



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Caracterización fisicoquímica de 9 lagos con
diferente estado trófico del Parque Nacional
Lagunas de Montebello, Chiapas, México**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Ciencias de la Tierra

P R E S E N T A:

Diego López Dávila



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

CIUDAD DE MÉXICO, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

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*” y IV200319 “*Área Experimental de Lagos Tropicales*”.

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

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas desde el nivel bachillerato. Por darme la oportunidad de conocer a grandes amistades a lo largo de todo el camino y por brindar las mejores enseñanzas con los profesores altamente calificados para impartir sus materias.

A la Facultad de Ciencias por formarme como una persona con valores, entregándome las herramientas necesarias para salir adelante a lo largo de la carrera y por tener el mejor ambiente donde todos los integrantes vivían en armonía, con constante ayuda simultánea y siempre estando al tanto de todos los factores sociales independientes de la ciencia.

Agradecimientos personales

A mi familia, especialmente a mis padres, que con su esfuerzo, desde niño me brindaron lo necesario para lograr llegar hasta este punto. Con sus regaños, sus bromas y sus actos lograron crear una atmósfera amigable para vivir de forma feliz. Lamento que mi padre ya no sea capaz de presenciar este momento, pero le agradezco profundamente todo el apoyo y le dedico este trabajo sea en donde sea que se encuentre.

A mis abuelitos que siempre se preocuparon por mí y me brindaron apoyo de diferente manera, además de que la comida que me brindan es la más deliciosa del mundo. Siempre fue bueno intercambiar libros con mi abuelito para salir de la rutina de la escuela.

A mis amigos, que son el soporte y desestrés que toda vida requiere para verla de colores. Por ser tan incondicionales y estar siempre en todo problema y en todo festejo, que con el paso del tiempo permanecen y que la distancia no influye para nada en el sentimiento que se tiene. Esos amigos que son ya parte de mi familia y no requieren de mención puesto que ellos saben a quién me refiero.

Al doctor Javier Alcocer y a la biblioteca Amália González. Al primero por siempre darme ánimos de continuar con el proyecto, brindándome apoyo, dándome ánimos y revisando mis borradores de forma rápida para agilizar el proceso. A la segunda por abrirme sus puertas para encontrar la inspiración y retomar la tesis después de un periodo de pausa. Además siempre era grato ir porque se encuentra en mi lugar favorito de la ciudad.

Finalmente, a las personas que ya no están en mi vida por diferentes circunstancias, pero que durante este camino la iluminaron de luz. Sea en donde sea que estén siempre tendrán un lugar especial en mi corazón.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	4
3. JUSTIFICACIÓN.....	6
4. OBJETIVO Y METAS.....	7
OBJETIVO GENERAL.....	7
OBJETIVOS PARTICULARES.....	7
5. ÁREA DE ESTUDIO.....	7
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
6.1 TRABAJO DE CAMPO.....	13
6.2 TRABAJO DE GABINETE.....	14
7. RESULTADOS.....	15
7.1 PROFUNDIDAD DE LA ZONA EUFÓTICA (Z_{EU}).....	15
7.2 TEMPERATURA.....	17
7.3 OXÍGENO DISUELTO.....	20
7.4 PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE OXÍGENO ($\%_{SAT}$).....	22
7.5 PROFUNDIDAD DE LA CAPA DE MEZCLA (Z_{mix}).....	24
7.6 CONDUCTIVIDAD.....	25
7.7 pH.....	27
7.8 TURBIDEZ.....	29
7.9 COMPARACIÓN ENTRE LOS LAGOS.....	30
7.9.1 PROFUNDO NO IMPACTADO.....	34
7.9.2 PROFUNDO IMPACTADO.....	38
7.9.3 SOMERO NO IMPACTADO.....	42
7.9.4 SOMERO IMPACTADO.....	45
8. DISCUSIÓN.....	49
9. CONCLUSIONES.....	56
10. BIBLIOGRAFÍA.....	58
11. ANEXO 1.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación geográfica, profundidad y clasificación de los lagos en estudio del PNLM.....	14
Tabla 2. Profundidad de la zona eufótica (m) en cada uno de los lagos estudiados.....	16
Tabla 3. Temperatura (°C) de los lagos en estudio.....	17
Tabla 4. Gradiente de temperatura en cada una de las zonaciones expresado en °C de cada uno de los lagos profundos estudiados.....	19
Tabla 5. Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹) de los lagos en estudio.....	20
Tabla 6. Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en los lagos en estudio (% _{SAT}).....	23
Tabla 7. Profundidad de la capa de mezcla (Z _{mix}) en metros (m) de cada lago estudiado...	24
Tabla 8. Conductividad K ₂₅ (μS cm ⁻¹) de los lagos en estudio.....	26
Tabla 9. pH de los lagos en estudio.....	28
Tabla 10. Turbidez (NTU) de los lagos en estudio.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Imagen satelital del área de estudio	8
Fig. 2. Representación del posicionamiento del PNLM, tomando como referencia la región hidrológica, la cuenca y la subcuenca de la que forma parte.....	9
Fig. 3. Representación de los lagos impactados por medio de imágenes satelitales.....	11
Fig. 4. Representación de los lagos no impactados por medio de imágenes satelitales.....	12
Fig. 5. (a) Sonda multiparamétrica de calidad de agua, marca Hydrolab modelo DS5X acoplado a un sistema de captura de información modelo SVR4, (b) PNF-300 <i>Profiling Natural Fluorometer System</i>	14
Fig. 6. Análisis de conglomerados (método de Ward) de los lagos de Montebello con base en los parámetros fisicoquímicos.....	32
Fig. 7. Gráficas de los parámetros fisicoquímicos en el lago no impactado Cinco Lagos...	38
Fig. 8. Gráficas de los parámetros fisicoquímicos en el lago profundo impactado La Encantada.....	42
Fig. 9. Gráficas de los parámetros fisicoquímicos en el lago somero no impactado Esmeralda.....	45

Resumen

Uno de los lugares más hermosos de México por sus paisajes naturales es el Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM) y un cambio en la coloración de algunos de sus lagos ha propiciado que se hagan estudios para preservarlo. En el presente trabajo se realizó una descripción de los parámetros fisicoquímicos en un grupo de 9 lagos con diferente estado trófico durante dos temporadas contrastantes: cálida de lluvias (primavera/verano) y fría de secas (invierno), con la finalidad de ver cuáles son los parámetros fisicoquímicos que difieren entre lagos impactados y no impactados. Las variables estudiadas fueron la radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura, concentración de oxígeno disuelto (OD), porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%_{SAT}), conductividad eléctrica (K_{25}), pH, y turbidez; además se calculó la profundidad de la zona eufótica (Z_{EU}) y la profundidad de la capa de mezcla (Z_{mix}). Los lagos someros presentaron circulación durante ambas temporadas (cálidos polimícticos); por el contrario, los lagos profundos presentaron estratificación en la primavera/verano y circulación en el invierno (cálidos monomícticos). La Z_{EU} fue aproximadamente 6 veces más profunda en los lagos no impactados. La turbidez, la temperatura, la concentración de OD y el %_{SAT} fueron mayores en la superficie de los lagos impactados, asociado a la alta concentración de biomasa fitoplanctónica que genera atenuación de luz y altas tasas de fotosíntesis en el epilimnion. El fondo se mantuvo anóxico. Lagos que presentaron $K_{25} > 400 \mu\text{S cm}^{-1}$ fueron impactados y los que presentaron $K_{25} < 400 \mu\text{S cm}^{-1}$ fueron no impactados. El pH no presenta un claro comportamiento asociado al estado trófico. Se concluye que los lagos sí difieren en sus propiedades fisicoquímicas de acuerdo con su estado trófico, colocándose los impactados en la región NW y los no impactados en la región SE.

Abstract

One of the most beautiful places in Mexico because of its natural landscapes is the Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM) and a change in water color of some of its lakes has propitiated a lot of studies aimed to preserve it. The present work made a description of the physicochemical parameters of a characteristic group of 9 lakes with different trophic state along two contrasting seasons: warm rainy (spring/summer) and dry cold (winter), with the purpose of look at the contrasting parameters physicochemical between impacted and non-impacted lakes. The variables were photosynthetic active radiation (PAR), temperature, dissolved oxygen concentration (OD), percentage of dissolved oxygen saturation ($\%_{SAT}$), conductivity (K_{25}), pH, and turbidity. In addition, the depth of the euphotic zone (Z_{EU}) and the depth of the mixed layer (Z_{mix}) were also calculated. Shallow lakes presented circulation during both seasons, so they are cataloged as warm polimictic; on the other hand, deep lakes presented stratification in the warm rainy season and circulation during the dry cold season, so they are cataloged as warm monomictic. The Z_{EU} was about six times deeper in non-impacted lakes. Turbidity, temperature, concentration of OD and $\%_{SAT}$ were greater in the surface of impacted lakes, associated with large numbers of phytoplankton biomass that generates light attenuation and high photosynthetic rates. The deep zone was anoxic. Lakes with $K_{25} > 400 \mu S cm^{-1}$ were impacted and lakes with $K_{25} < 400 \mu S cm^{-1}$ were non-impacted. pH did not present a clear behavior associated with the trophic state. It is concluded that both groups of lakes do differ in their physicochemical properties according to their trophic state, with impacted lakes located in the NW region and non-impacted lakes in the SE region.

1. Introducción

Los lagos kársticos se forman mediante el intemperismo químico. Este es un proceso exógeno que degrada las rocas carbonatadas mediante procedimientos de disolución provocados por el agua y los ácidos formados con los minerales de calcio y magnesio. Esto origina un paisaje muy característico con depresiones, cenotes y otras formas singulares, producto del proceso geomórfico kárstico (CONANP-SEMARNAT, 2007).

En el sur de Chiapas destacan las “dolinas”, “uvalas” y “poljes”, las cuales corresponden a depresiones resultado de la disolución química de las calizas y que se llenan de agua. La posición específica de estas estructuras dentro del sistema de las aguas freáticas kársticas facilita el relleno de estas depresiones con aguas subterráneas y el nivel del espejo lacustre (Vásquez y Méndez, 1994).

