



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**EUTROFIZACIÓN DE LOS LAGOS  
DEL PARQUE NACIONAL  
“LAGUNAS DE MONTEBELLO”,  
CHIAPAS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIÓLOGA**

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

**MARÍA FERNANDA MEDRANO COLÓN**



**DIRECTOR DE TESIS:**  
Dr. Javier Alcocer Durand  
Ciudad de México, Febrero, 2024



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.

Medrano  
Colón  
María Fernanda  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Biología  
316183680

### 2. Datos del Asesor.

Dr.  
Javier  
Alcocer  
Durand

### 3. Datos del Sinodal 1

Dra.  
Ana Cecilia  
Espinosa  
García

### 4. Datos del Sinodal 2

Dr.  
Fernando  
Córdova  
Tapia

### 5. Datos del Sinodal 3

M. en C.  
León Felipe  
Álvarez  
Sánchez

### 6. Datos del Sinodal 4

Dra.  
Adriana  
Gaytán  
Caballero

### 7. Datos de la tesis.

Eutrofización de los lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas  
Número de páginas 67 pp  
2024

### 8. Palabras clave (temas principales que trata la tesis):

“lagos tropicales” “eutrofización” “estado trófico” “Índice OCDE” “Índice Lamparelli”

## **DEDICATORIA**

Para mi familia,

Esta tesis es un testimonio de nuestro viaje como familia. A ustedes, mis pilares fundamentales, dedico estas páginas con gratitud y amor.

A mamá y papá, cuya dedicación y sacrificios han sido la brújula que me guio en este camino académico. Su amor incondicional es mi mayor inspiración. A mi hermano, compañero de risas y cómplice en cada desafío, gracias por compartir este trayecto lleno de aprendizajes y momentos inolvidables.

Cada palabra escrita aquí lleva consigo el reflejo de nuestra unión, de las enseñanzas compartidas y de los lazos indestructibles que nos unen. Esta tesis es tan suya como mía, y celebro este logro con ustedes, mi familia, que ha sido mi mayor fortaleza y apoyo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), siendo la máxima casa de estudios, por abrirme las puertas desde años atrás y formarme para ser una profesionista, específicamente en el campo de la Biología, en la Facultad de Ciencias. Implementé cada una de las oportunidades presentadas en mi camino, mismas que he tomado como obsequios y recursos para ejercer en el mundo laboral, por el motivo, como muestra de gratitud, continuo con mi formación como bióloga y persona, aportando el desarrollo académico de la UNAM, manteniendo el compromiso y orgullo que me caracteriza a mí y a quienes pertenecemos y permanecemos en esta loable institución.

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 proyectos IN219215 “*Factores que determinan el estado trófico de los lagos de Montebello, Chiapas*”, IV200319 “*Área Experimental de Lagos Tropicales*” y IV200122 “*AELT - Efectos del cambio global y climático sobre la limnología y biodiversidad acuática*”.

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

De manera particular, quiero agradecerle a mi director de tesis, el apreciable y admirable Dr. Javier Alcocer Durand, por aceptarme y brindarme las bases necesarias para mi desarrollo académico, desde el comienzo del taller y, actualmente, por ser mi guía para realizar este proyecto de investigación, dedicando su tiempo y espacio. A su vez, agradezco a la Dra. Vilma Ardiles que ha sido parte de este trabajo, por sus revisiones, observaciones y sugerencias, basadas en su admirable formación, grado y experiencia, pero sobre todo aprecio su orientación, su paciencia, sus palabras de aliento, motivación y apoyo durante todo este arduo camino. Mi respeto y admiración por ustedes que se dedican a esta noble profesión.

Finalmente, agradezco inmensamente a mi familia, mi mamá, mi papá y mi hermano que hayan estado conmigo, tanto en mis logros, como en mis fracasos, por apoyarme en cada paso dado en esta trayectoria llamada “vida y carrera”. Su lealtad, amor, tiempo y apoyo incondicional han hecho que esto valga más la pena y, por ende, motivarme a seguir y mejorar en la misma línea que he decidido incluir en mi desarrollo personal, cumpliendo cada uno de mis sueños y metas.

Así mismo, dentro de este ámbito familiar, incluyo a mis amigxs sin necesidad de mencionar nombres, ciertamente saben quiénes son y les agradezco a los que se han quedado y han sido parte de este camino, quienes fueron mis compañeros de clase en la carrera, trabajando en equipo, participando en ámbitos académicos y personales, con quienes nos levantamos mutuamente en algunas caídas y obstáculos que se presentaron a raíz de la pandemia, mis mejores amigxs que han demostrado el verdadero valor de la amistad y la lealtad.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	3
1. Introducción .....	4
2. Antecedentes .....	8
2.2 Antecedentes del área de estudio .....	9
3. Justificación.....	12
4. Objetivos .....	12
4.1 General .....	12
4.2 Particulares .....	12
5. Hipótesis .....	13
6. Área de estudio .....	13
7. Material y Método .....	16
7.1. Trabajo de campo .....	16
7.2. Trabajo de laboratorio .....	18
7.3. Trabajo de gabinete .....	19
7.3.1 Análisis de la información .....	19
7.3.2 Índice de estado trófico .....	19
8. RESULTADOS.....	21
8.1 Parámetros físicoquímicos: temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y pH..	21
8.2 Zona eufótica (Z <sub>EU</sub> ) .....	25
8.3 Turbidez.....	26
8.4 Nutrientes .....	27
8.5 Concentración de clorofila-a (C1-a).....	33
8.6 Estado trófico.....	35
8.7 Comparación entre lagos .....	40
8.7.1 Lago profundo ultraoligotrófico: Cinco Lagos .....	41
8.7.2 Lago profundo eutrófico: Bosque Azul .....	43
8.7.3 Lago somero eutrófico: Chajchaj .....	45
8.7.4 Lago somero ultraoligotrófico: Esmeralda .....	47
9. Discusión.....	49

10. Conclusiones .....	57
11. Referencias .....	58
12. Anexos.....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ubicación geográfica, área, volumen (Vol.), profundidad máxima ( $Z_{\text{máx}}$ ) y profundidad media ( $Z_{\text{med}}$ ) de los lagos de Montebello estudiados (Tomado de Alcocer <i>et al.</i> , 2016b). Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. ....	17
<b>Tabla 2.</b> Clasificación del estado trófico de acuerdo con el Índice de Estado Trófico (IET) OCDE. ( $Z_{\text{DS}}$ = profundidad del Disco de Secchi, PT = fósforo total). ....	20
<b>Tabla 3.</b> Escala de valores del índice de estado trófico (IET) de los cuerpos de agua (Lamparelli, 2004). (Cl-a = concentración de clorofila-a; PT = concentración de fósforo total). ....	20
<b>Tabla 4.</b> Valores de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del agua registrados en los lagos del estudio. [(-): sin datos. Mín. = temperatura mínima, Máx. = temperatura máxima, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE]. ....	21
<b>Tabla 5.</b> Valores de oxígeno disuelto (mg/L) del agua registrados en los lagos del estudio. [(-): sin datos. Mín. = cantidad de OD mínima, Máx. = cantidad de OD máxima, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE]. ....	22
<b>Tabla 6.</b> Valores de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) del agua registrados en los lagos del estudio. [(-): sin datos. Mín. = conductividad eléctrica mínima, Máx. = conductividad eléctrica máxima, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE]. ....	23
<b>Tabla 7.</b> Valores de pH del agua registrados en los lagos del estudio. [(-): sin datos. Mín. = pH mínimo, Máx. = pH máximo, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE]. ....	24
<b>Tabla 8.</b> Profundidad de la zona eufótica ( $Z_{\text{EU}}$ , m) de los lagos estudiados, en ambas épocas. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. (-): sin datos]. ....	26
<b>Tabla 9.</b> Valores de turbidez (NTU) de los lagos en estudio. [Los lagos se encuentran ordenados de NW a SE. (-): sin datos. Mín. = NTU mínima, Máx. = NTU máxima, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar]. ....	27
<b>Tabla 10.</b> Valores de nutrientes ( $\mu\text{g}/\text{L}$ ) en los lagos durante la época cálida de lluvias. ....	29
[Ntot = nitrógeno total, Ptot = fósforo total, Ntot:Ptot = relación de nitrógeno total y fósforo total. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. - = sin datos]. ....	29



<b>Tabla 11.</b> Valores de nutrientes ( $\mu\text{g/L}$ ) en los lagos durante la época fría de secas. [Ntot = nitrógeno total, Ptot = fósforo total, Ntot:Ptot = relación de nitrógeno total y fósforo total. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. - = sin datos].	31
<b>Tabla 12.</b> Valores del Cociente de Redfield en los lagos durante ambas épocas. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. - = sin datos].	32
<b>Tabla 13.</b> Valores de concentración de clorofila-a (Cl-a $\mu\text{g/L}$ ) de los lagos en estudio, en ambas épocas. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. (-): sin datos. Mín. = cantidad de Cl-a mínima, Máx. = cantidad de Cl-a máxima, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar].	34
<b>Tabla 14.</b> Estado trófico de los lagos en estudio para la época cálida de lluvias, según los criterios del índice OCDE. [Los lagos se encuentran ordenados de NW a SE. Hiper= hipereutrófico, Super=supereutrófico, Eu=eutrófico, Oli=oligotrófico, Ultra=ultraoligotrófico. (-): sin datos].	35
<b>Tabla 15.</b> Estado trófico de los lagos en estudio para la época fría de secas, según los criterios del índice OCDE. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. Hiper= hipereutrófico, Super=supereutrófico, Eu=eutrófico, Oli=oligotrófico, Ultra=ultraoligotrófico. (-): sin datos].	36
<b>Tabla 16.</b> Estado trófico de los lagos en estudio para la época cálida de lluvias, según los criterios del índice de Lamparelli. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. Hiper= hipereutrófico, Super=supereutrófico, Eu=eutrófico, Oli=oligotrófico, Ultra=ultraoligotrófico. (-): sin datos].	37
<b>Tabla 17.</b> Estado trófico de los lagos en estudio para la época fría de secas, según los criterios del índice de Lamparelli. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. Hiper= hipereutrófico, Super=supereutrófico, Eu=eutrófico, Oli=oligotrófico, Ultra=ultraoligotrófico. (-): sin datos].	37
<b>Tabla 18.</b> Comparación del estado trófico de los lagos en estudio, por ambos índices (basados en Cl-a) en ambas épocas. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. Hiper = hipereutrófico, Super = supereutrófico, Eu= eutrófico, Oli= oligotrófico, Ultra= ultraoligotrófico. (-): sin datos].	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la cuenca del Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello, Chiapas (Mora <i>et al.</i> , 2016).	13
<b>Figura 2.</b> Ubicación de los 18 lagos estudiados del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, México.	16
<b>Figura 3.</b> A la izquierda se encuentra el lago Cinco Lagos con aguas transparentes y azules, mientras que a la derecha se sitúa el lago La Encantada, con un aspecto turbio y de color verde (Fotografías de Mariana Vargas Sánchez).	40

**Figura 4.** Perfiles verticales de temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L), conductividad eléctrica (µS/cm), pH, Cl-a (µg/L) y turbidez (NTU) en Cinco Lagos, representando un lago profundo ultraoligotrófico en la época cálida de lluvias (línea roja) y en la época fría de secas (línea azul). .....42

**Figura 5.** Perfiles verticales de temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L), conductividad eléctrica (µS/cm), pH, Cl-a (µg/L) y turbidez (NTU) en Bosque Azul, representando un lago profundo eutrófico en la época cálida de lluvias (línea roja) y en la época fría de secas (línea azul). .....44

**Figura 6.** Perfiles verticales de temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L), conductividad eléctrica (µS/cm), pH, Cl-a (µg/L) y turbidez (NTU) en Chajchaj, representando un lago somero eutrófico en la época cálida de lluvias (línea roja) y en la época fría de secas (línea azul). .....46

**Figura 7.** Perfiles verticales de temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L), conductividad eléctrica (µS/cm), pH, Cl-a (µg/L) y turbidez en Esmeralda, representando un lago somero oligotrófico en la época cálida de lluvias (línea roja) y en la época fría de secas (línea azul). .....48

## ÍNDICE DE ANEXOS

12.1 Perfiles verticales de temperatura .....62

12.2 Perfiles verticales de oxígeno disuelto .....63

12.3. Perfiles verticales de conductividad eléctrica .....64

12.4. Perfiles verticales de pH.....65

12.5. Perfiles verticales de turbidez .....66

12.6. Perfiles verticales de Cl-a .....67

## RESUMEN

Los lagos de origen kárstico, debido a su naturaleza geológica, son particularmente susceptibles y vulnerables a los impactos de las actividades humanas. En el estado de Chiapas, México, se encuentra un distrito lacustre kárstico constituyendo el Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM). Algunos de estos lagos se han visto afectados por la eutrofización siendo evidente por el cambio en su coloración. El presente estudio realiza un diagnóstico del grado de impacto de 18 lagos del PNLM a través del análisis de parámetros fisicoquímicos (temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH, profundidad de la zona eufótica) y tróficos (concentración de nutrientes y clorofila “a” -Cl-a-). Con base en éstos se evaluó el estado trófico de los lagos durante dos épocas contrastantes: cálida de lluvias y fría de secas. Se utilizaron dos índices para asignar el estado trófico: el índice de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y el índice de Lamparelli. Este último se utilizó debido a que su rango de valores coincide con la condición trófica de cuerpos de agua ubicados en ambientes tropicales. Doce de los 18 lagos estudiados (Agua Tinta, Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Esmeralda, Kichail, Montebello, Patianú, Pojoj, San José, Tzisco y Yalalush) se clasificaron de ultraoligotróficos a oligotróficos, mientras que los 6 restantes (Balantetic, Liquidámbar, Chajchaj, San Lorenzo, Bosque Azul y La Encantada) se clasificaron de mesotróficos a hipereutróficos (con base en las concentraciones de Cl-a) y de eutróficos a hipereutróficos (con base en las concentraciones de fósforo total). El cociente de Redfield indica que el fósforo es el nutriente limitante, aunque se identificaron casos donde el nitrógeno también desempeñó un papel restrictivo. Los lagos eutrofizados se ubican en la zona de planicie (NO) y el proceso de eutrofización se relaciona con las altas concentraciones de nutrientes que derivan de procesos antrópicos. Los lagos de la zona de montaña (SE) donde la actividad antrópica es de nula a baja permanecen sin cambio aparente.

## ABSTRACT

Lakes of karst origin are particularly susceptible and vulnerable to the impacts of human activities due to their geological nature. Chiapas, Mexico, has a karst lake district constituting the "Lagunas de Montebello National Park" (PNLM). Some of these lakes have been affected by eutrophication, evident by the change in their color. The present study carries out a diagnosis of the degree of impact of 18 lakes of the PNLM through the analysis of physicochemical parameters (temperature, dissolved oxygen, electrical conductivity, pH, depth of the euphotic zone) and trophic parameters (concentration of nutrients and chlorophyll "a"). -Cl-a-. Based on these, the trophic state of the lakes was evaluated during two contrasting seasons: warm rainy and cold dry seasons. Two indices were used to assign trophic status: The Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) and Lamparelli indexes. Although not as recognized, the latter was used because its range of values coincides with the trophic condition of water bodies in tropical environments. Twelve of the 18 lakes studied were classified from ultra-oligotrophic to oligotrophic (Agua Tinta, Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Esmeralda, Kichail, Montebello, Patianú, Pojoj, San José, Tziscaco and Yalalush), while the remaining 6 (Balantetic, Liquidámbar, Chajchaj, San Lorenzo, Bosque Azul, and La Encantada) were classified from mesotrophic to hypereutrophic (based on Cl-a concentrations) and from eutrophic to hypereutrophic (based on total phosphorus concentrations). The Redfield ratio indicates that phosphorus is the limiting nutrient, although cases were identified where nitrogen also played a restrictive role. Eutrophic lakes are in the plain zone (NW), and eutrophication is related to the high concentrations of nutrients derived from anthropogenic processes. The lakes in the mountain area (SE) remain pristine, where anthropogenic activity is from zero to low.

# 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas acuáticos epicontinentales son fuentes de agua importantes para el desarrollo de las actividades antropogénicas y para el sostén de diversas formas de vida, además de su relevancia para el desarrollo social y económico del país. Su disponibilidad condiciona la posibilidad de una calidad de vida mejor en las regiones del territorio nacional (Alcocer, 2007). Desde el punto de vista ambiental, los sistemas acuáticos juegan un papel determinante para el funcionamiento de cualquier ecosistema porque son indispensables para procesos como la precipitación, la formación del suelo, la regulación de la temperatura y del clima, entre otros (Balvanera, 2012).

Al iniciar el siglo XXI no ha quedado duda de que gran parte de los cambios que se han presentado en nuestro planeta han sido provocados por el hombre. Las actividades humanas están cambiando el uso del suelo, los hábitats, la química de la atmósfera terrestre y del agua, el balance de los ciclos biogeoquímicos y la diversidad de la vida en el planeta (Vitousek *et al.*, 1997). En la actualidad, los sistemas acuáticos epicontinentales son constantemente afectados por el crecimiento poblacional, la intensificación de la agricultura, la sobre-extracción y las descargas continuas de desechos, razón por la cual se ha modificado la cantidad y calidad del agua, reduciendo fuertemente su disponibilidad (Aguilar *et al.*, 2013). De acuerdo con el informe de la Comisión Nacional de los Derechos Humanos (2018), el 70 % de los ríos, lagos y lagunas en México presenta algún grado de contaminación.

La contaminación en estos cuerpos de agua conlleva un aumento de las concentraciones de nitrógeno, fósforo y materia orgánica. Las respuestas a la concentración de nutrientes se manifiestan en las siguientes características (Carpenter *et al.*, 1998):

- Aumentos de la concentración de clorofila.
- Disminución de la transparencia de la columna de agua.
- Sedimentación de materia orgánica, en la variación de las proporciones de nitrógeno, fósforo y sílice.
- Florecimientos de microalgas productoras de toxinas.
- Variación de la comunidad de fitoplancton y del bentos.
- Calidad y diversidad de hábitats.

- Biogeoquímica de los sedimentos.
- Reciclado de los nutrientes.
- Concentración del oxígeno disuelto.
- Mortalidad de peces e invertebrados.
- Estructura de la red trófica.

Las condiciones de un cuerpo de agua empiezan normalmente siendo oligotróficas, es decir, agua con alta transparencia, con concentraciones de dióxido de carbono, de oxígeno y de pH constantes en columna de agua y baja concentración de biomasa fitoplanctónica. En etapa mesotrófica, un lago mantiene sus aguas claras con algunos florecimientos de algas, posee una mayor concentración de nutrientes y gradualmente se van acumulando sedimentos. Tienen características que permiten el desarrollo y el crecimiento de una variedad de peces y de vegetación acuática. Sin embargo, con una carga de nutrientes elevada se produce un incremento rápido de diferentes especies de fitoplancton que se extienden y se van acumulando en el cuerpo de agua, por lo que la transparencia disminuye progresivamente hasta adquirir un color verdoso y turbio (Pokorny y Kvet, 2003).

Finalmente, en condiciones eutróficas el enriquecimiento de nutrientes estimula el crecimiento excesivo del fitoplancton y favorece la proliferación de especies, como cianobacterias, algunas cepas de éstas tóxicas, las cuales evitan que la luz penetre en la columna de agua, alterándose los procesos fotosintéticos. El exceso de materia orgánica que no es consumido se sedimenta y se deposita en el fondo, donde la descomposición bacteriana consume oxígeno para los procesos de respiración. La ausencia de este elemento ocasiona que la materia orgánica sedimentada esté sujeta a procesos de remineralización anaeróbica, liberándose ácido sulfhídrico y otros gases, como metano y amoníaco, los cuales proporcionan mal olor al agua. Con el tiempo, el aporte de sedimentos va llenando el fondo del lago y reduciendo la profundidad, hasta que se transforma en un estanque de aguas someras y muy productivas (Vallentyne, 1974).

