1 Trabajo de campo.....	20
7.2 Trabajo de gabinete.....	24
8. RESULTADOS.....	25
8.1 Caracterización ambiental.....	25
8.2 Comparaciones entre lagos.....	40
9. DISCUSIÓN.....	48
10. CONCLUSIONES.....	55
11. BIBLIOGRAFÍA.....	56
ANEXOS.....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> A) Ubicación geográfica de los lagos en estudio del PNLM, ordenados de NW a SE. B) Imágenes satelitales de los lagos de Montebello estudiados. ....	21
<b>Tabla 2.</b> Promedio de la profundidad de la $Z_{EU}$ (m) durante primavera/verano (P/V) e invierno en los lagos de estudio. ....	25
<b>Tabla 3.</b> Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de T (°C) durante las épocas de primavera/verano e invierno en los lagos de estudio. ....	26
<b>Tabla 4.</b> Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de la concentración de OD (mg/L) durante las épocas de primavera/verano e invierno en los lagos de estudio. ....	28
<b>Tabla 5.</b> Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) del %OD durante las épocas de primavera/verano e invierno en los lagos de estudio. ....	30
<b>Tabla 6.</b> Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de pH durante las épocas de primavera/verano e invierno (F/S) en los lagos de estudio. ....	32
<b>Tabla 7.</b> Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de $K_{25}$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) durante las épocas de primavera/verano e invierno en los lagos de estudio. ....	34
<b>Tabla 8.</b> Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) del potencial de óxido-reducción (mV) las épocas de primavera/verano e invierno ..	36
<b>Tabla 9.</b> Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de turbidez (NTU) las épocas de primavera/verano e invierno en los lagos de estudio. ....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1. A)</b> Ubicación del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas.B) Imagen satelital de los nueve lagos del estudio.....	18
<b>Fig. 2.</b> Climograma de la estación Tzsicao, Montebello.....	20
<b>Fig. 3.</b> Temperatura promedio (°C) ( $\pm 1$ d.e.) registrada durante la época de primavera/verano (barras en rojo) y la época de invierno de secas (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM. ....	27
<b>Fig. 4.</b> Concentraciones promedio de OD (mg/L) ( $\pm 1$ d.e.) registrados durante la época de primavera/verano(barras en rojo) y la época de invierno de secas (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM.. ....	29
<b>Fig. 5.</b> Porcentajes de saturación de oxígeno disuelto promedio ( $\pm 1$ d.e.) registrados durante la época de primavera/verano (barras en rojo) y la época de invierno (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM.....	31
<b>Fig. 6.</b> Valores promedio de pH ( $\pm 1$ d.e.) registrados en la época de primavera/verano (barras en rojo) y en la época de invierno (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM. ....	33
<b>Fig. 7.</b> Conductividad eléctrica estandarizada a 25°C ( $K_{25}$ , $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) promedio ( $\pm 1$ d.e.) registrada en la época primavera/verano (barras en rojo) y la época de invierno (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM.....	35
<b>Fig. 8.</b> Potencial de óxido-reducción (mV) promedio ( $\pm 1$ d.e.) registrado en la época primavera/verano (barras en rojo) y la de invierno (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM. ....	37
<b>Fig. 9.</b> Turbidez promedio (NTU) ( $\pm 1$ d.e.) registrados en la época primavera/verano (barras en rojo) y la época de invierno (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM.. ....	39
<b>Fig. 10.</b> Perfiles verticales de T, OD, % Sat OD, $K_{25}$ , pH, redox y turbidez en Yalalush ejemplificando un lago somero no impactado). ....	41
<b>Fig. 11.</b> Perfiles verticales de T, OD, % Sat OD, $K_{25}$ , pH, redox y turbidez en Chajchaj, ejemplificando a un lago somero impactado. ....	43

**Fig. 12.** Perfiles verticales de T, OD, % Sat OD, K25, pH, redox y turbidez en Tziscoa, ejemplificando un lago profundo no impactado ..... 45

**Fig. 13.** Perfiles verticales T, OD, % Sat OD, K25, pH, redox y turbidez en Bosque Azul, ejemplificando a un lago somero impactado. .... 47

## RESUMEN

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM), Chiapas, ha mostrado cambios en la coloración de las aguas de algunos de sus lagos desde el 2003, por ello se vio la necesidad de estudiar a fondo las características limnológicas del sistema acuático, así como la problemática registrada. Por esta razón se llevó a cabo un reconocimiento ambiental de un grupo selecto de nueve lagos en dos temporadas contrastantes: cálida de lluvias y fría de secas con el fin de analizar y comparar las características fisicoquímicas de la columna de agua de estos lagos, registrando los perfiles verticales de radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (OD %), conductividad eléctrica ( $K_{25}$ ), pH, potencial de óxido-reducción (redox), turbidez y determinar la zona eufótica ( $Z_{EU}$ ) y capa de mezcla ( $Z_{MIX}$ ). Al comparar las características medidas, los lagos someros mostraron que estuvieron circulando en ambas épocas lo que los califica como “funcionalmente someros” y, por ende, polimícticos cálidos. Por otro lado, los lagos profundos se estratificaron durante la época C/LL y circularon durante la época F/S clasificándolos como monomícticos cálidos. En los lagos no impactados e impactados se reconocen diferencias en  $Z_{EU}$  y  $Z_{MIX}$  así como en los perfiles de T y OD. La  $Z_{EU}$  en los lagos impactados es menor ( $< 5$  m) que la de los lagos no impactados ( $> 10$  m) en ambas épocas del año. En los no impactados en época C/LL, muestran clinas profundas y amplias con capas de mezcla extensas, mientras que en los impactados las clinas son más superficiales y estrechas y la  $Z_{MIX}$  es menor. Los perfiles de  $K_{25}$  obtenidos, también mostraron diferencias ya que son más elevados en los lagos impactados (mayor a  $500 \mu\text{S/cm}$ ) que en los lagos no impactados (menor a  $500 \mu\text{S/cm}$ ). Los perfiles de pH fueron similares en todos los lagos, tanto no impactados como impactados, que mostraron valores básicos entre 7 y 8.9 unidades, ya que por el origen de los lagos suelen tener elevada reserva alcalina y por ello no varían su pH. Por lo tanto, los lagos de la zona NW del PNLM que corresponden a los impactados, muestran claras diferencias entre las características fisicoquímicas principales con los lagos de la zona SE del PNLM que corresponden a los no impactados.

## ABSTRACT

The "Lagunas de Montebello" National Park (PNLM), Chiapas, has shown changes in the coloration of the waters of some of its lakes since 2003, for this reason, it was necessary to thoroughly study the limnological characteristics of the aquatic system, as well as the recorded problems. For this reason an environmental survey of a select group of nine lakes was carried out in two contrasting seasons: warm rainy and dry cold in order to analyze and compare the physicochemical characteristics of the water column of these lakes, recording the vertical profiles of photosynthetically active radiation (PAR), temperature (T), dissolved oxygen (DO), percentage of dissolved oxygen saturation (OD%), electrical conductivity ( $K_{25}$ ), pH, oxide-reduction potential (redox), turbidity and determine the euphotic zone ( $Z_{EU}$ ) and mixing zones ( $Z_{MIX}$ ). When comparing the measured characteristics, the shallow lakes showed that they were circulating in both epochs what qualifies them as "functionally shallow" and therefore, warm polymictic. On the other hand, the deep lakes were stratified during the C / LL period and circulated during the F / S period, classifying them as warm monomictic. In the impacted and impacted lakes, differences in  $Z_{EU}$  are recognized, as well as in the T and OD profiles. The  $Z_{EU}$  in the impacted lakes is smaller (<5 m) than that of the non-impacted lakes (> 10 m) in both seasons of the year. In those not impacted in C / LL time, they show deep and wide clines with extensive mixing layers, while in those impacted the clines are more superficial and narrower and the  $Z_{MIX}$  is smaller. The  $K_{25}$  profiles obtained also showed differences since they are higher in the impacted lakes (greater than 500  $\mu\text{S} / \text{cm}$ ) than in the non-impacted lakes (less than 500  $\mu\text{S} / \text{cm}$ ). The pH profiles were similar in all the lakes, both not impacted and impacted, which showed alkaline values between 7 and 8.9 units, since the origin of the lakes usually have high alkaline reserve and therefore their pH does not vary. Therefore, the lakes of the NW area of the PNLM that correspond to the impacted show clear differences between the main physicochemical characteristics with the lakes of the SE zone of the PNLM that correspond to the non-impacted ones.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) es el área natural protegida (ANP) más sobresalientes de Chiapas por su gran belleza escénica y su elevada biodiversidad. Su ubicación geográfica y las condiciones propias de la zona favorecen la existencia de una serie de cuerpos acuáticos formados en el terreno kárstico (lagos de disolución), inmersos en una vegetación boscosa exuberante, lo que hace de este lugar una región hidrológica con alta riqueza biológica (CONANP, 2009).

A pesar de que la ANP se denomina “Lagunas de Montebello”, se desconocen en gran medida las características limnológicas de los cuerpos acuáticos que la conforman. Sin embargo, para reconocer limnológicamente un sistema acuático de una forma más amplia se requiere, además de conocer su batimetría y morfometría (Alcocer 2016), evaluar las características de sus aguas a través de diversos parámetros físico-químicos (p.ej., radiación fotosintéticamente activa –PAR-, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH, potencial redox y turbidez) y no solo en la superficie, sino su variación a lo largo de la columna de agua.

Los lagos de Montebello se consideran tropicales por su ubicación geográfica dentro de los límites marcados por los trópicos de Cáncer y Capricornio (23° 26' 16" N y S). Dicha *tropicalidad* conlleva tres condiciones básicas (Straskraba, 1980): a) una mayor cantidad de radiación solar anual, b) una menor variación anual en la radiación solar y c) un menor efecto de la fuerza de Coriolis. De los factores antes mencionados, la radiación solar es la que se considera de mayor importancia en los estudios limnológicos dado que casi toda la energía que impulsa y controla el metabolismo de los lagos y corrientes se deriva a partir de esta energía, que es bioquímicamente convertible en energía química potencial a través de la fotosíntesis (Lewis, 1996).

Estas condiciones tropicales afectan directamente a los lagos en diversas formas, entre las cuales destacan la temperatura del cuerpo de agua, la estabilidad de la estratificación térmica, el espesor de la capa de mezcla, la eficiencia en el reciclamiento de nutrientes, el agotamiento de oxígeno disuelto hipolimnético, la producción primaria y

la diversidad de especies y, por lo tanto, ejercen controles regulatorios importantes en la fisiología y el metabolismo acuáticos (Lewis, 1987).

El patrón térmico, esto es, el ciclo de estratificación-circulación anual que presenta un cuerpo acuático, determina en gran medida la dinámica limnológica de los lagos. Alcocer *et al.* (2000) mencionan que en México predominan dos patrones térmicos: a) la polimixis cálida, en aquellos lagos someros y extensos y b) la monomixis cálida, en los lagos profundos y pequeños. Lo anterior sugiere que el comportamiento térmico de los lagos de Montebello, que resultan ser en su mayoría profundos, debe ser, predominantemente, la monomixis cálida, esto es, que se estratifican térmicamente durante la época cálida de lluvias y circulan una vez al año, asociado al periodo seco invernal (Lewis, 1987).

Así, el estudio de las características ambientales antes mencionadas permitirá entender los diversos procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en los cuerpos de agua. Esto es de suma importancia, ya que la degradación progresiva que sufren los ecosistemas acuáticos es uno de los problemas más graves con los que se enfrenta actualmente el entorno natural. El vertido de residuos orgánicos, la fertilización de las aguas con abonos agrícolas y la creciente industrialización y urbanización de zonas rurales ha incidido negativamente en la calidad de los sistemas acuáticos. Debido a estos hechos el número de cuerpos acuáticos con problemas de eutrofización ha aumentado considerablemente en los últimos años (Borrego y García, 1992).

## **2. ANTECEDENTES**

En enero de 2003 se comenzó a percibir un cambio en la coloración del agua en Vuelta de Agua, uno de los lagos del PNLN, el cual pasó de un color característico azul cristalino a uno inusual, amarillo-verdoso, con la aparición de natas blanco-amarillentas en la orilla del cuerpo acuático, acompañado de un olor fétido a compuestos azufrados y presentando mortandad de peces. Esta alteración derivó en la realización de algunos estudios para diagnosticar la calidad del agua de estos lagos, entre los cuales se encuentra el Programa de Monitoreo realizado por la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP, 2009). En este estudio se destacó la necesidad de intensificar los muestreos, debido a que con los estudios realizados no se logró encontrar la raíz del problema.

En el 2011 la CONANP llevó a cabo un Monitoreo de Parámetros de Calidad de Agua en los lagos, cuyo objetivo principal fue analizar los parámetros físico-químicos: olor, color, temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad del agua. Entre las conclusiones obtenidas destacan que el oxígeno disuelto, pH y conductividad se encuentran dentro de los límites permisibles para la vida acuática, debido a que los valores no exceden los criterios ecológicos establecidos en la Norma Oficial NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Por otra parte, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en conjunto con la Secretaría del Medio Ambiente e Historia Natural del Gobierno de Chiapas (SEMAHN), realizaron estudios multidisciplinarios en cuatro áreas principales: Hidrometeorología (CFE, 2012a), Geohidrología (CFE, 2012b), Topografía y Modelos Matemáticos (CFE, 2012c), para determinar la calidad del agua de las “Lagunas de Montebello”. En estos estudios se encontró la presencia de sulfatos en concentraciones elevadas, así como bajos niveles de oxígeno disuelto, consecuencia del deterioro de la calidad de agua en algunos lagos.

Tanto Galicia (2012) como Villalpando (2015) abordaron el tema implementando el uso de la percepción remota como herramienta para la estimación del estado trófico de los cuerpos de agua. Concluyeron la existencia de un proceso de eutrofización en la zona

NW del sistema lacustre como resultado de las descargas provenientes del Río Grande de Comitán, el cual mencionan es la principal fuente de alimentación del sistema.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

El PNLM se estableció como ANP en 1959 mediante un Decreto Presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) y posteriormente (2003) designado como sitio RAMSAR (DOF, 2009). A pesar de lo anterior, existe gran desconocimiento de las características limnológicas presentes en estos ecosistemas acuáticos, incluso ni siquiera se conocía su batimetría hasta que recientemente Alcocer et al. (2016) la determinaron en una muestra de 18 lagos. Por lo anterior, el presente trabajo plantea hacer un reconocimiento ambiental de un grupo selecto de nueve lagos en dos temporadas contrastantes: primavera/verano e invierno. Se espera que la caracterización ambiental de los lagos permita reconocer los cambios acaecidos al comparar aquellos lagos deteriorados (impactados) con los que conservan aún características inalteradas (no impactados).

### **4. HIPÓTESIS**

La comparación entre las características fisicoquímicas principales de los lagos impactados y no impactados permitirá evidenciar los cambios acaecidos en los primeros e identificará las variables indicativas de cambio, con lo cual se contará con criterios científicos que conlleven a identificar la problemática presente que ha llevado al deterioro en los lagos impactados.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 Objetivo General**

Analizar y comparar las características fisicoquímicas de la columna de agua de nueve lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, impactados y no impactados.

### **4.2 Objetivos particulares**

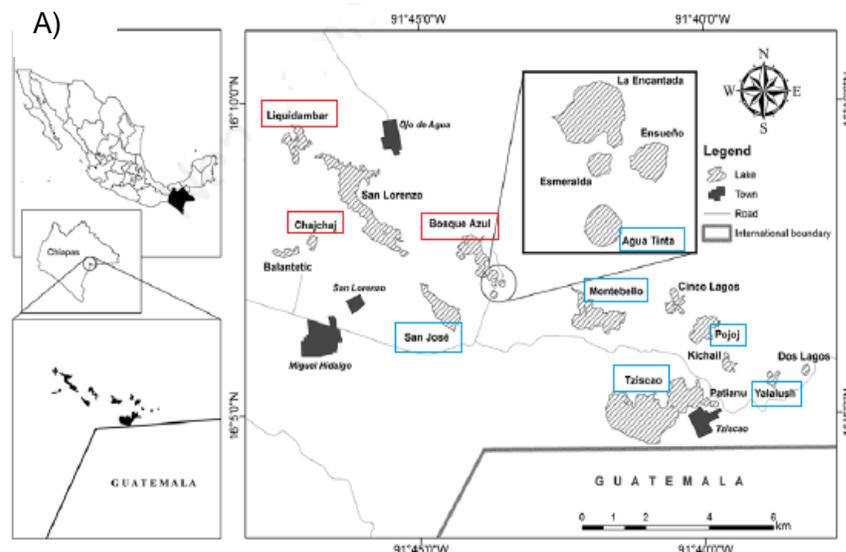
- Medir los perfiles de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y determinar la zona eufótica.
- Registrar los perfiles verticales de temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH, potencial de óxido-reducción, turbidez y determinar la capa de mezcla.
- Comparar las características físico-químicas de los lagos en las dos épocas hidrodinámicas contrastantes: estratificación y circulación.
- Realizar la comparación físico-química entre los lagos no impactados e impactados identificando las diferencias entre ambos.