Este es el caso de los lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM), considerado como uno de los lugares más hermosos en la zona sur/sureste del estado de Chiapas, México, debido a su complejo de sistemas hidrológicos que están rodeados por un paisaje boscoso y que contiene más de 50 lagos de naturaleza kárstica (CONANP-SEMARNAT, 2007), de los cuales su mayor atractivo son las diferentes tonalidades de sus aguas, adquiridas por diferentes factores como es el tipo de suelo del fondo, la vegetación y la refracción de la luz (SECTUR, 2013). El PNLM representa una fuente de recursos hídricos y forestales para las comunidades que habitan en las inmediaciones. Los bienes y servicios ecológicos que se pueden asociar con su función como vaso de captación de agua son: regulador climático regional, absorción de gases de efecto invernadero, conservación de suelos, su valor paisajístico, brinda servicios como corredor biológico y estructuración del hábitat para una amplia diversidad de flora y fauna (CONANP-SEMARNAT, 2007).

En este sitio se albergan especies protegidas y de importancia florística, como son bosques de pino, pino-encino, pino-encino-liquidámbar y mesófilo de montaña; además se puede apreciar en el área vegetación primaria, vegetación secundaria y zonas de cultivo (CONANP, 2009).

El uso de suelo de la zona está destinado a la conservación de bosques de pino, pino-encino-liquidámbar, y aproximadamente el 73% de la superficie del parque estaba ocupada por coníferas y latifoliadas. Sin embargo, esta situación ha cambiado. En 1970, más del 70% del PNLN se encontraba arbolado y en buen estado de conservación, con un área destinada a la agricultura de 187 hectáreas; en 1995 aproximadamente el 50% se encontraba perturbado o transformado, incluyendo selvas y bosques; y en 2005, el 44% de dichos bosques estaban perturbados y presentaban vegetación secundaria, en gran parte por cultivos agrícolas, en un área que ha incrementado de 187 a 578 hectáreas (CONANP-SEMARNAT, 2007).

De acuerdo con CONAGUA (2018), la mayor cantidad de agua utilizada en el territorio mexicano es para uso agrícola (76.0 %), siendo el segundo lugar el abastecimiento público (14.4 %) y en tercero el uso de la industria autoabastecida (4.9 %). En Chiapas, esta situación no es diferente pues la actividad principal de las comunidades de la zona de Montebello ha sido, desde hace décadas, la agricultura, que aún se realiza con técnicas primitivas de roza-tumba-quema y en donde se utilizan agroquímicos (principalmente fertilizantes y plaguicidas).

Otra actividad prevaeciente en el lugar es el turismo. En 1981 había 3 guías turísticos, los que aumentaron a más de 100 en 1998 (Ruiz *et al.*, 1998). Sin embargo, otras dos

actividades que afectan al ecosistema son la ganadería y los asentamientos irregulares (Arriaga *et al.*, 2000).

Derivado de las características kársticas del lugar, los recursos acuáticos del PNLM son considerados como muy vulnerables y susceptibles a la contaminación, con una importante afectación al sistema de agua subterránea. Las fuentes potenciales de contaminación son la lixiviación e infiltración de residuos sólidos municipales y descargas residuales no tratadas (CFE, 2012). Aunado a la contaminación, el estrés hídrico de la zona es un problema creciente. En sus inicios (1959), el territorio del PNLM estaba habitado únicamente por 40 habitantes distribuidos en 10 familias; para el año 2000 ese número cambió aumentando radicalmente, quedando en un valor de 1319 personas, las cuales utilizan el agua para uso doméstico, consumo humano y riego de la agricultura (CONANP, 2009).

Como estrategia de preservación, se impulsó el ecoturismo en esta zona, con el argumento de que así se iba a favorecer su conservación y los recursos se iban a usar de manera sustentable (CONANP-SEMARNAT, 2007). Sin embargo, esta estrategia parece no haber funcionado, puesto que para el año 2008 se estimó que el 80% de la población estaba relacionada con las entradas económicas relativas al turismo, y para el 2014 se encontró que el 62% de las familias que dependían de esta actividad no recibían lo suficiente a pesar de haber tenido una cantidad de aproximadamente 12,000 turistas en ese año (Barriga, 2017).

Actualmente algunos de estos lagos están siendo afectados, principalmente por desechos de asentamientos humanos y por el cambio de uso de suelo alrededor de éstos, teniendo como consecuencia cambios en el color del agua (CONANP-SEMARNAT, 2007), lo que se asocia con procesos de eutrofización cuando este cambio se da hacia aguas turbias y verdes.

La eutrofización es un fenómeno paulatino muy lento cuando ocurre de manera natural (usualmente por progresivo llenado del cuerpo de agua por parte de sedimentos, lo que facilita el retorno de los nutrientes hacia la zona superficial iluminada desde la zona más profunda), mediante el cual se ve incrementada la producción primaria, aumentando la biomasa del fitoplancton, como es el caso de las cianobacterias (Vallentyne, 1974). Este aumento de producción se debe al incremento de nutrientes dentro del cuerpo de agua epicontinental, los cuales son en parte alóctonos al sistema; esto es así porque el agua tiene la capacidad de disolver y erosionar rocas, además de transportar grandes cantidades de sedimentos, lo que se ve reflejado en, además de un aumento de nutrientes, una disminución de la profundidad de los lagos por la colmatación y asolvamiento (Roldán y Ramírez, 2008).

Este proceso natural puede derivar en un exceso de nutrientes en el agua, principalmente nitrógeno y fósforo, por contaminación, es decir, cuando proceden mayoritariamente por la actividad del hombre y se conoce como eutrofización antropogénica, la cual afecta la calidad del agua, pudiendo ocasionar pérdidas económicas en la zona (Vallentyne, 1974).

2. Antecedentes

El “Parque Nacional Lagunas de Montebello” (PNLM) fue designado en 1959 por Decreto Presidencial en el Diario Oficial de la Federación. Para el año 2003 se seleccionó como sitio RAMSAR, el cual reconoce a esta zona como un humedal de importancia internacional y para el año 2009 fue proclamado como parte de la Reserva de la Biosfera por parte de la UNESCO (CONANP, 2019), así como un Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA) por la CONABIO en 1997 (en CONANP, 2009). En la actualidad, la administración y manejo del PNLM lo realiza la Secretaría del Medio

Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) a través del órgano desconcentrado, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP-SEMARNAT, 2007).

En 2003 la laguna Vuelta de Agua, uno de los cuerpos acuáticos del PNLN, presentó un cambio de coloración de cristalino a amarillo-verdoso, además de presencia de natas blancas y olor azufroso. El gobierno de Chiapas solicitó a CONACYT llevar a cabo un estudio con la finalidad de obtener un reconocimiento hidrogeológico, caracterizando la climatología y meteorología, además de efectuar un diagnóstico de las características fisicoquímicas del agua de los lagos, así como a través de modelos numéricos para caracterizar su hidrodinámica (CFE, 2012).

Estudios anteriores revelaron que las concentraciones de nutrientes eran muy elevadas, sobre todo del fósforo y nitrógeno, además de elementos como el azufre en los sedimentos (Marín, 2003). En 2012, la CFE realizó el "Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas" en el sistema lagunar Chinkultic-Vuelta de Agua. Se obtuvo el resultado de que el acuífero de la zona está expuesto a la contaminación, además de que la calidad de aguas subterráneas aledañas a las lagunas se encuentra en deterioro. Resultó ser la principal razón de esta afectación la lixiviación y la infiltración de residuos sólidos y descarga de aguas residuales (CFE, 2012).

Otras caracterizaciones se basan en los valores de temperatura y conductividad eléctrica (K_{25} , como descriptor de la mineralización de un cuerpo de agua) que se midieron en los cuerpos de agua -como Vuelta del Agua, San Lorenzo y Chinkultic- y variaron en profundidad en más de 4°C. En general, la conductividad eléctrica se registró entre los 600 y 660 $\mu\text{S}/\text{cm}$ excepto en San Lorenzo y Vuelta de Agua en donde se obtuvieron mediciones de más de 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CFE, 2012).

Recientemente se aportaron nuevos datos que reconocían que algunos cuerpos de agua del PNLN se han visto afectados por procesos de eutrofización (Juárez, 2014).

Sin embargo, no se ha realizado al momento una caracterización más amplia comparando cuerpos acuáticos impactados y no impactados que permitan examinar los cambios principales que se derivan de la eutrofización. Por esta razón, la finalidad de esta tesis es reconocer, con base en las propiedades fisicoquímicas de nueve lagos, tanto impactados como no impactados, el estado actual de los mismos y entender qué aspectos principales pueden estar relacionados con los cambios que presentan algunos de los cuerpos de agua presentes en el PNLN.

3. Justificación

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” es reconocido como uno de los escenarios naturales más hermosos de Chiapas y de México. Es considerado como una importante reserva hidrológica y forestal, además de ser un recurso paisajístico y de actuar como regulador térmico. También representa el ingreso de cientos de familias que viven en los alrededores del parque y que se dedican al turismo (CONANP-SEMARNAT, 2007).

Con la contaminación que se ha venido presentando, los lagos no alterados pueden comenzar a transformarse en lagos perturbados, debido a causas que aún no se terminan de entender por completo. Lo anterior, además de ser preocupante ambientalmente, también simboliza una pérdida económica para las familias de la región por la disminución del turismo (CFE, 2012).

Esta problemática hace necesario estudiar los lagos de forma integrada, por lo que la presente investigación plantea analizar fisicoquímicamente y de forma comparativa un

conjunto representativo de lagos, incluyendo tanto impactados como no impactados, para reconocer las diferencias presentes entre ambos e identificar las modificaciones.

4. Objetivo y metas

Objetivo general

Caracterizar fisicoquímicamente la columna de agua de un conjunto de nueve lagos del PNLM, considerando perturbados y no perturbados, en dos épocas ambientales contrastantes (cálida de lluvias y fría de secas en los años 2014-2015).

Para cumplir con este objetivo general, se implementaron las siguientes metas:

1. Medir los perfiles de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y determinar la zona eufótica.
2. Reconocer las características ambientales en el perfil vertical de temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y turbidez, así como determinar la capa de mezcla de cada lago.
3. Realizar un análisis comparativo entre lagos no impactados e impactados para identificar las diferencias en los descriptores físico-químicos entre ambos.

Hacer la comparación de las variables evaluadas en dos épocas climáticas: primavera/verano de 2014 e invierno de 2015.

5. Área de estudio

El PNLM se encuentra en la parte sur-sureste del estado de Chiapas, en la frontera con Guatemala y comprende parte de los municipios La Independencia y La Trinitaria (Fig. 1). Sus coordenadas extremas son 16° 04' 40'' y 16° 10' 20'' Norte y 91° 37' 40'' y 91° 47'

40'' Oeste (CONANP-SEMARNAT, 2007). La zona de estudio abarca un área total de aproximadamente 60 km² y tiene una altitud que va desde los 1,200 a los 1,800 m s.n.m (García, 1988).