La eutrofización, en un principio, se estudió como un proceso natural (eutrofización natural), para conocer el transcurso del “envejecimiento” de los lagos inducido por procesos autóctonos (NAS, 1969). Este proceso de envejecimiento natural toma entre miles a cientos de años. Sin embargo, este término se utilizó, posteriormente, para referirse al fenómeno provocado por los vertidos de

los desechos de actividades humanas, llamándolo Proceso de Eutrofización Cultural o simplemente eutrofización, definido por la US-EPA (1997) como “*el abastecimiento excesivo de los nutrientes nitrógeno y fósforo a los cuerpos de agua, con el consecuente crecimiento acelerado de microalgas, que puede producir la muerte de peces al despojarlos del oxígeno que necesitan para vivir*”. De forma diferente, el proceso de envejecimiento antrópico toma tan solo décadas o menos años en llevarse a cabo.

La eutrofización se ha convertido en uno de los principales problemas ecológicos y ambientales que enfrentan muchos cuerpos de agua. Las variables tanto abióticas como bióticas cambian rápidamente, afectando la estabilidad y el funcionamiento del ecosistema y modificando las interacciones de las especies, debido a la competencia por recursos (nutrientes, luz, alimento). Además, las toxinas provenientes de los florecimientos de algunas cianobacterias ocasionan la mortandad de muchos organismos, aunque aún no se cuenta con una estimación cuantitativa de las pérdidas asociadas (Pokorny y Kvet, 2003).

Desde el punto de vista socioeconómico, la eutrofización genera impactos sobre los bienes y servicios asociados, sobre las actividades económicas vinculados a ellos y sobre la salud humana. Las pérdidas económicas atribuidas a la eutrofización incluyen desde costos de purificación de agua para uso humano hasta pérdidas de producción de peces y vida silvestre (Dodds *et al.*, 2008).

El concepto de calidad del agua es complejo y difícil de precisar. Sin embargo, se puede valorar al identificar y medir sus cualidades, a través de características químicas, físicas y biológicas, para poder calificarla. Del estudio de la calidad del agua se pueden inferir los contaminantes y procesos que la afectan, con el fin de implantar los valores máximos permisibles de contaminantes, cuyas concentraciones no generen estrés a la vida acuática y permita al ser humano aprovechar el agua para diferentes usos. Los procesos son un conjunto de intercambios entre componentes, del mismo sistema acuático y entre sistemas, de transformaciones biogeoquímicas que cambian el hábitat. Tanto los criterios como los estándares y objetivos de calidad de agua variarán dependiendo de si se trata de agua para consumo humano, para uso agrícola o industrial, o bien para recreación (CONAGUA, 2017).

Con el tiempo, se han desarrollado soluciones y medidas para disminuir el impacto en el deterioro de las aguas, como restringir los fertilizantes que contengan fósforo (P) y mejorar el tratamiento de las aguas residuales que son vertidas en cuerpos superficiales (Lathrop *et al.*, 1998). Sin embargo, los problemas ecológicos en los sistemas acuáticos persisten debido a las actividades antropogénicas crecientes, además de que los esfuerzos por garantizar la conservación en ellos son aún limitados (Denzin *et al.*, 2017).



## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Calidad de agua en lagos

La calidad del agua de los lagos, en general, ha tenido un impacto negativo por la falta de control de los contaminantes que llegan por diferentes vías. Como respuesta, se han desarrollado los índices de calidad del agua, como herramientas sencillas, para poder evaluar el recurso hídrico. Estos índices de calidad del agua se definen como una expresión simple de una combinación de varios parámetros que -en su conjunto- sirven para estimar la calidad del agua. Se pueden representar por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o incluso un color (Caneva, 2017).

Existen diferentes métodos o índices para determinar el estado trófico de un lago y observar las variaciones ambientales que ocurren en los cuerpos de agua (Gibson *et al.*, 2000). En particular, se puede establecer una clasificación adecuada utilizando solo las medidas de clorofila-a (Cl-a), ya que es bastante práctico. No obstante, podría ser una limitación para realizar una clasificación más precisa, por ello se toma en cuenta otras variables limnológicas involucradas en el proceso de eutrofización (Janus y Vollenweider, 1981).

A principios de los años setenta, ante la necesidad de encontrar un método uniforme y consistente para dar a conocer la calidad del agua de manera accesible a la población, se desarrolló un sistema estimativo de la calidad del agua que requirió la medición física de los parámetros de contaminación del agua y el uso de una escala estandarizada de medición para expresar la relación entre la existencia de varios contaminantes en el agua y el grado de impacto en sus diferentes usos (Vollenweider *et al.*, 1998).

El índice de estado trófico de Carlson (1977) es uno de los primeros índices propuestos para sistemas lacustres y uno de los más utilizados. Está basado en la utilización del Disco de Secchi, para la medición de la transparencia del agua a través de la columna de agua del lago. Esta transparencia determina el nivel de atenuación de la luz a través de la turbidez y el color que presenta la columna de agua, por efecto de descargas de sólidos (suspendidos, volátiles o sedimentables) o por la formación de sistemas coloidales o soluciones complejas (Cunha *et al.*,

2013). Se obtiene mediante una transformación logarítmica de los valores obtenidos de la profundidad del Disco de Secchi ( $Z_{DS}$ ), la concentración de clorofila-*a* ( $Cl-a$ ) y de fósforo total (PT). Esto bajo el supuesto de que el material particulado suspendido controla la  $Z_{DS}$  y que la concentración de microalgas en el agua es la principal fuente de este material. Este índice fue desarrollado con base en los conocimientos obtenidos del estudio de lagos templados (Carlson, 1977).

Otro índice ha sido propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1982). La OCDE se propuso definir un lenguaje común para los parámetros a medir, buscando una simplificación de estos, pero a la vez seleccionando aquellos con significado biológico adecuado, para un análisis estadístico reproducible (Vollenweider y Kerekes, 1982). Esta clasificación proporciona un esquema cuantitativo probabilístico para las diferentes categorías de estado trófico a partir del análisis de nutrientes (concentración de fósforo), de la capacidad de generar biomasa ( $Cl-a$ ) y de la transparencia de la columna de agua. Estos datos se relacionan con el estado trófico asignado de acuerdo con las percepciones cualitativas. En este índice los valores varían en una escala de cero a cien (Ludovisi y Poletti, 2003).

Se han realizado diferentes modificaciones a los índices desarrollados, para ajustarlos a sistemas tropicales, como lo realizado por Toledo (1983) al índice de estado trófico de Carlson (IET), quien propuso incluir el fósforo reactivo soluble, con la finalidad de utilizar este sistema para condiciones climáticas de ambientes tropicales.

Además, como la biomasa fitoplanctónica tiene una correlación directa con el incremento de los nutrientes (nitrógeno -N- y fósforo -P-), elementos responsables directos de la eutrofización (Smith, 1982), se utiliza el cociente de Redfield (16N: 1P), que permite obtener la proporción en la que el C, el N y el P están presentes en la biomasa fitoplanctónica y, con ello, se pueden estimar los nutrientes que pueden ser limitantes de la producción primaria (Redfield, 1958).

## **2.2 Antecedentes del área de estudio**

Los pobladores de la zona del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) detectaron,

desde el año 2003, que algunos de los lagos presentaban cambios. Particularmente, Vuelta de Agua pasó de ser un lago con aguas cristalinas a un color verdoso-amarillo y con un olor fétido, característico de algunos compuestos azufrados, además de presentar mortandad de peces (CFE, 2012). La misma CFE realizó mediciones de las variables fisicoquímicas en algunos lagos de Montebello, obteniendo como resultados que la calidad de agua variaba entre ellos. Concluyeron que las fuentes potenciales de contaminación son la lixiviación, las descargas de sustancias químicas y la infiltración de aguas residuales no tratadas, principalmente.

Las tonalidades azules se están perdiendo en algunos lagos, generando serias preocupaciones sobre la calidad del agua de ellos. Estas afectaciones han sido claramente atribuidas a fuentes antrópicas, principalmente, por las ciudades que se han establecido a lo largo del curso del río Grande de Comitán. En la ciudad de Comitán de Domínguez continuamente se vierten aguas residuales junto con el drenaje agrícola rico en agroquímicos, esto llega a los lagos con un elevado aporte de sedimentos, lo que produce un aumento en el crecimiento de la productividad vegetal y cambios en las propiedades del agua (CONANP, 2009).

Los estudios recientes en PNLN han demostrado que los lagos que se localizan en la zona noroeste y con la mayoría de las actividades humanas reciben una mayor aportación de aguas residuales. Razón por la cual los cuerpos de agua son más vulnerables ante la contaminación y se han catalogado como eutróficos. Al contrario de los lagos que se ubican en la zona suroeste que tienen una mejor calidad ambiental porque su fuente principal de recarga es agua subterránea, por lo tanto, tienen un menor impacto por parte de las poblaciones y se han catalogado como oligotróficos (Alcocer *et al.*, 2018).

Mora *et al.* (2017) describieron los cambios químicos en diez lagos del PNLN. De acuerdo con sus resultados, este sistema kárstico se puede dividir en dos grupos con base en sus características geomorfológicas y que coinciden con la calidad del agua. El primer grupo de lagos se caracteriza por la presencia de sulfatos de calcio-magnesio y, se encuentra conectado hidráulicamente con el río Grande de Comitán, lugar donde se vierte toda la escorrentía de la cuenca. En cuanto al segundo grupo de lagos, presenta propiedades bicarbonatadas de calcio-magnesio, y se encuentra dependiente por el intercambio de masas de agua que se da a través de pequeños canales. Se

estima que la cantidad de cloruros y sulfatos en el agua puede incrementar a causa de la erosión, la agricultura y el drenaje de la ciudad.

En el estudio de Rivera-Herrera *et al.* (2019) se utilizó la concentración de *Cl-a* para medir la distribución de la biomasa fitoplanctónica a lo largo de la columna de agua en un conjunto de lagos del PNLM, con el fin de precisar las diferencias entre los lagos. En su trabajo concluyeron que hay lagos con una mayor concentración de biomasa fitoplanctónica ( $36.0 \pm 13.6 \mu\text{g L}^{-1}$ ) y otros con muy poco fitoplancton ( $0.73 \pm 0.2 \mu\text{g L}^{-1}$ ).

Villalpando (2015) estimó el índice trófico de diferentes lagos de la región NO del PNLM a través de la utilización de percepción remota, detectando las concentraciones de *Cl-a*. Encontró que el estado trófico de los cuerpos de agua, en general, es de eutrofia, concluyendo que algunos de los lagos de Montebello se encuentran en deterioro ambiental.

Basándose en los trabajos de Alvarado-Velázquez (2017) y CONAGUA (2009), la cuenca del Río Grande de Comitán se ha visto sometida a una serie de adversidades en los últimos años, que han impactado negativamente en tanto la cantidad como la calidad del recurso hídrico. Estos desafíos provienen primordialmente de presiones asociadas al cambio de uso del suelo, la deforestación y actividades agrícolas. Aunado a esto la naturaleza kárstica de la región introduce un peligro latente para el ecosistema, derivado de la elevada porosidad y permeabilidad de las formaciones rocosas.

Investigaciones previas (p. ej. CONANP, 2007; Alcocer *et al.*, 2018; Rivera-Herrera *et al.*, 2019) han destacado diversos riesgos ambientales en las “Lagunas de Montebello”, tales como la disminución de la provisión de agua apta para su consumo, los episodios de florecimientos tóxicos provocados por determinadas especies del género *Planktothris*, la introducción de especies exóticas y la contaminación derivada del uso de agroquímicos, entre otros. Estos elementos representan un obstáculo significativo para la mayoría de las actividades económicas, turísticas y sociales en la urbe de Comitán, y conllevan además a una pérdida de la riqueza biológica regional. Así mismo, de acuerdo con Corona y Cruz (2023), la contaminación hídrica y el mantenimiento deficiente de los sistemas de alcantarillado, especialmente vinculados con los

núcleos urbanos, tienen ramificaciones directas en las áreas rurales. De esta manera, se han incrementado las desigualdades socioeconómicas y, sobre todo, la marginación de ciertos grupos vulnerables.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

Algunos de los cuerpos acuáticos del PNLM muestran signos de potencialmente asociados al impacto de las actividades antrópicas en la zona, mientras que otros han permanecido en condiciones sin cambio aparente. A pesar de que se han llevado a cabo diversos estudios, aún no hay un diagnóstico del estado trófico en los lagos de Montebello, ni de la evaluación de las principales variables limnológicas asociadas al proceso de eutrofización. Por lo anterior, el análisis de un conjunto de lagos del PNLM a lo largo del gradiente trófico NO-SE permitirá tener una visión global del problema y, así, poder contribuir a lograr una mejor gestión en la zona.

### **4. OBJETIVOS**

#### **4.1 General**

Evaluar el estado trófico de 18 lagos cubriendo el gradiente NO-SE, planicie a montaña, del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, durante las épocas cálida de lluvias y fría de secas, con el fin de identificar los lagos que presentan eutrofización actualmente.

#### **4.2 Particulares**

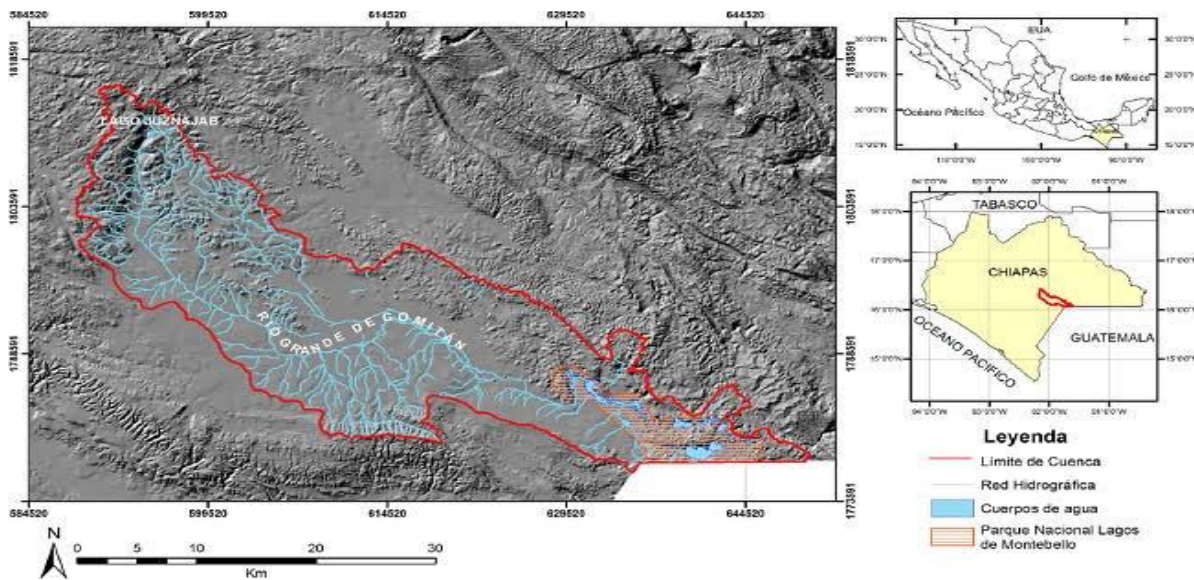
- Caracterizar los perfiles de temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y pH en la columna de agua de cada uno de los lagos.
- Determinar la profundidad de la zona eufótica.
- Determinar las concentraciones de nutrientes (N y P) presentes en ellos.
- Estimar la biomasa fitoplanctónica a través de la concentración de *Chl-a*.
- Estimar el estado trófico de los lagos.
- Comparar las características limnológicas y el estado trófico de los lagos.

## 5. HIPÓTESIS

La evaluación de las principales variables limnológicas medidas permitirá reconocer el estado trófico que presentan los lagos del PNLM, así como reconocer los cambios limnológicos más evidentes producto de la eutrofización. Se plantea que los lagos localizados en las áreas de menor altitud y contiguas a la planicie del PNLM manifestarán un incremento notable en los niveles de eutrofización en contraste con aquellos emplazados en regiones más elevadas y distantes de los asentamientos humanos. Así mismo, se contempla que la temporalidad, en virtud de sus efectos dinámicos, ejercerá una influencia determinante en los parámetros fisicoquímicos.

## 6. ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) se localiza en la región sureste del estado de Chiapas, en la frontera con Guatemala. Abarca una superficie de 6,425 hectáreas que pertenecen a los municipios de la Independencia y La Trinitaria, cuyas coordenadas son 16° 04' 40" y 16° 10' 20" de latitud norte y 91° 37' 40" y 91° 47' 40" de longitud oeste, a una altitud que varía entre 1 380 y 1 740 m s.n.m. Se ubica dentro de la Región Hidrológica Nacional No. 30 Grijalva-Usumacinta y forma parte de la subcuenca del Río Grande de Comitán (CONANP, 2011).



**Figura 1.** Ubicación de la cuenca del Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello, Chiapas (Tomado de Mora *et al.*, 2016).

El PNLM fue una de las primeras áreas naturales protegidas en México, designada en el año 1959, con motivo de ser un área de alta importancia ambiental, social, turística y económica para la región, dada por su inmensa riqueza natural y sus recursos hidrológicos. Este sistema lacustre se caracteriza por ser la fuente de sustento de un número considerable de comunidades y de vida silvestre. Además, representa uno de los paisajes más bellos a nivel nacional, especialmente por la coloración de sus aguas, que reflejan un color turquesa y cristalino (CONANP, 2011). En 1997 fue decretado como Área de importancia para la Conservación de las Aves por la CONABIO. Y en el año 2003 fue declarado Sitio Ramsar, por consiguiente, la zona fue reconocida como un humedal de importancia internacional (CONANP, 2009).

El clima de la cuenca del Río Grande de Comitán es templado húmedo C(fm) con lluvias durante todo el año (García, 1988). Por lo general, la precipitación media anual es de 2,279 mm (Alcocer *et al.*, 2016a) en la época fría de secas es menor a 40 mm y en meses de lluvia la precipitación cambia de 1,200 a 1,400 mm. La temperatura media mensual es de 23.6 °C, no obstante, en la época más cálida se presenta una temperatura de 25.6 °C, mientras que en la época fría es de 20.9 °C (CONANP, 2007).

Las principales asociaciones vegetales son bosques de coníferas, bosque de latifoliadas y bosque mesófilo de montaña (CONANP, 2007). Sin embargo, la presencia de vegetación secundaria en estos bosques es una consecuencia común de la deforestación, plagas e incendios (CONAGUA, 2009).

En la cuenca del Río Grande de Comitán los litosoles y las rendzinas son los suelos que ocupan mayor superficie y se encuentran en las partes altas de montaña, mientras que en las partes bajas de planicie son reemplazados por vertisoles, acrisoles, gleysoles y fluvisoles (Melo y Cervantes, 1986). Existe una relativa heterogeneidad morfológica y de origen del relieve, a pesar de la homogeneidad litológica, la cual podría explicarse por la interacción de los procesos kársticos (exógenos) y tectónicos (endógenos) que tienen lugar en la zona (Durán *et al.*, 2014).

El PNLM está constituido por más de 60 lagos de origen kárstico, que varían en forma, tamaño y tonalidad del agua (CONANP, 2007). Las cuencas que ocupan los cuerpos acuáticos se formaron

por la disolución química de las rocas calizas, dando origen a sistemas de dolinas, úvalas kársticas y poljes capaces de almacenar agua (Durán *et al.*, 2014).