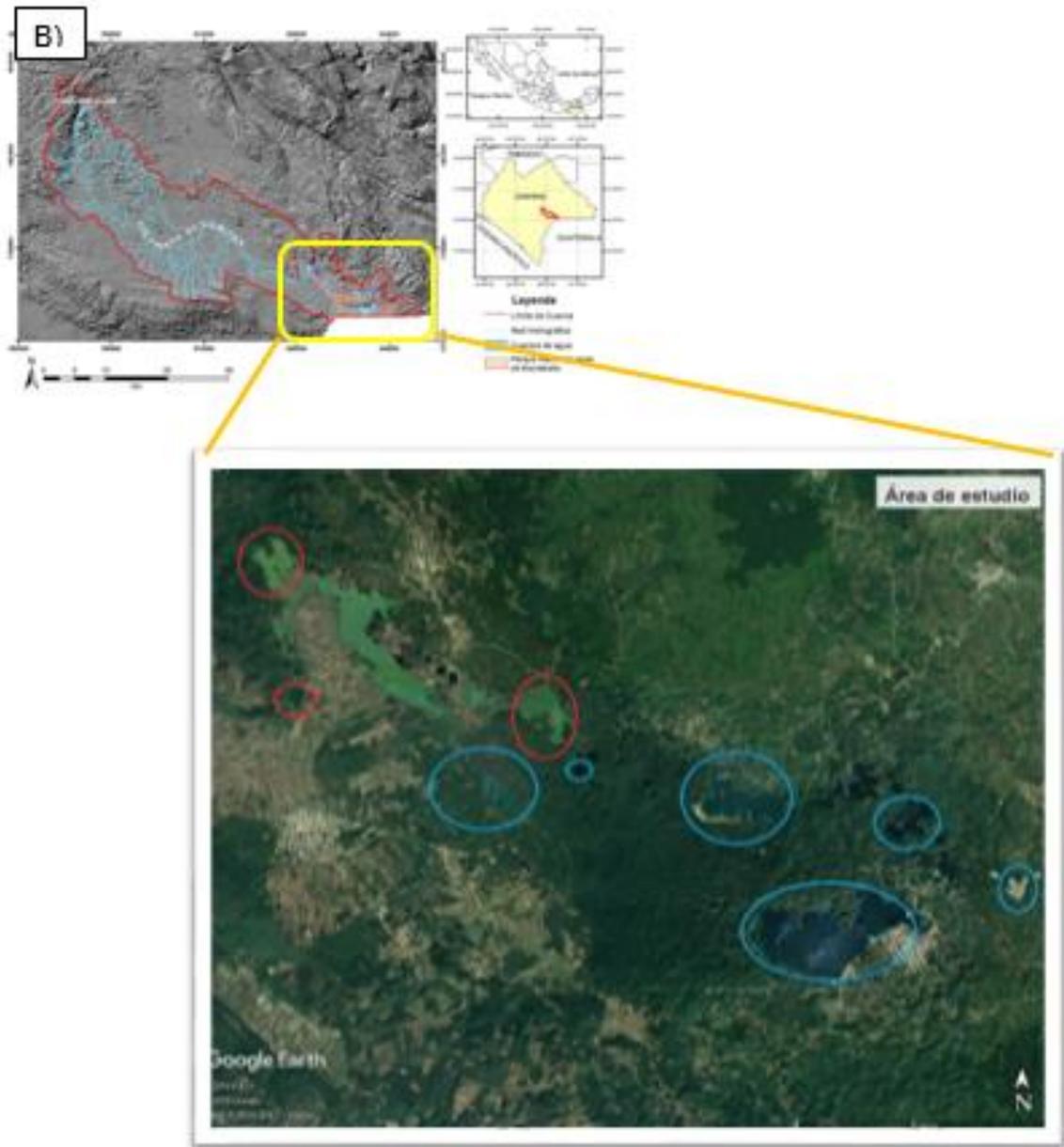
## 6. ÁREA DE ESTUDIO

El PNLM (Fig. 1) se encuentra ubicado en la región sureste del Estado de Chiapas entre los 16° 04' 40" y 16° 10' 20" N y los 91° 37' 40" y 91° 47' 40" O, a una altitud promedio de 1,500 m s.n.m. cerca de la frontera con Guatemala. Comprende una extensión de 6,022 hectáreas y abarca parte de los municipios La Independencia y La Trinitaria (CONANP, 2011).

El PNLM se localiza entre la región de la Altiplanicie de Chiapas y la Planicie Costera del Golfo, donde su fisiografía cuenta con pequeños sumideros hasta grandes fosas con perfiles cóncavos. También hay presencia de grutas y oquedades con variadas formas y tamaños (CONANP, 2007).

La zona se caracteriza por un relieve de morfología kárstica donde la topografía del lugar es el resultado de procesos de meteorización química del agua ligeramente ácida (cargada de ácido carbónico) con las rocas carbonatadas, principalmente rocas calizas y lomeríos y lomeríos de poca altura con laderas de inclinación variable que llegan a formar paredes abruptas con orientación SE a NO. En la mayor parte de la cuenca los suelos que predominan son litosoles y rendizas en partes escarpadas, vertisoles en las partes bajas en las depresiones de los lomeríos, acrisoles en las laderas de montaña con pendiente suave, gleysoles en las partes bajas del relieve y fluviosoles en las laderas de pendiente suave (Gonzales del Castillo, 2003).





**Fig. 1. A)** Ubicación del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas (Tomado de Alcocer, 2016) (cuadro rojo=impactados, cuadro azul= no impactados). **B)** Localización de la cuenca del Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello, Chiapas. (cuadro rojo=impactados, cuadro azul= no impactados). (Tomado de Mora Palomino 2017).

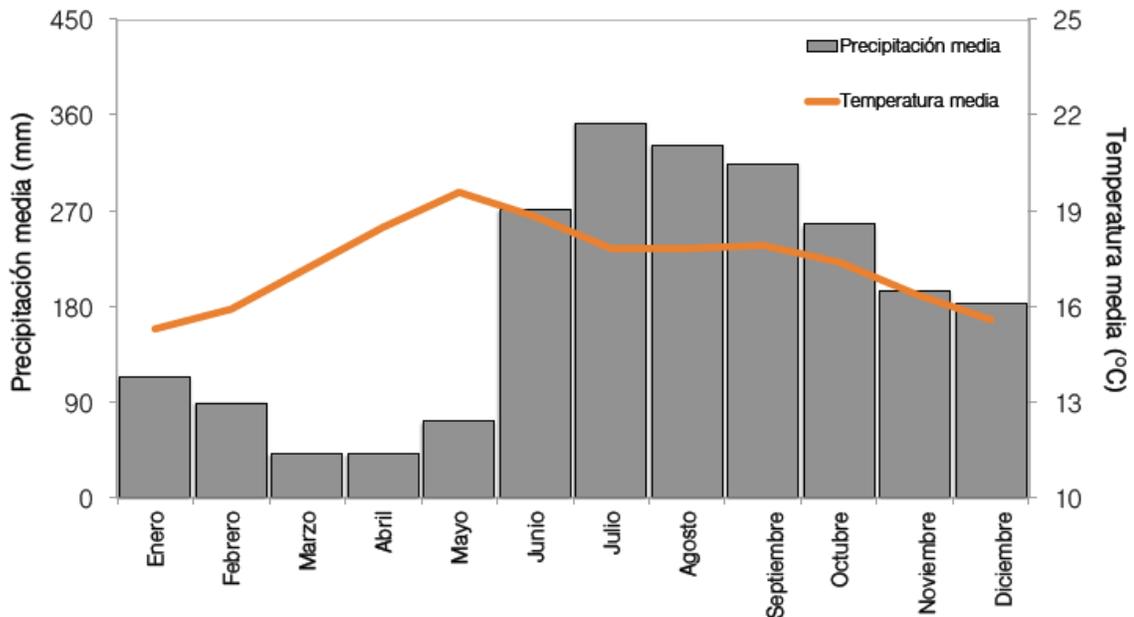
El PNLM, con 545 km<sup>2</sup>, forma parte de la subcuenca del río Grande de Comitán que a su vez es parte del Río Lacantún. La alimentación de este sistema lacustre es tanto superficial a través del río Grande de Comitán como subterránea y comprende un conjunto de aproximadamente 60 lagos en territorio mexicano, que varían en morfología debido a la existencia de zonas de inundación o pequeñas playas (Gonzales del Castillo, 2003).

El PNLM posee un clima templado húmedo con lluvias todo el año [C(fm)] y en los extremos noroeste del mismo, clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano [A(cm)]. La temperatura media anual es de 23.6°C, con una oscilación térmica de 5.6°C. El mes más caluroso del año es abril y el mes más frío en enero. La precipitación media anual es de 1,030 mm, con lluvias en verano, siendo septiembre el mes más húmedo. Durante la temporada de lluvias, la precipitación es de 1,200 a 1,400 mm, mientras que durante el mes más seco la precipitación es menor a 40 mm. Se presentan dos periodos climáticos bien definidos, uno de alta precipitación y otro de relativa sequía. Durante el periodo húmedo (de mayo a diciembre) llueve en promedio 1,715 mm, el 92% de la precipitación anual, mientras que el 8 % restante (147 mm), se distribuye en las escasas lluvias del periodo seco (CONANP, 2011).

## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1 Trabajo de campo

El estudio consideró dos muestreos, uno correspondiente a finales de mayo de 2014 (primavera/verano) correspondiente al final de la época secas e inicio de la de lluvias y con las temperaturas más elevadas y otro en febrero de 2015 (invierno) en la temporada de secas y temperaturas más bajas (Fig. 2). El lago Liquidambar no fue posible muestrearlo en la época fría de secas, debido a que los ejidatarios no permitieron el acceso.



**Fig. 2.** Climograma de la estación Tzsicao, Montebello.

Los lagos seleccionados fueron los siguientes ubicados de NW a SE: Chajchaj, Liquidámba, Bosque Azul, San José, Agua Tinta, Montebello, Pojoj, Tziscoa y Yalalush (Tabla 1). De este conjunto de lagos, dos son someros –uno no impactado y uno

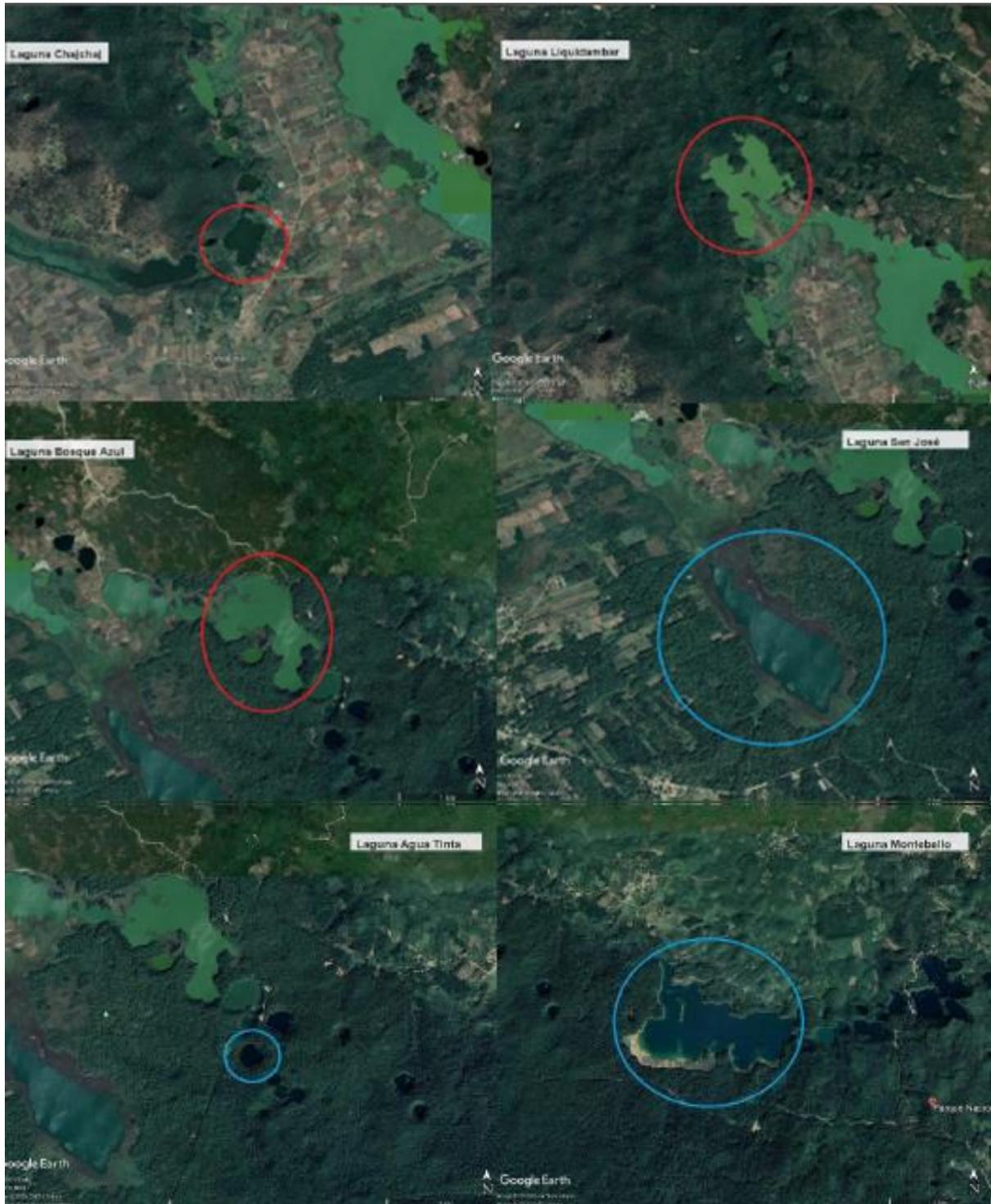
impactado- y siete son profundos –cinco no impactados y 2 impactados- lo que resulta en una muestra representativa de la diversidad los lagos presentes en el PNLM.

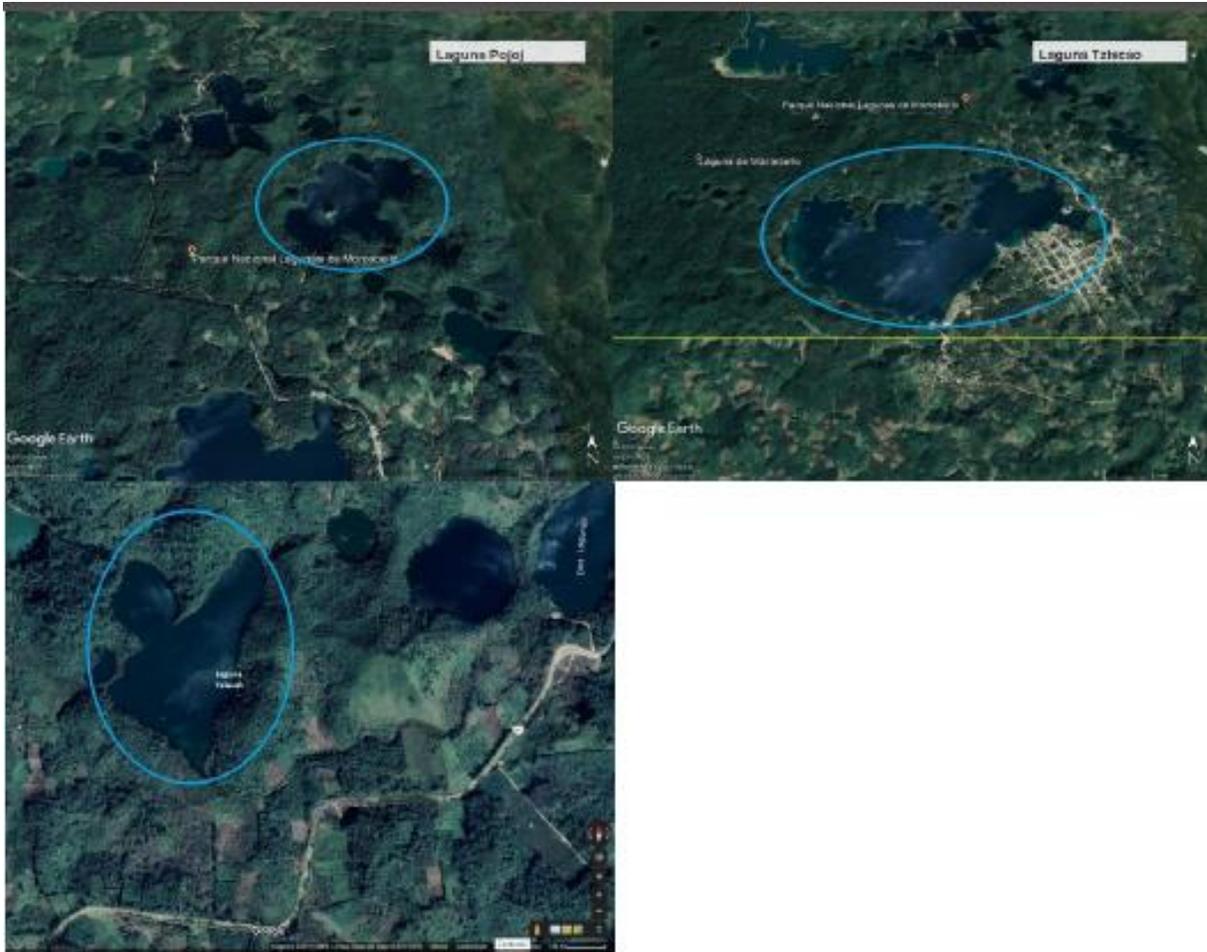
**Tabla 1. A)** Ubicación geográfica de los lagos en estudio del PNLM, ordenados de NW a SE (Alcocer *et al.*, 2016). ( $Z_{MAX}$  = profundidad máxima,  $Z_{MED}$  = profundidad media, profundidad: S = funcionalmente somero, P = profundo, grado e impacto: I = impactado, NI = no impactado). **B)** Imágenes satelitales de los lagos de Montebello estudiados (Tomados de Google Earth). Nota: los lagos están a diferentes escalas.