Se encuentra en la provincia tectónica de fallas de transcurrencia del Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas, cuya tectónica está relacionada con la interacción entre las placas de Cocos, Caribe y Norteamericana (Mora *et al.*, 2006).

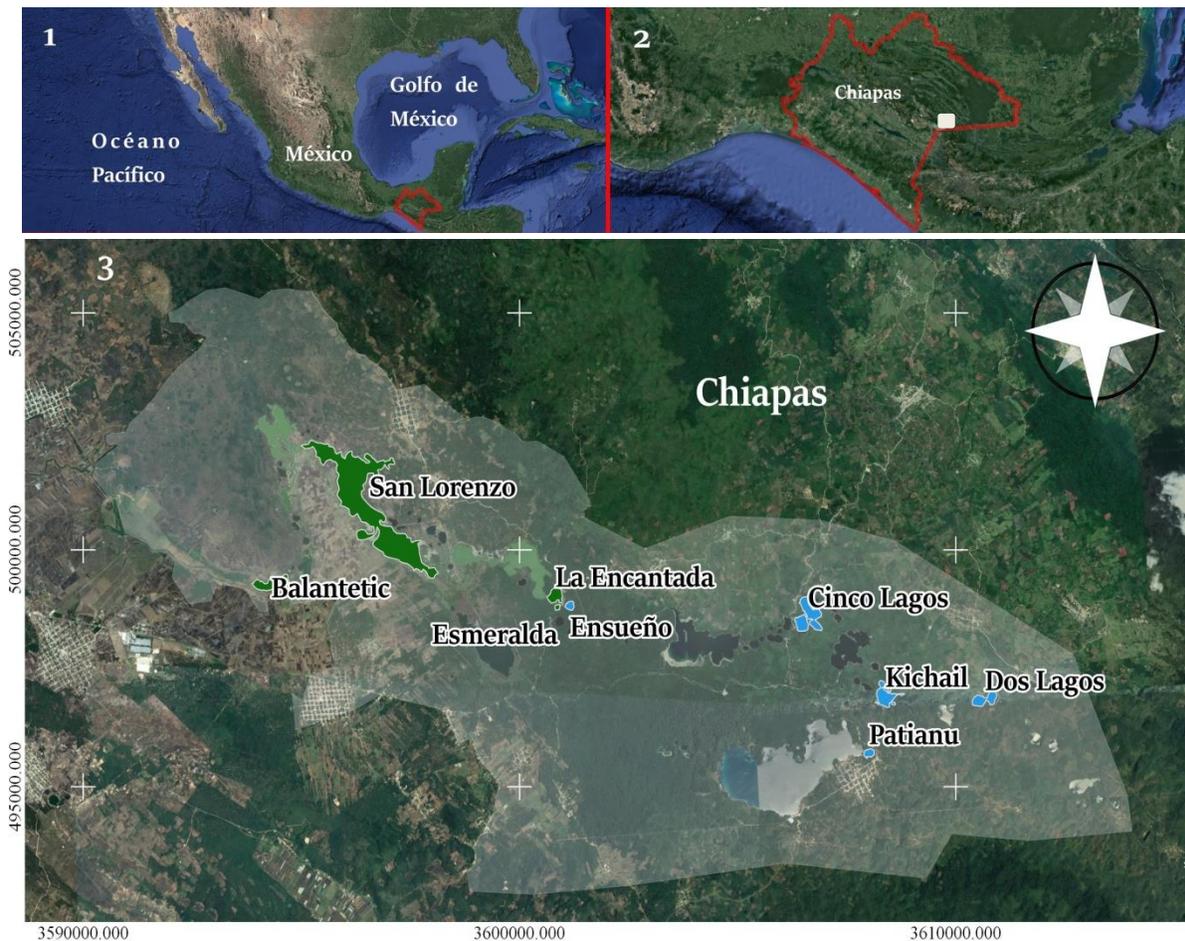


Fig. 1. Imagen satelital del área de estudio (tomada de Google Satellite y modificada con QGIS Desktop 3.4.8). 1) Representación del posicionamiento de Chiapas dentro de la República Mexicana. 2) Posicionamiento del PNLM dentro del estado de Chiapas. 3) El área sombreada representa el área correspondiente al PNLM, tomando en cuenta igualmente su área de influencia (CONANP, 2006). Los polígonos verdes y azules representan los lagos estudiados, donde los primeros hacen referencia a los lagos impactados (eutróficos), mientras que los segundos representan a los lagos no impactados (oligotróficos) (Alcocer *et al.*, 2016).

El clima en la zona es templado-húmedo con lluvias todo el año, teniendo una temperatura promedio mensual de aproximadamente 23.6°C y una precipitación pluvial anual alrededor de 1862 mm. Los lagos funcionan como una cuenca captadora de agua que permite a los habitantes colindantes aprovechar el recurso hídrico (CONANP, 2011).

El PNLM está comprendido en la Región Hidrológica (RH) No. 30 Grijalva-Usumacinta (91,928.78 km²), la cual engloba la cuenca del Río Lacatún (2,601.544 km²), que a su vez engloban la subcuenca del Río Grande de Comitán (785.796 km²), que incluye al PNLM (Fig. 2) (SEGOB, 2018). La importancia de esta región hidrológica radica en que es la que contiene el mayor escurrimiento natural medio superficial total (hm³/año) del país (CONAGUA, 2018).

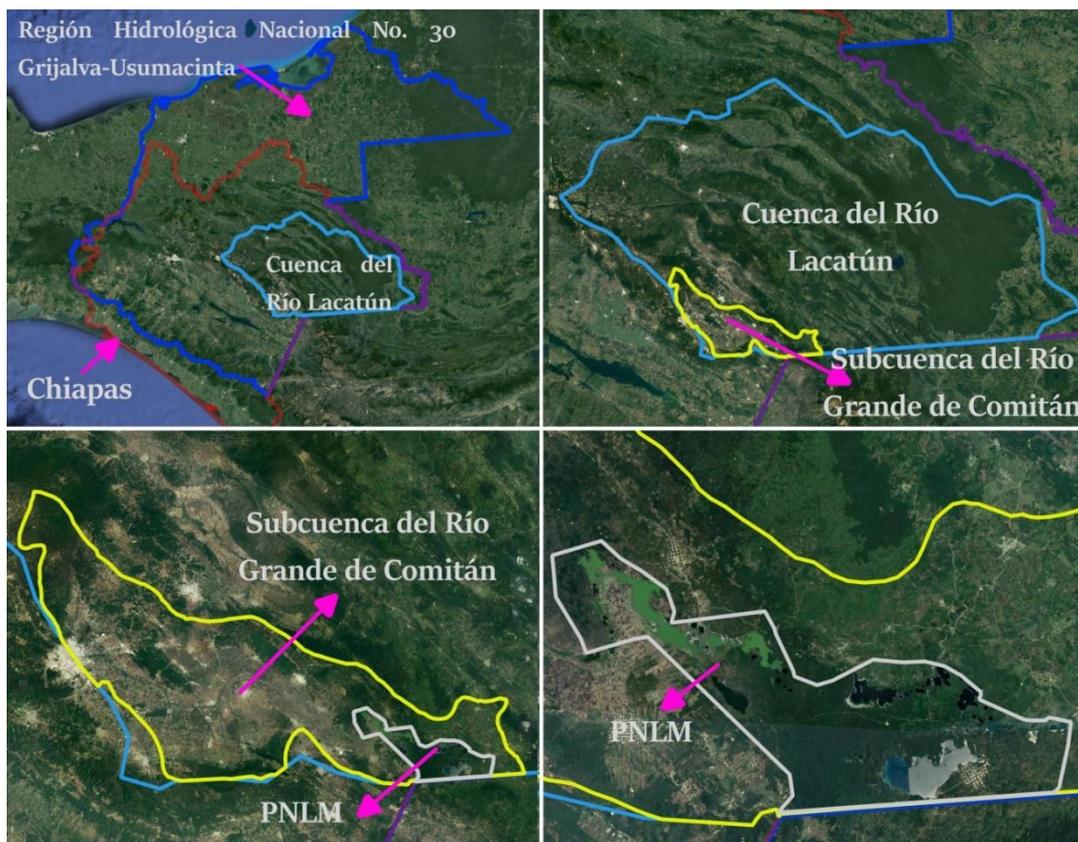


Fig. 2. Representación del posicionamiento del PNLM, tomando como referencia la región hidrológica, la cuenca y la subcuenca de la que forma parte (CNA, 1998; CONAGUA, 2007). (Imagen satelital tomada de Google Satellite y modificada con QGIS 3.4.8).

En la porción noroccidental del Parque se encuentran superficies inundables, lo que determina la existencia de oscilaciones substanciales del medio lacustre entre las estaciones climáticas del año (CONANP, 2011).

La zona del PNLN comprende un conjunto de lagos de origen kárstico, cuya alimentación principalmente es subterránea (Vásquez y Méndez, 1994). Los lagos se formaron por disolución química de los techos de cuevas subterráneas compuestos de calizas, creando dolinas, uvalas y poljes capaces de almacenar agua (CONANP-SEMARNAT, 2007).

El Sistema Tepancoapan de 13 km de longitud, es considerado como un cuerpo continuo de agua que reúne los lagos San Lorenzo, Bosque Azul, Peninsular, Encantada, Esmeralda, Bartolo y Peñasquito. Le siguen en importancia los lagos de Tziscaco (3.6 km de longitud) y Montebello (2 km de longitud). Muchos lagos de menor dimensión poseen belleza escénica relevante, entre ellos: Agua Tinta y Ensueño, ubicados al sureste del Sistema de Lagos Tepancoapan y Cinco Lagos, al este del Lago Montebello. El río principal en la subcuenca es el Río Grande, en el cual desembocan las aguas negras provenientes de la ciudad de Comitán de Domínguez (Vásquez y Méndez, 1994); sin embargo, la información del sitio no es consistente, ya que INEGI reportó en 1985 que no existen desagües directos al río y que sí lo tiene con el Sistema de Lagos Tepancoapan (en CONANP-SEMARNAT, 2007). Por otro lado, CFE en el 2012 volvió a corroborar que sí existía el vertido de aguas residuales al río.