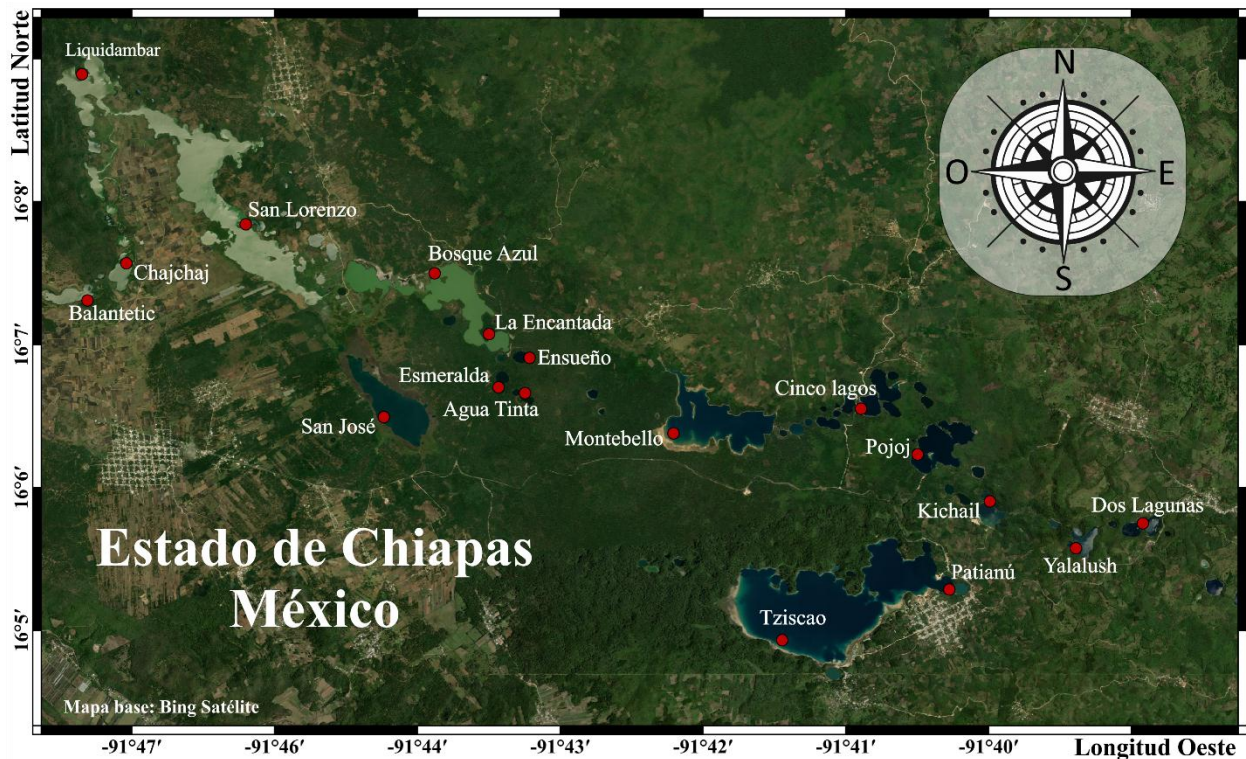
Como se mencionó, los lagos del PNLM están catalogados en dos grupos: los lagos de montaña (oligotróficos) cuya fuente de agua es subterránea y los lagos de planicie (eutróficos) alimentados por el escurrimiento del Río Grande de Comitán. El último grupo de lagos está conectado por una red de canales, los cuales fueron construidos por los habitantes de la zona (Alcocer *et al.*, 2018).



## 7. MATERIAL Y MÉTODO

### 7.1. Trabajo de campo

Se seleccionó una muestra de 18 lagos del PNLM ubicados a lo largo de la línea de fractura y fallamiento principal con orientación NO-SE incluyendo lagos de planicie y de montaña (Fig. 2). Los nombres de los lagos, su ubicación y características morfométricas principales se presentan en la Tabla 1.



**Figura 2.** Ubicación de los 18 lagos estudiados del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, México.

**Tabla 1.** Ubicación geográfica, área, volumen (Vol.), profundidad máxima (Z<sub>máx</sub>) y profundidad media (Z<sub>med</sub>) de los lagos de Montebello estudiados (Tomado de Alcocer *et al.*, 2016b). Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE.

Lago	Coordenadas	Area (ha)	Vol (km <sup>3</sup> )	Z <sub>máx</sub> (m)	Z <sub>med</sub> (m)
Balantetic	16°7' N, 91°47'W	13.6	0.00023	3	1.7
Liquidámbar	16°9' N, 91°46'W	40.5	0.00453	24	11.2
Chajchaj	16°7' N, 91°46'W	9.2	0.0048	12	5.3
San Lorenzo	16°7' N, 91°45'W	181.3	0.02147	67	11.8
Bosque Azul	16°7' N, 91°43'W	52.2	0.0105	58	20
La Encantada	16°7' N, 91°43'W	8.2	0.00241	89	29.4
San José	16°6' N, 91°44'W	60.6	0.00623	30	10.3
Esmeralda	16°7' N, 91°43'W	1.1	0.00004	7	3.6
Ensueño	16°7' N, 91°43'W	2.7	0.00058	35	21.6
Agua Tinta	16°6' N, 91°43'W	3.0	0.00044	24	14.7
Montebello	16°6' N, 91°41'W	96.2	0.01186	45	12.3
Cinco Lagos	16°6' N, 91°40'W	23.7	0.1006	162	42.5
Pojoj	16°6' N, 91°39'W	43.7	0.01538	198	35.2
Kichail	16°5' N, 91°39'W	12.5	0.00119	22	9.5
Tziscoao	16°4' N, 91°39'W	306.6	0.08852	86	28.9
Patianú	16°5' N, 91°39'W	3.4	0.00037	26	10.8
Yalalush	16°5' N, 91°38'W	11.5	0.00114	23	9.9
Dos Lagos	16°5' N, 91°38'W	5.2	0.00132	42	25.2

Se realizaron dos muestreos: el primero en el mes de mayo de 2014 (época de lluvias) y el segundo en febrero de 2015 (época de secas). Los perfiles verticales de temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y turbidez fueron obtenidos *in situ* en la parte central y más profunda de cada lago, por medio de una sonda multiparamétrica marca Hydrolab modelo DS5X, acoplado a un sistema de captura de información modelo Surveyor 4 (SVR4). La zona de mezcla (Z<sub>mix</sub>) corresponde al epilimnion cuando el lago se encuentra estratificado y a toda la columna

de agua cuando se encuentra en circulación. Para determinar la zona eufótica ( $Z_{EU}$ ) de cada lago se midió la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por su sigla en inglés) con un perfilador de fluorescencia natural marca Biospherical Instruments, modelo PNF-300. La profundidad de la  $Z_{EU}$  se consideró desde la superficie del cuerpo acuático y hasta dónde llega el 1% de la PAR en superficie.

Para estimar la biomasa fitoplanctónica en la columna de agua, se realizaron mediciones de las concentraciones de Cl-*a*. Para esto, se tomaron muestras de agua de los lagos utilizando una botella hidrográfica tipo Niskin marca UWITEC de 5 L de capacidad. Las muestras fueron filtradas con una bomba de vacío marca Millipore a una presión aproximada de 0.3 atm, utilizando filtros de fibra de vidrio GF/F marca Whatman con apertura de poro nominal de 0.7  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, cada filtro fue etiquetado y guardado en oscuridad y en refrigeración hasta su análisis en el laboratorio. Para el análisis de nutrientes se tomaron muestras de agua, las cuales fueron filtradas a través de filtros de jeringa de acetato de celulosa (0.22  $\mu\text{m}$ ) y guardadas en frío y en oscuridad hasta su posterior análisis en el laboratorio.

## 7.2. Trabajo de laboratorio

### 7.2.1 Clorofila (Cl-*a*)

Los filtros GF/F fueron triturados con ayuda de un macerador de tejidos con punta de teflón y agregando 10 mL de acetona al 90%. Después de ello, cada filtro se dejó en reposo durante un período de 20 a 24 h en oscuridad y refrigeración. Posteriormente, las muestras del extracto de Cl-*a* fueron colocadas en una centrifuga a 3,000 rpm durante 15 min para obtener un sobrenadante. Se midió el volumen del sobrenadante y después se realizaron las lecturas de fluorescencia en un fluorómetro digital marca Turner Designs, modelo 10-AU previamente calibrado (Arar y Collins, 1997). Las lecturas obtenidas se convirtieron a  $\mu\text{g}$  de Cl-*a* por litro con la siguiente fórmula:

$$Cl\ a = \frac{(Ce * Ve * FD)}{(VM)}$$

**Ce:** concentración de Cl-*a* ( $\mu\text{g} / \text{L}$ ) obtenida de la solución extraída

**Ve:** volumen (L) utilizado para la extracción

**FD:** factor de dilución

**V<sub>m</sub>**: volumen (L) de la muestra de agua

### **7.2.2 Nutrientes**

Los análisis de nutrientes se realizaron usando un autoanalizador de flujo segmentado Skalar Sanplus de cinco canales, el cual funciona bajo técnicas colorimétricas. El nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) se determinaron en muestras sin filtrar, después de su oxidación a  $\text{NO}_3^-$  y SRP. El límite de detección para ambas variables fue de  $0.04 \mu\text{m}$  y  $0.02 \mu\text{m}$ , respectivamente (Hansen y Koroleff, 1999).

## **7.3. Trabajo de gabinete**

### **7.3.1 Mapa**

El mapa de la zona se elaboró con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto, QGIS 3.4 Madeira (2018), en conjunto con la base satelital de Google Earth.

### **7.3.2 Análisis de la información**

Para los análisis estadísticos se obtuvieron las medidas de tendencia central (promedio) y de dispersión (desviación estándar, valor máximo y mínimo) de los parámetros fisicoquímicos (temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH, Cl-*a* y turbidez). En relación con la Cl-*a*, ciertos cuerpos de agua únicamente cuentan con valores promedio y desviación estándar, ya que se recolectó solo una muestra debido a sus condiciones de alta turbidez y su poca profundidad. Por último, se graficaron los perfiles verticales con el programa Microsoft Office Excel (2019).

### **7.3.3 Índice de estado trófico**

Para la designación del estado trófico de cada uno de los lagos se utilizó el índice de la OCDE (1982) utilizado generalmente en estudios ecológicos y se comparó con el índice de Lamparelli (2004). Al ser cuantitativos y replicables son útiles para predecir la biomasa fitoplanctónica en ecosistemas acuáticos.

De acuerdo con el índice OCDE, el grado de eutrofización de un lago se define en función de tres parámetros: (1) transparencia del agua, determinada por el disco de Secchi ( $Z_{DS}$ ), (2) concentración de Cl-*a* y (3) concentración de PT (Tabla 2). El índice de Lamparelli considera las concentraciones de PT. Este índice se ha convertido en un índice de estado trófico (IET)

ampliamente utilizado (p. ej., Díaz-Torres *et al.*, 2021; Fetahi, 2019; Saghi *et al.*, 2015), ya que adoptó los mismos criterios de Carlson y proporciona ecuaciones de los valores de PT y Cl-*a* para su aplicación en reservorios tropicales, exceptuando la medida de la transparencia, ya que los cuerpos de aguas eutrofizados de zonas tropicales suelen presentar niveles más altos de turbidez a diferencia de los lagos templados.

**Tabla 2.** Clasificación del estado trófico de acuerdo con el Índice de Estado Trófico (IET) OCDE. ( $Z_{DS}$  = profundidad del Disco de Secchi, PT = fósforo total).

Categoría trófica	Clorofila- <i>a</i> ( $\mu\text{g/L}$ )	$Z_{DS}$ (m)	PT ( $\mu\text{g/L}$ )
Ultraoligotrófico	< 1	> 12	< 4
Oligotrófico	1-2.5	6 a 12	4 a 10
Mesotrófico	2.5 a 7.9	3 a 6	10 a 35
Eutrófico	8 a 25	1.5 a 3	35 a 100
Supereutrófico	-	-	-
Hipertrófico	> 25	< 1,5	>100

**Tabla 3.** Escala de valores del índice de estado trófico (IET) de los cuerpos de agua (Lamparelli, 2004). (Cl-*a* = concentración de clorofila-*a*; PT = concentración de fósforo total).

Categoría trófica	Clorofila- <i>a</i> ( $\mu\text{g/L}$ )	PT ( $\mu\text{g/L}$ )	IET
Ultraoligotrófico	< 1.17	< 8	< 47
Oligotrófico	1.17 - 3.24	8 – 19	47 - 52
Mesotrófico	3.24 - 11.03	19 – 52	52 - 59
Eutrófico	11.03 - 30.55	52 – 120	59 - 63
Supereutrófico	30.55 - 69.05	120 – 233	63 - 67
Hipertrófico	> 69.05	>233	> 67
$\text{IET} = \frac{\text{IET (Cl-a)} + \text{IET (PT)}}{2} \quad (3.8)$			

## 8. RESULTADOS

### 8.1 Parámetros fisicoquímicos: temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y pH

La información concerniente de la temperatura de los lagos se detalla en la Tabla 4. Durante la época cálida de lluvias, se determinó que la temperatura media de todos los cuerpos lacustres fue de  $20.8 \pm 1.5$  °C, a diferencia de la época fría de secas, se obtuvo un promedio de  $18.2 \pm 0.2$  °C. Las menores temperaturas se registraron en Bosque Azul (cálida-lluvias) y Montebello (fría-secas), mientras que las mayores temperaturas se presentaron en Balantetic (ambas épocas).

**Tabla 4.** Valores de temperatura (°C) del agua registrados en los lagos del estudio. [(-): sin datos. Mín. = temperatura mínima, Máx. = temperatura máxima, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE].

Temperatura (°C)								
Lago	Época cálida de lluvias				Época fría de secas			
	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.
Balantetic	23.3	2.1	21.56	25.6	20.7	0.04	20.7	20.7
Liquidámbar	20.2	2.1	18.8	26.1	-	-	-	-
Chajchaj	22.7	0.7	22.2	24.3	18.2	0.1	18.1	18.2
San Lorenzo	21.1	1.8	19.9	26	17.5	0.3	17.3	17.9
Bosque Azul	18.8	1.9	17.8	24.6	17.4	0.02	17.3	17.4
La Encantada	18.7	1.1	18.3	24.3	17.9	0.04	17.9	18.0
San José	20.9	2.1	18.4	23.6	17.6	0.6	17.2	18.9
Esmeralda	23.4	0.4	22.7	23.9	19.0	0.02	19.0	19.0
Ensueño	21.8	1.5	19.8	23.6	18.7	0.3	18.5	19.3
Agua Tinta	22.6	1.6	20.1	24.0	19.0	0.4	18.7	19.9
Montebello	19.9	2.2	17.8	22.7	17.1	0.1	17.1	17.5
Cinco Lagos	19.5	1.4	18.3	22.3	18.3	0.1	18.3	18.6
Pojoj	20.0	1.7	17.9	22.5	18.7	0.1	18.7	19.5
Kichail	20.8	2.3	18.2	24.5	17.8	0.6	17.5	19.5
Tzisco	19.9	1.9	17.9	22.5	17.6	0.1	17.5	18.2
Patianú	20.1	1.6	18.1	22.9	17.6	0.3	17.3	18.0
Yalalush	20.7	0.3	20.4	21.1	17.7	0.4	17.3	18.5
Dos Lagos	19.3	1.0	18.5	21.9	18.5	0.3	17.9	19.2
	20.8	1.5	19.3	23.7	18.2	0.2	18.0	18.7

En cuanto al oxígeno disuelto (OD), en la época cálida de lluvias se registró que la media de OD fue de  $3.8 \pm 3.4$  mg/L y para la época fría de secas de  $6.1 \pm 0.5$  mg/L. En la época cálida de lluvias solo dos lagos presentaron OD en la zona profunda (Esmeralda y Yalalush), mientras los demás presentaron anoxia. En la época fría de secas 15 lagos presentaron OD y solo tres lagos presentaron anoxia (Dos Lagos, La Encantada y San Lorenzo). San Lorenzo (cálida-lluvias) y Balantetic (fría-seca) presentaron las concentraciones más elevadas de OD (Tabla 5).

**Tabla 5.** Valores de oxígeno disuelto (mg/L) del agua registrados en los lagos del estudio. [(-): sin datos. Mín. = cantidad de OD mínima, Máx. = cantidad de OD máxima, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE].

<b>Oxígeno disuelto (mg/L)</b>								
<b>Lago</b>	<b>Época cálida de lluvias</b>				<b>Época fría de secas</b>			
	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.
<b>Balantetic</b>	5.1	4.7	0	9.15	18.1	0.1	18.0	18.2
<b>Liquidámbar</b>	2.4	6.6	0	24.3	-	-	-	-
<b>Chajchaj</b>	3.5	3.1	0	7.5	8.1	0.8	7.0	9.1
<b>San Lorenzo</b>	5.8	10.0	0	25.7	0	0	0	0
<b>Bosque Azul</b>	0.9	2.7	0	11.5	3.0	0.3	2.2	3.6
<b>La Encantada</b>	0.4	2.2	0	11.8	1.2	1.6	0	4.9
<b>San José</b>	3.3	3.3	0	7.5	5.5	0.2	5.4	6.1
<b>Esmeralda</b>	5.8	0.7	4.5	6.3	6.4	0.03	6.4	6.4
<b>Ensueño</b>	1.7	2.5	0	7.4	7.1	0.1	7.0	7.2
<b>Agua Tinta</b>	5.7	2.3	0	7.9	6.6	0.2	6.4	6.8
<b>Montebello</b>	2.7	2.9	0	6.2	7.3	0.2	7.0	7.5
<b>Cinco Lagos</b>	4.4	3.5	0	8.9	6.1	0.1	6.0	6.5
<b>Pojoj</b>	4.6	3.5	0	8.9	6.4	0.1	6.3	6.5
<b>Kichail</b>	5.4	3.2	0	7.8	7.0	0.2	6.7	7.3
<b>Tzisco</b>	5.5	3.0	0	8.1	7.2	0.03	7.2	7.3
<b>Patianú</b>	3.6	3.4	0	7.7	5.7	1.4	3.7	7.1
<b>Yalalush</b>	5.7	0.7	4.4	6.6	-	-	-	-
<b>Dos Lagos</b>	1.7	2.5	0	7.4	2.6	2.7	0	7.2
	3.8	3.4	0.5	10.0	6.1	0.5	5.6	7.0

En la Tabla 6 contiene los datos de la conductividad eléctrica. En la época cálida de lluvias, se estableció un promedio de  $435 \pm 63$   $\mu$ S/cm y para la época fría de secas fue de  $453 \pm 22$   $\mu$ S/cm

entre todos los lagos. En ambas épocas los valores más bajos se registraron en Montebello (165  $\mu\text{S/cm}$  cálida-lluvias y 190  $\mu\text{S/cm}$  fría-secas) y los valores más altos en Liquidambar 995  $\mu\text{S/cm}$  (cálida-lluvias) y en ChajChaj 1025  $\mu\text{S/cm}$  (fría-secas).

**Tabla 6.** Valores de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S/cm}$ ) del agua registrados en los lagos del estudio. [(-): sin datos. Mín. = conductividad eléctrica mínima, Máx. = conductividad eléctrica máxima, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE].

Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S/cm}$ )								
Lago	Época cálida de lluvias				Época fría de secas			
	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.
Balantetic	654	102	583	770	945	1.2	944	947
Liquidambar	995	185	606	1118	-	-	-	-
Chajchaj	686	113	585	823	1025	1.4	1023	1027
San Lorenzo	731	91.2	521	785	754	8.4	745	766
Bosque Azul	534	46.0	498	650	545	5.4	538	553
La Encantada	429	31.4	406	563	469	6.6	456	478
San José	343	16.5	320	360	368	1.2	367	371
Esmeralda	342	4.3	339	351	374	0.5	374	375
Ensueño	255	6.1	248	264	265	0.3	265	266
Agua Tinta	342	20.8	325	373	343	0.4	378	380
Montebello	165	6.9	156	172	190	0.2	189	190
Cinco Lagos	205	160	192	246	212	0.1	212	213
Pojoj	227	48.3	193	322	213	1.9	212	217
Kichail	269	7.2	263	288	284	0.4	285	284
Tzisco	243	3.3	238	250	257	0.1	257	257
Patianú	262	15.3	243	279	272	5.2	264	277
Yalalush	272	1.7	269	275	303	0.5	303	305
Dos Lagos	869	282	351	1429	880	348	397	1715
	435	63	352	518	453	22	424	507

Los valores de pH se presentan en la Tabla 7. Durante la época cálida de lluvias se observó que la media fue de  $7.5 \pm 0.3$  y en el caso de la época fría de secas fue de  $8.2 \pm 0.0$ . En ambas épocas los valores menores se registraron en Dos Lagos, 7.1 (cálida-lluvias) y 7.5 (fría-secas). Los mayores valores de pH se registraron en Kichail, con 7.9 (cálida-lluvias) y en Balantetic con 8.8 (fría-secas).