A)

Lago	Latitud N	Longitud W	$Z_{MAX}$	$Z_{MED}$	S/P	I/NI
<b>Chajchaj</b>	16° 12' 75"	91° 77' 98"	12	5.3	S	I
<b>Liquidambar</b>	16°15' 05"	91° 78' 12"	24	11.2	P	I
<b>Bosque Azul</b>	16° 11' 99"	91° 72' 90"	58	20	P	I
<b>San José</b>	16° 06' 34"	91°44' 29"	30	10.3	P	NI
<b>Agua Tinta</b>	16° 06' 25"	91°41' 19"	24	14.7	P	NI
<b>Montebello</b>	16°06' 32"	91° 40' 57"	45	12.3	P	NI
<b>Pojoj</b>	16° 06' 22"	91° 40' 03"	198	35.2	P	NI
<b>Tziscoa</b>	16° 04' 59"	91° 40' 46"	86	28.9	P	NI
<b>Yalalush</b>	16° 05' 30"	91° 38' 47"	23	9.9	S	NI

B)





En la parte central y más profunda de cada uno de los lagos se registraron perfiles verticales -con una resolución espacial de 1 m- de temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica estandarizada a 25°C, potencial redox y turbidez. Se utilizó para ello una sonda multiparamétrica de calidad de agua marca Hydrolab modelo DS5X acoplado a un sistema SVR4. Por otro lado, se registraron perfiles verticales de radiación fotosintéticamente activa (PAR) para lo cual se utilizó un perfilador de fluorescencia natural marca Biospherical modelo PNF-300.

## **7.2 Trabajo de gabinete**

Todos los perfiles obtenidos fueron capturados en archivos Excel, depurados y ordenados. Se realizó estadística básica con promedios, desviación estándar, mínimos y máximos de todas las variables, representándose en tablas y gráficas comparando los perfiles de ambas épocas. Se realizó una comparación entre los lagos no impactados e impactados de acuerdo con los perfiles obtenidos en el análisis.

## 8. RESULTADOS

### 8.1 Caracterización ambiental

#### 8.1.1 Zona eufótica o productiva ( $Z_{EU}$ )

Los valores para la  $Z_{EU}$ , esto es, la zona desde la superficie del cuerpo acuático y hasta dónde llega el 1% de la PAR en superficie, se presentan en la Tabla 9. Durante la época cálida de lluvias se obtuvieron valores entre 2 m (Chajchaj) y 73 m (Pojoj). En la época fría de secas la profundidad de la  $Z_{EU}$  se registró entre 2 m (Chajchaj) y 57 m (Pojoj).

**Tabla 2.** Promedio de la profundidad de la  $Z_{EU}$  (m) durante primavera/verano (P/V) e invierno en los lagos de estudio. (\* = no se pudo realizar el muestreo). (I = verde, NI = azul, S = color claro, P = color oscuro). Los lagos se encuentran ordenados de NW a SE.

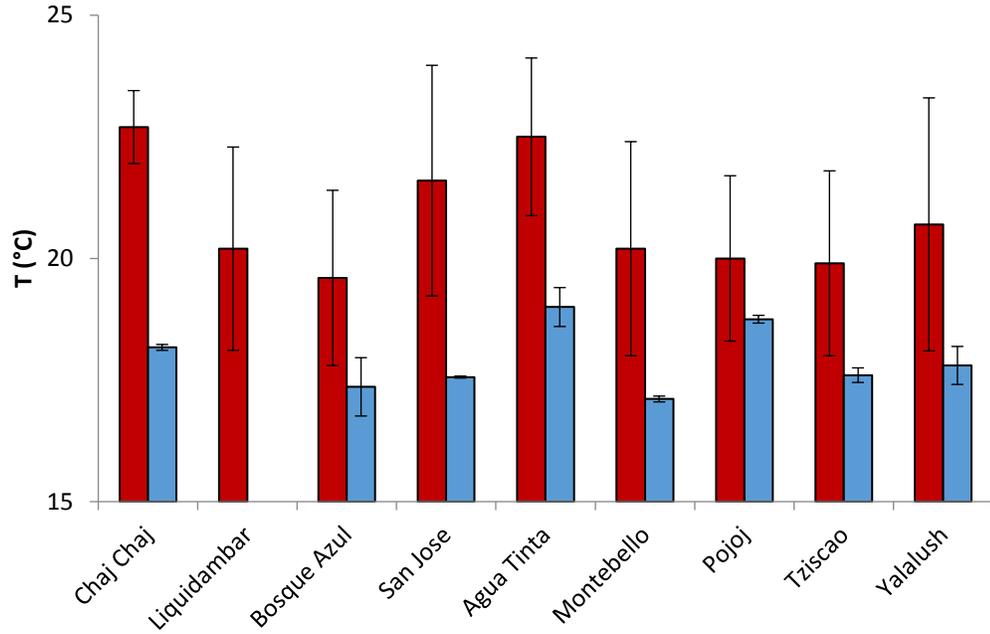
Lago	$Z_{EU}$ P/V	$Z_{EU}$ Invierno
Chajchaj	2	2
Liquidambar	3	*
Bosque Azul	3	5
San José	20	12
Agua Tinta	22	22
Montebello	18	39
Pojoj	73	57
Tziscoa	43	37
Yalalush	13	14

### 8.1.2 Temperatura (T)

La T para primavera/verano registró un promedio general de  $20.8 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$  (Fig. 2). La T máxima ( $T_{\text{MÁX}}$ ) se obtuvo en Liquidambar, mientras que la T mínima ( $T_{\text{MÍN}}$ ) se registró en Bosque Azul y Montebello. Durante el invierno se encontró un promedio de  $16.3 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , donde la  $T_{\text{MÁX}}$  se registró en Pojoj y la  $T_{\text{MÍN}}$  en Agua Tinta. Los valores de T se presentan en la Tabla 2. A excepción de Yalalush, todos los lagos tanto no impactados como impactados estuvieron estratificados en primavera/verano y circulando en invierno, a excepción de San José, no importando su profundidad.

**Tabla 3.** Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de T ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante las épocas de primavera/verano e invierno en los lagos de estudio. (\* = no se permitió el muestreo). (I = verde, NI = azul, S = color claro, P = color oscuro). Los lagos se encuentran ordenados de NW a SE.

Lago	Primavera/verano				Iniverno			
	Mín.	Máx.	Prom.	d.e	Mín.	Máx.	Prom.	d.e
Chajchaj	22.2	24.3	22.7	0.7	18	18.2	18.1	0.06
Liquidambar	18.8	26.1	20.2	2.0	*	*	*	*
Bosque Azul	17.8	24.6	19.6	2.4	17.3	17.3	17.3	0.02
San José	18.4	23.6	21.6	1.8	17.1	18.8	17.5	0.5
Agua Tinta	20.1	24.0	22.5	1.6	6.3	6.8	6.6	0.1
Montebello	17.8	22.7	20.2	2.2	17	17.4	17.1	0.06
Pojoj	17.9	22.5	20.0	1.7	18.7	19.4	18.7	0.08
Tzisco	17.9	22.5	19.9	1.9	17.5	18.2	17.6	0.1
Yalalush	20.4	21.1	20.7	0.3	17.3	18.4	17.7	0.3



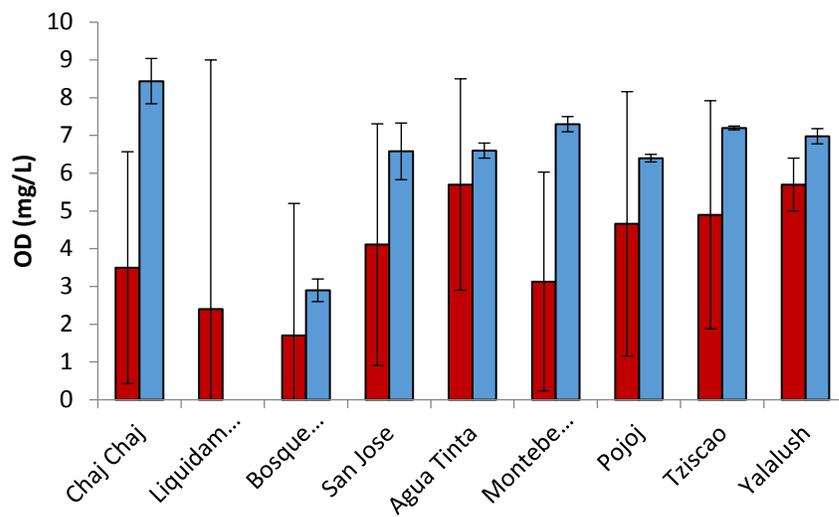
**Fig. 3.** Temperatura promedio (°C) ( $\pm 1$  d.e.) registrada durante la época de primavera/verano (barras en rojo) y la época de invierno de secas (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM. Los lagos ordenados de NW a SE.

### 8.1.3 Oxígeno disuelto (OD)

La concentración de OD (Tabla 3) en los cuerpos de agua en la época de primavera/verano registró un promedio general de  $4.0 \pm 1.4$  mg/L (Fig. 3). La concentración de OD máxima (OD<sub>MAX</sub>) se obtuvo en Liquidambar con 24.3 mg/L y la concentración de OD mínima (OD<sub>MIN</sub>) fue de 0 mg/L (por debajo del límite de detección) en la mayoría de los lagos, es decir, se registró anoxia, excepto en Yalalush. En la época de invierno se registró un promedio general en la concentración de OD de  $6.5 \pm 0.2$  mg/L. El OD<sub>MAX</sub> se encontró en la superficie de Chajchaj (9 mg/L), mientras que el OD<sub>MIN</sub> se registró en la superficie de Bosque Azul.

**Tabla 4.** Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de la concentración de OD (mg/L) durante las épocas de primavera/verano e invierno en los lagos de estudio. (\* = no se permitió el muestreo). (I = verde, NI = azul, S = color claro, P = color oscuro). Los lagos se encuentran ordenados de NW a SE.

Lago	Primavera/verano				Invierno			
	Mín.	Máx.	Prom.	d.e	Mín.	Máx.	Prom.	d.e
Chajchaj	0	7.5	3.5	3.0	7.5	9	8.4	0.6
Liquidambar	0	24.3	2.4	6.5	*	*	*	*
Bosque Azul	0	11.5	1.7	3.5	2.2	3.8	2.9	0.3
San José	0	7.5	4.1	3.2	5.4	7.5	6.5	0.7
Agua Tinta	0	7.9	6.0	2.8	6.3	6.8	6.6	0.1
Montebello	0	6.2	3.1	2.9	6.9	7.5	7.3	0.1
Pojoj	0	9.0	4.6	3.4	6	6.5	6.4	0.09
Tzisco	0	8.0	5.0	3.0	7.1	7.5	7.2	0.04
Yalalush	4.4	6.6	5.7	0.7	6.7	7.1	6.9	0.1



**Fig. 4.** Concentraciones promedio de OD (mg/L) ( $\pm 1$  d.e.) registrados durante la época de primavera/verano (barras en rojo) y la época de invierno de secas (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM. Los lagos ordenados de NW a SE.

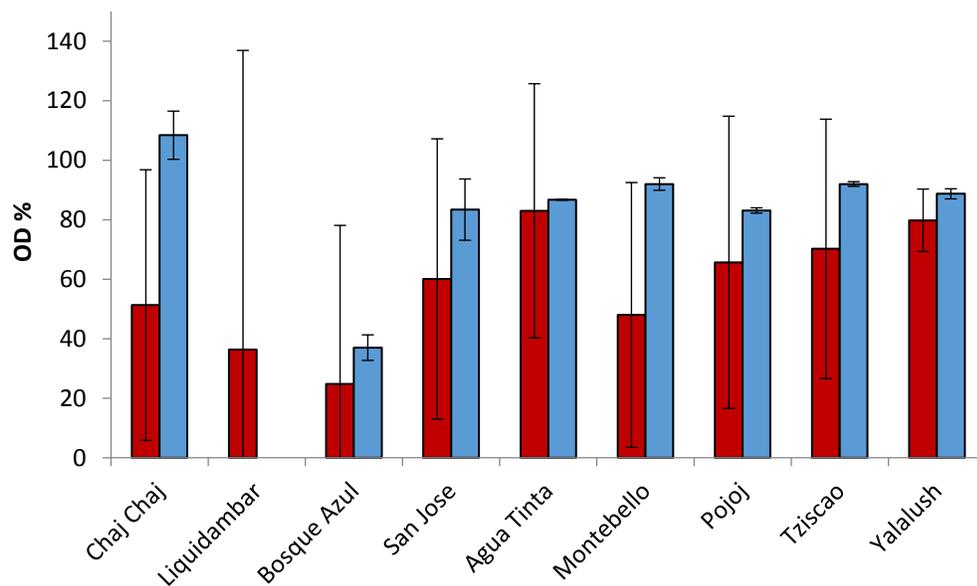
### 8.1.4 Porcentaje de saturación de oxígeno (%OD)

Los valores de %OD en los lagos se presentan en la Tabla 4. En el muestreo de la época de primavera/verano se obtuvo un promedio general de  $57.7 \pm 19.4\%$  (Fig. 4). El mayor %OD se obtuvo en el epilimnion de Liquidambar y el menor %OD fue de 0% para todos los lagos, excepto para Yalalush. Para la época de invierno se registró un promedio general de  $83.9 \pm 3.8\%$ , siendo Chajchaj el lago con el mayor %OD y Bosque Azul con el mínimo.

**Tabla 5.** Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) del %OD durante las épocas de primavera/verano e invierno en los lagos de estudio. (\* = no se permitió el muestreo). (I = verde, NI = azul, S = color claro, P = color oscuro). Los lagos se encuentran ordenados de NW a SE.

Lago	Primavera/verano				Invierno			
	Mín.	Máx.	Prom.	d.e	Mín.	Máx.	Prom.	d.e
Chajchaj	0	113.2	51.3	45.5	96.5	116.3	108.4	8.0
Liquidambar	0	378	36.4	100.5	*	*	*	*
Bosque Azul	0	174.2	24.8	53.3	27.9	45.1	37.0	4.2
San José	0	110.6	60.1	47.1	68.0	97.0	83.4	10.3
Agua Tinta	0	111.3	83.0	42.7	82.1	90.7	86.7	2.8
Montebello	0	95.0	48.0	44.5	87.2	95.1	92.0	2.1
Pojoj	0	125.9	65.7	49.1	77.8	85.5	83.1	0.8
Tziscoa	0	117.0	70.2	43.6	90.9	95.9	92.0	0.7
Yalalush	61.2	93.7	79.8	10.5	85.9	90.6	88.7	1.7

En general, para la época de primavera/verano los lagos presentaron valores de sobresaturación de OD en la capa superficial de los lagos. En cambio, en la época de invierno, aunque los porcentajes de saturación de oxígeno fueron menores, éstos se registraron relativamente homogéneos a lo largo de la columna de agua.