Para el presente estudio se seleccionaron 9 lagos: Balantetic, San Lorenzo y La Encantada, clasificados como impactados (Fig. 3); Esmeralda, Ensueño, Cinco Lagos, Kichail, Patianú y Dos Lagos, clasificados como no impactados (Fig. 4). Alcocer *et al.* (2016) mencionan que los lagos Balantetic, La Encantada y Esmeralda son eutróficos, mientras que Cinco

Lagos, Dos Lagos y Patianú son oligotróficos. Por otro lado, los lagos Balantetic y Esmeralda se consideran funcionalmente someros (i.e., se mezclan todo el año); el resto de los lagos son profundos (i.e., monomícticos cálidos). De igual manera, Alcocer (2017) menciona que el PNLM es una zona donde muchos de sus lagos se originan por procesos de disolución. Dentro de las disoluciones pueden estar presentes depósitos de yesos y halitas (otro tipo de sales adicionales a los carbonatos de la cuenca) y por esta razón es que puede verse afectada la conductividad en algunos lagos. Este es el caso de Dos Lagos, el cual se puede dividir en dos estratos por su diferente fuente de agua: el estrato superficial más dulce por la afectación de las lluvias y el estrato profundo más salado por el aporte de aguas subterráneas saladas. Para el caso del lago Esmeralda, se tomó en cuenta su clasificación como lago prístino, de acuerdo con Alcocer *et al.* (2018), por ser un dato más reciente. Además, se les dio un ordenamiento NW-SE, como lo recomiendan Oseguera y Alcocer (2015).

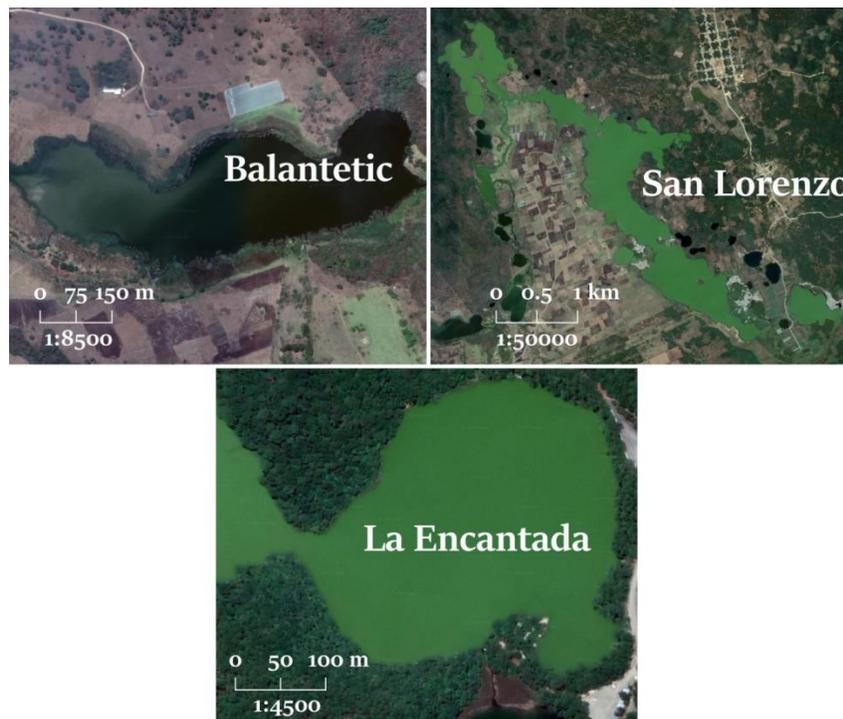


Fig. 3. Representación de los lagos impactados por medio de imágenes satelitales (Obtenidas a través de Google Satellite y modificadas con QGIS 3.4.8).

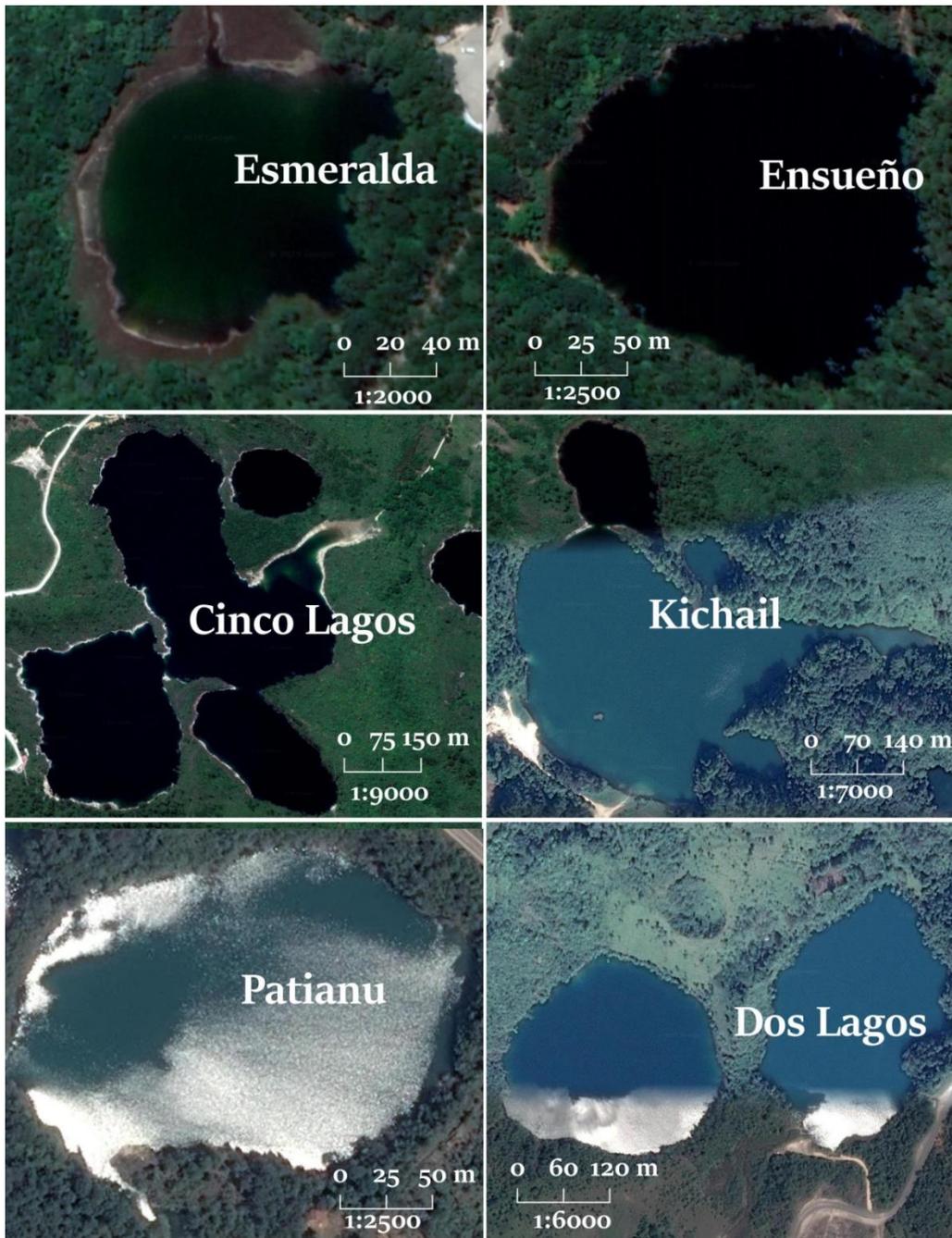


Fig. 4. Representación de los lagos no impactados por medio de imágenes satelitales (Obtenidas a través de Google Satellite y modificadas con QGIS 3.4.8).

6. Materiales y métodos

6.1 Trabajo de campo

El presente estudio consideró 9 lagos del PNLM (Figs. 3 y 4) muestreados durante dos periodos climáticos contrastantes: primavera/verano de 2014 e invierno de 2015. En estos periodos se esperaba que durante la primavera/verano los lagos suficientemente profundos desarrollaran una estratificación estable mientras que todos los lagos estuvieran circulando en el invierno.

En la parte central y más profunda de cada lago se midieron perfiles verticales metro a metro, con la respectiva resolución de cada sensor (Res), de temperatura (T° , Res = 0.01 $^\circ\text{C}$), oxígeno disuelto (OD, Res = 0.01 mg/L), porcentaje de saturación de oxígeno ($\%_{\text{SAT}}$, Res = 1 $\%_{\text{SAT}}$), conductividad eléctrica (K_{25} , Res = 1 $\mu\text{S/cm}$), pH (Res = 0.01 unidades de pH) y turbidez (NTU, Res = 0.1 NTU), mediante una sonda multiparamétrica de calidad de agua, marca Hydrolab modelo DS5X, acoplado a un sistema de captura de información modelo SVR4 (Fig. 5). Asimismo, se registraron perfiles verticales de radiación fotosintéticamente activa (PAR) con un perfilador de fluorescencia natural marca Biospherical modelo PNF-300. Cabe destacar que el tiempo de medición de cada uno de los perfiles verticales se realizó de manera rápida, razón por la cual puede que algunos sensores hayan dado valores no exactos.

La profundidad de la zona eufótica (Z_{EU}) se consideró desde la superficie del cuerpo acuático y hasta donde llega el 1 % de la PAR en superficie. La profundidad de la capa de mezcla (Z_{mix}) se definió con base en los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto como la zona de la columna de agua con características homogéneas de temperatura, y delimitada en la época de estratificación por el tope de la termoclina.

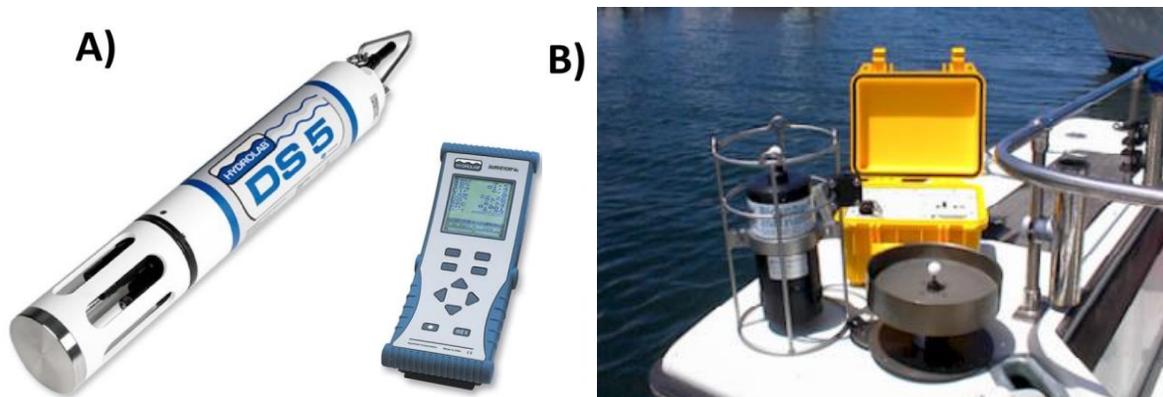


Fig. 5. (a) Sonda multiparamétrica de calidad de agua, marca Hydrolab modelo DS5X acoplado a un sistema de captura de información modelo SVR4, (b) PNF-300 *Profiling Natural Fluorometer System*.