**Tabla 7.** Valores de pH del agua registrados en los lagos del estudio. [(-): sin datos. Mín. = pH mínimo, Máx. = pH máximo, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE].

pH								
Lago	Época cálida de lluvias				Época fría de secas			
	Prom.	d.e.	Mín.	Máx.	Prom.	d.e.	Min.	Máx.
Balantetic	7.6	0.3	7.2	7.9	8.8	0	8.8	8.8
Liquidámbar	7.2	0.5	7.0	8.9	-	-	-	-
Chajchaj	7.4	0.1	7.3	7.6	8.6	0	8.6	8.6
San Lorenzo	7.3	0.5	7.1	8.9	8.0	0.2	7.8	8.4
Bosque Azul	7.2	0.2	7.1	8.3	8.0	0	7.9	8.1
La Encantada	7.2	0.2	7.1	8.4	7.8	0.1	7.6	8.1
San José	7.6	0.3	7.3	8.1	8.4	0	8.3	8.5
Esmeralda	7.5	0.1	7.3	7.6	8.2	0	8.2	8.2
Ensueño	7.8	0.3	7.2	8.2	8.4	0	8.3	8.5
Agua Tinta	7.8	0.2	7.3	8.3	8.3	0	8.2	8.4
Montebello	7.5	0.4	7.0	8.1	8.3	0	8.3	8.4
Cinco Lagos	7.6	0.4	7.0	8.3	8.3	0	8.3	8.4
Pojoj	7.8	0.4	7.0	8.4	8.4	0	8.3	8.5
Kichail	7.8	0.4	7.1	8.2	8.2	0	8.1	8.2
Tziscoa	7.8	0.4	7.2	8.2	8.3	0	8.3	8.3
Patianú	7.4	0.3	7.1	8.1	8.3	0.1	8.0	8.5
Yalalush	7.6	0.0	7.4	7.7	8.3	0	8.1	8.3
Dos Lagos	7.1	0.2	6.9	7.8	7.5	0.2	7.2	8.1
	7.5	0.3	7.1	8.2	8.2	0.0	8.1	8.4

En la época cálida de lluvias se encontraron estratificados: Agua Tinta, Cinco Lagos, Ensueño, Kichail, Montebello, Patianú, Pojoj, Tziscoa, San José, Bosque Azul, San Lorenzo y La Encantada. El epilimnion registró mayor temperatura, alto contenido de OD, así como valores de conductividad y pH homogéneos. En el metalimnion se registraron gradientes de temperatura y OD en la profundidad, mientras que en el hipolimnion se registraron menores temperaturas, así como condiciones anóxicas.

En la época fría de secas, se produjo la circulación del agua de los lagos y con ello una homogenización de la temperatura, OD, conductividad y pH, lo que refiere a un comportamiento monomictico cálido.

Los lagos someros Yalalush, Esmeralda, Balantetic, Chajchaj y Liquidámbar, presentaron un comportamiento polimíctico cálido, ya que estuvieron circulando continuamente a lo largo de todo el año y no se produjo estratificación.

A diferencia de los demás lagos, Dos Lagos presentó un comportamiento meromíctico, debido a que las aguas de las capas profundas no se mezclan nunca con las aguas superficiales, como resultado de su profundidad ( $Z_{max} = 42m$ ). Este fenómeno suele ser debido a un gradiente permanente de densidad.

## **8.2 Zona eufótica ( $Z_{EU}$ )**

La  $Z_{EU}$  en los lagos oligotróficos (Agua Tinta, Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Esmeralda, Kichail, Montebello, Patianú, Pojoj, San José, Tzisco y Yalalush) fue mayor en comparación con la de los lagos eutróficos (Balantetic, Liquidámbar, Chajchaj, San Lorenzo, Bosque Azul y La Encantada).

En los lagos oligotróficos la  $Z_{EU}$  mínima se registró para el lago Esmeralda (5.6 m en cálida-lluvias y 5.1 m en fría-secas) y la máxima en Pojoj (73.1 m en cálida de lluvias y 57.3 m en fría-secas). En los lagos eutróficos varió entre los 1.8 m (Chajchaj) y los 4.4 m (La Encantada), en la época cálida de lluvias y entre 2.4 m (San Lorenzo) y 6.5 m (La Encantada) en la época fría de secas (Tabla 8).

**Tabla 8.** Profundidad de la zona eufótica ( $Z_{EU}$ , m) de los lagos estudiados, en ambas épocas. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. (-): sin datos].

<b>Profundidad de la <math>Z_{EU}</math> (m)</b>		
<b>Lago</b>	<b>Cálida de lluvias</b>	<b>Fría de secas</b>
<b>Balantetic</b>	3.3	2.9
<b>Liquidámbar</b>	2.9	-
<b>Chajchaj</b>	1.8	3
<b>San Lorenzo</b>	-	2.4
<b>Bosque Azul</b>	3.5	5.5
<b>La Encantada</b>	4.4	6.5
<b>San José</b>	20.4	12.6
<b>Esmeralda</b>	5.6	5.1
<b>Ensueño</b>	31.5	32.5
<b>Agua Tinta</b>	21.5	21.5
<b>Montebello</b>	18.9	38.5
<b>Cinco Lagos</b>	36.2	47.5
<b>Pojoj</b>	73.1	57.3
<b>Kichail</b>	19.2	19.9
<b>Tzisco</b>	42.8	36.5
<b>Patianú</b>	15.5	18.3
<b>Yalalush</b>	13.3	14.9
<b>Dos Lagos</b>	27.2	27.7

### **8.3 Turbidez**

Los valores de turbidez fueron variables en los diversos lagos (Tabla 9). En los lagos oligotróficos se presentaron valores entre  $1 \pm 0$  NTU (Esmeralda, Ensueño, Cinco Lagos y Pojoj) y  $33 \pm 20$  NTU (Agua Tinta), en la época cálida de lluvias. En la época fría de secas la mayoría de los lagos registraron 0 NTU y el máximo fue de  $1.5 \pm 1.8$  NTU en San José.

En los lagos eutróficos varió entre  $30 \pm 1$  NTU (Chajchaj) y  $27 \pm 19$  NTU (San Lorenzo), en la época cálida de lluvias y para Balantetic fue de  $23 \pm 15$  NTU (fría-secas).

**Tabla 9.** Valores de turbidez (NTU) de los lagos en estudio. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. (-): sin datos. Mín. = NTU mínima, Máx. = NTU máxima, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar].

<b>Turbidez (NTU)</b>						
<b>Lago</b>	<b>Cálida de lluvias</b>			<b>Fría de secas</b>		
	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Prom. <math>\pm</math> d.e.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Prom. <math>\pm</math> d.e.</b>
<b>Balantetic</b>	18	30	$24 \pm 9$	11	40	$23 \pm 15$
<b>Liquidámbar</b>	4	37	$20 \pm 23$	-	-	-
<b>Chajchaj</b>	28	32	$30 \pm 1$	4	5	$5 \pm 0$
<b>San Lorenzo</b>	7	53	$27 \pm 19$	14	21	$17 \pm 4$
<b>Bosque Azul</b>	6	26	$20 \pm 7$	0	8	$7 \pm 2$
<b>La Encantada</b>	14	16	$15 \pm 1$	2	3	$2.2 \pm 0.2$
<b>San José</b>	2	3	$2.1 \pm 0.3$	0	6	$1.5 \pm 1.8$
<b>Esmeralda</b>	1	1	$1 \pm 0$	0	0	$0 \pm 0$
<b>Ensueño</b>	1	1	$1 \pm 0$	0	0	$0 \pm 0$
<b>Agua Tinta</b>	8	65	$33 \pm 20$	0	0	$0 \pm 0$
<b>Montebello</b>	0	7	$1.2 \pm 2.4$	0	1	$0.1 \pm 0.1$
<b>Cinco Lagos</b>	1	1	$1 \pm 0$	0	0	$0 \pm 0$
<b>Pojoj</b>	1	1	$1 \pm 0$	0	0	$0 \pm 0$
<b>Kichail</b>	1	2	$1.5 \pm 0.1$	0	0	$0 \pm 0$
<b>Tzisco</b>	1	2	$1.3 \pm 0.1$	0	0	$0 \pm 0$
<b>Patianú</b>	3	25	$12 \pm 8$	0	2	$0.6 \pm 1$
<b>Yalalush</b>	1	2	$2.2 \pm 0.5$	0	0	$0 \pm 0$
<b>Dos Lagos</b>	3	4	$3.5 \pm 0.5$	0	1	$0.2 \pm 0.3$

## 8.4 Nutrientes

En la Tabla 10 se presentan los valores de las concentraciones de nutrientes registrados para la época cálida de lluvias.

En los lagos oligotróficos las concentraciones de nitrógeno total (NT) fluctuaron entre  $110.4 \pm 46.2 \mu\text{g/L}$  (Ensueño) y  $516.1 \pm 320.5 \mu\text{g/L}$  (Kichail). Los valores de PT se registraron entre  $9.2 \pm 4.6 \mu\text{g/L}$  (Cinco Lagos) y  $31.3 \pm 3.5 \mu\text{g/L}$  (Dos Lagos). En cuanto a las proporciones NT:PT variaron de  $6.3 \pm 35 \mu\text{g/L}$  (Ensueño) a  $30.6 \pm 52.6 \mu\text{g/L}$  (Kichail).

En los lagos eutróficos el NT tuvo las menores concentraciones en La Encantada ( $1173.7 \pm 156.7 \mu\text{g/L}$ , respectivamente) y las mayores concentraciones en Liquidámbar ( $4761.7 \pm 1831.0 \mu\text{g/L}$ ). La misma situación ocurre con las concentraciones de PT, teniendo La Encantada las menores concentraciones, con  $88.5 \pm 23.5 \mu\text{g/L}$  y Liquidámbar las mayores concentraciones, con  $409.2 \pm 187.7 \mu\text{g/L}$ . Los valores de la relación NT:PT variaron de  $11.6 \pm 9.8 \mu\text{g/L}$  (Liquidámbar) a  $13.3 \pm 6.7 \mu\text{g/L}$  (La Encantada).

**Tabla 10.** Valores de nutrientes ( $\mu\text{g/L}$ ) en los lagos durante la época cálida de lluvias. [NT = nitrógeno total, PT = fósforo total, NT:PT = relación de nitrógeno total y fósforo total. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. - = sin datos].

<b>Cálida-lluvias</b>						
<b>Lago</b>	<b>Ntot</b>		<b>Ptot</b>		<b>Ntot:Ptot</b>	
	<b>Prom.</b>	<b>d.e.</b>	<b>Prom.</b>	<b>d.e.</b>	<b>Prom.</b>	<b>d.e.</b>
<b>Balantetic</b>	351.3	-	21.0	-	16.7	-
<b>Liquidámbar</b>	4761.7	1831.0	409.2	187.7	11.6	9.8
<b>Chajchaj</b>	356.7	-	16.5	-	21.6	-
<b>San Lorenzo</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Bosque Azul</b>	1452.5	189.1	118.7	25.2	12.2	7.5
<b>La Encantada</b>	1173.7	156.7	88.5	23.5	13.3	6.7
<b>San José</b>	329.4	165.3	28.8	8.0	11.4	20.7
<b>Esmeralda</b>	12.8	-	0.7	-	18.1	-
<b>Ensueño</b>	110.4	46.2	17.6	1.3	6.3	35.0
<b>Agua Tinta</b>	157.8	17.3	17.1	2.1	9.2	8.1
<b>Montebello</b>	286.1	161.1	11.3	3.5	25.3	46.1
<b>Cinco Lagos</b>	151.3	52.7	9.2	4.6	16.5	11.4
<b>Pojoj</b>	153.3	61.9	10.3	2.1	14.9	29.6
<b>Kichail</b>	516.1	320.5	16.9	6.1	30.6	52.6
<b>Tzisco</b>	227.2	70.0	14.1	2.1	16.1	33.7
<b>Patianú</b>	495.8	364.8	20.3	11.0	24.4	33.1
<b>Yalalush</b>	18.1	1.6	0.4	0.1	42.1	3.8
<b>Dos Lagos</b>	476.6	216.2	31.3	3.5	15.2	62.0

En la Tabla 11 se presentan los valores de las concentraciones de nutrientes registrados para la época fría de secas.

Las concentraciones de NT en los lagos oligotróficos fluctuaron entre  $177.6 \pm 39.0 \mu\text{g/L}$  (Cinco Lagos) y  $1343.4 \pm 383.3 \mu\text{g/L}$  (Dos Lagos). Los valores de PT variaron entre  $4.5 \pm 0.9 \mu\text{g/L}$  (Cinco Lagos) y  $39.8 \pm 9.6 \mu\text{g/L}$  (Tzisco). En cuanto a las proporciones de la relación de NT:PT variaron de  $12.5 \pm 9.4 \mu\text{g/L}$  (Tzisco) a  $73.9 \pm 44.6 \mu\text{g/L}$  (Kichail).

En los lagos eutróficos, el NT tuvo las menores concentraciones en La Encantada ( $1366.4 \pm 152.6 \mu\text{g/L}$ ) y las mayores concentraciones en San Lorenzo ( $2490.0 \pm 296.3 \mu\text{g/L}$ ). En cuanto a las concentraciones de PT Bosque Azul presentó las menores concentraciones, con  $143.4 \pm 19.0 \mu\text{g/L}$  y San Lorenzo las mayores concentraciones, con  $267.9 \pm 27.1 \mu\text{g/L}$ . Los valores de la relación NT:PT variaron de  $7.0 \pm 4.5 \mu\text{g/L}$  (La Encantada) a  $12.1 \pm 10.4 \mu\text{g/L}$  (Bosque Azul).

**Tabla 11.** Valores de nutrientes ( $\mu\text{g/L}$ ) en los lagos durante la época fría de secas. [NT = nitrógeno total, PT = fósforo total, NT:PT = relación de nitrógeno total y fósforo total. Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. - = sin datos].

<b>Cálida-lluvias</b>						
<b>Lago</b>	<b>Ntot</b>		<b>Ptot</b>		<b>Ntot:Ptot</b>	
	<b>Prom.</b>	<b>d.e.</b>	<b>Prom.</b>	<b>d.e.</b>	<b>Prom.</b>	<b>d.e.</b>
<b>Balantetic</b>	121.9	-	13.9	-	8.8	-
<b>Liquidámbar</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Chajchaj</b>	217.0	-	15.5	-	14.0	-
<b>San Lorenzo</b>	2490.0	296.3	267.9	27.1	9.3	10.9
<b>Bosque Azul</b>	1739.7	197.6	143.4	19.0	12.1	10.4
<b>La Encantada</b>	1366.4	152.6	195.3	33.7	7.0	4.5
<b>San José</b>	374.2	42.9	16.4	1.7	22.8	26.0
<b>Esmeralda</b>	30.3	-	0.6	-	54.9	-
<b>Ensueño</b>	199.8	23.5	11.2	1.8	17.9	12.9
<b>Agua Tinta</b>	695.1	107.6	25.4	1.7	27.3	64.2
<b>Montebello</b>	508.1	102.6	22.9	7.6	22.2	13.5
<b>Cinco Lagos</b>	177.6	39.0	4.5	0.9	39.1	45.9
<b>Pojoj</b>	405.1	145.2	7.6	3.7	53.1	39.6
<b>Kichail</b>	1139.5	186.0	15.4	4.2	73.9	44.6
<b>Tzisco</b>	498.1	90.5	39.8	9.6	12.5	9.4
<b>Patianú</b>	520.0	30.9	11.4	0.8	45.6	39.8
<b>Yalalush</b>	38.5	5.0	1.8	0.9	23.0	6.5
<b>Dos Lagos</b>	1343.4	383.3	34.9	11.4	38.5	33.6



En la Tabla 12 se presentan los valores del cociente de Redfield para ambas épocas. En la época cálida de lluvias el nitrógeno fue el nutriente limitante para ocho lagos y el fósforo para nueve. En la época fría de secas el nitrógeno fue el nutriente limitante para seis lagos, mientras que el fósforo lo fue para 11 lagos.

**Tabla 12.** Valores del Cociente de Redfield en los lagos durante ambas épocas. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. - = sin datos].

Lago	Época de lluvias		Época de secas	
	Prom.	Nutriente limitante	Prom.	Nutriente limitante
Balantetic	16.7	Fósforo	8.8	Nitrógeno
Liquidambar	11.6	Nitrógeno	-	-
Chajchaj	21.6	Fósforo	14.0	Nitrógeno
San Lorenzo	-	-	9.3	Nitrógeno
Bosque Azul	12.2	Nitrógeno	12.1	Nitrógeno
La Encantada	13.3	Nitrógeno	7.0	Nitrógeno
San José	11.4	Nitrógeno	22.8	Fósforo
Esmeralda	18.3	Fósforo	54.9	Fósforo
Ensueño	6.3	Nitrógeno	17.9	Fósforo
Agua Tinta	9.2	Nitrógeno	27.3	Fósforo
Montebello	25.3	Fósforo	22.2	Fósforo
Cinco Lagos	16.5	Fósforo	39.1	Fósforo
Pojoj	14.9	Nitrógeno	53.1	Fósforo
Kichail	30.6	Fósforo	73.9	Fósforo
Tzisco	16.1	Fósforo	12.5	Nitrógeno
Patianú	24.4	Fósforo	45.6	Fósforo
Yalalush	42.1	Fósforo	23	Fósforo
Dos Lagos	15.2	Nitrógeno	38.5	Fósforo

## **8.5 Concentración de clorofila-a (Cl-a)**

Los valores de Cl-a se presentan en la Tabla 13. En los lagos oligotróficos las concentraciones fueron muy bajas, registrándose entre 0.2 µg/L (Agua Tinta, Cinco Lagos, Ensueño, Pojoj y Yalalush) y 5.7 µg/L (Patianú), en la época cálida de lluvias. En la época fría de secas la concentración mínima fue de 0.1 µg/L en Yalalush y la máxima fue de 2.3 µg/L en Dos Lagos.

En los lagos eutróficos, en la época cálida de lluvias, varió entre 0.9 µg/L (La Encantada) y 45.7 µg/L (Liquidámbar), mientras que en la época fría de secas varió entre 22.1 µg/L (La Encantada) y 76.9 µg/L (San Lorenzo).

**Tabla 13.** Valores de concentración de clorofila-a (Cl-a  $\mu\text{g/L}$ ) de los lagos en estudio, en ambas épocas. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. (-): sin datos. Mín. = cantidad de Cl-a mínima, Máx. = cantidad de Cl-a máxima, Prom. = promedio y d.e. = desviación estándar].