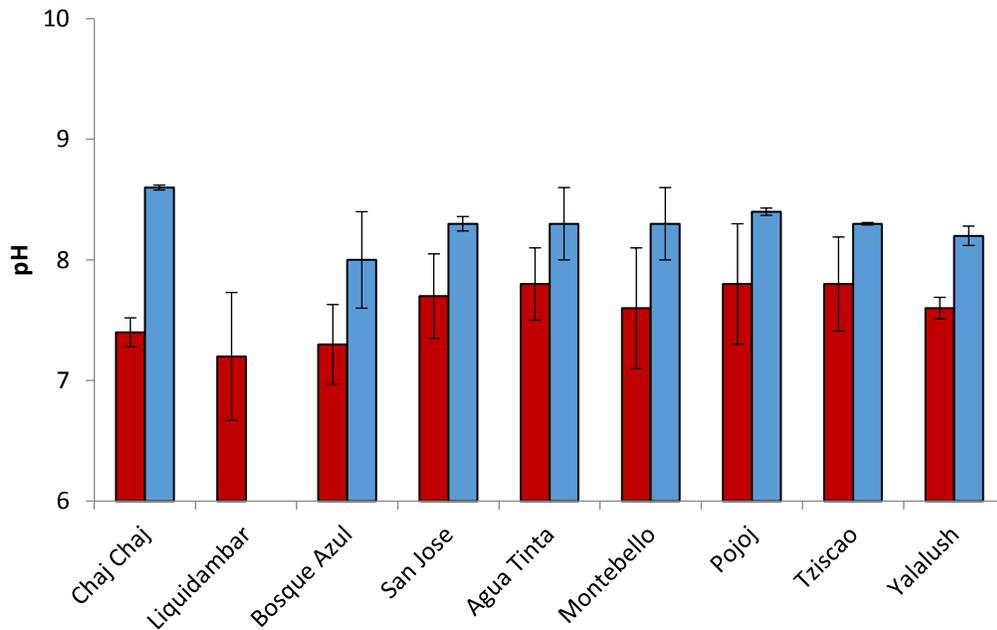
**Fig. 5.** Porcentajes de saturación de oxígeno disuelto promedio ( $\pm 1$  d.e.) registrados durante la época de primavera/verano (barras en rojo) y la época de invierno (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM. Los lagos están ordenados de NW a SE.

### 8.1.5 pH

Los valores de pH se presentan en la Tabla 5. En la época de primavera/verano el pH registró un promedio general de  $7.6 \pm 0.2$  unidades (Fig. 5). Los valores de pH mínimo y máximo se registraron en Liquidambar, en la capa superficial 8.9 unidades y en el fondo 7 unidades, respectivamente. Por otro lado, en la época de invierno se registró un promedio general de  $8.2 \pm 0.03$  unidades. Los valores mínimos se obtuvieron en Bosque Azul y los valores máximos en Chajchaj.

**Tabla 6.** Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de pH durante las épocas de primavera/verano e invierno (F/S) en los lagos de estudio. (\* = no se permitió el muestreo). (I = verde, NI = azul, S = color claro, P = color oscuro). Los lagos se encuentran ordenados de NW a SE.

Lago	Primavera/verano				Iniverno			
	Mín.	Máx.	Prom.	d.e	Mín.	Máx.	Prom.	d.e
Chajchaj	7.3	7.6	7.4	0.1	8.5	8.6	8.6	0.02
Liquidambar	7.0	8.9	7.2	0.5	*	*	*	*
Bosque Azul	7.1	8.3	7.3	0.3	7.9	8.0	8.0	0.04
San José	7.3	8.1	7.7	0.3	*	8.4	8.3	0.06
Agua Tinta	7.3	8.3	7.8	0.3	8.2	8.4	8.3	0.02
Montebello	7.0	8.1	7.6	0.5	8.2	8.3	8.3	0.03
Pojoj	7.0	8.4	7.8	0.5	8.3	8.4	8.4	0.03
Tziscoa	7.2	8.2	7.8	0.4	8.3	8.3	8.3	0.01
Yalalush	7.4	7.7	7.6	0.1	8.0	8.3	8.2	0.08



**Fig. 6.** Valores promedio de pH ( $\pm 1$  d.e.) registrados en la época de primavera/verano (barras en rojo) y en la época de invierno (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM. Los lagos están ordenados de NW a SE.

### 8.1.6 Conductividad eléctrica estandarizada a 25°C (K<sub>25</sub>)

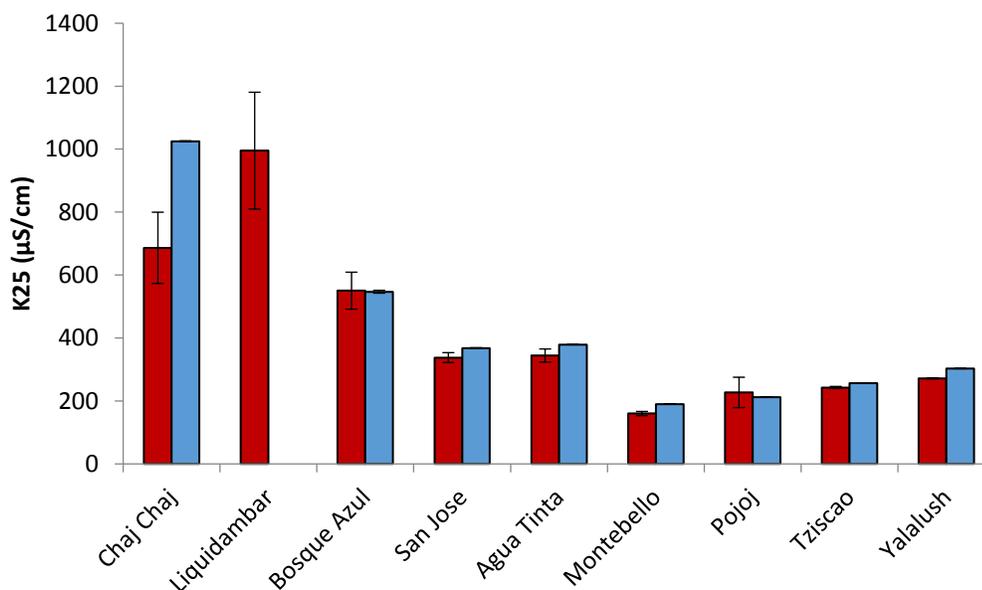
El promedio general de K<sub>25</sub> para la época de primavera/verano fue de 422 ± 272 µS/cm (Fig. 6). En donde el valor de K<sub>25</sub> presentó su mínimo en Montebello con 160 µS/cm (Tabla 6) y el valor máximo se registró en Liquidambar con 1,118 µS/cm. En la época de invierno el promedio general de K<sub>25</sub> fue de 414 ± 1 µS/cm, con un máximo de 1,027 µS/cm en el fondo de Chajchaj y un mínimo de 190 µS/cm en la superficie de Montebello.

**Tabla 7.** Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de K<sub>25</sub> (µS/cm) durante las épocas de primavera/verano e invierno en los lagos de estudio. (\* = no se permitió el muestreo). (I = verde, NI = azul, S = color claro, P = color oscuro). Los lagos se encuentran ordenados de NW a SE.

Lago	Primavera/verano				Invierno			
	Min.	Max.	Prom.	d.e.	Min.	Max.	Prom.	d.e.
Chajchaj	585	823	686	113	1,023	1,027	1,025	1
Liquidambar	606	1,118	995	186	*	*	*	*
Bosque Azul	498	650	550	59	538	553	547	5
San José	320	360	338	16	367	371	368	1
Agua Tinta	325	373	344	21	378	380	379	0.4
Montebello	160	170	160	0.006	190	190	190	0.1
Pojoj	193	323	227	48	212	215	212	1
Tziscoa	238	250	243	3	257	257	257	0.1
Yalalush	269	275	272	2	303	305	303	1

De acuerdo con los valores de  $K_{25}$  se distinguieron dos conjuntos de lagos:

- 1) Lagos con valores menores a  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ : Agua Tinta, Montebello, Pojoj, San José, Tzisco y Yalalush (lagos no impactados).
- 2) Lagos con valores mayores a  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ : Bosque Azul, Chajchaj y Liquidambar (lagos impactados).



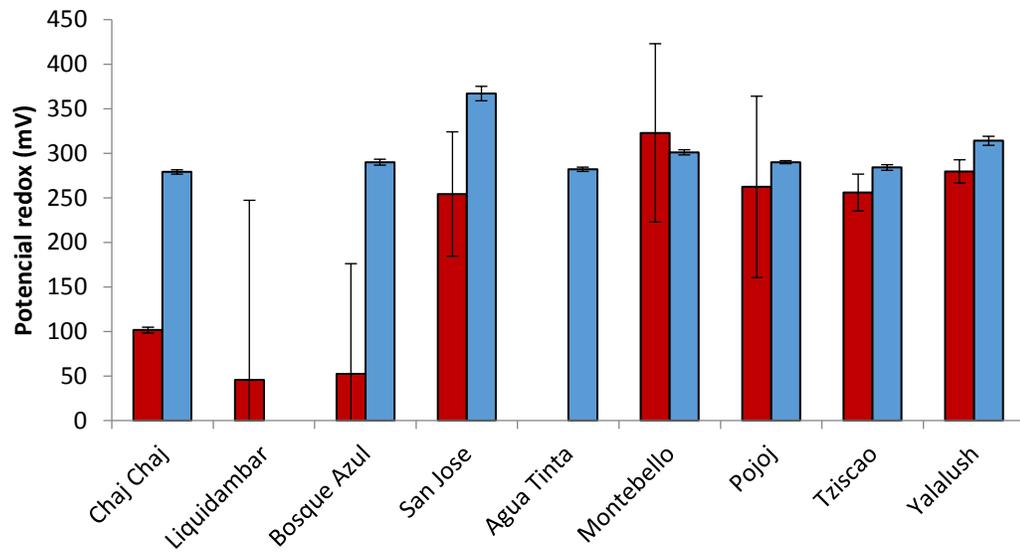
**Fig. 7.** Conductividad eléctrica estandarizada a  $25^{\circ}\text{C}$  ( $K_{25}$ ,  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) promedio ( $\pm 1$  d.e.) registrada en la época primavera/verano (barras en rojo) y la época de invierno (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM. Los lagos están ordenados de NW a SE.

### 8.1.7 Potencial de óxido-reducción (redox)

Los valores de redox se presentan en la Tabla 7. En general, se registró un promedio de  $196 \pm 113$  mV en la de primavera/verano (Fig. 7). El valor máximo se encontró en la capa superficial de Montebello con 416 mV y el valor mínimo de -145 mV en el fondo de Liquidambar. Para la época de invierno el promedio fue de  $301 \pm 4$  mV; San José presentó el máximo valor (372 mV) y Chajchaj el valor mínimo (274 mV).

**Tabla 8.** Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) del potencial de óxido-reducción (mV) las épocas de primavera/verano e invierno. (\* = no se permitió el muestreo). (I = verde, NI = azul, S = color claro, P = color oscuro). Los lagos se encuentran ordenados de NW a SE.

Lago	Primavera/verano				Invierno			
	Mín.	Máx.	Prom	d.e	Mín.	Máx.	Prom	d.e
Chajchaj	236	247	102	3	274	281	279	2
Liquidambar	-145	392	46	188	*	*	*	*
Bosque Azul	-65	277	53	124	287	300	290	3
San José	94	307	254	70	334	372	367	8
Agua Tinta	*	*	*	*	278	286	282	2
Montebello	150	416	323	100	297	306	301	3
Pojoj	62	349	262	102	288	296	290	2
Tzisco	212	281	256	21	278	289	284	3
Yalalush	275	288	280	13	305	321	314	5



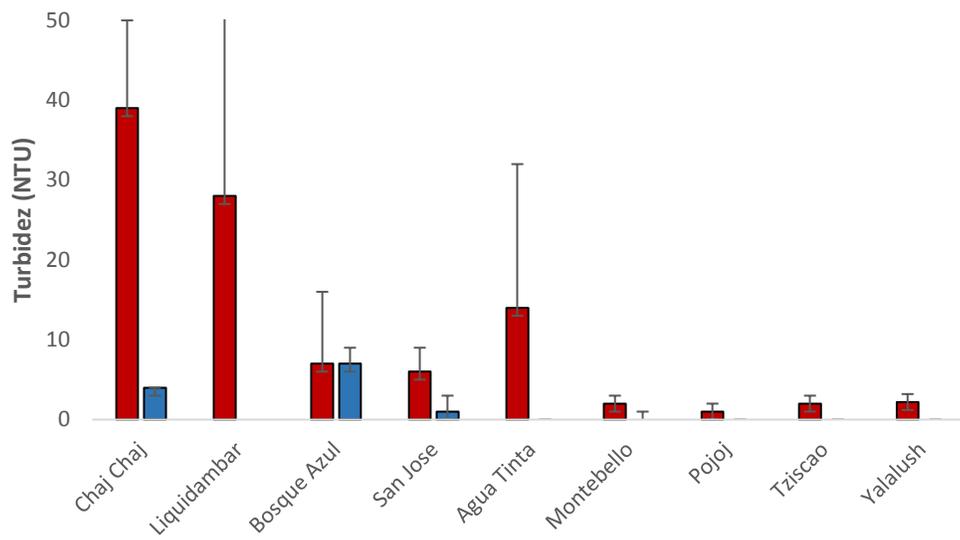
**Fig. 8.** Potencial de óxido-reducción (mV) promedio ( $\pm 1$  d.e.) registrado en la época primavera/verano (barras en rojo) y la de invierno (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM. Los lagos están ordenados de NW a SE.

### 8.1.8 Turbidez

El promedio general de la turbidez en la época de primavera/verano fue de  $11 \pm 14$  NTU (Fig.8). La turbidez máxima se encontró la capa superficial de Liquidambar (426 NTU) y la turbidez mínima se localizó en el fondo de Montebello (0 NTU). Para la época de invierno el promedio general fue de  $1 \pm 3$  NTU, con valores máximos en el agua de fondo de Bosque azul (8 NTU) y Montebello ( 7 NTU) y valores mínimos en todos los lagos (excepto Chajchaj), con valor de 0 NTU (por debajo del límite de detección) (Tabla 8).

**Tabla 9.** Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedios (Prom.) y desviación estándar (d.e.) de turbidez (NTU) las épocas de primavera/verano e invierno en los lagos de estudio. (\* = no se permitió el muestreo). (I = verde, NI = azul, S = color claro, P = color oscuro). Los lagos se encuentran ordenados de NW a SE.

Lago	Primavera/verano				Invierno			
	Min.	Máx.	Prom.	d.e.	Min.	Máx.	Prom.	d.e.
Chajchaj	28	50	39	11	4	5	4	0
Liquidambar	3	426	28	94	*	*	*	*
Bosque Azul	2	26	7	9	0	8	7	2
San José	2	10	6	3	0	6	1	2
Agua Tinta	2	60	14	18	0	0	0	0
Montebello	0	7	2	1	0	7	0	1
Pojoj	1	5	1	1	0	0	0	0
Tziscoa	1	7	2	1	0	0	0	0
Yalalush	1	3	2	1	0	0	0	0



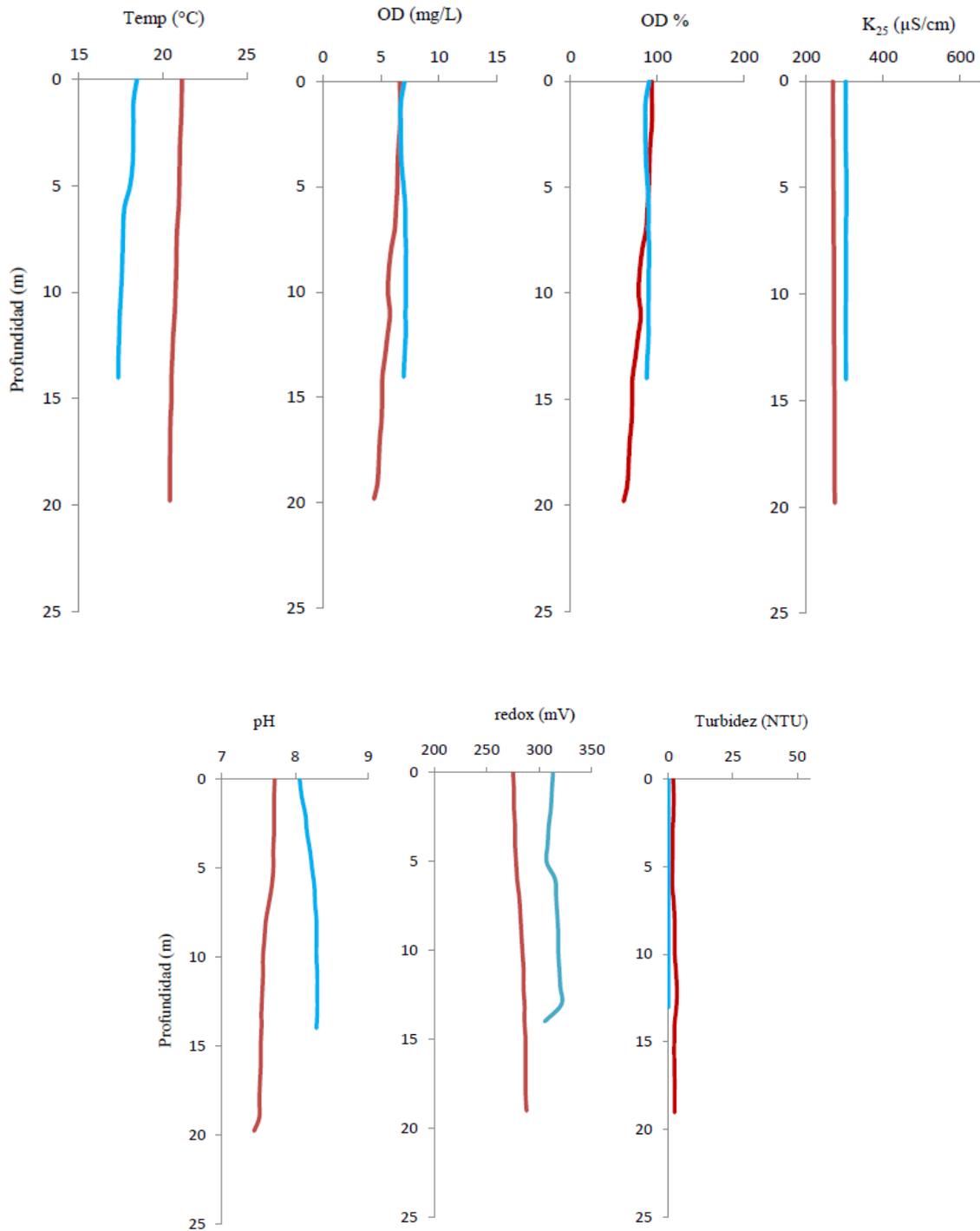
**Fig. 9.** Turbidez promedio (NTU) ( $\pm 1$  d.e.) registrados en la época primavera/verano (barras en rojo) y la época de invierno (barras en azul) para los nueve lagos del PNLM. Los lagos están ordenados de NW a SE.