6.2 Trabajo de gabinete

Los lagos fueron clasificados en someros y profundos, prístinos e impactados, de acuerdo con Alcocer *et al.* (2016) (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación geográfica, profundidad y clasificación de los lagos en estudio del PNLM, ordenados de NW a SE de acuerdo con Oseguera y Alcocer (2015). $Z_{m\acute{a}x}$ = profundidad máxima, Z_{med} = profundidad media, Som = somero, Prof = profundo; NI = no impactado, I = impactado.

LAGO	Lat. N	Lat. W	Z _{máx} (m)	Z _{med} (m)	Som/Prof	I/NI
Balantetic	16°07′	91°47′	3	1.7	Som	I
San Lorenzo	16°07′	91°46′	67	11.8	Prof	I
La Encantada	16°07′	91°43′	89	29.4	Prof	I
Esmeralda	16°07′	91°43′	7	3.6	Som	NI
Ensueño	16°07′	91°43′	35	21.6	Prof	NI
Cinco Lagos	16°06′	91°40′	162	42.5	Prof	NI
Kichail	16°05′	91°39′	22	9.5	Prof	NI
Patianú	16°05′	91°39′	26	10.8	Prof	NI
Dos Lagos	16°05′	91°38′	42	25.2	Prof	NI

Con los datos obtenidos se elaboraron gráficas de líneas con el programa Jupyter Notebook, el cual es una consola gratuita del programa Python. De igual manera se elaboraron tablas con ayuda del programa Excel 2010 para tener de manera ordenada los datos y así la comparación fuera más fácil. Posteriormente se realizó un análisis de conglomerados, tomando en cuenta los promedios de todas las variables fisicoquímicas de cada lago para las temporadas de primavera/verano e invierno, aplicando el método de Ward, puesto que nos agrupó a los lagos de manera más satisfactoria, con ayuda del programa Past3.exe.

7. Resultados

La turbidez es una variable que muestra datos no exactos, puesto que para su medición depende de diferentes factores, siendo el principal el tiempo que tarda el sensor en estabilizarse y la dificultad para calibrarlo. De esta manera, se puede decir que los datos que arrojan estos sensores siempre van a variar, puesto que no le damos el tiempo suficiente para estabilizarse por cuestiones de campo, que requiere la realización rápida del muestreo, y porque las condiciones de los materiales suspendidos van a estar en constante cambio. Es un problema común que suele producirse en este tipo de muestreos, puesto que todos los sensores trabajan de diferente manera, provocando que para unos se tengan datos más exactos y para otros se puedan obtener únicamente estimaciones.

7.1 PROFUNDIDAD DE LA ZONA EUFÓTICA (Z_{EU})

En ambas temporadas la mayor profundidad de la Z_{EU} se registró en Cinco Lagos, seguido de Ensueño y Dos Lagos (todos clasificados como no impactados, Tabla 2).

En cuanto a la Z_{EU} mínima, durante la época primavera/verano se presentó en Balantetic, seguido de San Lorenzo y La Encantada (todos clasificados como impactados) y en la

época de invierno, se presentó en San Lorenzo, seguido de Balantetic (ambos impactados) y luego Esmeralda (no impactado).

Tabla 2. Profundidad de la zona eufótica (m) en cada uno de los lagos estudiados. Se le asignó un color verde al nombre del lago que se clasifica como impactado y un color azul a los lagos que se clasifican como no impactados.

LAGO	Temporada de primavera/verano	Temporada de invierno
Balantetic	3.3	2.9
San Lorenzo	3.8	2.4
La Encantada	4.4	6.5
Esmeralda	5.6	5.1
Ensueño	31.5	32.5
Cinco Lagos	36.2	47.5
Kichail	19.2	19.9
Patianú	15.5	18.3
Dos Lagos	27.2	27.7

La Z_{EU} suele ser más profunda durante el invierno en la mayoría de los lagos, con excepción de Balantetic, San Lorenzo (ambos impactados) y Esmeralda (no impactado). Además, los lagos no impactados presentaron una Z_{EU} mayor en comparación con los lagos impactados.

Durante ambas temporadas, la Z_{EU} de los lagos no impactados/oligotróficos es mucho mayor que la de los lagos impactados/eutróficos (aproximadamente 6 veces más profunda en los lagos no impactados que en los lagos impactados), tomando como referencia el promedio de ambos grupos durante cada temporada (3.8 ± 0.6 y 3.9 ± 2.2 m de profundidad, primavera/verano e invierno, respectivamente, en los lagos impactados, y 22.5

± 11.3 y 25.1 ± 14.4 m de profundidad, primavera/verano e invierno, respectivamente, en los lagos no impactados).

7.2 TEMPERATURA

Durante la época de primavera/verano se registraron temperaturas en el agua con un mínimo de 18.0 °C en el fondo Patianú (no impactado) y un máximo de 26.2 °C en la superficie de San Lorenzo (impactado). Por otro lado, en el invierno la temperatura mínima (17.3°C) se obtuvo de nueva cuenta en el fondo de Patianú, en tanto que la máxima (20.7 °C) se registró en la superficie Balantetic (impactado, Tabla 3).

Tabla 3. Temperatura (°C) de los lagos en estudio. Mín = temperatura mínima, Máx = temperatura máxima, X = promedio y d.e. = desviación estándar. Se le asignó un color verde al nombre del lago que se clasifica como impactado y un color azul a los lagos que se clasifican como no impactados.

LAGO	Temporada de primavera/verano			Temporada de invierno		
	Mín	Máx	X \pm d.e.	Mín	Máx	X \pm d.e.
Balantetic	21.9	24.0	22.8 \pm 1.0	20.7	20.7	20.7 \pm 0.0
San Lorenzo	19.7	26.2	22.3 \pm 1.8	17.3	17.9	17.5 \pm 0.3
La Encantada	18.2	24.6	18.6 \pm 1.1	17.9	18.0	17.9 \pm 0.0
Esmeralda	23.3	23.6	23.5 \pm 0.1	19.0	19.0	19.0 \pm 0.0
Ensueño	20.0	23.6	22.3 \pm 1.4	18.5	19.3	18.7 \pm 0.3
Cinco Lagos	18.5	22.3	20.1 \pm 1.5	18.3	18.6	18.3 \pm 0.1
Kichail	18.5	23.7	21.1 \pm 1.9	17.5	19.5	17.8 \pm 0.6
Patianú	18.0	22.2	19.9 \pm 1.3	17.3	18.0	17.6 \pm 0.3
Dos Lagos	18.5	22.2	19.3 \pm 1.1	17.9	19.2	18.5 \pm 0.3

Se observó que las temperaturas en el período de primavera/verano fueron más heterogéneas y cálidas que durante la circulación invernal. En promedio, en primavera/verano se presentó una mayor temperatura que en invierno. Para la época de primavera/verano, el valor promedio más alto que se encontró fue en el lago Esmeralda (23.5 ± 0.2 °C), el cual no está impactado, seguido de Balantetic y San Lorenzo (22.8 ± 1.0 y 22.3 ± 1.8 °C, respectivamente), los cuales están impactados. Por el contrario, la temperatura mínima promedio se presentó en el lago impactado La Encantada (18.6 ± 1.1 °C), seguido de los lagos no impactados Patianú y Dos Lagos (19.9 ± 1.3 y 19.3 ± 1.1 °C, respectivamente).

En cuanto al invierno, la temperatura promedio más alta se presentó en el lago impactado Balantetic (20.7 ± 0.0 °C), seguido de Esmeralda y Ensueño (19.0 ± 0.0 y 18.7 ± 0.3 °C, respectivamente), clasificados como no impactados. Por otro lado, la temperatura mínima promedio se presentó en el lago impactado San Lorenzo (17.5 ± 0.3 °C), seguido de los no impactados Patianú y Kichail (17.6 ± 0.3 y 17.8 ± 0.6 °C, respectivamente).

A su vez, las mayores temperaturas promedio se presentaron, como era de esperarse, en la temporada de primavera/verano, con 21.2 ± 2.3 °C y 21.0 ± 1.6 °C (lagos impactados y no impactados, respectivamente) en comparación con las temperaturas del invierno 18.7 ± 1.7 °C y 18.3 ± 0.5 °C (lagos impactados y no impactados, respectivamente).

Se calcularon los gradientes de temperatura en cada una de las zonaciones de todos los lagos clasificados como profundos y donde se esperaba que existiera termoclina para la temporada de primavera/verano (Tabla 4).

Tabla 4. Gradiente de temperatura en cada una de las zonaciones expresado en $^{\circ}\text{C m}^{-1}$ de cada uno de los lagos profundos estudiados. Se determinó la presencia de termoclina con un gradiente de temperatura $> 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ (Fiedler, 2010). El símbolo - indica que no hubo estratificación (lagos someros, no se pudieron obtener datos) y * marca a aquellos lagos profundos pero que no presentaron las tres zonaciones bien diferenciadas, aunque sí presentan un alto gradiente de temperatura en los primeros metros de profundidad, produciendo una posible termoclina superficial. En verde están representados los lagos impactados y en azul los no impactados.

LAGO	Gradiente del epilimnion	Grosor del epilimnion	Gradiente del metalimnion	Grosor del metalimnion	Gradiente del hipolimnion	Grosor del hipolimnion
Balantetic	-	-	-	-	-	-
San Lorenzo	*	*	*	*	*	*
La Encantada	*	*	*	*	*	*
Esmeralda	-	-	-	-	-	-
Ensueño	< 0.1	16	0.6	5	0.1	14
Cinco Lagos	< 0.1	22	0.4	3	0.1	47
Kichail	0.2	7	0.5	8	0.1	5
Patianú	0.2	13	0.3	6	0.1	5
Dos Lagos	0.2	5	0.5	4	< 0.1	31

Los gradientes de temperatura más grandes en el epilimnion se presentan en Kichail, Dos Lagos y Patianú ($0.2 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$) mientras que los menores se presentaron en Ensueño y Cinco Lagos ($< 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$). En el metalimnion, el mayor gradiente de temperatura se presentó en Ensueño ($0.6 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$) mientras que el menor se presentó en Patianú ($0.3 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$). Finalmente, el gradiente de temperatura más alto presentado en el hipolimnion fue de $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ en Ensueño, Cinco Lagos, Kichail y Patianú, mientras que el menor se presentó en Dos Lagos ($0.0 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$).