Lago	Cl-a ( $\mu\text{g/L}$ )					
	Cálida de lluvias			Fría de secas		
	Mín.	Máx.	Prom. $\pm$ d.e.	Mín.	Máx.	Prom. $\pm$ d.e.
Balantetic	-	-	42.1 $\pm$ 5.9	-	-	148.4 $\pm$ 14.1
Liquidámbar	3.6	45.7	45.7 $\pm$ 9.5	-	-	-
Chajchaj	-	-	17.8 $\pm$ 3.1	-	-	111.2 $\pm$ 5.2
San Lorenzo	-	-	-	25.1	76.9	49.8 $\pm$ 3.0
Bosque Azul	18.1	26.0	22.0 $\pm$ 3.7	37.4	56.7	46.9 $\pm$ 4.2
La Encantada	-	-	16.7 $\pm$ 3.7	22.1	70.0	38.9 $\pm$ 2.4
San José	0.2	0.3	0.3 $\pm$ 0.06	0.4	0.8	0.6 $\pm$ 0.06
Esmeralda	-	-	0.8 $\pm$ 0.2	-	-	1.1 $\pm$ 0.01
Ensueño	0.2	0.2	0.2 $\pm$ 0.02	0.4	0.8	0.6 $\pm$ 0.03
Agua Tinta	0.2	0.3	0.3 $\pm$ 0.03	0.6	0.9	0.8 $\pm$ 0.07
Montebello	0.4	0.5	0.5 $\pm$ 0.03	0.3	0.5	0.4 $\pm$ 0.02
Cinco Lagos	0.2	0.3	0.3 $\pm$ 0.04	0.2	0.4	0.3 $\pm$ 0.03
Pojoj	0.2	0.3	0.2 $\pm$ 0.06	0.4	0.6	0.4 $\pm$ 0.03
Kichail	1.17	1.22	1.2 $\pm$ 0.2	0.5	0.9	0.8 $\pm$ 0.05
Tzisco	0.4	1.0	0.6 $\pm$ 0.07	0.5	0.6	0.6 $\pm$ 0.06
Patianú	0.4	0.7	0.5 $\pm$ 0.07	0.6	1.1	0.9 $\pm$ 0.03
Yalalush	0.2	0.3	0.3 $\pm$ 0.02	0.1	0.3	0.2 $\pm$ 0.01
Dos Lagos	-	-	0.3 $\pm$ 0.06	-	-	0.4 $\pm$ 0.2

## 8.6 Estado trófico

En la Tabla 14 se presenta la clasificación de la OCDE para la época cálida de lluvias y la Tabla 15 para la época fría de secas. Los cuerpos lacustres con registros previos de contaminación, circunscritos en la región noroeste han exhibido una variabilidad de estados tróficos que abarcan desde mesotróficos hasta hipereutróficos para las tres variables evaluadas. No obstante, aquellos lagos con un bajo grado de impacto ambiental mantienen estados ultraoligotrófico u oligotrófico, con excepción de ciertos cuerpos de agua que muestran niveles mesotróficos y eutróficos en términos de  $Z_{DS}$  y PT para ambas épocas.

**Tabla 14.** Estado trófico de los lagos en estudio para la época cálida de lluvias, según los criterios del índice OCDE. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. (-): sin datos].

Lagos	Estado trófico			
	$Z_{DS}$ (m)	$Z_{DS}$	Cl-a	PT
Balantetic	1.0	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Mesotrófico
Liquidámbar	0.9	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Chajchaj	0.5	Hipereutrófico	Eutrófico	Mesotrófico
San Lorenzo	-	-	-	-
Bosque Azul	0.6	Hipereutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
La Encantada	0.8	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico
San José	6.8	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Esmeralda	1.9	Eutrófico	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico
Ensueño	9.8	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Agua Tinta	7.2	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Montebello	6.3	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Cinco Lagos	11.3	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Oligotrófico
Pojoj	22.9	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico	Oligotrófico
Kichail	6.4	Oligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico
Tziscoa	14.3	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Patianú	5.2	Mesotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Yalalush	4.4	Mesotrófico	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico
Dos Lagos	9.1	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico

**Tabla 15.** Estado trófico de los lagos en estudio para la época fría de secas, según los criterios del índice OCDE. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. (-): sin datos].

Lagos	Estado trófico			
	Z <sub>DS</sub> (m)	Z <sub>DS</sub>	Cl-a	PT
Balantetic	1.0	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Mesotrófico
Liquidámbar	0.9	Hipereutrófico	-	-
Chajchaj	0.5	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Mesotrófico
San Lorenzo	-	-	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Bosque Azul	0.6	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
La Encantada	0.8	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
San José	6.8	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Esmeralda	1.9	Eutrófico	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico
Ensueño	9.8	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Agua Tinta	7.2	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Montebello	6.3	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Cinco Lagos	11.3	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Oligotrófico
Pojoj	22.9	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico	Oligotrófico
Kichail	6.4	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Tziscoa	14.3	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico	Eutrófico
Patianú	5.2	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico
Yalalush	4.4	Mesotrófico	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico
Dos Lagos	9.1	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Mesotrófico

En la Tabla 16 se presenta la clasificación de Lamparelli para la época cálida de lluvias y la Tabla 17 para la época fría de secas. Los lagos del área noroeste, caracterizados por antecedentes de contaminación, presentan una amplia gama de estados tróficos que incluyen desde mesotróficos hasta hipereutróficos al combinar las dos variables analizadas en la ecuación de Lamparelli. En lo que respecta a los lagos de la región suroeste, con menor exposición a las implicaciones antropogénicas, mayoritariamente permanecen con niveles ultraoligotróficos, salvo dos lagos que muestra un estado eutrófico.

**Tabla 16.** Estado trófico de los lagos en estudio para la época cálida de lluvias, según los criterios del índice de Lamparelli. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. (-): sin datos].

Lagos	Estado trófico		
	CI-a	PT	IET
Balantetic	Supereutrófico	Mesotrófico	Hipereutrófico
Liquidámbar	Supereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Chajchaj	Eutrófico	Oligotrófico	Supereutrófico
San Lorenzo	-	-	-
Bosque Azul	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
La Encantada	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
San José	Ultraoligotrófico	Mesotrófico	Mesotrófico
Esmeralda	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico
Ensueño	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Ultraoligotrófico
Agua Tinta	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Ultraoligotrófico
Montebello	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Ultraoligotrófico
Cinco Lagos	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Ultraoligotrófico
Pojoj	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Ultraoligotrófico
Kichail	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Ultraoligotrófico
Tzisco	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Ultraoligotrófico
Patianú	Ultraoligotrófico	Mesotrófico	Ultraoligotrófico
Yalalush	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico
Dos Lagos	Ultraoligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico

Los lagos de la zona NO reflejan un estado hipereutrófico, mientras que los lagos prístinos muestran una categoría ultraoligotrófica, exceptuando Dos lagos y Tzisco, que exhiben una condición hipereutrófica.

**Tabla 17.** Estado trófico de los lagos en estudio para la época fría de secas, según los criterios del índice de Lamparelli. [Los lagos se encuentran ordenados de NO a SE. (-): sin datos].

Lagos	Estado trófico		
	CI-a	PT	IET
Balantetic	Hipereutrófico	Oligotrófico	Hipereutrófico
Liquidámbar	-	-	-
Chajchaj	Hipereutrófico	Oligotrófico	Hipereutrófico
San Lorenzo	Supereutrófico	Hipertrófico	Hipereutrófico
Bosque Azul	Supereutrófico	Supereutrófico	Hipereutrófico
La Encantada	Supereutrófico	Supereutrófico	Hipereutrófico
San José	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Ultraoligotrófico
Esmeralda	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico
Ensueño	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Ultraoligotrófico
Agua Tinta	Ultraoligotrófico	Mesotrófico	Oligotrófico
Montebello	Ultraoligotrófico	Mesotrófico	Ultraoligotrófico
Cinco Lagos	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico
Pojoj	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico
Kichail	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Ultraoligotrófico
Tziscoa	Ultraoligotrófico	Mesotrófico	Hipereutrófico
Patianú	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Ultraoligotrófico
Yalalush	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico
Dos Lagos	Ultraoligotrófico	Mesotrófico	Hipereutrófico

En la Tabla 18 se presenta una comparación entre el índice de la OCDE y el índice de Lamparelli, para ambas épocas. Ambos coinciden en la clasificación “Ultraoligotrófico” en los lagos San José, Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta, Montebello, Cinco Lagos, Pojoj, Tziscoa, Patianú y Yalalush. Balantetic es clasificado como hipereutrófico por la OCDE en ambas épocas y por el índice de Lamparelli es clasificado como supereutrófico en la época cálida de lluvias y como hipereutrófico en la época fría de secas. Chajchaj, Bosque Azul y La Encantada son clasificados como eutrófico por ambos índices en la época cálida de lluvias. Para la época fría de secas la

OCDE los clasifica como hipereutrófico, mientras que Lamparelli los clasifica como hipereutrófico (Chajchaj) y supereutrófico (Bosque Azul y La Encantada).

**Tabla 18.** Comparación del estado trófico de los lagos en estudio, por ambos índices (basados en Cl-a) en ambas épocas. [Los lagos se encuentran ordenados de NW a SE. (-): sin datos].

Lago	Cálida de lluvias		Fría de secas	
	OCDE	Lamparelli	OCDE	Lamparelli
<b>Balantetic</b>	Hipereutrófico	Supereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
<b>Liquidámbar</b>	Hipereutrófico	Supereutrófico	-	-
<b>Chajchaj</b>	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
<b>San Lorenzo</b>	-	-	Hipereutrófico	Supereutrófico
<b>Bosque Azul</b>	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Supereutrófico
<b>La Encantada</b>	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Supereutrófico
<b>San José</b>	Ultraoligotrófico		Ultraoligotrófico	
<b>Esmeralda</b>	Ultraoligotrófico		Ultraoligotrófico	
<b>Ensueño</b>	Ultraoligotrófico		Ultraoligotrófico	
<b>Agua Tinta</b>	Ultraoligotrófico		Ultraoligotrófico	
<b>Montebello</b>	Ultraoligotrófico		Ultraoligotrófico	
<b>Cinco Lagos</b>	Ultraoligotrófico		Ultraoligotrófico	
<b>Pojoj</b>	Ultraoligotrófico		Ultraoligotrófico	
<b>Kichail</b>	Oligotrófico	Ultraoligotrófico	Ultraoligotrófico	
<b>Tzisco</b>	Ultraoligotrófico		Ultraoligotrófico	
<b>Patianú</b>	Ultraoligotrófico		Ultraoligotrófico	
<b>Yalalush</b>	Ultraoligotrófico		Ultraoligotrófico	
<b>Dos Lagos</b>	Ultraoligotrófico		Ultraoligotrófico	



La Figura 3 ofrece una representación comparativa entre un lago oligotrófico y un lago eutrófico de Montebello, destacando las distintivas características asociadas a sus respectivos estados tróficos.

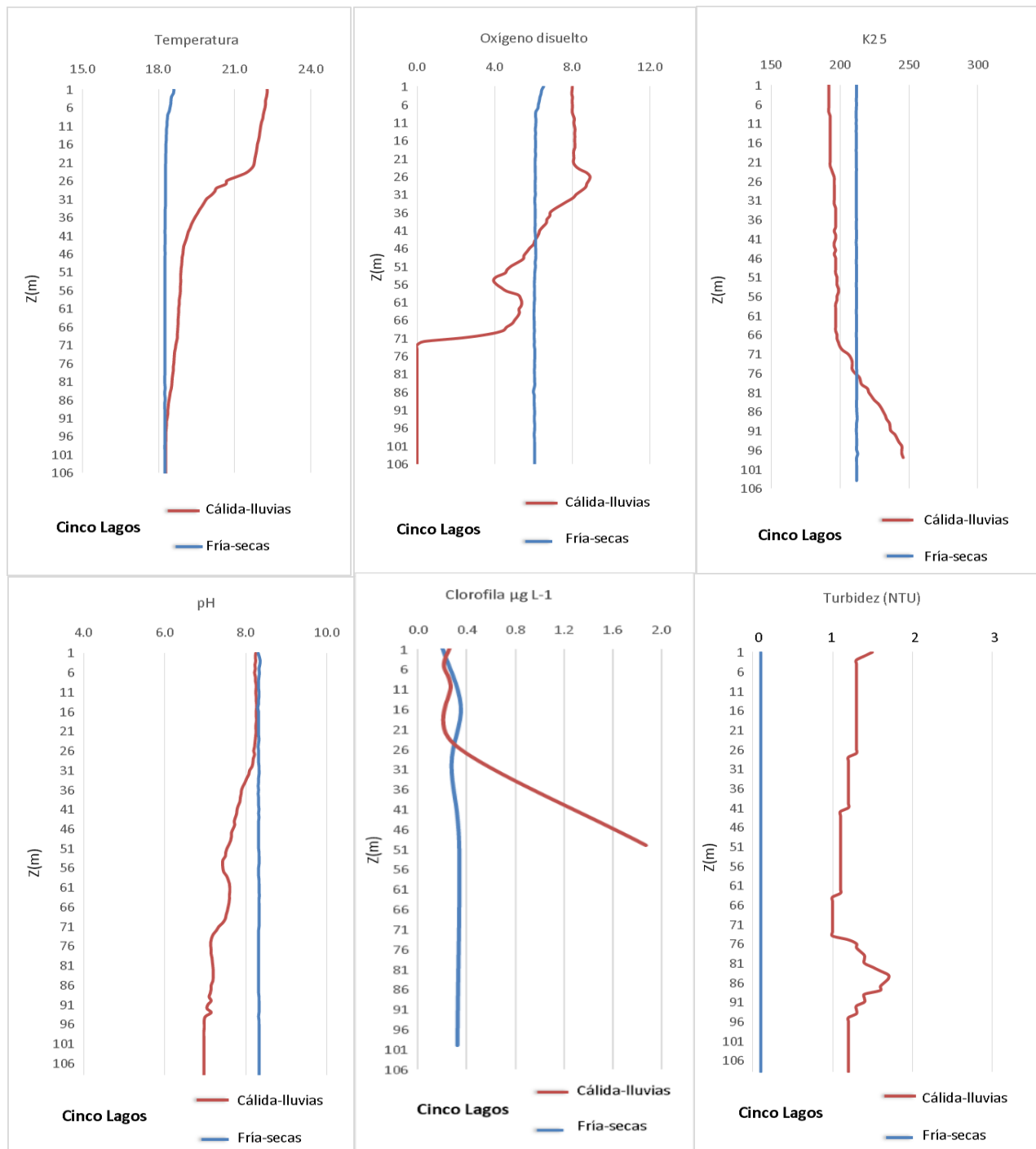


**Figura 3.** A la izquierda se encuentra el lago Cinco Lagos con aguas transparentes y azules, mientras que a la derecha se sitúa el lago La Encantada, con un aspecto turbio y de color verde (Fotografías de Mariana Vargas Sánchez tomadas de Alcocer *et al.*, 2023).

## 8.7 Comparación entre lagos

### 8.7.1 Lago profundo ultraoligotrófico: Cinco Lagos

Cinco Lagos se toma como ejemplo lago de tipo ultraoligotrófico. En la época cálida de lluvia mostró estratificación térmica con una temperatura promedio de  $19.5 \pm 1.4$  °C. Con respecto al oxígeno disuelto, presentó concentraciones máximas en el epilimnion de 8.9 mg/L y condiciones anóxicas en el hipolimnion. En cuanto a los valores de conductividad eléctrica en el epilimnion fueron de 192  $\mu$ S/cm y valores máximos en el hipolimnion de 246  $\mu$ S/cm. El pH tuvo valores mínimos en el hipolimnion (7.0 unidades) y máximos en el epilimnion (8.3 unidades). La Cl-*a* presentó valores mínimos de 0.21  $\mu$ g/L y valores máximos de 0.27  $\mu$ g/L, en el epilimnion. La turbidez presentó valores muy bajos (1.1 NTU en el hipolimnion y 1.6 NTU en el epilimnion). Durante la época fría de secas el lago presentó perfiles homogéneos en todas las variables, lo que es indicativo de que se encontraba circulando (Fig. 2). Cinco Lagos en ambas épocas se clasificó como ultraoligotrófico, de acuerdo con las concentraciones de Cl-*a* y en ambos índices (OCDE y Lamparelli).



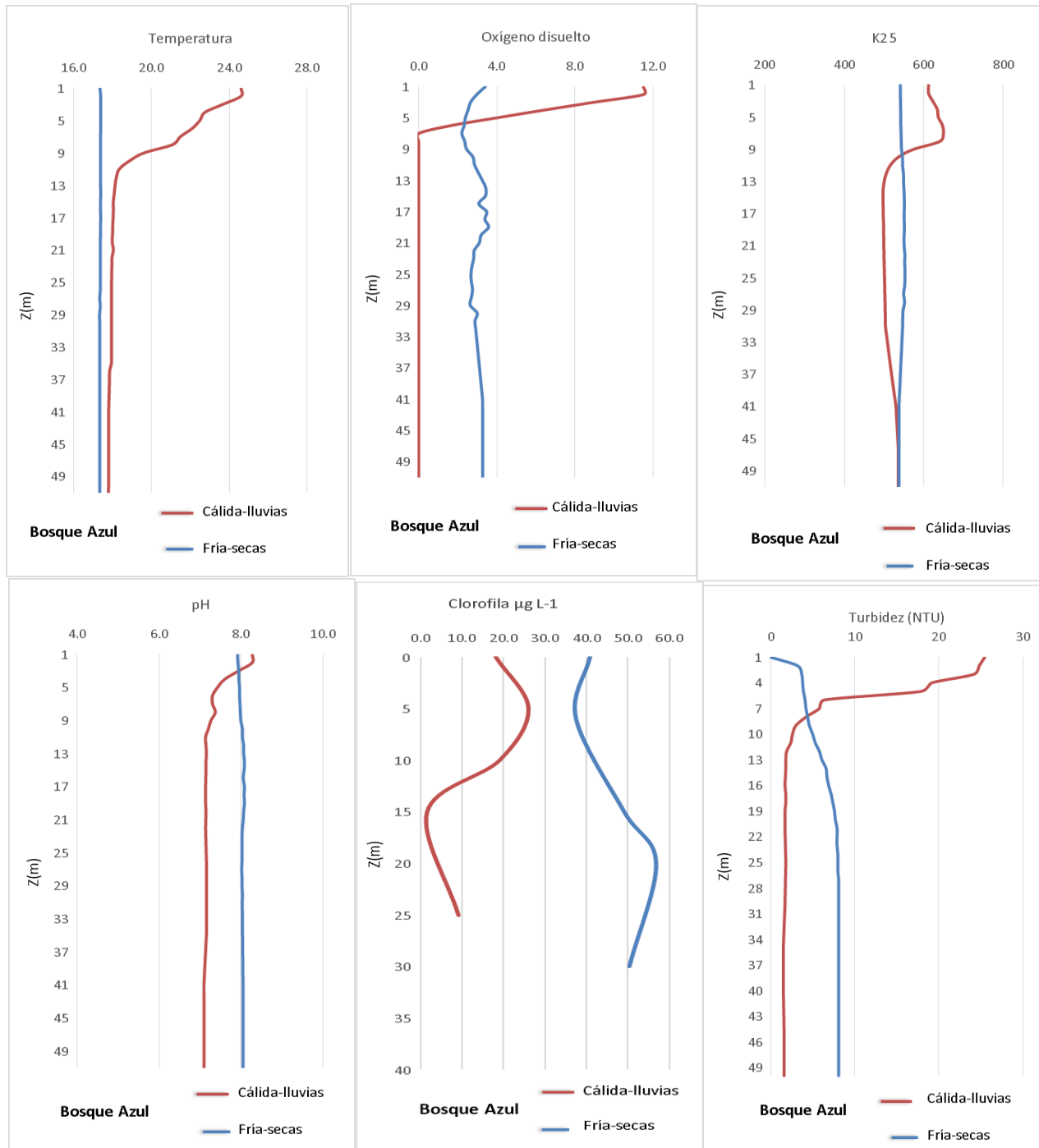
**Figura 4.** Perfiles verticales de temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L), conductividad eléctrica (µS/cm), pH, Cl-a (µg/L) y turbidez (NTU) en Cincro Lagos, representando un lago profundo ultraoligotrófico en la época cálida de lluvias (línea roja) y en la época fría de secas (línea azul).

### 8.7.2 Lago profundo eutrófico: Bosque Azul

Bosque Azul se toma como ejemplo de lago de tipo eutrófico. Durante la época cálida de lluvias mostró estratificación térmica con una temperatura promedio de  $18.8 \pm 1.9$  °C y un perfil clinogrado de oxígeno disuelto con concentraciones máximas en el epilimnion (11.5 mg/L) y condiciones anóxicas en el hipolimnion. La conductividad eléctrica disminuyó con la profundidad, con concentraciones que variaron entre 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (epilimnion) y 498  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (hipolimnion). El pH presentó valores máximos en el epilimnion (8.3 unidades) y mínimos en el hipolimnion (7.1 unidades). En cuanto a la *Cl-a* presentó valores máximos en el epilimnion de 26.0  $\mu\text{g}/\text{L}$  (a los 5 m de profundidad) y los valores mínimos en el hipolimnion con 1.6  $\mu\text{g}/\text{L}$  (a los 15 m de profundidad), mientras que la turbidez disminuyó conforme la profundidad se incrementó, con valores que variaron entre 26 NTU (epilimnion) y 6 NTU (hipolimnion).