## **8.2 Caracterización entre lagos**

A continuación, se realiza una descripción de las categorías de los lagos estudiados que incluyen someros, profundos, impactados y no impactados, incluyendo un lago como ejemplo de cada categoría (los restantes se encuentran en la sección de Anexos) . Lo anterior permite clasificarlos en cuatro categorías: someros no impactados, someros impactados, profundos no impactados y profundos impactados.

### **8.2.1 Lagos someros no impactados (Yalalush)**

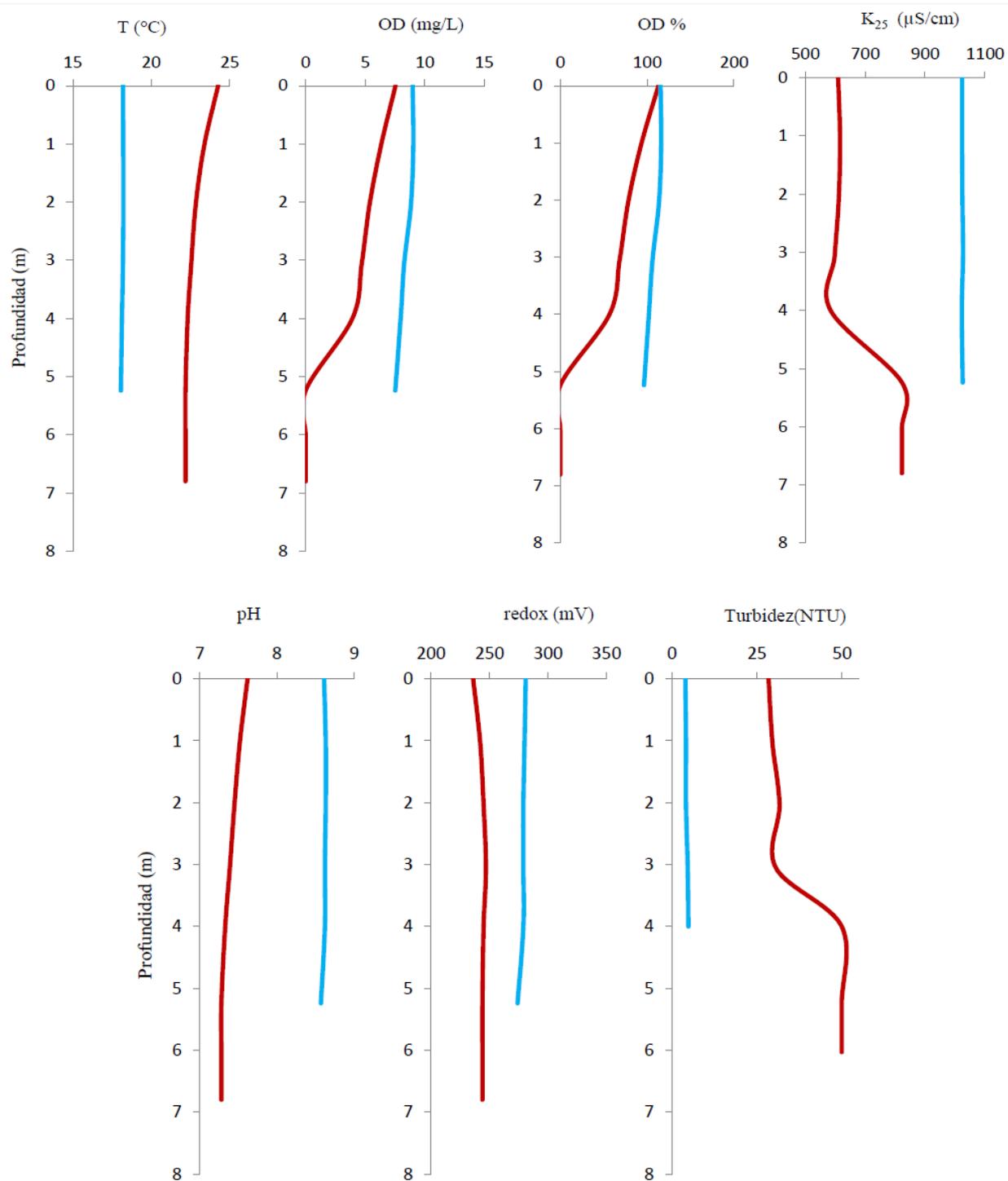
Yalalush durante la época de primavera/verano presentó T homogénea a lo largo de toda la columna de agua con un promedio general de  $20.7 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ . Mostró un perfil ortogrado de OD con concentraciones máximas en la superficie (6.6 mg OD/L) y concentraciones más bajas en el fondo (4.4 mg OD/L) (Fig. 9). En cuanto al %OD presentó valores máximos en la capa superficial (94%) disminuyendo con la profundidad, observando los valores mínimos en el fondo del lago (61%). Los valores de pH fueron homogéneos en toda la columna de agua con un valor promedio de  $7.6 \pm 0.8$  unidades. Para los valores de  $K_{25}$ , potencial redox y turbidez se observaron valores en superficie de 269  $\mu\text{S/cm}$ , 275 mV y 1.8 NTU y valores máximos en el fondo con 275  $\mu\text{S/cm}$ , 288 mV y 3 NTU respectivamente. Durante la época de invierno, Yalalush presentó perfiles homogéneos de todas las variables lo que indicó que se encontraba circulando (Fig. 9).



**Fig. 10.** Perfiles verticales de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), porcentaje de saturación de OD (OD%), conductividad eléctrica ( $K_{25}$ ), pH, potencial de oxido-reducción (redox) y turbidez en Yalalush ejemplificando un lago somero no impactado (época primavera/verano = línea roja, época de invierno = línea azul).

### 8.2.2 Lagos someros impactados

Chajchaj en la época de primavera/verano presentó T homogénea a lo largo de toda la columna de agua con un promedio de  $22.7 \pm 0.7$  °C. A pesar de no mostrar estratificación térmica sugiriendo que estaba circulando, mostró un perfil clinogrado de OD, observando concentraciones máximas en superficie (7.5 mg OD/L) y concentraciones mínimas en el fondo (0 mg OD/L) (Fig.10). Al ser un lago impactado, las elevadas concentraciones de materia orgánica presentes seguramente explican por qué disminuye –degradación microbiana- la concentración de OD en la parte más profunda. La  $K_{25}$  aumenta con la profundidad, presentando valores elevados (823  $\mu$ S/cm). El pH fue homogéneo en toda la columna de agua con un valor promedio de  $7.4 \pm 0.1$  unidades. Los valores redox fueron bajos con un valor promedio de  $101.5 \pm 3.2$  mV. La turbidez aumentó conforme la profundidad, con valores en superficie de 28 NTU y valores máximos en el fondo (50 NTU). Durante la época de invierno, Chajchaj presentó perfiles homogéneos lo que indicó que estaba circulando (Fig. 10).

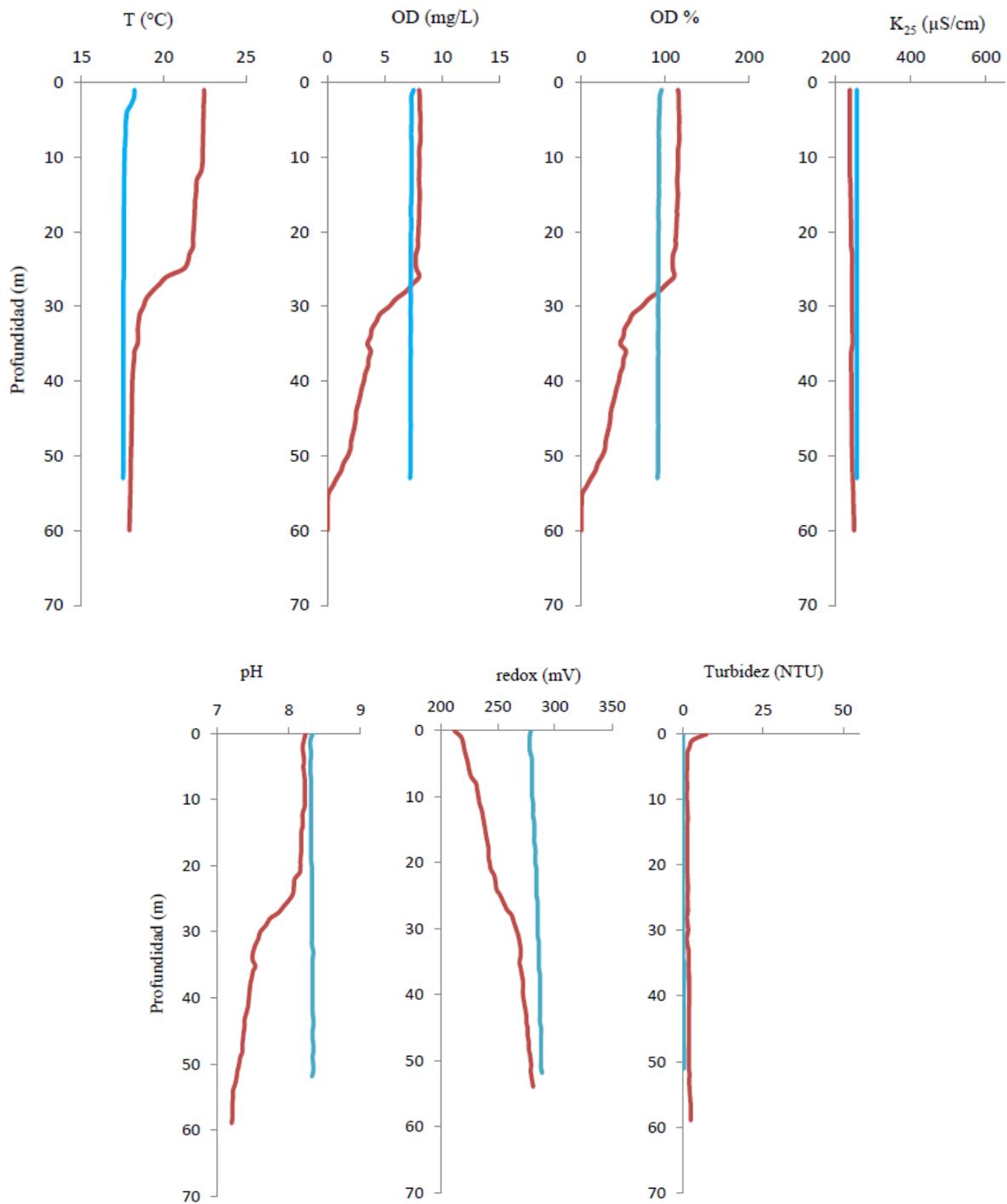


**Fig. 11.** Perfiles verticales de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), porcentaje de saturación de OD (OD%), conductividad eléctrica (K<sub>25</sub>), pH, potencial de óxido-reducción (redox) y turbidez en Chajchaj, ejemplificando a un lago somero impactado (época de primavera/verano = línea roja, época de invierno = línea azul).

### **8.2.3 Lagos profundos no impactados**

Tzisco, a modo de ejemplo de este conjunto de lagos, mostró estratificación térmica en la época de primavera/verano con una T promedio de  $20.2 \pm 1.9$  °C y un perfil clinogrado de OD, con concentraciones máximas en el epilimnion (8 mg OD/L) y condiciones anóxicas en el hipolimnion (0 mg OD/L) (Fig. 11). En cuanto al %OD sus valores máximos se encontraron en superficie (115.4 %) y sus valores mínimos en el fondo del lago (0 %). Los valores de  $K_{25}$  en superficie fueron de 238  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y valores máximos en el hipolimnion de 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Para el potencial redox, se observaron valores en superficie de 212 mV y valores máximos en el hipolimnion de 281 mV. El pH con valores máximos en el epilimnion de 8.2 unidades y valores mínimos en el hipolimnion (7.2 unidades). Por último, la turbidez mostró valores máximos en superficie (7.4 NTU) y los mínimos en el hipolimnion de 2.4 NTU.

Durante la época de invierno el lago presentó perfiles homogéneos en todas las variables lo que indicó que se encontraba circulando.

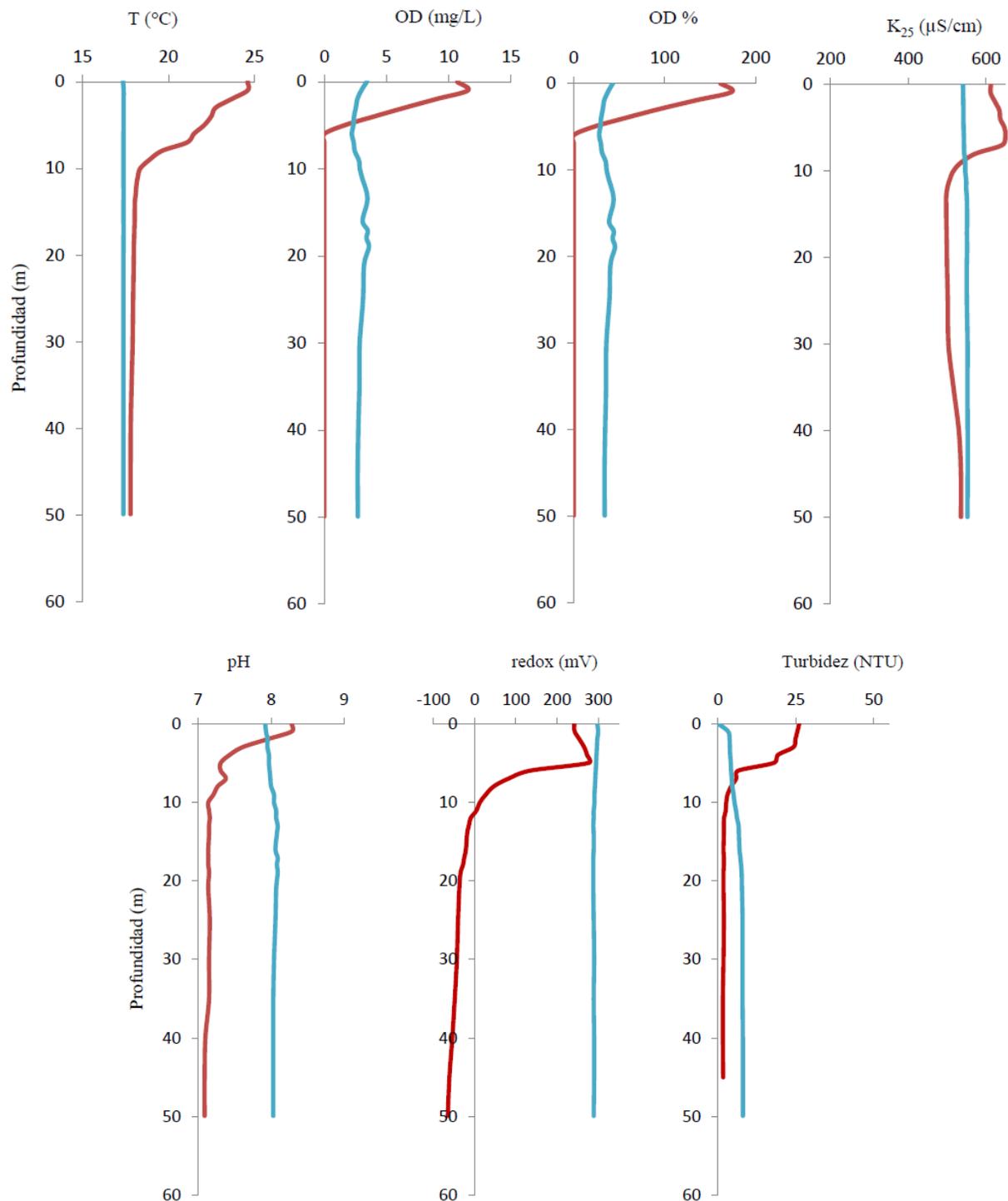


**Fig. 12.** Perfiles verticales de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), porcentaje de saturación de OD (%OD), conductividad eléctrica (K<sub>25</sub>), pH, potencial de oxido-reducción (redox) y turbidez en Tzisco, ejemplificando un lago profundo no impactado (época de primavera/verano = línea roja, época de invierno = línea azul).