En cuanto a la termoclina, ésta fue más profunda (13 ± 7 m) en los lagos no impactados y más ancha (4 ± 2 m) en comparación con los lagos impactados donde fue más superficial (5 ± 0 m) y más delgada (3 ± 0 m).

Los asteriscos (*) dentro de la tabla señalan los lagos que, a pesar de ser profundos, presentan un elevado gradiente de temperatura en superficie, provocando que no se tengan las tres zonaciones representativas.

7.3 OXÍGENO DISUELTO (OD)

Durante la época de primavera/verano la concentración de OD varió desde valores por debajo del límite de detección (considerada como anoxia, puesto que el límite de detección $DLD < 0.1 \text{ mg L}^{-1}$) hasta 17.5 mg L^{-1} en el lago San Lorenzo (Tabla 5). La anoxia se registró en todos los lagos excepto en los lagos profundos no impactados Ensueño y Cinco Lagos, ni en los lagos someros Balantetic (impactado) y Esmeralda (no impactado).

Durante el invierno se registró anoxia en los lagos impactados San Lorenzo y La Encantada, y en el lago no impactado Dos Lagos. La concentración máxima se obtuvo en el lago impactado Balantetic (18.2 mg L^{-1}).

Tabla 5. Oxígeno disuelto (OD, mg L^{-1}) de los lagos en estudio. Mín = cantidad de OD mínima, Máx = cantidad de OD máxima, X = promedio y d.e. = desviación estándar. DLD = por debajo del límite de detección (i.e., $< 0.1 \text{ mg L}^{-1}$). En verde se representan los lagos impactados, mientras que en azul se presentan los lagos no impactados.

LAGO	Temporada de primavera/verano			Temporada de invierno		
	Mín	Máx	X \pm d.e.	Mín	Máx	X \pm d.e.
Balantetic	2.2	6.9	4.8 ± 2.4	18.0	18.2	18.1 ± 0.1
San Lorenzo	DLD	17.7	5.0 ± 6.4	DLD	6.6	2.4 ± 2.9
La Encantada	DLD	9.7	0.4 ± 1.8	DLD	4.9	1.4 ± 1.6

Esmeralda	5.5	5.8	5.7 ± 0.1	6.3	6.4	6.4 ± 0.0
Ensueño	3.8	7.6	6.6 ± 0.9	7.2	7.00	7.1 ± 0.1
Cinco Lagos	0.6	8.4	6.0 ± 1.8	6.0	6.5	6.1 ± 0.1
Kichail	DLD	7.2	4.9 ± 3.0	6.7	7.3	7.0 ± 0.2
Patianú	DLD	7.0	3.1 ± 2.9	3.8	7.1	6.0 ± 1.2
Dos Lagos	DLD	6.8	1.9 ± 2.3	DLD	7.2	2.7 ± 2.7

En promedio, durante la temporada de primavera/verano se tuvo una concentración de OD más elevada en Ensueño, seguido por Cinco Lagos y Esmeralda (6.6 ± 0.9 , 6.0 ± 1.8 , 5.7 ± 2.0 y 5.7 ± 0.1 mg L⁻¹, respectivamente), todos no impactados. Las menores concentraciones de OD promedio se encontraron en el lago impactado La Encantada (0.4 ± 1.8 mg L⁻¹), seguido por los lagos no impactados Dos Lagos y Patianú (1.8 ± 2.3 y 3.1 ± 2.9 mg L⁻¹, respectivamente). Además, en esta temporada el OD promedio fue mayor (4.7 ± 1.9 mg L⁻¹) en los lagos no impactados que en los lagos impactados (3.4 ± 2.6 mg L⁻¹).

Por el contrario, en la temporada de invierno el lago impactado Balantetic es el que presentó un valor promedio de oxígeno disuelto mayor (18.1 ± 0.1 mg L⁻¹), seguido de los lagos no impactados Ensueño y Kichail (7.1 ± 0.1 y 7.0 ± 0.2 mg L⁻¹, respectivamente). En cuanto a los valores mínimos promedio, se encontraron en los lagos impactados La Encantada y San Lorenzo (1.4 ± 1.6 y 2.4 ± 2.9 mg L⁻¹, respectivamente), además del lago no impactado Dos Lagos (2.7 ± 2.7 mg L⁻¹). Además, el OD promedio, a diferencia de la primavera/verano, fue mayor en los lagos impactados (7.3 ± 9.4 mg L⁻¹) que en los lagos no impactados (5.9 ± 1.6 mg L⁻¹).

Los únicos lagos que presentaron concentraciones de oxígeno disuelto por DLD en ambos periodos fueron los lagos impactados San Lorenzo y La Encantada, además del lago no impactado Dos Lagos. Cabe destacar que de igual manera, San Lorenzo y La Encantada presentaron los valores mínimos y máximos durante la primera/verano.

Los lagos profundos presentaron una oxiclina acoplada a la termoclina, la cual es una zona en donde el gradiente de concentración de OD disminuye drásticamente conforme aumenta la profundidad. Suele encontrarse a la misma profundidad de la termoclina, puesto que la temperatura es la variable principal que genera diferencias de densidad del agua y con ello conduce a la estratificación.

En general, se tuvo un incremento en la concentración de OD promedio durante la temporada fría (invierno), excepto en San Lorenzo.

7.4 PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO (%_{SAT})

Los valores mínimos de porcentaje de saturación de OD correspondieron a las concentraciones de OD por DLD, por lo que este valor se consideró como 0 %_{SAT}. Por otro lado, el valor máximo fue de 270 %_{SAT}, en la superficie de San Lorenzo durante la primavera/verano. En el periodo de circulación invernal, el valor mínimo del porcentaje de saturación fue de 0 %_{SAT}, en el fondo del lago La Encantada, y el valor máximo se encontró en Balantetic con 245 %_{SAT} (Tabla 6).

Tabla 6. Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en los lagos en estudio (%_{SAT}). Mín = %_{SAT} mínimo, Máx = %_{SAT} máximo, X = promedio y d.e. = desviación estándar. En verde se representan los lagos impactados, mientras que en azul se presentan los lagos no impactados.

LAGO	Temporada de primavera/verano			Temporada de invierno		
	Mín	Máx	X ± d.e.	Mín	Máx	X ± d.e.
Balantetic	34	105	73 ± 36	243	246	245 ± 2
San Lorenzo	0	270	77 ± 100	1	84	30 ± 37
La Encantada	0	146	6 ± 27	0	63	17 ± 20
Esmeralda	84	89	87 ± 2	83	84	83 ± 0
Ensueño	53	112	97 ± 15	90	95	92 ± 1
Cinco Lagos	9	121	86 ± 27	77	84	78 ± 1
Kichail	0	108	72 ± 45	84	96	88 ± 3
Patianú	0	103	44 ± 42	47	91	77 ± 16
Dos Lagos	0	101	26 ± 34	1	94	35 ± 35

En la temporada de primavera/verano, los lagos no impactados son los que presentaron el mayor valor promedio en %_{SAT}. Ensueño es el lago que tuvo el valor más elevado promedio, seguido de Esmeralda y Cinco Lagos (97 ± 15, 87 ± 42 y 86 ± 27 %_{SAT}, respectivamente). Los porcentajes mínimos se presentaron en el lago impactado La Encantada (6 ± 27 %_{SAT}), seguido de los no impactados Dos Lagos y Patianú (26 ± 34 y 44 ± 42 %_{SAT}, respectivamente).

Para el invierno, el lago impactado Balantetic es el que presentó %_{SAT} promedio más elevado (245 ± 2 %_{SAT}), seguido de los no impactados Ensueño y Kichail (92 ± 1 y 88 ± 3 %_{SAT}, respectivamente). El %_{SAT} mínimo se presentó en los lagos impactados La Encantada y San Lorenzo (17 ± 20 y 30 ± 37 %_{SAT}, respectivamente), seguidos por el lago no impactado Dos Lagos (35 ± 35 %_{SAT}).

La tendencia en ambas épocas es que los lagos impactados presentaron el valor mayor de %_{SAT}.

7.5 PROFUNDIDAD DE LA CAPA DE MEZCLA (Z_{mix})

La profundidad de la capa de mezcla (Z_{mix}) se describe como aquella zona desde la superficie hasta la profundidad en la cual la temperatura comienza a disminuir de forma drástica. Su límite de profundidad está marcado por el inicio de la termoclina durante la primavera/verano (en lagos profundos). En este caso, está representada por la profundidad a la que llega el epilimnion mostrado en la Tabla 4 y expresada en la Tabla 7 obtenida mediante el gradiente de temperatura para la primavera/verano.

Tabla 7. Profundidad de la capa de mezcla (Z_{mix}) en metros (m) de cada lago estudiado. El gradiente de temperatura se usó para delimitar la Z_{mix} durante la primavera/verano. Los “-” representan a aquellos lagos someros, por lo que no se pudieron obtener datos, y los “*” representan a los lagos que carecen de tres zonaciones características. La Z_{mix} en el invierno alcanzó el fondo dentro de todos los lagos, a excepción de Dos Lagos.

LAGO	Gradiente del epilimnion en primavera/verano	Z_{mix} Primavera/verano	$Z_{m\acute{a}x}$ Primavera/verano	Z_{mix} Invierno	$Z_{m\acute{a}x}$ Invierno
Balantetic	-	2	2	2	2
San Lorenzo	*	4	11	22	22
La Encantada	*	5	68	69	69
Esmeralda	-	4	4	6	6
Ensueño	< 0.1	16	30	36	36
Cinco Lagos	< 0.1	22	73	109	109
Kichail	0.2	7	20	21	21
Patianú	0.2	13	23	20	20
Dos Lagos	0.2	5	41	13	40

Durante el invierno, como existe circulación, la Z_{mix} se considera presente en toda la columna de agua (de superficie a fondo) a excepción de Dos Lagos (Tabla 7); en este lago, aproximadamente en los metros 5-12 de profundidad existen variaciones en la temperatura debido a que esta zona está delimitada por una haloclina, gracias al aporte de aguas más saladas desde los acuíferos (ver gráficas de Dos Lagos en el Anexo 1).

Los dos lagos someros se mezclan frecuentemente (polimícticos) por lo que su Z_{mix} abarca toda la columna de agua durante todo el año.