Durante la época fría de secas, Bosque Azul presentó perfiles homogéneos en toda la columna de agua lo que es indicativo de que estaba circulando (Fig. 3).

Bosque Azul de acuerdo con las concentraciones de *Cl-a* en la época cálida de lluvias se clasificó como eutrófico, en ambos índices y en la época fría de secas, como hipereutrófico, según el índice de la OCDE y como supereutrófico, de acuerdo con el índice de Lamparelli.



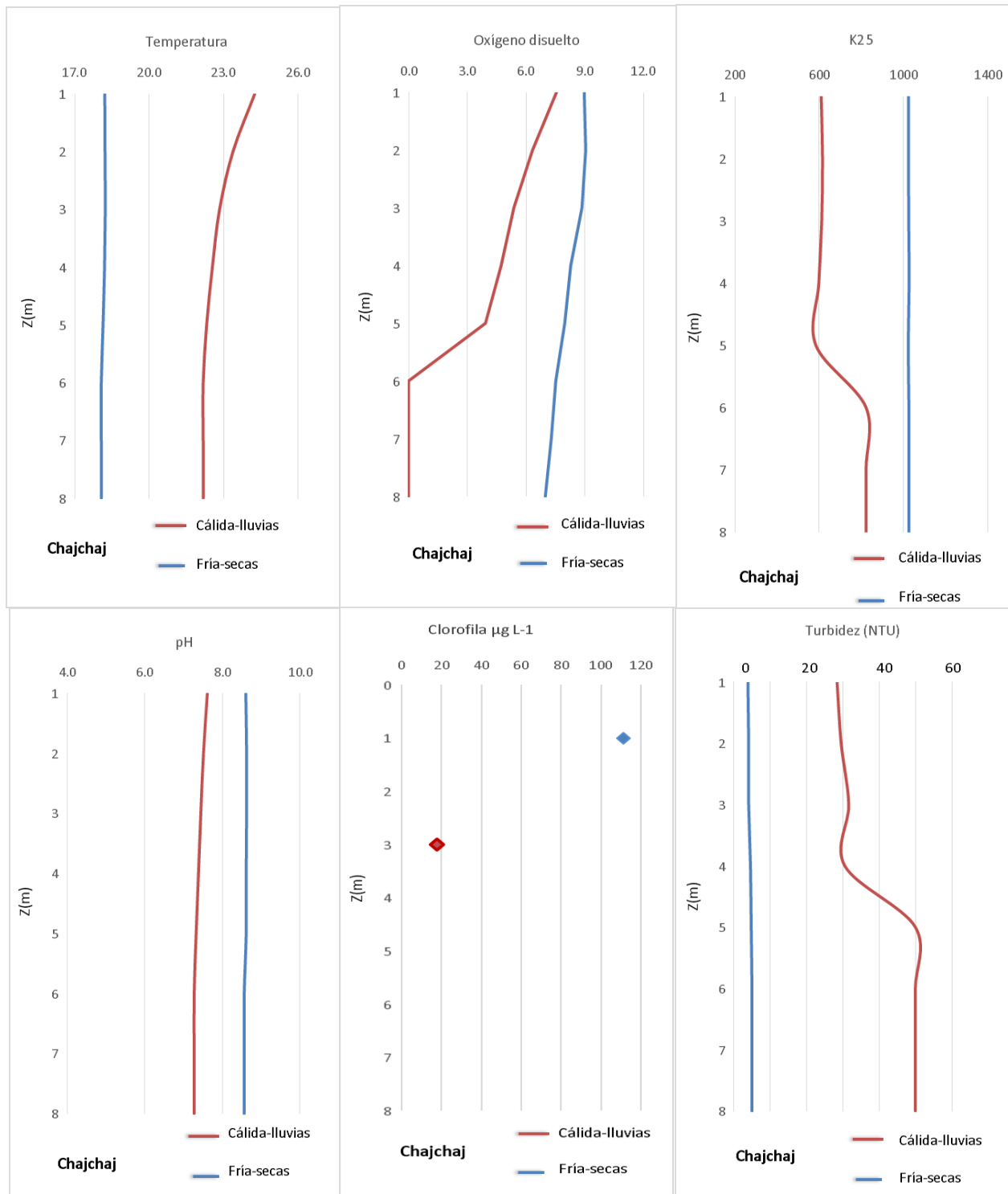
**Figura 5.** Perfiles verticales de temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L), conductividad eléctrica (µS/cm), pH, Cl-a (µg/L) y turbidez (NTU) en Bosque Azul, representando un lago profundo eutrófico en la época cálida de lluvias (línea roja) y en la época fría de secas (línea azul).

### 8.7.3 Lago somero eutrófico: Chajchaj

Chajchaj se toma como ejemplo de tipo de lago eutrófico. Durante la época cálida de lluvias presentó temperaturas homogéneas a lo largo de la columna de agua, con un promedio general de  $22.7 \pm 0.7$  °C. Mostró un perfil ortógrafo de oxígeno disuelto con concentraciones máximas en la superficie de 7.5 mg/L y anoxia en el agua de fondo. La conductividad eléctrica presentó valores entre 585 y 823  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que el pH promedio fue de  $7.4 \pm 0.1$  unidades. La *Cl-a* presentó una concentración promedio de  $17.8 \pm 3.1$   $\mu\text{g}/\text{L}$  (a los 3 m de profundidad), mientras que la turbidez promedio fue de  $30 \pm 1$  NTU.

Durante la época fría de secas, Chajchaj presentó perfiles homogéneos de todas las variables lo que indicó que se encontraba circulando (Fig. 4).

Chajchaj en la época cálida de lluvias se clasificó como eutrófico y en la época fría de secas, como hipereutrófico, de acuerdo con las concentraciones de *Cl-a* y en ambos índices.



**Figura 6.** Perfiles verticales de temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L), conductividad eléctrica (µS/cm), pH, Cl-a (µg/L) y turbidez (NTU) en Chajchaj, representando un lago somero eutrófico en la época cálida de lluvias (línea roja) y en la época fría de secas (línea azul).

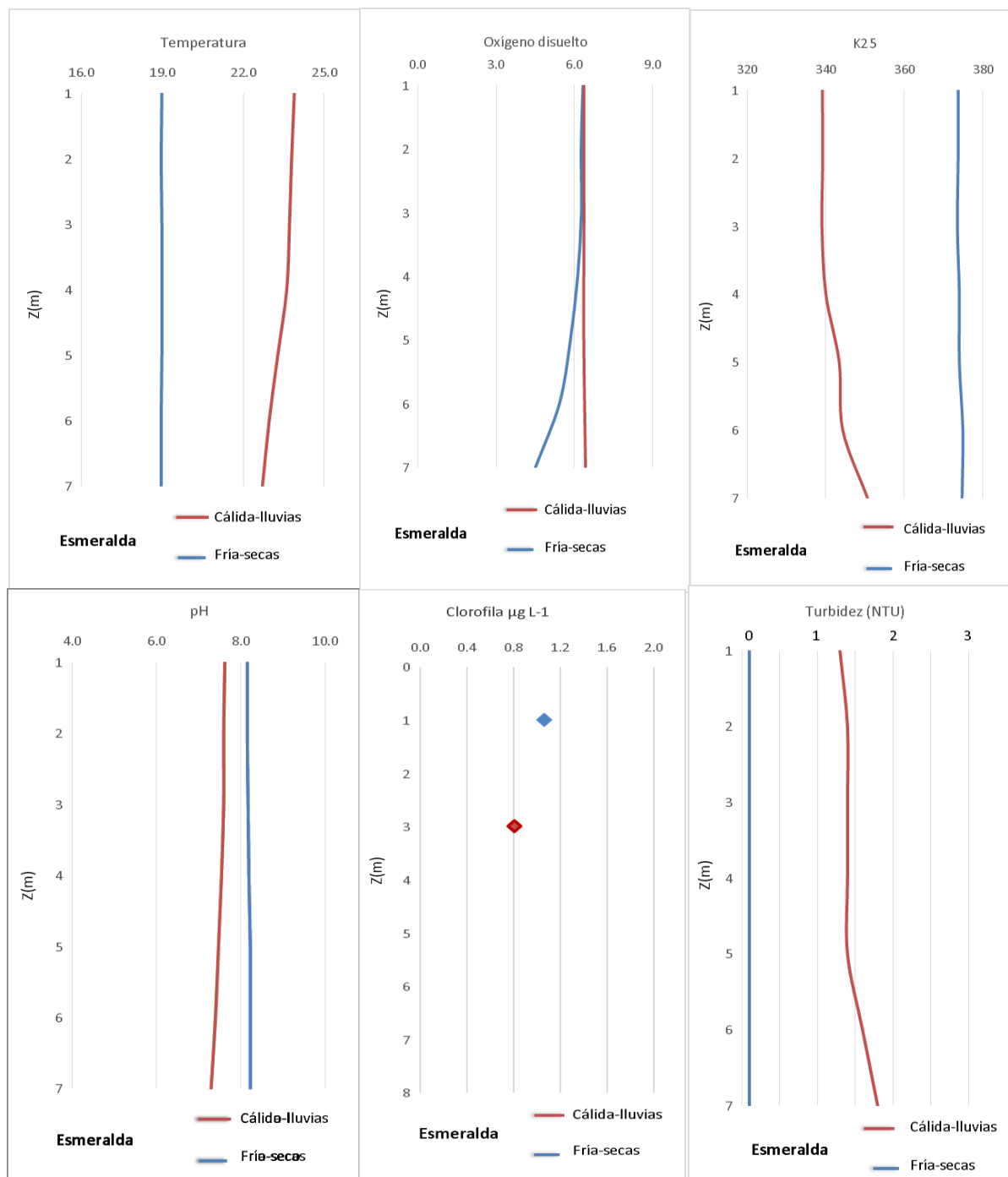
#### **8.7.4 Lago somero ultraoligotrófico: Esmeralda**

Esmeralda se toma como ejemplo de lago de tipo de ultraoligotrófico, durante la época cálida de lluvias presentó una temperatura homogénea ( $23.4 \pm 0.4$  °C) a lo largo de toda la columna, así como las concentraciones de OD ( $5.8 \pm 0.7$  mg/L),  $K_{25}$  ( $342 \pm 4.3$   $\mu$ S/cm), pH ( $7.5 \pm 0.1$  unidades) y turbidez ( $1 \pm 0$  NTU). La Cl-*a* presentó una concentración baja de  $0.8 \pm 0.2$   $\mu$ g/L (superficial).

Durante la época fría de secas, también presentó perfiles homogéneos lo que indicó que estaba circulando (Fig. 5).

Esmeralda en la época cálida de lluvias y en la época fría de secas, se clasificó como ultraoligotrófico, de acuerdo con las concentraciones de Cl-*a* y en ambos índices.





**Figura 7.** Perfiles verticales de temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L), conductividad eléctrica (µS/cm), pH, Cl-a (µg/L) y turbidez en Esmeralda, representando un lago somero oligotrófico en la época cálida de lluvias (línea roja) y en la época fría de secas (línea azul).

## 9. DISCUSIÓN

De acuerdo con la concentración de clorofila-*a* (Cl-*a*), la transparencia de la columna de agua ( $Z_{DS}$ ) y el fósforo total (PT), se determinó el estado trófico de 18 lagos mediante la aplicación del Índice de la OCDE (1982) y el índice propuesto por Lamparelli (2004). La clasificación del estado trófico generalmente se basa en el nutriente que representa una limitación y en las concentraciones de clorofila-*a*. En este estudio la clasificación de los lagos en oligotróficos fue coincidente en ambos índices, en ambas épocas, pero al ir aumentando el estado trófico fue cambiando su clasificación.

Al comparar ambos índices se optó por usar el criterio de la concentración de Cl-*a* debido a su capacidad para indicar directamente la cantidad de fitoplancton presente en el agua. Dado que el fitoplancton responde a las concentraciones de fósforo y nitrógeno, la medición de la Cl-*a* se convirtió en un indicador valioso del estado trófico.

El contraste entre ambos índices se debe a los diferentes intervalos de las concentraciones de Cl-*a* y PT (ver Tabla 2 y Tabla 3). Por ejemplo, al considerar la concentración de PT, se observa que los lagos se clasifican en diferentes estados tróficos. Esto se debe a que, en el índice propuesto por la OCDE, se establece que un ambiente se clasifica como eutrófico cuando la concentración de PT supera los 35  $\mu\text{g/L}$ , un umbral que resulta considerablemente menor a los límites propuestos para la misma categorización trófica en ecosistemas tropicales, como indica Lamparelli, con 52  $\mu\text{g/L}$ .

Además, la interpretación del índice OCDE se torna un poco compleja, ya que cada parámetro se analiza de manera independiente, sin posibilidad de integración, a diferencia del índice de Lamparelli, que engloba estos datos en una ecuación (Tabla 3). Esto refleja de manera clara la naturaleza multidimensional del estado trófico, respaldando la afirmación de Janus y Vollenweider (1981) en la que resulta imposible establecer una limitación estricta entre las diversas categorías tróficas.

Tras un análisis exhaustivo de los dos índices empleados, se perfila una inclinación hacia la aplicación del índice propuesto por Lamparelli para la evaluación del sistema lacustre de

Montebello. Este enfoque se justifica en parte por la observación de que modelos como los desarrollados por Carlson y OCDE, están diseñados con base en las estaciones más productivas en los lagos templados, que son la primavera y el verano. Por el contrario, en los ecosistemas tropicales, la alta producción primaria puede ser una constante a lo largo de todas las épocas del año, debido a las elevadas temperaturas. Por ende, la aplicación de índices ideados para ambientes templados podría propiciar una sobreestimación del estado trófico en los lagos tropicales (Cunha *et al.*, 2013).

Es pertinente mencionar que, aunque el índice de Lamparelli es comúnmente utilizado en Brasil y otros países de América del Sur, su implementación también ha sido documentada en algunos lagos de México en el lago Cajititlán, un cuerpo de agua con características tropicales, lo que resalta su potencial para este tipo de ambientes (Díaz-Torres *et al.*, 2021).

Durante un extenso periodo se ha sostenido que el desarrollo del fitoplancton en lagos de latitudes altas está mayormente restringido por el fósforo, pero en el caso de las regiones tropicales y subtropicales, diversos autores (p. ej. Lewis, 1996; Tallin y Lemoalle, 1998, Lewis, 2002) han señalado la limitación por nitrógeno en ciertos escenarios. Este fundamento es de esperar, ya que las fuentes naturales de fósforo se remontan en la erosión química de las rocas, un proceso altamente sensible a las variaciones térmicas, que se manifiesta a velocidades sustancialmente superiores en zonas con altas temperaturas (Meybeck, 1979).

En contraparte, históricamente, los lagos de Montebello han mostrado una mayor limitación de nitrógeno durante la época cálida de lluvias, cuando la columna de agua permanece estratificada. Esta situación se vincula con la intensificación de los procesos de nitrificación y desnitrificación, inducidos por temperaturas más elevadas y por los prolongados períodos de anoxia hipolimnética (Lewis, 2002). Por otra parte, en el transcurso de la época fría de secas, los lagos oligotróficos parecieron estar más limitados por el fósforo, debido a sus condiciones kársticas (Alcocer *et al.*, 2016a). No obstante, en el caso de los lagos impactados, la limitación predominante fue el nitrógeno, lo cual sugiere la influencia de las contribuciones antropogénicas de fósforo derivadas del uso de agroquímicos en la agricultura (CONANP, 2007).

Los lagos en regiones tropicales y subtropicales experimentan un continuo aumento en las tasas de actividad fotosintética en comparación con aquellos en climas templados. La notable estación de lluvias en estas áreas genera cambios en las propiedades fisicoquímicas del agua, ejerciendo una influencia de importancia significativa en la dinámica del fitoplancton (Lewis, 1974). Este evento puede contemplarse cuando una gran cantidad de nutrientes son arrastrados por el escurrimiento superficial a causa de las intensas lluvias, y que posteriormente transcurre una dilución gradual a medida que el nivel del agua se eleva (Gradilla-Hernández *et al.*, 2020). Por ende, durante la época fría de secas, se apreció un incremento en el nivel trófico en los lagos afectados de Montebello.

Adicionalmente a los aspectos anteriormente mencionados, es necesario enfatizar que la circulación también desempeña un papel crucial en estos lagos, ya que facilita la disponibilidad de nutrientes que, en la columna de agua, han sido remineralizados en el hipolimnion. (Wetzel, 2001). En los ecosistemas acuáticos eutrofizados, se altera la biota y la diversidad biológica, provocando una proliferación de algas, cianobacterias y macrófitas. El desarrollo de estos organismos impide que la luz penetre hasta regiones profundas de la columna de agua. Las consecuencias directas son la imposibilidad de llevar a cabo la fotosíntesis salvo en una porción reducida de la columna de agua y simultáneamente, el excedente de materia orgánica generada de superficie se transporta al fondo, lo cual aumenta la actividad metabólica, así como el consumo de oxígeno de los organismos descomponedores. El fondo del ecosistema acuático se va convirtiendo de forma gradual en un ambiente anaerobio (Roldán y Ramírez, 2008).

Se presenta una notable diferencia en la transparencia del agua entre los lagos oligotróficos (aguas cristalinas) y los lagos eutróficos (aguas turbias). La turbidez, obstaculiza el paso de la luz, por tal razón la  $Z_{EU}$  de los lagos eutróficos es somera, en contraste con los lagos oligotróficos donde se registró una  $Z_{EU}$  de mayor profundidad, especialmente en el lago Pojoj (73.1 m) en la época cálida de lluvias.

Vargas-Sánchez *et al.* (2022) han reportado que el seston, concepto que engloba la densidad de materiales finamente particulados suspendidos en el agua, emerge como una variable clave para comprender los cambios registrados en los cuerpos de agua del PNLM. Las características

ambientales provocan una amplia variación espacial en la concentración de seston, el cual tiene consecuencias significativas en  $Z_{EU}$  y en la estructura térmica de los lagos. Los mismos autores encontraron una fuerte correlación significativa con la  $Z_{EU}$  (negativa) y con la  $Cl-a$  (positivo), en ambas épocas. Esta correlación sugiere que la alta productividad primaria es responsable de la turbidez biogénica en los lagos.

La turbidez del agua afecta su transparencia y ocasiona una acelerada atenuación de la luz solar, razón por la cual la energía regularmente se queda en la capa superficial. De acuerdo con Vargas-Sánchez *et al.* (2022) la existencia de una fuerte correlación entre  $Z_{EU}$  y con el seston indica que la extinción de la luz entre los lagos se incrementa con el aumento de partículas por efecto de la dispersión, refracción y absorción de la luz, lo que resulta en una  $Z_{EU}$  más delgada, una relación  $Z_{EU}:Z_{MIX}$  reducida y una porción cada vez mayor de  $Z_{MIX}$  ubicada debajo de  $Z_{EU}$ . De este modo, el máximo cambio de temperatura ocurre en los metros de la superficie, contribuyendo a la formación de un fondo anóxico con alta concentración de nutrientes. En cambio, los lagos oligotróficos profundos exhibieron termoclinas anchas y con mayor profundidad, mostrando que la atenuación de la energía lumínica se lleva a cabo de manera paulatina en la columna de agua.