#### **8.2.4 Lagos profundos impactados**

Bosque Azul, a modo de ejemplo de este conjunto de lagos, mostró estratificación térmica en la época de primavera/verano con una T promedio de  $19.6 \pm 2.3^{\circ}\text{C}$  y un perfil clinogrado de OD con concentraciones máximas en el epilimnion de 10.7 mg OD/L y con condiciones anóxicas a partir de los 6 m (Fig. 12). El %OD obtuvo su valor máximo en superficie (174.2 %) y valor mínimo de 0 % a partir de los 6 m. La  $K_{25}$  disminuye con la profundidad, con concentraciones máximas en el epilimnion (613  $\mu\text{S/cm}$ ) y mínimas en el hipolimnion (536  $\mu\text{S/cm}$ ). El pH con promedio de  $7.3 \pm 0.3$  unidades y valores máximos en el epilimnion de 8.3 unidades y mínimos en el hipolimnion (7.1 unidades). En cuanto a los valores de potencial redox, disminuyen conforme aumentó la profundidad, con valores máximos en el epilimnion de 242 mV y valores mínimos en el hipolimnion de -65 mV. La turbidez también disminuye conforme la profundidad se incrementa, con un valor máximo en el epilimnion de 26 NTU y un mínimo en el hipolimnion de 2 NTU.

Durante la época de invierno, Bosque Azul presentó perfiles homogéneos de T, %OD, OD,  $K_{25}$ , potencial redox, pH y turbidez en toda la columna de agua lo que indicó que estaba circulando.



**Fig.13.** Perfiles verticales de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), porcentaje de saturación de OD (%OD), conductividad eléctrica (K<sub>25</sub>), pH, potencial de óxido-reducción (redox) y turbidez en Bosque Azul, ejemplificando a un lago somero impactado (época de primavera/verano = línea roja, época de invierno = línea azul).

## 9. DISCUSIÓN

Los lagos someros estuvieron circulando en ambas épocas lo que los califica como “funcionalmente someros” y por ende, polimícticos cálidos. Por otro lado, los lagos profundos se estratificaron durante la época de primavera/verano y circularon durante la época de invierno clasificándolos como monomícticos cálidos. De acuerdo con Lewis (1996), los lagos tropicales profundos son típicamente monomícticos cálidos, presentando estratificación térmica estable la mayor parte de un ciclo anual y se mezclan una vez por año, en coincidencia con el invierno hemisférico. Esto coincide con los lagos profundos del PNLM.

La  $Z_{EU}$  en los lagos impactados es menor ( $< 5$  m) que la de los lagos no impactados ( $> 10$  m) en ambas épocas del año. Debido a que los componentes particulados regulan la atenuación de la luz en la mayoría de las aguas continentales (Effler *et al.*, 2002), la mayor cantidad de material particulado en los lagos impactados tienen mayor atenuación de ésta y por ende menor penetración en la columna de agua. Lewis (1986) encontró que en algunos lagos la  $Z_{EU}$  disminuye durante la época F/S y que rara vez esta disminución se observa debajo de los 6 m. Debido a esto el fitoplancton no se puede desarrollar, por lo cual la turbidez presentada es de origen terrígeno. Algo similar se encontró en los lagos no impactados profundos Tziscaco, Pojoj, San José y Agua Tinta, indicando, posiblemente, que la turbidez en época F/S podría ser en parte de origen terrígeno.

Por lo general, en los lagos monomícticos cálidos, en época de invierno cuando se encuentran en circulación, la turbidez biogénica aumenta, debido a que la producción primaria es favorecida por la recirculación de nutrientes atrapados en el hipolimnion durante la estratificación (Lewis, 1983). No obstante, la  $Z_{EU}$  en Montebello (lago no impactado) y Bosque Azul (lago impactado) se incrementó durante la época F/S manifestando una  $Z_{EU}$  más amplia, en Montebello aumentó al doble y en Bosque Azul aumento 2 metros. Según Roldán (2008), la turbidez es el grado en el que el agua interfiere con la transmisión de la luz a través de ella. Normalmente, los sistemas acuáticos tropicales son turbios por el arrastre de materiales propiciado por la alta

lixiviación que se da en estas regiones. Lo anterior se confirma en los lagos del PNLM los cuales durante la época de primavera/verano mostraron valores de turbidez más elevados. En donde los lagos no impactados presentan valores menores a 10 NTU (observando los valores máximos en superficie), a excepción de Agua Tinta que presentó su valor máximo de 60 NTU en superficie; y los lagos impactados mostraron valores máximos mayores a 26 NTU con un valor máximo en la superficie de Liquidambar (426 NTU) en época de primavera/verano y valores menores a 8 NTU en época de invierno.

La atenuación de la luz conlleva su transformación a calor y por ello se expresa en temperatura. Los lagos impactados mostraron temperaturas mayores  $20.8 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$  y presencia de termoclinas más someras  $1.6 \pm 0.5$  m y estrechas  $6.3 \pm 2.5$  m, mientras que los lagos no impactados presentan temperaturas menores  $19.8 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$  y las termoclinas son más profundas  $14.8 \pm 11.8$  m y extensas  $25.2 \pm 10.6$  m. El gradiente de temperatura en los lagos impactados es de  $0.27 \pm 0.1^{\circ}\text{C/m}$ , mientras que en los no impactados es de  $0.08 \pm 0.08^{\circ}\text{C/m}$ .

Con relación al OD en los lagos someros, Yalalush mostró una curva de distribución de tipo ortogrado indicando que estaba circulando y presenta un bajo consumo de oxígeno, característico de la oligotrofia. A diferencia, Chajchaj, el otro lago somero, a pesar de estar circulando, su condición eutrófica consume el OD de las capas más profundas dando como resultado un perfil clinogrado. En los lagos profundos, durante la época de primavera/verano todos los lagos mostraron perfiles clinogrados de distribución de OD, con hipolimnia anóxicos.

Lewis (1996) afirma que el desarrollo de un hipolimnion anóxico es más común en lagos tropicales debido a que presentan temperaturas hipolimnéticas más elevadas, provocando que la cantidad de oxígeno que puedan mantener en disolución sea menor, así como una tasa de descomposición de materia orgánica y metabolismo microbiano acelerado. Debido a ello, los lagos profundos presentan un perfil clinogrado, condición característica de una disminución progresiva de oxígeno hacia el fondo, con hipolimnion anóxico y en la superficie es donde se desarrolla la actividad fotosintética.

Los lagos impactados mostraron concentraciones de OD menores  $2.5 \pm 0.9$  mg/L y presencia de oxiclina más someras  $1.6 \pm 0.5$  m y estrechas  $3.6 \pm 1.5$  m, mientras que los lagos no impactados presentan concentraciones de OD mayores  $4.5 \pm 0.9$  mg/L y las oxiclinas son más profundas  $20.6 \pm 8.2$  m y extensas  $39 \pm 22.8$  m. El gradiente de OD en los lagos impactados es de  $0.85 \pm 0.5$  mg/L/m, mientras que en los no impactados es de  $0.2 \pm 0.1$  mg/L/m. En la época F/S todos los lagos se encontraron circulando y, por ende, con presencia de OD aún en la parte profunda.

El potencial redox normalmente se asocia -aunque no es algo directo- al OD; a mayores concentraciones de OD, valores más positivos de redox y a valores más bajos de OD y anoxia se asocian valores negativos de redox. Este comportamiento es similar en los lagos del PNLM en primavera/verano ya que los lagos impactados Bosque Azul y Liquidambar presentaron valores negativos asociados a anoxia, mientras que los lagos no impactados y Chachaj (lago impactado somero) presentaron valores bajos –cercaos a 0- de redox asociados a la presencia de OD pero en baja concentración.

De acuerdo con Roldan (2008), los valores de pH de la mayoría de los lagos se encuentran entre 6 y 9 unidades, siendo la mayor parte del tipo “bicarbonato”, es decir, contienen cantidades variables de carbonatos. Como es el caso de los lagos del PNLM donde el pH es similar en todos los lagos, tanto no impactados como impactados, que mostraron valores básicos entre 7 y 8.9 unidades en época de primavera/verano y de 7.9 a 8.6 unidades en época de invierno, observando valores más altos en la superficie de los lagos y disminuyendo con la profundidad.

En los trópicos, los valores de  $K_{25}$  están relacionados con la naturaleza geoquímica del terreno y su concentración varía principalmente con las épocas de lluvia y de sequía, y con su estado trófico. Lagos y ciénagas de zonas cálidas tropicales presentan conductividades elevadas (mayores a  $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), pues en ellas se recoge mayor escorrentía, además de los aportes de los ríos (Roldan Pérez, 2008). Como fue el caso de los lagos impactados que se encuentran en el NW del área de estudio, que tienen aportes provenientes del río Comitán y presentan valores entre los 498 y  $1,027 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

De acuerdo con los valores de  $K_{25}$  obtenidos, son más elevados en los lagos impactados ( $> 500 \mu\text{S/cm}$ ) que en los lagos no impactados ( $< 500 \mu\text{S/cm}$ ). Durante la época F/S, los lagos presentaron perfiles homogéneos de  $K_{25}$  a lo largo de la columna de agua mostrando una buena mezcla de la columna. Mientras que en época C/LL, en todos los lagos se observó un incremento de  $K_{25}$  conforme la profundidad aumenta, lo cual sugiere, además de la presencia de estratificación, la existencia de dos fuentes diferentes de suministro de agua: a) una superficial derivada del río Comitán o directamente de lluvia y b) una vía subterránea, lo que corrobora lo mencionado por Gonzáles del Castillo (2003), el cual expone que la alimentación de este sistema lacustre es tanto superficial -a través del río Grande de Comitán-, como subterránea. Mora Palomino (2017) informó que la erosión, las aguas residuales urbanas y el cambio de uso de suelo habían aumentado las concentraciones de cloruro y sulfato en el agua de los lagos, y los lagos con las concentraciones más altas de estos se encuentran al NW del área, lo que sugiere que el río Grande de Comitán podría ser una fuente importante de contaminación.

Los lagos de la zona NW del PNLN que corresponden a los impactados muestran claras diferencias con los lagos de la zona SE del PNLN que corresponden a los no impactados. Las diferencias entre los lagos impactados y los no impactados parecen estar asociados al proceso de eutrofización de los primeros, ya que de acuerdo con Vera-Franco (2015), seis de los nueve lagos de estudiados (i.e., Agua Tinta, Montebello, Pojoj, San José, Tzisco y Yalalush) se clasifican como ultraoligotróficos. De los tres restantes, Chaj Chaj se clasificó como oligotrófico, Bosque Azul como mesotrófico y Liquidambar como meso-eutrófico. Los lagos ultraoligotróficos corresponden a los lagos no impactados, mientras que los mesotróficos y meso-eutróficos son los impactados (a excepción de Chajchaj, lago impactado clasificado como oligotrófico lo cual seguramente es un error de clasificación).

Lo anterior coincide con Alcocer (2016) donde menciona que las perturbaciones se identificaron con más frecuencia en los lagos de la zona NW (lagos impactados) con más influencia del río Grande Comitán y de las tierras de agricultura dominantes alrededor de esta zona, lo que probablemente ha promovido cambios perjudiciales en

los lagos a través del aporte de nutrientes tanto orgánicos como inorgánicos que han conducido a la eutrofización; mientras que los lagos de la zona SE con más influencia del agua subterránea y de la tierra boscosa dominante a su alrededor, permanecen en su mayoría no impactados.

La comparación entre las características fisicoquímicas principales de los lagos impactados y no impactados permitió evidenciar los cambios acaecidos en los primeros. El proceso de eutrofización de los lagos impactados de la zona NW identifican al oxígeno disuelto, al porcentaje de saturación de oxígeno, a la conductividad y a la turbidez de los lagos como las variables indicativas de los cambios. Esto permite puntualizar la problemática presente del deterioro de los lagos impactados, los cuales evolucionaron probablemente de una condición no impactada a través de la adición de nutrientes, principalmente por fuentes antropogénicas, como las aguas residuales urbanas y agrícolas, que se agrava más debido a la presión de cambio de uso de suelo, deforestación y crecimiento urbano y turístico de zona. Este proceso se ha descrito ampliamente en diferentes ecosistemas (p. ej., Martino, 1989; Harper, 1992; García y Miranda, 2018).

En la Tabla 10 se muestran algunas características fisicoquímicas medidas en lagos kársticos.

**Tabla 10.** Características físico-químicas reportados para diversos lagos kársticos. (Z = profundidad, OD = oxígeno, T = temperatura, Ref. = referencia, NM = no se menciona).

Lago	Ubicación	Z (m)	OD (mg/L)	T (°C)	pH	Ref.
<b>Cenote Azul</b>	Q. Roo, México.	65.0	6.1 ± 0.9	29.2 ± 0.9	8 – 7.4	Cervantes <i>et al.</i> , 2009
<b>Albufera</b>	Valencia, España.	1.2	NM	18.9-19.4	8.7-8.9	Romo <i>et al.</i> , 2008
<b>Laguna del Tejo</b>	Las Torcas de Cañada, España	28.0	12- 0	6.3-24	8.5-9.1	Morata <i>et al.</i> , 2003

<b>Montcortés</b>	Lérida, España	30.0	0.0-11.3	5.5-23.9	7-8.5	Camps <i>et al.</i> , 1976
<b>Banyoles</b>	Banyoles, España	62.5	0-¿?	6.1-23.1	6.2-9.4	Borrego y García, 1992; Planas, 1990
<b>Delta Llobregat</b>	Cataluña, España	7.5	NM	NM	7.5-8.4	Catalán, 1984; Cañedo y Riederadeval, 2009
<b>Conde de Guagalhorce</b>	Málaga, España	37.0	NM	11-21.1	NM	Armengol <i>et al.</i> , 1990
<b>Guadalhorce</b>	Málaga, España	58.0	NM	11-22.3	NM	
<b>Guadalteba</b>	Málaga, España	58.0	NM	11-22.2	NM	
<b>Chajcaj</b>	PNLM, Chiapas	12	3.5 ± 3.0	22.7 ± 0.7	7.4 ± 0.1	Este estudio
<b>Bosque Azul</b>	PNLM, Chiapas	58	1.7 ± 3.5	19.5 ± 2.3	7.3 ± 0.3	Este estudio
<b>Tziscao</b>	PNLM, Chiapas	86	5.0 ± 3.0	19.9 ± 1.9	7.7 ± 0.3	Este estudio
<b>Yalalsuh</b>	PNLM, Chiapas	23	5.7 ± 0.7	20.7 ± 0.2	7.6 ± 0.08	Este estudio

En el complejo lacustre kárstico de Banyoles, por ejemplo, la laguna Coromina presenta una distribución de OD característica de estos sistemas a lo largo de un ciclo anual, con fluctuaciones extremas que van desde periodos de sobresaturación y otros con condiciones anóxicas a partir de 3 metros de profundidad y hasta el fondo (Borrego y García, 1992). Este fenómeno se presenta en algunos lagos del PNLM, como es el caso de Liquidambar con 24.3 mg/L hasta 0 mg/L a los 3 m de profundidad. El pH en La Coromina se presentó entre 6.2 y 9.4 unidades, con valores más altos en superficie, similar a los lagos del PNLM con valores de neutro a básico. En cuanto a la temperatura para La Coromina se observó un poco más baja que los lagos del PNLM (6.1-23.1°C),

similar a las temperaturas presentadas en Guagalhorce y Guadalteba, tres lagos estudiados en Magala, España (Armegol *et al.*, 1990) con temperaturas entre 11 y 22 °C. Lo anterior, debido que los lagos de Málaga y La Coromina son lagos templados y los lagos del PNLM son tropicales.