Por el contrario, los lagos profundos son monomícticos cálidos, de forma tal que la Z_{mix} durante primavera/verano (estratificación) corresponde al epilimnion, mientras que en el invierno abarca toda la columna de agua. La excepción se encuentra en Dos Lagos, meromíctico, por lo que durante el invierno la Z_{mix} abarca solo el mixolimnion (capa superficial hasta la quimioclina).

De igual manera no importa el grado de impacto que presenten los lagos, puesto que todos los lagos tuvieron una mezcla completa a lo largo de toda la columna de agua, salvo el caso de Dos Lagos por el aporte de aguas subterráneas, el cual es un carácter único que se presenta solo en ese lago estudiado.

7.6 CONDUCTIVIDAD (K_{25})

Dos Lagos es el único lago que presentó una K_{25} mayor a $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$ en su zona más profunda durante ambas épocas. Por otro lado, el lago que presentó la menor conductividad fue Cinco Lagos, manteniéndose por debajo de $220 \mu\text{S cm}^{-1}$ durante los dos periodos (Tabla 8).

Tabla 8. Conductividad K_{25} ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de los lagos en estudio. Mín = conductividad mínima, Máx = conductividad máxima, X = promedio y d.e. = desviación estándar. En verde se representan los lagos impactados, mientras que en azul se presentan los lagos no impactados.

LAGO	Temporada de primavera/verano			Temporada de invierno		
	Mín	Máx	X \pm d.e.	Mín	Máx	X \pm d.e.
Balantetic	528	622	564 \pm 51	944	947	945 \pm 1
San Lorenzo	493	733	599 \pm 79	745	766	754 \pm 9
La Encantada	411	555	430 \pm 27	456	478	469 \pm 7
Esmeralda	340	342	340 \pm 1	373	375	374 \pm 1
Ensueño	236	255	243 \pm 8	265	266	265 \pm 0
Cinco Lagos	189	204	194 \pm 3	212	213	212 \pm 0
Kichail	243	295	255 \pm 16	284	285	284 \pm 0
Patianú	243	287	259 \pm 17	264	277	271 \pm 5
Dos Lagos	339	1349	838 \pm 267	397	1545	841 \pm 307

En cuanto a los valores promedio de K_{25} , para la temporada de primavera/verano el lago no impactado Dos Lagos es el que presentó el valor más alto ($838 \pm 267 \mu\text{S cm}^{-1}$) seguido de los impactados San Lorenzo y Balantetic (599 ± 79 y $430 \pm 27 \mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente). Los valores mínimos se encontraron en los lagos no impactados Cinco Lagos, Ensueño y Kichail (194 ± 3 , 243 ± 8 y $255 \pm 16 \mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente).

Para la temporada de invierno, el lago impactado Balantetic es el que presentó el valor máximo promedio ($945 \pm 1 \mu\text{S cm}^{-1}$), seguido del no impactado Dos Lagos ($841 \pm 307 \mu\text{S cm}^{-1}$) y el impactado San Lorenzo ($754 \pm 8 \mu\text{S cm}^{-1}$). Por otro lado, los valores mínimos promedio para ambas temporadas se presentaron en Cinco Lagos (194 ± 3 en primavera/verano y 212 ± 0 en invierno).

En general, la conductividad promedio para ambas temporadas es mayor en el invierno $723 \pm 240 \mu\text{S cm}^{-1}$ y $375 \pm 234 \mu\text{S cm}^{-1}$ (respectivamente en impactados y no impactados) que en la primavera/verano $531 \pm 89 \mu\text{S cm}^{-1}$ y $355 \pm 241 \mu\text{S cm}^{-1}$ (respectivamente en impactados y no impactados) y se aprecia una clara tendencia de que los lagos impactados presentan una mayor conductividad que los lagos no impactados solamente en superficie, puesto que todos demuestran un comportamiento de aumento en la K_{25} conforme se aumenta la profundidad.

De acuerdo con lo anterior, se pudieron distinguir dos grupos perfectamente diferenciables tomando como referencia sus valores de K_{25} :

- a) El que presenta valores mayores a $400 \mu\text{S cm}^{-1}$ durante ambas temporadas (alta conductividad), conformado por los lagos impactados más Dos Lagos.
- b) El que presenta valores menores a $400 \mu\text{S cm}^{-1}$ durante ambas temporadas (baja conductividad), conformado por los lagos no impactados.

7.7 pH

Durante el periodo de primavera/verano el pH mínimo fue de 7.0 y se presentó en el epilimnion Dos Lagos y el pH máximo se encontró en la superficie de San Lorenzo, con un valor de 8.8. En el periodo de invierno el pH mínimo se presentó de nueva cuenta en los metros más superficiales de Dos Lagos, con un valor de 7.2 y el valor máximo fue de 8.8 en Balantetic (Tabla 9).

Tabla 9. pH de los lagos en estudio. Mín = pH mínimo, Máx = pH máximo, X = promedio y d.e. = desviación estándar. En verde se representan los lagos impactados, mientras que en azul se presentan los lagos no impactados.

LAGO	Temporada de primavera/verano			Temporada de invierno		
	Mín	Máx	X ± d.e.	Mín	Máx	X ± d.e.
Balantetic	7.4	7.8	7.6 ± 0.2	8.8	8.8	8.8 ± 0.0
San Lorenzo	7.1	8.8	7.8 ± 0.6	7.9	8.4	8.1 ± 0.2
La Encantada	7.1	8.3	7.2 ± 0.2	7.6	8.1	7.8 ± 0.1
Esmeralda	7.7	7.8	7.7 ± 0.0	8.2	8.2	8.2 ± 0.0
Ensueño	7.5	8.2	8.0 ± 0.3	8.3	8.5	8.4 ± 0.0
Cinco Lagos	7.2	8.2	7.9 ± 0.3	8.3	8.4	8.3 ± 0.0
Kichail	7.2	8.3	7.9 ± 0.4	8.1	8.2	8.2 ± 0.0
Patianú	7.1	7.9	7.4 ± 0.3	8.1	8.5	8.3 ± 0.2
Dos Lagos	7-0	7.9	7.2 ± 0.3	7.2	8.1	7.5 ± 0.3

En cuanto al pH promedio, los lagos no impactados Ensueño, Cinco Lagos y Kichail tuvieron los valores más básicos para la primavera/verano (8.0 ± 0.3 , 7.9 ± 0.3 y 7.9 ± 0.4 , respectivamente). En cuanto a los valores promedios más cercanos a la neutralidad, se encontraron en el lago no impactado Dos Lagos (7.2 ± 0.3), seguido del impactado La Encantada (7.2 ± 0.2) y el no impactado Patianú (7.4 ± 0.3).

Por el contrario, los lagos con el pH promedio más básico en el invierno fueron el impactado Balantetic (8.8 ± 0.0), seguido de los no impactados Ensueño y Cinco Lagos (8.4 ± 0.0 y 8.3 ± 0.0 , respectivamente). El pH más cercano a la neutralidad se presentó en el lago no impactado Dos Lagos (7.5 ± 0.3), seguido de los impactados La Encantada y San Lorenzo (7.8 ± 0.1 y 8.1 ± 0.2 , respectivamente).

Además, se determinó que durante la temporada de invierno se tiene un pH más básico promedio 8.2 ± 0.5 y 8.2 ± 0.3 (impactados y no impactados, respectivamente) en comparación con la primavera/verano 7.5 ± 0.3 y 7.7 ± 0.3 (impactados y no impactados, respectivamente) durante ambas temporadas.

7.9 TURBIDEZ

Por la rapidez del muestreo, este sensor puede tener valores inexactos, pero son lo suficientemente buenos para analizarlos.

Para el periodo de primavera/verano los valores mínimos de turbidez se registraron en la superficie de los lagos no impactados Esmeralda, Ensueño, Cinco Lagos, Kichail y Dos Lagos (NTU = 1). El valor máximo se registró en el fondo del lago impactado Balantetic con 130 NTU. En cuanto al periodo de invierno, el valor mínimo de turbidez que se obtuvo fue de 0 NTU a lo largo de toda la columna de agua de casi todos los lagos no impactados. Por el contrario, el valor máximo que se obtuvo fue de 40 NTU de nueva cuenta en el fondo del lago impactado Balantetic (Tabla 10).

Tabla 10. Turbidez (NTU) de los lagos en estudio. Máx= NTU máxima, Mín= NTU mínima, X= promedio y d.e.= desviación estándar. En verde se representan los lagos impactados, mientras que en azul se presentan los lagos no impactados.

LAGO	Temporada de primavera/verano			Temporada de invierno		
	Mín	Máx	X±d.e.	Mín	Máx	X ± d.e.
Balantetic	36	130	70 ± 52	11	40	23 ± 15
San Lorenzo	6	39	20 ± 10	14	21	18 ± 2
La Encantada	2	30	3 ± 5	2	3	2 ± 0
Esmeralda	1	1	1 ± 0	0	0	0 ± 0
Ensueño	1	2	1 ± 0	0	0	0 ± 0

Cinco Lagos	1	2	1 ± 0	0	0	0 ± 0
Kichail	1	75	8 ± 16	0	0	0 ± 0
Patianú	4	21	15 ± 5	0	2	0 ± 1
Dos Lagos	1	6	2 ± 1	0	1	0 ± 0

El lago en el que se registró la mayor turbidez en ambas temporadas fue Balantetic, clasificado como impactado. Por otro lado, los lagos que presentaron valores menores de turbidez fueron, en general, los no impactados.

Balantetic registró el valor mayor promedio de turbidez, tanto en la temporada de primavera/verano como en el invierno (70 ± 52 y 23 ± 15 , respectivamente). La turbidez mínima promedio para la primavera/verano se encontró en los lagos no impactados Esmeralda, Ensueño y Cinco Lagos (todos con 1 ± 0 NTU). Por otro lado, la turbidez mínima promedio en invierno se presentó en todos los lagos no impactados (0 ± 1 en Patianú y 0 ± 0 en todos los demás).

En promedio, los lagos impactados tienen una turbidez de 31 ± 35 NTU y 14 ± 11 NTU (primavera/verano e invierno, respectivamente) y los no impactados de 6 ± 5 NTU y 0 NTU (primavera/verano e invierno, respectivamente).

7.10 COMPARACIÓN ENTRE LOS LAGOS

Para la época de primavera/verano (Fig. 6a) el análisis de conglomerados realizado con los valores promedio de todas las variables fisicoquímicas conformó dos grandes grupos: Balantetic, San Lorenzo y Dos Lagos (Grupo 1) y Cinco Lagos, Patianú, Ensueño, Kichail, La Encantada y Esmeralda (Grupo 2).