En relación a los perfiles verticales de oxígeno disuelto (OD) de los lagos someros oligotróficos, muestran la presencia de concentraciones elevadas de OD en toda columna de agua. En cambio, los lagos someros eutróficos, así como los lagos profundos, eutróficos y oligotróficos, mostraron un perfil clinógrado en la época cálida de lluvias, cuando se estratifican. Este patrón de distribución vertical de OD se observa en cuerpos de agua estratificados con una alta productividad primaria. Notoriamente, se produce una reducción significativa de OD en el hipolimnion, como resultado de la descomposición aeróbica de la materia orgánica generada en el epilimnion y por un metabolismo microbiano acelerado, procesos que han descrito varios autores (p. ej., Lampert y Sommer, 2007).

La reducción de OD de los lagos eutróficos y oligotróficos profundos puede suceder por algunos fenómenos, como la estratificación térmica, así como por las diversas reacciones metabólicas que se originan dentro de ellos, independientemente de sus condiciones tróficas para los lagos tropicales (Ryding y Rast, 1992). En este contexto, la presencia de una termoclina desempeña un

papel importante al contribuir de manera significativa a la creación de un hipolimnion anóxico, siendo este evento más acentuado en los lagos tropicales debido a su ubicación geográfica, donde las temperaturas son elevadas e incrementa las diferencias de densidad a menores cambios de temperatura. Este escenario conlleva a una reducción de OD y un aumento en el consumo por el incremento del metabolismo microbiano.

Investigaciones llevadas a cabo en lagos brasileños (Esteves, 1998) sugieren que existen dos factores principales y con influencia indirecta, en el déficit de oxígeno en sistemas acuáticos. Estos factores son la extensión del periodo de estratificación térmica y la concentración de materia orgánica en el agua. Sin embargo, en algunos perfiles verticales de lagos tropicales analizados, se identificó un marcado déficit de oxígeno en el hipolimnion, independiente del patrón térmico. Estas pérdidas fueron vinculadas con procesos de descomposición aeróbica, la respiración de organismos microbianos y con el efecto del viento, que genera un “fetch” a medida que sopla a lo largo de la superficie de los lagos (Roldán y Ramírez, 2008).

Los valores de conductividad generalmente se situaron por debajo de 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los lagos oligotróficos, mientras que, para los lagos eutróficos, se observaron valores superiores a 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este conjunto de lagos corresponde al grupo identificado por Mora *et al.* (2017) como los que reciben una mayor aportación de concentraciones de sulfatos y cloruros provenientes del drenaje de la ciudad de Comitán, además de la erosión del suelo. Normalmente, los lagos en zonas tropicales suelen tener valores elevados de conductividad, ya que son cuerpos de agua que generalmente acogen mayor escorrentía (Roldán y Ramírez, 2008), como el caso de los lagos eutróficos del PNLM. La cantidad de sedimentos que son arrastrados por las precipitaciones afectan las concentraciones de iones del agua y, con ello, los valores de conductividad (Mora *et al.*, 2017).

En cuanto a los valores de pH en los lagos del PNLM fue mayor en la época fría de secas, en comparación con la época cálida de lluvias. Se ha descrito que los sistemas de las zonas bajas tropicales presentan rangos de pH más amplios (5.0 - 9.0), principalmente, en lagos kársticos con dominancia de  $\text{CaCO}_3$  (Roldán y Ramírez, 2008). Esto se observó en los perfiles verticales de los lagos profundos, los cuales mostraron valores altos de pH en la superficie y fueron disminuyendo

progresivamente hacia el fondo.

Este patrón hallado no solo se correlaciona con la interacción compleja entre diversos procesos biogeoquímicos que ocurren dentro del cuerpo de agua, sino también con el régimen hídrico de los lagos, el cual es condicionado por dos fuentes: las aguas superficiales y las aguas subterráneas (Vázquez y Méndez, 1994). Estas últimas tienden a tener un pH más ácido por la liberación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como consecuencia de la respiración del suelo, lo que conlleva al percolamiento del agua hasta alcanzar el manto freático (Winter *et al.*, 1998) y, posteriormente, su flujo hacia los ecosistemas del PNLM. En el caso específico de los lagos eutróficos examinados, tuvieron un pH ligeramente alcalino o básico, dado por la actividad fotosintética en superficie y, probablemente, por el aporte de las aguas residuales.

Los lagos caracterizados con estado trófico elevado se encuentran en la región NO, en la zona de planicie. Una de las causas de su eutrofización es el aporte de aguas residuales ricas en materia orgánica por parte de la ciudad de Comitán Domínguez al Río Grande de Comitán, así como el aporte de drenaje agrícola de las amplias zonas de cultivo que se encuentran a lo largo de su trayectoria a las “Lagunas de Montebello”. Este aporte de materia orgánica y compuestos ricos en N y P se lleva a cabo tanto por escorrentía superficial como por aporte subterráneo (CONAGUA, 2009).

Se menciona (CONANP, 2007) que en los últimos 30 años la agricultura (31%) se ha intensificado en la región, principalmente con cultivos de maíz, jitomate y algunas hortalizas, en áreas anteriormente boscosas (reducción del 51.6 %). Dentro de la cuenca se identifican dos tipos de actividad agrícola: la de temporal y la de riego, representando un 23% y un 8% del total de terrenos de cultivo respectivamente (Alcocer *et al.*, 2023). El cambio de uso de suelo (de áreas boscosas a áreas agrícolas) ha favorecido el deterioro de los lagos impactados a través del enriquecimiento de nutrientes (Alcocer *et al.*, 2018) y, probablemente, continuará teniendo un impacto significativo en la calidad del agua de los lagos.

Es innegable que el paradigma agrícola vigente, en combinación con la deforestación y el crecimiento urbano, han demostrado ser un sistema insostenible para el sistema lacustre, dado por

su pernicioso efecto sobre la integridad edáfica, propiciando tanto la compactación como una erosión ambiental de magnitud enorme (CONANP, 2007). Esta disminución de la cobertura vegetal en la región de Montebello augura un incremento en la temperatura ambiental acompañado de una reducción en la capacidad de retención de nutrientes en las aguas superficiales (Alvarado-Velázquez, 2017). En virtud de tales apreciaciones, se atisba la estrecha relación entre la problemática de la deforestación en la zona NO y los hallazgos de este estudio en los lagos catalogados como eutróficos. La turbidez, el aumento térmico, la disminución de la zona eufrótica, así como las elevadas concentraciones de nutrientes y biomasa fitoplanctónica, constituyen los signos irrefutables de dicho vínculo.

Aunado a ello, durante la temporada cálida de lluvias las inundaciones, propias de la región kárstica tropical, crean conexiones temporales entre lagos que, en otras circunstancias, permanecerían aislados en la superficie. Esta interconexión efímera posibilita la transferencia de agua y contaminantes entre los cuerpos de agua, lo que, a su vez, puede ejercer una repercusión sustancial tanto en la calidad del agua como en la biodiversidad de los lagos que no están directamente afectados por las actividades humanas. Además, estas interconexiones pueden agravar los impactos en los lagos afectados, especialmente por los canales construidos por las comunidades locales, que fomenta el intercambio de agua y contaminantes entre los recursos hídricos (Alcocer *et al.*, 2018).

Esta dinámica singular subraya la importancia de considerar no sólo las características geológicas y los patrones de flujo de agua que distinguen a los ambientes kársticos, sino también la variabilidad estacional inherente a la ecología lacustre. Inclusive incorporar información concerniente a las actividades antropogénicas y su correlación con el proceso de la eutrofización proporciona un enfoque integral para la investigación, facilitando la comprensión de las complejas interacciones que interfieren en estos cuerpos de agua. Por consiguiente, la gestión y conservación efectivas de estos ecosistemas únicos deben abordar estas diferencias y las implicaciones que tienen para la salud de los lagos y la biodiversidad en esta región kárstica.

Finalmente, los datos recopilados confirman la presencia de un deterioro ambiental, manifestado con claridad en la eutrofización observada en los lagos de la zona NO. A pesar de la intervención preponderante de los agentes antropogénicos, la geología kárstica confiere una mayor



susceptibilidad y vulnerabilidad a la contaminación en este distrito lacustre. Este estudio se erige como un paso esencial en la fase preliminar de la planificación de acciones de gestión, permitiendo identificar las verdaderas razones del estado trófico actual de los lagos, cuantificando los cambios limnológicos ocasionados por la perturbación e identificando los nutrientes que limitan la productividad primaria.

Al comprender las fuentes que contribuyen a la eutrofización y los cambios que hayan surgido a partir de ello, sienta las bases para el desarrollo e implementación de planes de manejo ecológico efectivos y confiables que controlen de manera sostenible este fenómeno, aunque los resultados de dichas medidas se visualicen en un plazo prolongado.

## 10. CONCLUSIONES

1. Las actividades antrópicas intensificadas en la zona NO repercuten de manera negativa en los lagos de planicie, eutrofizándolos.
2. Los lagos ubicados en la zona de planicie del NO presentan un estado trófico que va de mesotrófico a hipereutrófico, mientras que los lagos de montaña ubicados en el SE son de ultraoligotróficos a oligotróficos.
3. Los lagos eutróficos presentaron temperaturas más cálidas ( $>20$  °C), sobresaturación de OD en la capa superficial, termoclinas más someras y estrechas, mayor conductividad eléctrica, menor transparencia y mayores concentraciones de nutrientes y clorofila-*a*.
4. Los lagos oligotróficos presentaron temperaturas más bajas ( $<20$  °C), saturación de OD en la capa superficial, termoclinas más profundas y anchas, menor conductividad eléctrica, mayor transparencia y menores concentraciones de nutrientes y clorofila-*a*.
5. El índice de Lamparelli mostró ser la elección más apropiada para el estudio de los lagos tropicales. Su capacidad para integrar diversos parámetros en una ecuación facilitó una determinación precisa del Índice de Estado Trófico (IET) de cada uno de los lagos.
6. El nutriente limitante de la producción primaria en los lagos del PNLM es el fósforo dado por las características del ambiente kárstico que lo precipita. No obstante, se observaron casos donde el nitrógeno también actuó como factor limitante.

## 11. REFERENCIAS

- Aguilar, D., Bautista, F., Mendoza, M. y Delgado, C. 2013. Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 243-263.
- Alcocer, J. 2007. El agua epicontinental de México, México, *Ciencia* 58(3): 26-35.
- Alcocer, J., Escolero, O. y Álvarez, F. 2023. Las “Lagunas de Montebello”. Joyas de la naturaleza amenazadas. FES Iztacala, UNAM, México, 12 pp.
- Alcocer, J., Merino-Ibarra, M., Oseguera, L. y Escolero, O. 2018. Anthropogenic impacts on tropical karstic lakes: “Lagunas de Montebello”, Chiapas. *Ecohydrology*. 11(8): 1-13.
- Alcocer, J. Oseguera, L., Sánchez, G., González, C., Martínez, J. y González, R. 2016a. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *Journal of Limnology*. 75(1): 56-65.
- Alcocer, J., Oseguera, L. y Escobar, E. 2016b. Contenido de carbono elemental en sedimentos lacustres de un conjunto de lagos tropicales con distinto estado trófico. En: Paz, F. y Torres, R. (Eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016*. Serie Síntesis Nacionales Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Texcoco. Estado de México, México.
- Alvarado-Velázquez, J. 2015. Evaluación del transporte de sedimentos y la calidad del agua, utilizando swat, en el Río Grande de Comitán, Chiapas, Tesis de maestría. ICMYL, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arar, E. y Collins, G. 1997. In vitro determination of chlorophyll-a and pheophytin-a in a marine and freshwater alga by fluorescent. Environmental Protection Agency.
- Balvanera, P. 2012. Servicios ecosistémicos en México: patrones, tendencias y prioridades de investigación. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México: Informe final SNIB CONABIO, proyecto No. FQ003.
- Caneva Silva, R. E. 2017. Calidad del agua y transporte de nutrientes en el Estero San Carlos. BCS, México (Doctoral dissertation, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas).
- Carlson, R. 1997. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. 22: 361-369.
- Carpenter, S., Caraco, N., Corell, D., Howarth, R., Sharpley, A. y Smith, V. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, Vol. 8: 559-568
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2012. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas. Tomo II: Geohidrología. México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2009. Plan de gestión de la cuenca del Río Grande-Lagunas de Montebello, Chiapas, México, 168 pp.
- Comisión Nacional del agua (CONAGUA). 2017. Estadísticas del agua en México. 62 pp.
- Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH). 2018. Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos. México.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2007. Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional Lagunas de Montebello, México. 37-43 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2009. Programa de trabajo para la prevención y combate de incendios forestales. Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas, México. 27 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2011. Parque Nacional Lagunas de Montebello. Programa de monitoreo de la calidad de agua: Estudio para monitorear los

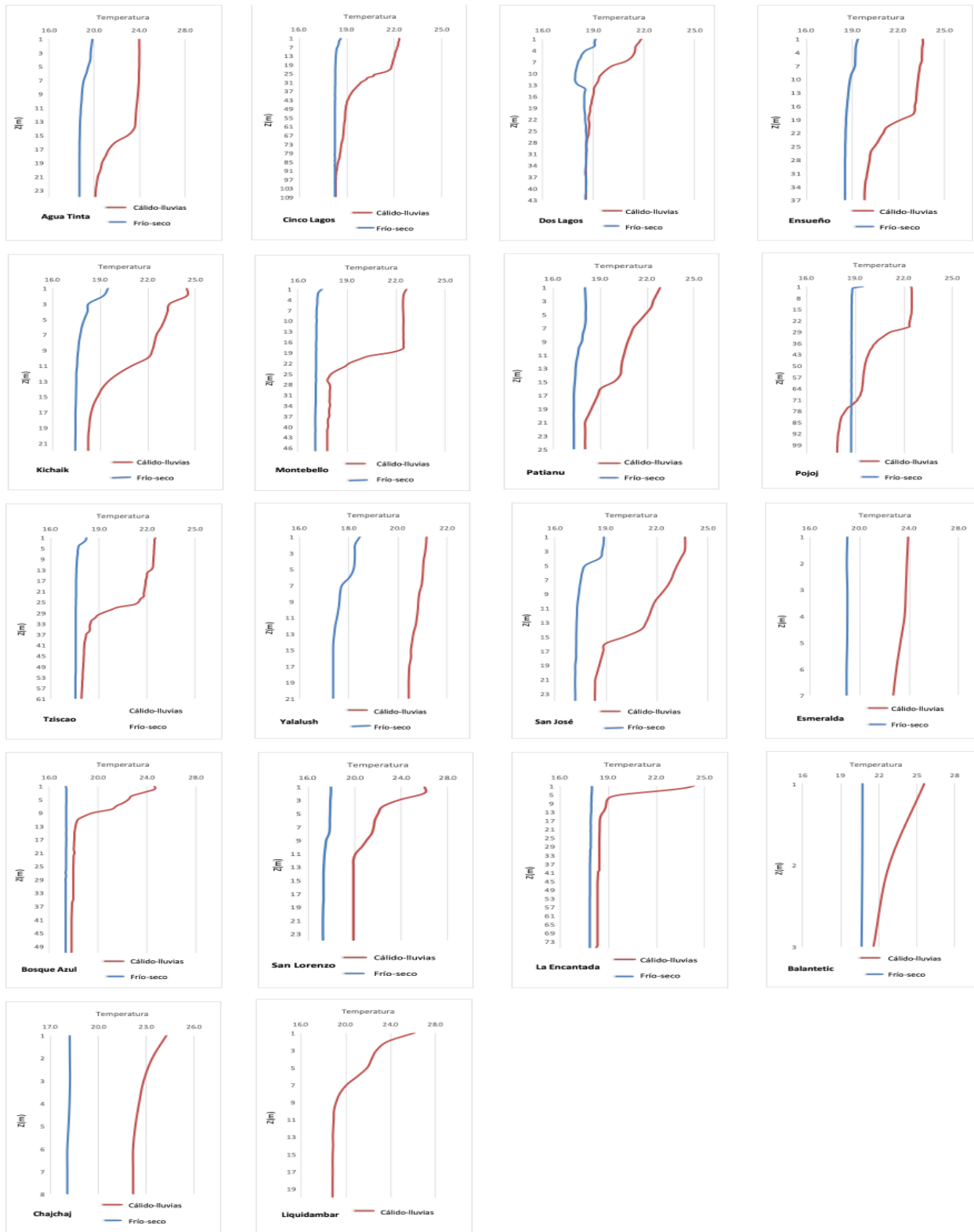
- parámetros de calidad de agua de las lagunas comunicadas con el sistema Lagunar Tepancuapan. México. 77 pp.
- Corona, M. y Cruz, E. 2023. Situación de desigualdad en el acceso al agua y saneamiento de la región hidrosocial-política e intercultural de las Margaritas y La Trinitaria, Chiapas, México. En: De la Vega, E. y Sáenz, H. (Eds.) *Desigualdad regional y empobrecimiento. Gestión de los territorios con inclusión social*. UNAM-AMECIDER, México, 115-136 pp.
- Cunha, D., Calijuri, M. y Lamparelli, M. 2013. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSItsr). *Ecological Engineering*. 60, 126-134.
- Díaz-Torres, O., Anda, J., Lugo, O., Pacheco, A., Orozco, D., Shear, H., Senés, C. y Gradilla, S. 2021. Rapid changes in the phytoplankton community of a subtropical, shallow, hypereutrophic lake during the rainy season. *Frontiers in Microbiology*, 12: 1-21.
- Denzin, C., Taboada, F. y Pacheco-Vega, R. 2017. El agua en México-Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica. Friedrich-Ebert-Stiftung. México.
- Dodds, W., Bouska, W., Eitzmann, J., Pilger, T., Pitts, K., Riley, A., Schloesser, J. y Thornbrugh, D. 2008. Eutrophication of U.S. Freshwater: Analysis of Potential Economic Damages. *Environmental Science Technology*, 43(1): 12-19.
- Durán, L., Escolero, O., Muñoz, E., Castillo, M. y Silva, R. 2014. Cartografía geomorfológica a escala 1:50000 del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas (México). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 66 (2): 263-277.
- Esteves, F. 1998. Fundamentos de limnología. Segunda edición. Río de Janeiro, Editora Interciencia Ltda.
- Fetahi, T. 2019. Eutrophication of Ethiopian water bodies: a serious threat to water quality, biodiversity and public health. *African Journal Aquatic Science*, 44 (4): 303–312.
- García, E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México.
- Gibson, G., Carlson, R., Simpson, J., Smeltze, E., Gerritson, J., Chapra, S., Heiskary, S., Jones, J. y Kennedy, R. 2000. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs, United States Environment Protection Agency, Washington DC, 40-39 pp.
- Gradilla-Hernández, M., de Anda, J., García-Gonzalez, A., Montes, C., Barrios-Piña, H. y Ruiz-Palomino, P. 2020. Assessment of the water quality of a subtropical lake using the NSF-WQI and newly proposed ecosystem specific water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192: 296-312.
- Hansen, H. y Koroleff, F. 1999. Determination of nutrients. En: Grasshof, K., Ehrhardt, M. y Kremling, K. (Eds.), *Methods of seawater analysis*. Segunda edición. Weinheim, Germany: Wiley-Verlag, 419 pp.
- Janus, L. y Vollenweider, R. 1981. The OECD Cooperative Programme on Eutrophication: Canadian contribution. Environment Canada, Inland Waters Directorate, *Scientific Series*, 131.
- Lamparelli, M. 2004. Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. Tese (Doutorado)—Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Lampert, W. y Sommer, U. 2007. Limnoecology: The Ecology of Lakes and Streams. Segunda edición. Oxford University Press, New York. 323 pp.
- Lampert, W. y Sommer, U. 2007. Limnoecology. Segunda edición. Oxford University Press.
- Lathrop, R., Carpenter, S., Stwo, C., Soranno, P. y Panuska, J. 1998. Phosphorus loading restrictions needed to control blue-green algal blooms in Lake Mendota. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55: 1169-1178.