Morata *et al.* (2003) realizaron estudios en la Laguna del Tejo, una de las siete lagunas del sistema Lagunar Cañada del Hoyo, España, similar al sistema de los lagos del PNLM en cuanto a los valores de pH básico (8.5-9 unidades). Al igual que en Montcortés (Camps *et al.*, 1976) siempre es básico, con valores superiores a 8 en verano en el epilimnion e inferiores en el hipolimnion.

Cervantes *et al.* (2009) estudiaron el Cenote Azul, Quintana Roo, presentando una temperatura promedio anual de  $29.2 \pm 0.9$  °C, más elevada al PNLM ( $20.8 \pm 1.1$  °C). Al igual que los lagos profundos del PNLM, Cenote Azul se clasificó como monomítico cálido. El promedio anual del OD osciló entre  $6.1 \pm 0.9$  mg/L, similar al promedio general en la época seca de lluvias de los lagos del PNLM, con concentración de OD de  $6.5 \pm 0.2$  mg/L. El pH registrado en el cenote fue básico al igual que los lagos del PNLM.

## 10. CONCLUSIONES

Se acepta la hipótesis del presente trabajo que plantea que existen diferencias físico-químicas entre los lagos impactados y los no impactados. Estas diferencias consistieron en:

- La penetración de la luz fue menor en los lagos impactados en comparación con los no impactados. La mayor presencia de material particulado en los lagos impactados (mayor turbidez en estos lagos) produce una mayor atenuación de la luz y, con ello, una menor penetración de ésta en la columna de agua ( $Z_{EU}$  más reducidas).
- La temperatura superficial fue mayor en los lagos impactados –seguramente asociada a su mayor turbidez y, por ende, mayor atenuación-, con un epilimnion más estrecho, una termoclina más superficial y un mayor gradiente térmico en comparación con los lagos no impactados, en donde el epilimnion fue más amplio, la termoclina se encontró a mayor profundidad y el gradiente térmico fue menor.
- La concentración de OD en la capa superficial fue mayor en los lagos impactados –probablemente por una mayor actividad fotosintética-, presentaron una oxiclina más superficial y con un mayor gradiente, en comparación con los no impactados, los cuales mostraron una menor concentración de OD superficial, una oxiclina más profunda y un gradiente menos abrupto.
- Los perfiles de  $K_{25}$  difieren entre los lagos no impactados e impactados, presentando valores de  $K_{25}$  más elevados en los lagos impactados ( $> 500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) en comparación con los lagos no impactados ( $< 500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). El aporte superficial a los lagos impactados por parte del río Grande de Comitán, así como de los drenes agrícolas seguramente explican la mayor  $K_{25}$ .

En resumen, los lagos de la zona NW del PNLM que corresponden a los impactados muestran claras diferencias con los lagos de la zona SE del PNLM que corresponden a los no impactados. Las diferencias entre los lagos impactados y los no impactados parecen estar asociados al proceso de eutrofización de los primeros.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Alcocer, J., Lugo, E. Escobar, M. Sánchez y G. Vilaclara. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, México. *Verhandlungen Internationalis Vereinigung Limnologiae* 27: 3166-3169 pp.
- Alcocer, J., L.A. Oseguera, G. Sánchez, C.G. González, J.R. Martínez y R. González. 2016. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *J. Limnol.* 75(s1): 56-65 pp.
- Armengol, J., J. Catalán, N. Gabellone, D. Jaume, J. de Manuel, E. Martí, J. Morguí, J. Nolla, J. Peñuelas, M. Real, J. Riera, S. Sabater, F. Sabater y J. Toja. 1990. A comparative limnological study of the Guadalhorce reservoirs system (Málaga, S.E. Spain). *Scientia gerundensis* 16 (2): 27-41.
- Borrego, C. y L. García. 1992. Caracterización limnológica de La Coromina, una laguna hipereutrófica del sistema lacustre de Banyoles. *Limnética* 10 (1): 43-45 pp.
- Camps J., I. Gonzalvo, J. Güell, P. López, A. Tejero, X. Toldra, F. Vallespinos y M. Vicens. 1976. El lago de Montcortés, descripción de un ciclo anual. *Oecologia aquatica* 2: 90-110 pp.
- Cañedo, M. y M. Rideradevall. 2009. Quantification of environment-driven changes in epiphytic macroinvertebrate communities associated to *Phragmites australis*. *J. Limnol.* 68 (2): 229-241 pp.
- Catalán, J. 1984. Agregados de algas en la superficie del agua (Delta Del Llobregat). Universidad de Murcia, *Anales de biología*: 70-88 pp.
- Cervantes, A., M. Mezeta y M. Gutiérrez. 2009. Limnología básica del lago cárstico turístico Cenote Azul en Quintana Roo, México. *Hidrobiológica* 19 (2): 175-180 pp.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2012a. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas. Tomo I: Primera Etapa: Diagnóstico. Comitán de Domínguez, Chiapas. 264 pp.

- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2012b. Estudio para conocer la calidad del agua en las Lagunas de Montebello, Chiapas. Tomo II, Geohidrología. Comitán de Domínguez, Chiapas. 123 pp.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2012c. Estudio para conocer la calidad del agua en las Lagunas de Montebello, Chiapas. Tomo III, Modelos Matemáticos. Comitán de Domínguez, Chiapas. 90 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2007. Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello. México. 200 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2009. Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello, México. 200 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2011. Programa de Monitoreo de Calidad del Agua. Estudio para monitorear los parámetros de calidad de agua de las lagunas comunicadas con el sistema lagunar Tepancoapan. Comitán de Domínguez, Chiapas. 42 pp.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1959. Decreto que declara necesaria y de utilidad pública la creación de un Parque Nacional en la región conocida con el nombre de Lagunas de Montebello, ubicada en Independencia y La Trinitaria, Chiapas.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2009. Programa de Manejo del Parque Nacional Lagunas de Montebello, ubicado en los municipios de La Trinitaria e Independencia, en el Estado de Chiapas.
- Effler, S.W., M. Perkins, N. Ohrazda, D.A. Matthews, R. Gelda, F. Peng, D.L. Johnson y C.L. Stephczuk. 2002. Tripton, transparency and light penetration in seven New York reservoirs. *Hydrobiologia* 468: 213-232.
- García Miranda, F.G., Rosales Miranda, V. 2018. Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico. Facultad de Química, UAEM, Vol.2, Parte 1., Capítulo 5., 353-370 pp.

- Galicia, J. 2012. Cambio de color en las lagunas de Montebello: Las atonalidades de una problemática tonal. Tesis de Licenciatura en Ciencias Naturales. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. UNAM México. 146 pp.
- Gonzales del Castillo, E. 2003. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR), Parques Nacionales de Chiapas. 9 pp.
- Harper, D. 1992. Eutrophication of freshwaters. Springer. Holanda. 1ed. 327 pp.
- Lewis, W.M. 1983. A revised classification of lakes base don mixing. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science 40: 1779-1787 pp.
- Lewis, W.M. 1996. Phytoplankton succession in lake Valencia, Venezuela. Hydrobiologia 138: 189-203 pp.
- Lewis, W.M. 1987. Tropical limnology. Ann. Rev. Ecol. Syst. 18: 59-84 pp.
- Lewis, W.M. 1996. Tropical lakes: How latitude makes a difference. En: Schimer F. y K. Boland (eds). Perspectives in Tropical Limnology. Academic Publishing. 43-46 pp.
- Martino, P. 1989. Curso Basico sobre eutrofización. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente, Cepis. 1-66 pp.
- Mora Palomino, L., García, L.A., Ramos, Y.R., Bonifaz, R., & Escolero, O. 2017. Description of chemical changes in a large karstic system: Montebello, México. Procedia Earth and Planetary Science, 17, 820-832 pp.
- Morata, S.M., A. Camacho, M.R. Miracle y E. Vicente. 2003. Asociaciones fitoplanctónicas y su periodicidad en un lago marcadamente estratificado. Limnética 22 (3-4): 35-52 pp.
- Planas, D. 1990. Factores de control de la distribución espacial y temporal de la producción primaria del fitoplancton del lago de Banyoles. Scientia gerundensis 16(2): 193-204.
- Roldan, G. 2008. Fundamentos de la Limnología Neotropical. Colección de Ciencias y Tecnología Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 440 pp.

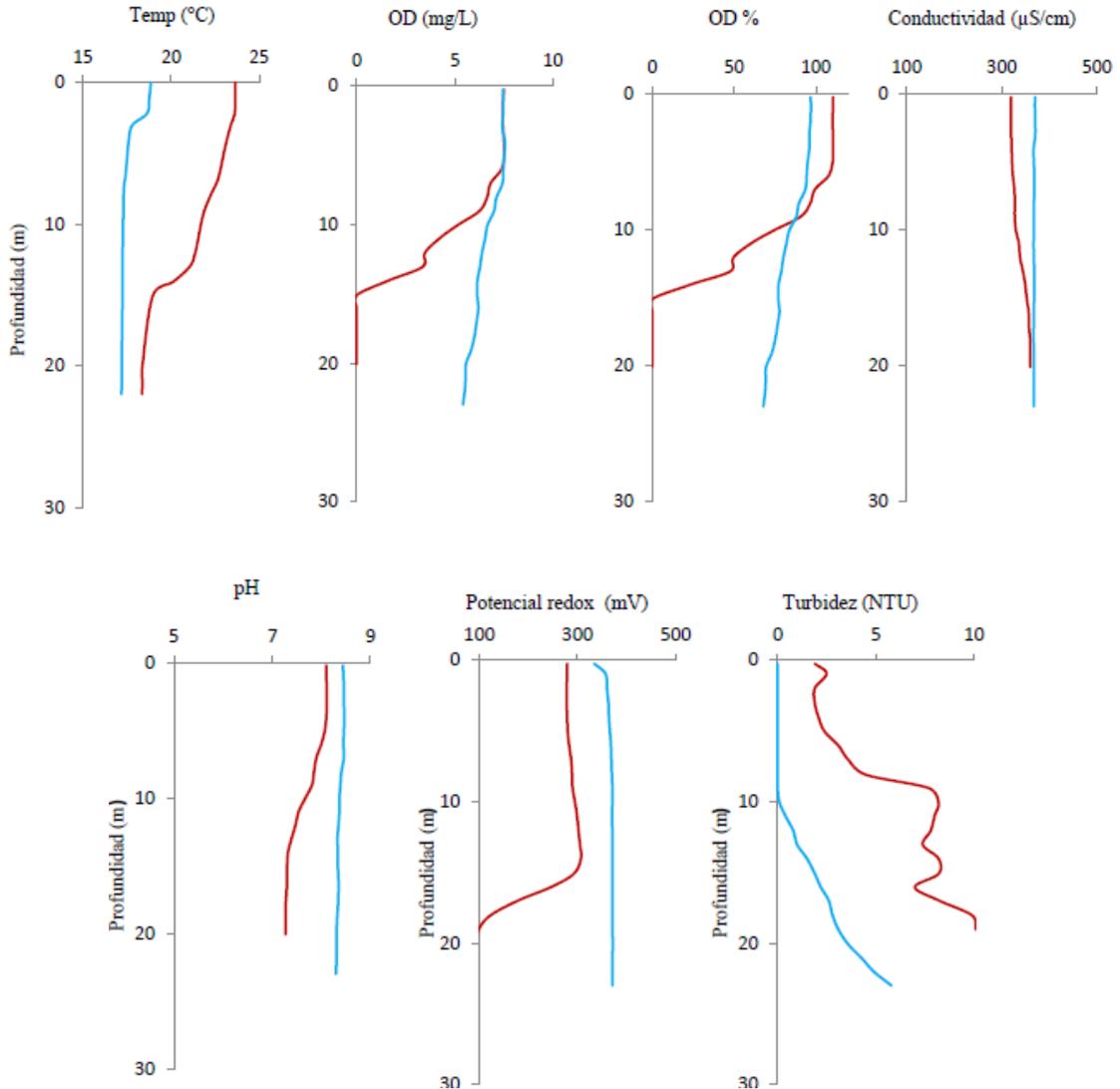
- Romo, S., A. García., M. Villena., V. Sánchez. y A. Ballester. 2008. Tendencias del fitoplancton en el lago de la Albufera de Valencia e implicaciones para su ecología, gestión y recuperación. *Limnética* 27 (1): 11-28 pp.
- Straskraba, M. 1980. The effects of physical variables on fresh water production: Analyses based on models. En: E. D. Le Cren. R.H. Lowe-McConnell (Ed.). *The Functioning of Fresh Water Ecosystems*. Cambridge University Press. pp. 13-84.
- Vera-Franco Maya N., Hernández-Victoria Patricia P., Alcocer Javier, Ardiles-Gloria Vilma, Oseguera Luis A. 2015. Concentración y distribución vertical de la clorofila-a fitoplanctónica en los lagos de Montebello, Chiapas. *Tendencias de Investigación en Limnología Tropical: Perspectivas universitarias en Latinoamérica*. 107-113 pp.
- Villalpando, L. 2015. Uso de la percepción remota para la estimación del índice trófico de las Lagunas del Parque Nacional lagunas de Montebello. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. México. 61 pp.

## ANEXOS

A continuación, se muestran los perfiles de los lagos restantes estudiados en la sección Caracterización entre lagos.

### 1. Lagos profundos no impactados

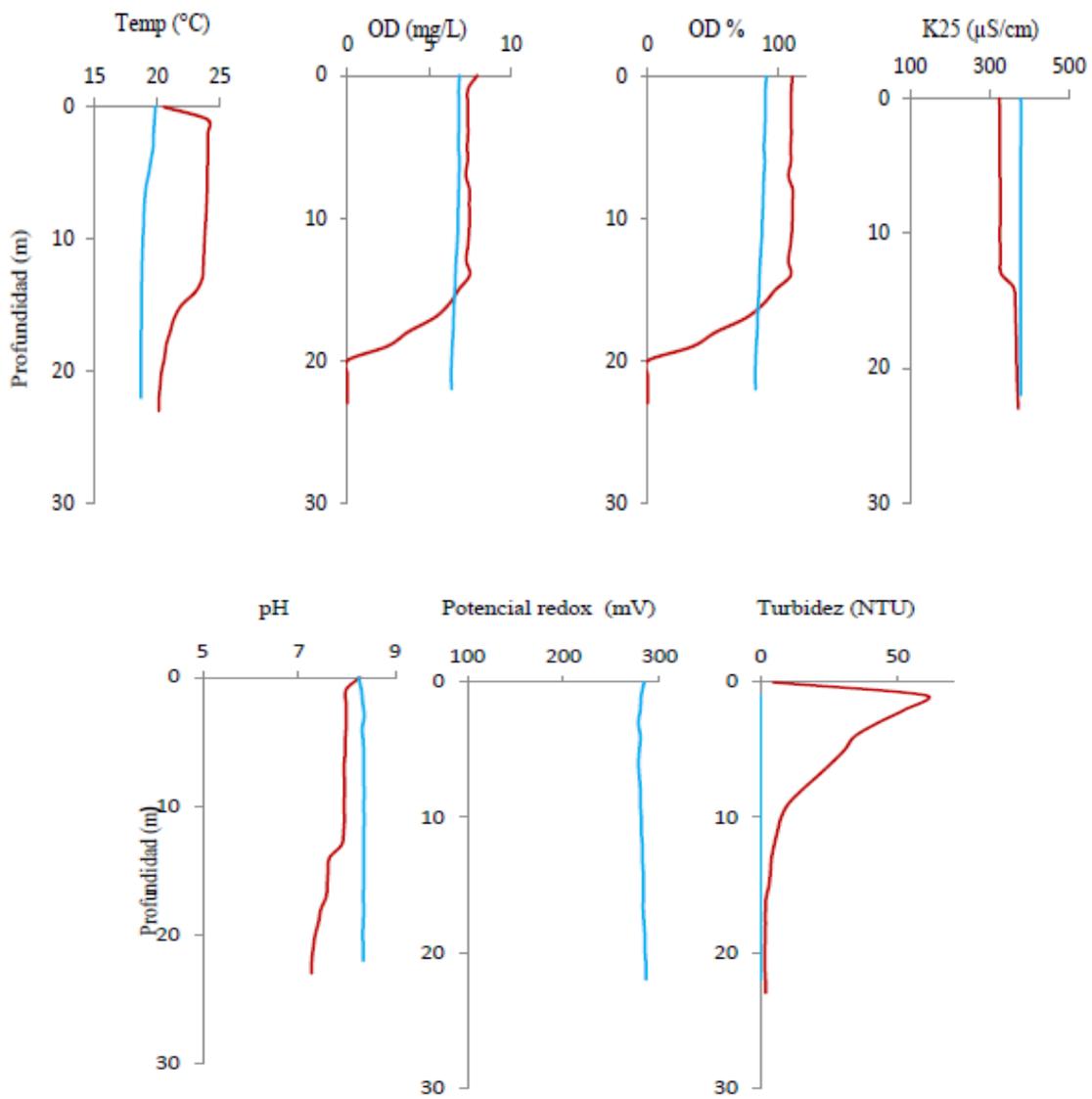
- San José



San José en época de primavera/verano mostró estratificación térmica con una T promedio de  $21.6 \pm 1.8$  °C y un perfil clinogrado de OD, con concentraciones máximas en el epilimnion (7.5 mg OD/L) y condiciones anóxicas en el hipolimnion (0 mg OD/L). En cuanto al %OD sus valores máximos se encontraron en superficie (110.5 %) y sus valores mínimos en el fondo del lago (0 %). Los valores de  $K_{25}$  en superficie fueron de 320  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y valores máximos en el hipolimnion de 360.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Para el potencial redox, se observaron valores máximos en superficie de 279 mV y valores mínimos en el hipolimnion de 94 mV. El pH con valores máximos en el epilimnion de 8.1 unidades y valores mínimos en el hipolimnion (7.3 unidades). Por último, la turbidez mostró valores mínimos en superficie (1.9 NTU) y los máximos en el hipolimnion de 10 NTU.