- Lewis, W. 1974. Primary production in the plankton community of a tropical lake. *Ecological Monographs*, 44: 377-409.
- Lewis, W. 1996. Tropical lakes: how latitude makes a difference, pp. 43-64. En: Schiemer F. y K. Boland (Eds.), *Perspectives in Tropical Limnology*. Academic Publishing.
- Lewis, W. 2002. Causes for the high frequency of nitrogen limitation in a tropical river-reservoir system of the Central Plateau, México. *Aquatic Ecosystems Health and Management*: 1: 345-351.
- Ludovisi, A. y Poletti, A. 2003. Use of thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems: 2. Exergy and specific exergy indices. *Ecological Modeling*, 159(3): 223-238.
- Melo, P. y Cervantes, B. 1986. Propuestas para el programa integral de manejo y desarrollo del parque nacional Lagunas de Montebello. *Investigaciones geográficas*. 16, 9-31.
- Meybeck, M. 1979. Concentrations des eaux fluviales en elements majeurs et apports en solution aux oceans. *Revue de géologie dynamique et de géographie et de géographie physique*, 21: 215-246.
- Mora, L., García, L., Ramos, Y., Bonifaz, R y Escolero, O. 2017. Description of chemical changes in a large karstic system: Montebello, México. *Procedia Earth and Planetary Science*. 17: 820-832.
- Mora, L., Bonifaz, R. y López-Martínez, R. 2016. Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3): 377-394.
- National Academy of Sciences (NAS). 1969. Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives. Proceedings of an International Symposium on Eutrophication. University of Wisconsin. NAS Printing and Publishing Office, Washington, D.C.
- OECD. 1982. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development: 154 pp.
- Pokorny, J. y Kvet, J. 2003. Aquatic plants and lake ecosystems. En: O'Sullivan, P. y Reynolds, C. (Eds.), 2003. *The lakes handbook: Limnology and Limnetic Ecology*. Australia, Blackwell.
- Redfield, A. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46, 205-221.
- Rivera-Herrera, E., Vargas, M., Alcocer, J. y Pérez, L. 2019. Impacto antrópico en la biomasa fitoplanctónica de lagos kársticos, Chiapas. México. En Paz, F., Velázquez, A. y Rojo, M (Eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2019* (318-324). Programa Mexicano del Carbono.
- Roldán, G. y Ramírez, J. 2008. Fundamentos de limnología neotropical. Segunda edición. Medellín, Universidad de Antioquia.
- Ryding, S. y Rast, W. 1992. El control de la eutrofización en lagos y pantanos. Madrid, Pirámide, 250 pp.
- Saghi H., Karimi, L. y Javid, H. 2015. Investigation on Trophic State Index by artificial neural networks (case study: Dez Dam of Iran). *Applied Water Science*, 5:127-136.
- Schindler, O. 1977. Evolution of Phosphorus Limitation in Lakes. *Science*, 195: 260-162.
- Smith, V. 1982. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: as empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanogr.*, 27(6): 1101-1112.
- Talling, J. y Lemoalle, J. 1998. Ecological dynamics of tropical waters. Cambridge University Press, Cambridge, 441 p.

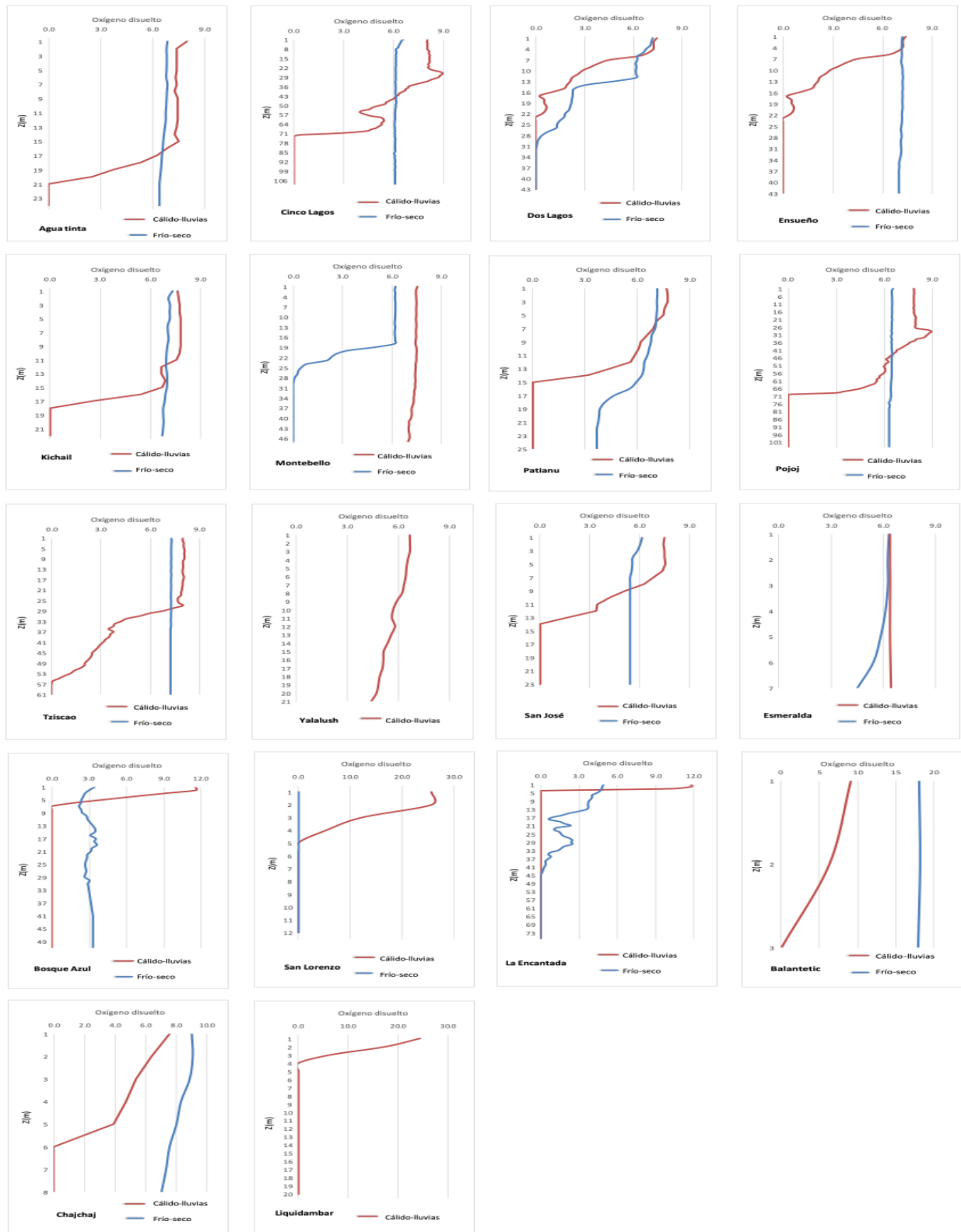
- Toledo, J. 1983. Aplicação de modelos simplificados para avaliação de procesos de eutrofização en lagos e reseratórios tropicais, Camboriú, Congreso Interamericano de Engenharia e ambiental, 35 p.
- US-EPA. 1997. Environmental Indicators of Water Quality in the United States (US EPA 841-R-96-02). Office of Water (4503F), US Government Printing Office, Washington, D.C.
- Vallentyne, R. 1974. The algal bowl, lakes and man. *Fisheries and Marine Service*, 22: 1-186.
- Vargas-Sánchez, M., Alcocer, J. y Oseguera, L. 2022. Seston and eutrophication on a tropical karst lake district: Lagunas de Montebello, Chiapas, Mexico. *Limnetica*, 41(2): 269-279.
- Vázquez, M. y Méndez, E. 1994. Aspectos generales de la región: Lagos de Montebello, Reporte del trabajo para el curso de conservación de naturaleza y recursos naturales, Maestría en Ciencias: Recursos Naturales y Desarrollo Rural, ECOSUR Chiapas.
- Villalpando, L. 2015. Uso de percepción remota para la estimación de índice trófico de las lagunas del Parque Nacional Lagunas de Montebello. Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, México.
- Vitousek, P., Mooney, H., Lubchenco, J. y Melillo, J. 1997. Human domination of Earth's Ecosystems. *Science*, 277(5325): 494-499.
- Vollenweider, R. 1989, Global problems of eutrophication and its control. En: Salánki, J. y Herodek, S. (Eds.), *Conservation and Management of Lakes*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 19-41.
- Vollenweider, R. y Kerekes, J. 1982. OECD-Organization for Economic Co-Operation and Development. Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control, OECD, Paris.
- Wetzel, G. 2001. Limnology: lake and river ecosystems. Tercera edición. San Diego, Academic Press.
- Winter, T., Harvey, J., Franke, O. y Alley, W. 1998. Ground water and surface water. A single resource: U.S. Geological Survey Circular 1139, 32 p.

# 12. ANEXOS

## 12.1 Perfiles verticales de temperatura

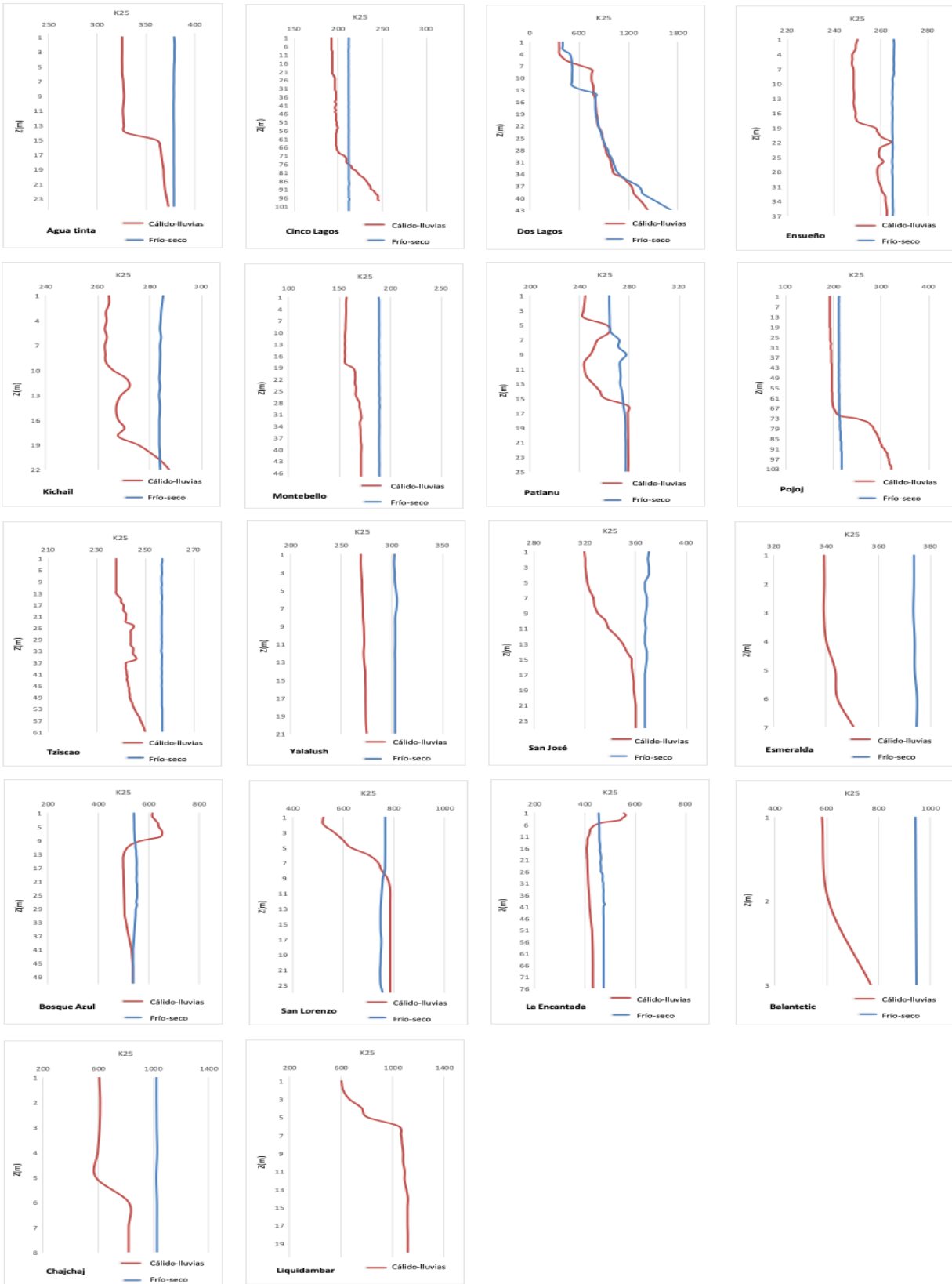


## 12.2 Perfiles verticales de oxígeno disuelto

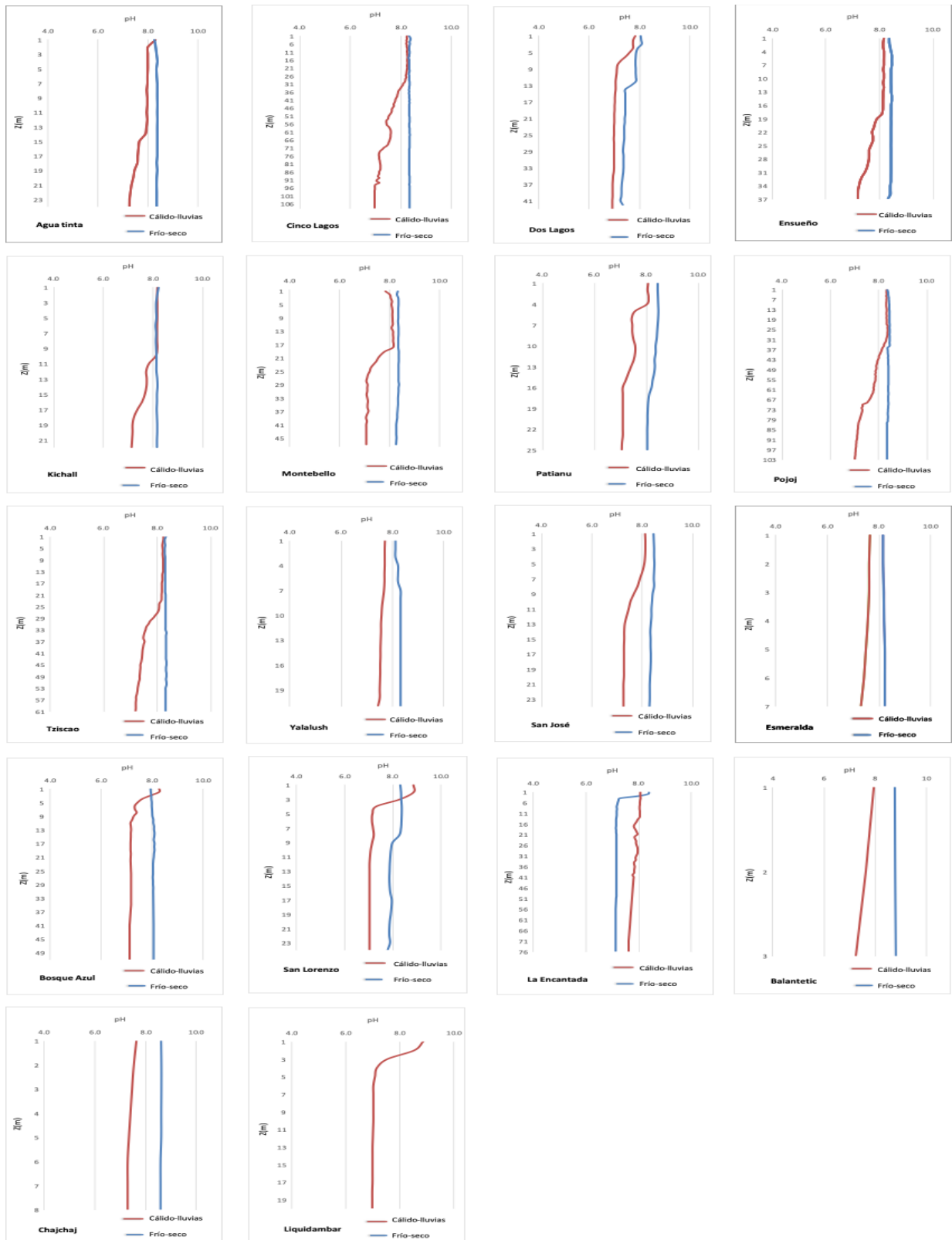




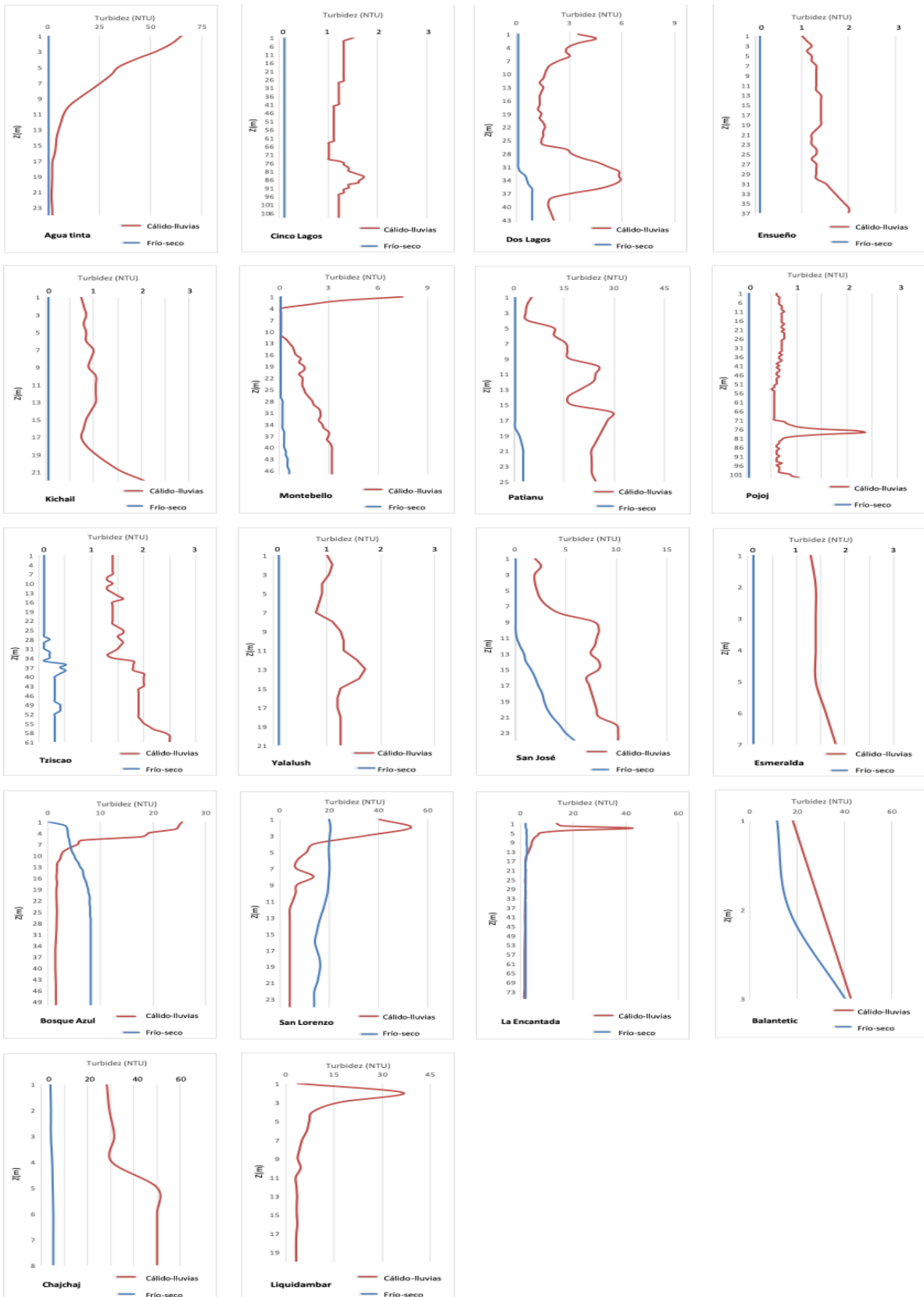
## 12.3. Perfiles verticales de conductividad eléctrica



## 12.4. Perfiles verticales de pH



## 12.5. Perfiles verticales de turbidez



## 12.6. Perfiles verticales de Cl-a