Durante la época de invierno el lago presentó perfiles homogéneos en todas las variables lo que indicó que se encontraba circulando.

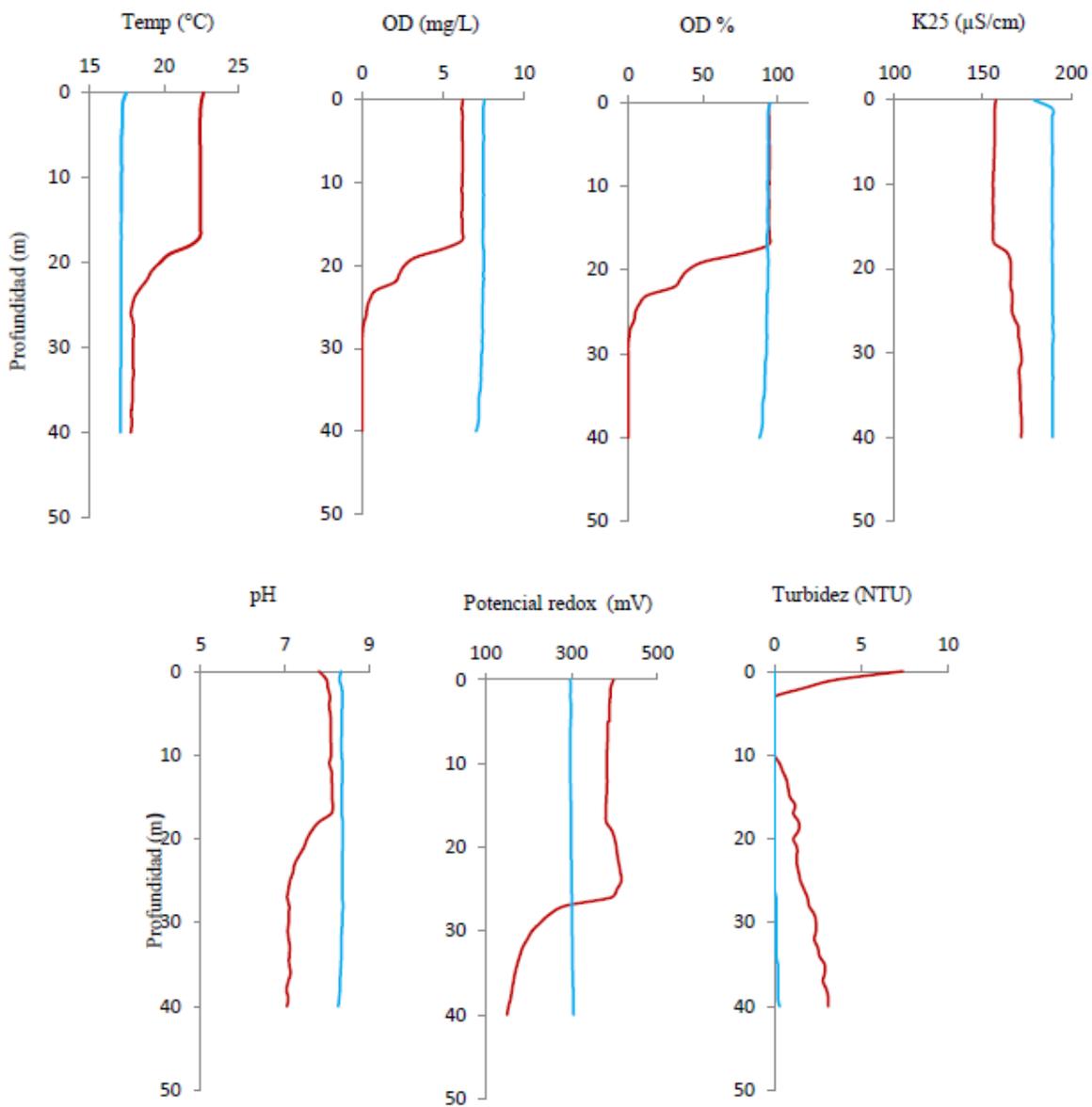
- Agua Tinta



Agua Tinta en época de primavera/verano mostró estratificación térmica con una T promedio de  $22.5 \pm 1.6$  °C y un perfil clinogrado de OD, con concentraciones máximas en el epilimnion (7.9 mg OD/L) y condiciones anóxicas en el hipolimnion (0 mg OD/L). En cuanto al %OD sus valores máximos se encontraron en superficie (110.6 %) y sus valores mínimos en el fondo del lago (0 %). Los valores de  $K_{25}$  en superficie fueron de 325.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y valores máximos en el hipolimnion de 372.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El pH con valores máximos en el epilimnion de 8.3 unidades y valores mínimos en el hipolimnion (7.3 unidades). Por último, la turbidez mostró valores máximos en superficie (60 NTU) y los mínimos en el hipolimnion de 1.9 NTU.

Durante la época de invierno el lago presentó perfiles homogéneos en todas las variables lo que indicó que se encontraba circulando.

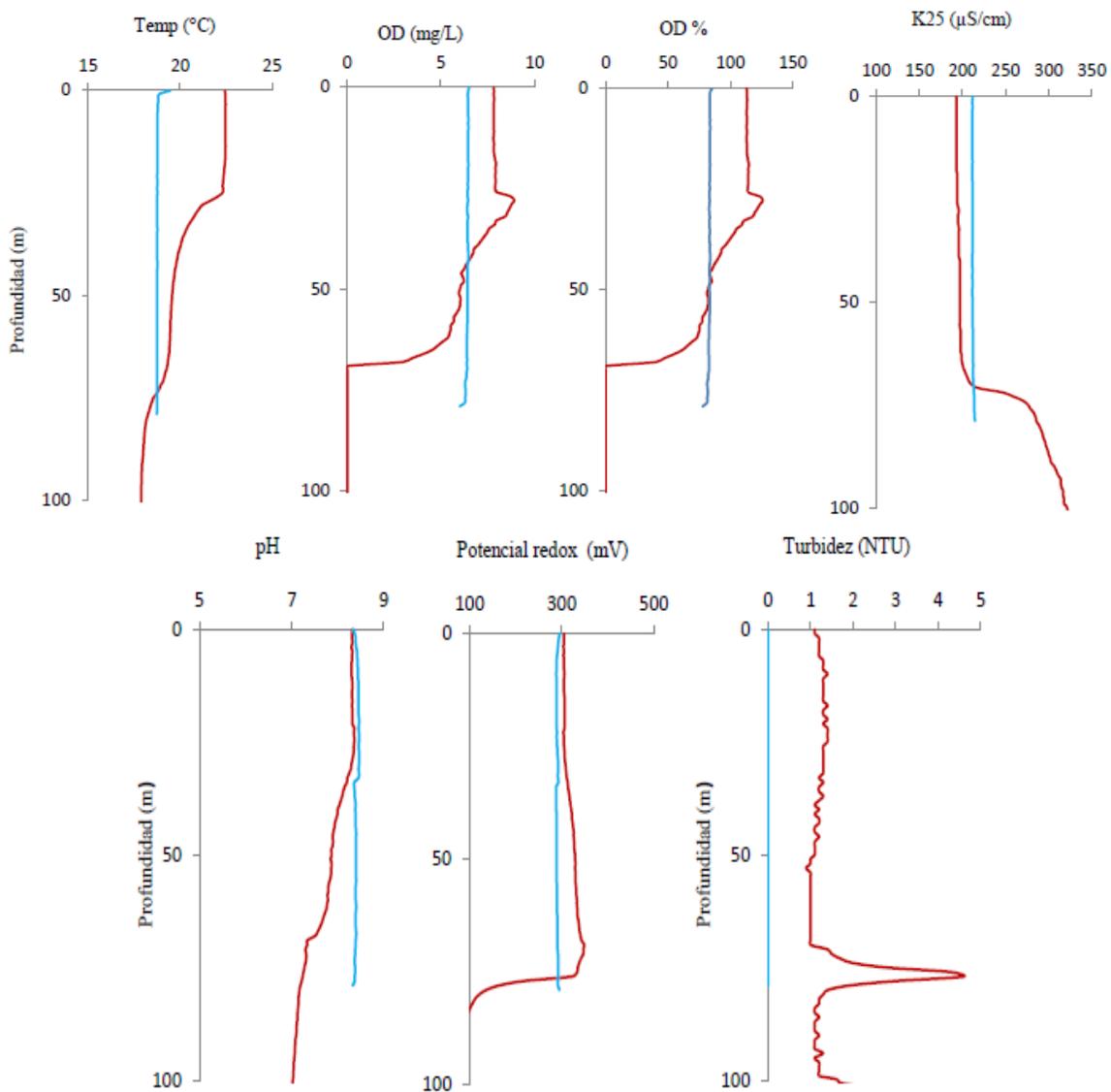
- Montebello



Montebello mostró estratificación térmica en la época primavera/verano con una T promedio de  $20.1 \pm 2.1$  °C y un perfil clinogrado de OD, con concentraciones máximas en el epilimnion (6.2 mg OD/L) y condiciones anóxicas en el hipolimnion (0 mg OD/L). En cuanto al %OD sus valores máximos se encontraron en superficie (94.9 %) y sus valores mínimos en el fondo del lago (0 %). Los valores de  $K_{25}$  en superficie fueron de 160  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y valores máximos en el hipolimnion de 171  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Para el potencial redox, se observaron valores máximos en superficie de 397.8 mV y valores mínimos en el hipolimnion de 149.8 mV. El pH con valores máximos en el epilimnion de 7.8 unidades y valores mínimos en el hipolimnion (7 unidades). Por último, la turbidez mostró valores máximos en superficie ( 7.4 NTU) y los mínimos en el hipolimnion de 3 NTU.

Durante la época de invierno el lago presentó perfiles homogéneos en todas las variables lo que indicó que se encontraba circulando.

- Pojoj

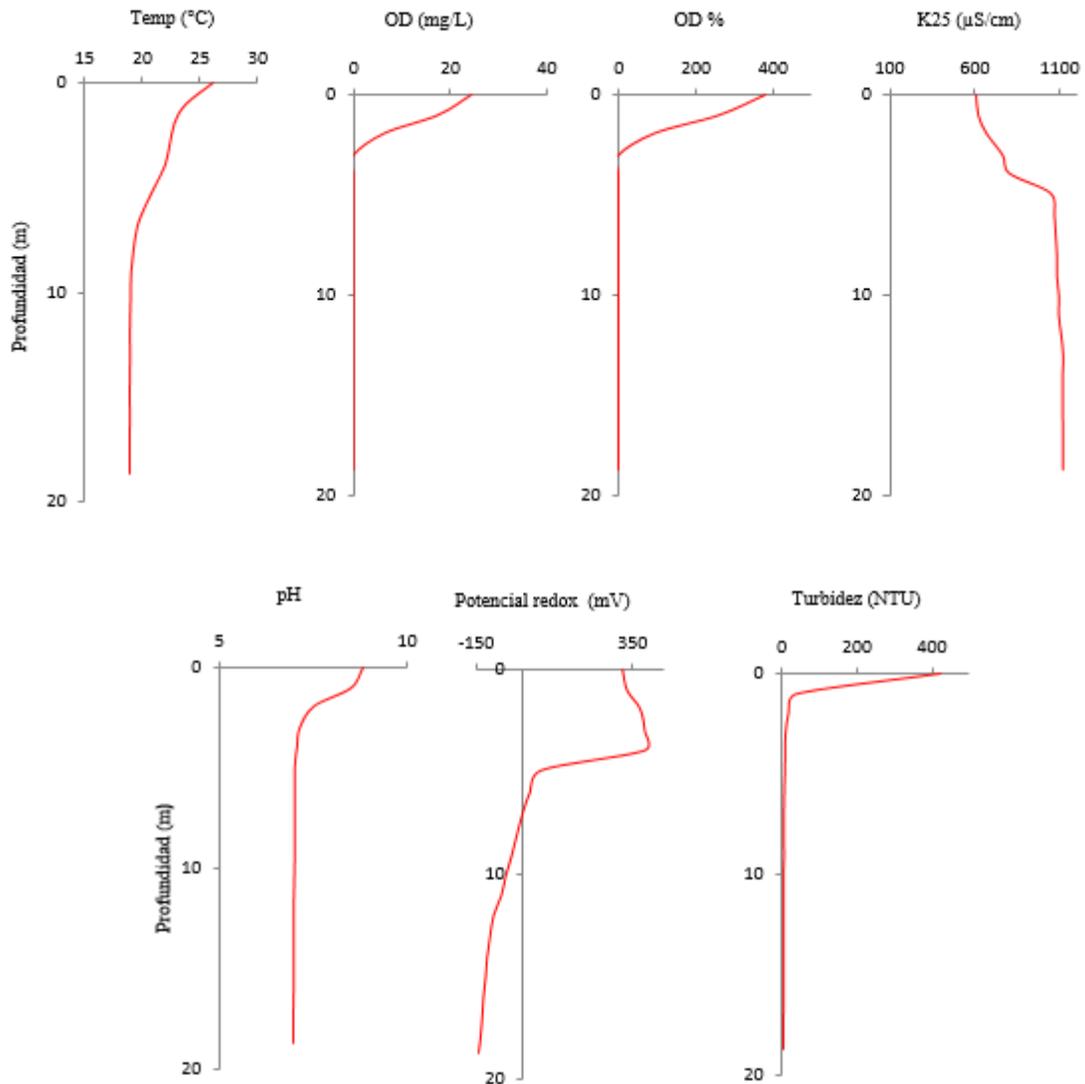


Pojoj mostró estratificación térmica en la época de primavera/verano con una T promedio de  $20.0 \pm 1.6$  °C y un perfil clinogrado de OD, con concentraciones máximas en el epilimnion (7.8 mg OD/L) y condiciones anóxicas en el hipolimnion (0 mg OD/L). En cuanto al %OD sus valores máximos se encontraron en superficie (113 %) y sus valores mínimos en el fondo del lago (0 %). Los valores de  $K_{25}$  en superficie fueron de 193  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y valores máximos en el hipolimnion de 323  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Para el potencial redox, se observaron valores máximos en superficie de 305 mV y valores mínimos en el hipolimnion de 62 mV. El pH con valores máximos en el epilimnion de 8.3 unidades y valores mínimos en el hipolimnion (7 unidades). Por último, la turbidez mostró valores mínimos en superficie ( 1.1 NTU) y los máximos en el hipolimnion de 2 NTU.

Durante la época de invierno el lago presentó perfiles homogéneos en todas las variables lo que indicó que se encontraba circulando.

## 2. Lagos profundos impactados

- Liquidambar



Liquidambar mostró estratificación térmica en la época de primavera/verano con una T promedio de  $20.2 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$  y un perfil clinogrado de OD con concentraciones máximas en el epilimnion de 24.3 mg OD/L y con condiciones anóxicas a partir de los 3 m El %OD obtuvo su valor máximo en superficie (378.0 %) y valor mínimo de 0 % a partir de los 3 m. La  $K_{25}$  aumenta con la profundidad, con concentraciones máximas en el hipolimnion (1,117.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y mínimas en el epilimnion (606.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). El pH con promedio de  $7.2 \pm 0.5$  unidades y valores máximos en el epilimnion de 8.9 unidades y mínimos en el hipolimnion (7.0 unidades). En cuanto a los valores de potencial redox, disminuyen conforme aumentó la profundidad, con valores máximos en el epilimnion de 319 mV y valores mínimos en el hipolimnion de -144.5 mV. La turbidez también disminuye conforme la profundidad se incrementa, con un valor máximo en el epilimnion de 426 NTU y un mínimo en el hipolimnion de 3.3 NTU.

Durante la época de invierno no fue posible muestrearlo debido a que los ejidatarios no permitieron el acceso.

Pojoj (lago no impactado)



Liquidambar (lago impactado)