El Grupo 1 engloba a la mayoría de los lagos impactados (con excepción de La Encantada), además del lago no impactado Dos Lagos. Este grupo se caracteriza en general por tener las mayores conductividades promedio, además de mostrar valores mayores de turbidez. En general, no hay presencia de epilimnion diferenciado y presentan los valores mayores de %_{SAT} de OD.

El Grupo 2 lo conforman los lagos no impactados (con excepción de Dos Lagos), además del lago impactado La Encantada. Este grupo se caracteriza en general por tener las menores conductividades promedio, presentar un pH con tendencia básica y demostrar los valores mínimos de turbidez. Además, cuentan con un epilimnion diferenciado y presentan una mayor concentración de OD.

Dos Lagos se incluyó en el Grupo 1 solo por tener más elevada conductividad; sin embargo, estos corresponden a la capa del fondo (monimolimnion)

La Encantada es el lago que menos se acopla a las características del Grupo 2, puesto que presenta temperaturas más bajas, valores de OD y %_{SAT} promedio mínimos (al igual que los lagos no impactados) y por no presentar epilimnion diferenciado, además de presentar anoxia en ambos periodos de muestreo (como los lagos impactados).

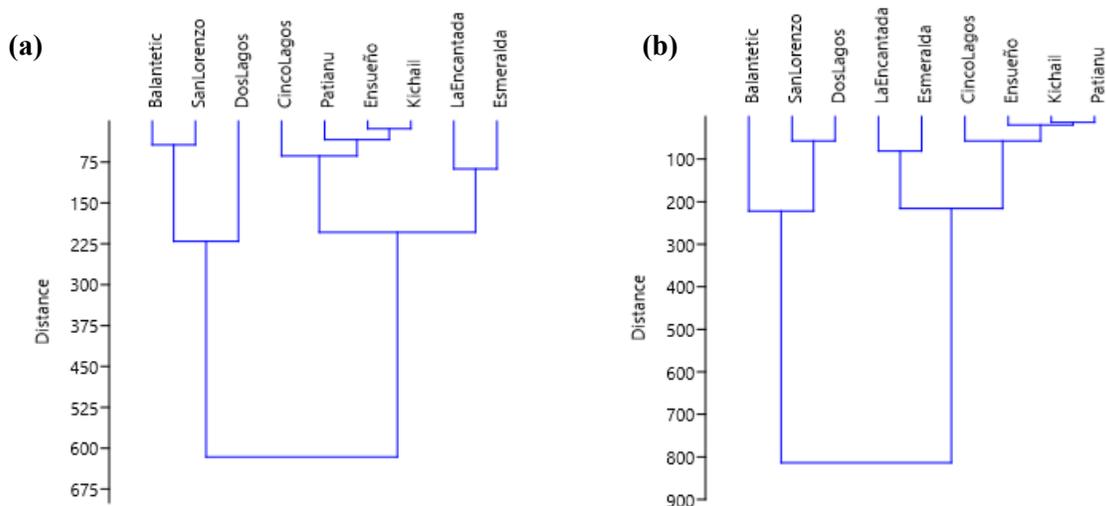


Fig. 6. Análisis de conglomerados (método de Ward) de los lagos de Montebello con base en los parámetros fisicoquímicos. (a) Época de primavera/verano y (b) Época de invierno, elaborados con el programa Past3.exe.

Para la época invierno (Fig. 6b) el análisis de conglomerados generó de nueva cuenta 2 agrupaciones iguales: el Grupo 1, que de nuevo engloba a Balantetic, San Lorenzo (impactados) y Dos Lagos (no impactado) y el Grupo 2, que de nueva cuenta engloba a La Encantada (impactado), Esmeralda, Cinco Lagos, Ensueño, Kichail y Patianú (no impactados).

El Grupo 1 se caracteriza por conjuntar lagos que presentan como mínimo valores de anoxia, pero como máximo las concentraciones más elevadas de OD y %_{SAT}. Finalmente, son los lagos con mayores conductividades y más alta turbidez. Todas estas características reflejan el estado eutrófico de los lagos impactados.

Dos Lagos se posiciona en este grupo por el aporte de aguas subterráneas enriquecidas por la disolución de yesos, provocando que se tenga la mayor conductividad de todos los lagos. Cabe destacar que las conductividades más bajas se presentan en los lagos no impactados, lo cual de igual manera se puede apreciar en el mixolimnion de Dos Lagos (ver gráficas de Dos Lagos en el Anexo 1).

El Grupo 2 se caracteriza por presentar temperaturas más bajas que el Grupo 1, además de encontrarse también valores más bajos de %_{SAT}. Estos lagos tienen una conductividad menor que el Grupo 1. En general, todos los lagos tienen bajos valores de turbidez.

Un dato que destaca de estos conjuntos es que los lagos tendieron a agruparse de acuerdo a su estado trófico (impactados con impactados y no impactados con no impactados), salvo algunos casos particulares (Dos Lagos y La Encantada). En cuanto a la profundidad, no se ve una clara tendencia de agrupamiento, puesto que los dos lagos someros (Balantetic y Esmeralda) en ninguna temporada quedaron inmersos en el mismo grupo. Otro punto importante es que en el Grupo 2 de ambas temporadas siempre se agruparon los lagos La Encantada y Esmeralda.

Con estos agrupamientos se puede generalizar diciendo que los lagos impactados se caracterizan por presentar más altas temperaturas, conductividades, turbidez, concentración de OD y %_{SAT}; sin embargo, tienen un fondo anóxico. De igual manera no presentan un epilimnion diferenciado.

En cuanto a los lagos no impactados, se caracterizan por tener más bajas temperaturas, conductividades, turbidez y %_{SAT}. Tienen un pH básico y presentan un epilimnion bien diferenciado.

Además de los anteriores agrupamientos, se puede tomar en consideración la presencia de 4 categorías de lagos tomando en cuenta la profundidad y el estado trófico, con lo cual se obtienen 4 categorías:

1. Profundos no impactados
2. Profundos impactados

3. Someros no impactados
4. Someros impactados

A continuación, se seleccionó un lago de cada categoría para ejemplificar sus propiedades. Los perfiles y las características de los otros 5 lagos se encuentran en el Anexo 1.

7.10.1 PROFUNDO NO IMPACTADO (CINCO LAGOS)

Los perfiles para la primavera/verano fueron menos profundos que para el invierno, pero alcanzaron una profundidad ideal para lograr hacer la comparación de ambos perfiles (Fig. 7).

La temperatura durante la primavera/verano presenta un decrecimiento progresivo durante los primeros 20 m de profundidad. Después de este valor se muestra una drástica disminución de temperatura que se estabiliza hasta los 40 m de profundidad, por la presencia de termoclina. Después de este valor se vuelve a tener el decrecimiento progresivo de la temperatura. En cuanto al oxígeno disuelto y el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto se demuestran valores homogéneos a lo largo de los primeros 20 metros. Después de esa profundidad se demuestran alternancias de aumentos y disminuciones en sus valores.

Durante el invierno, la temperatura fue homogénea, siendo considerablemente mayor en los primeros 10 m de profundidad. El mismo comportamiento lo presentan el oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación. Cabe destacar que durante el invierno, a lo largo de toda la columna de agua se presentaron temperaturas menores con respecto a la primavera/verano, existiendo una menor diferencia entre ambos a la profundidad máxima (aproximadamente 0.5 °C de diferencia). En cuanto al oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación durante el

invierno, únicamente en superficie se presentaron valores menores que en primavera/verano. Después de los 20 metros de profundidad en primavera/verano continúa la disminución de sus valores, mientras que en el invierno se siguen preservando los valores homogéneos conforme se sigue aumentando la profundidad, lo que provoca que los valores presentados en primavera/verano sean menores a mayor profundidad.

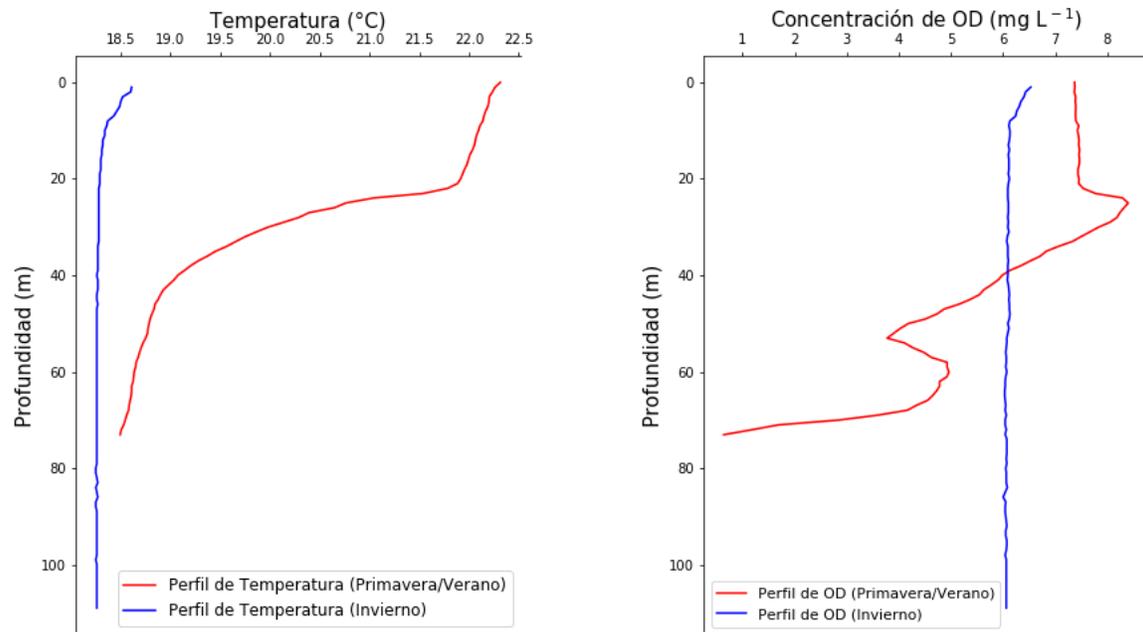
La conductividad específica demuestra una ligera homogeneidad de sus valores a lo largo de los primeros 20 m de profundidad. Después de este punto se aprecia un marcado aumento que alcanza los $195 \mu\text{S cm}^{-1}$ de conductividad. Posteriormente, se aprecian alternaciones entre ascensos y descensos en los valores de la conductividad específica, teniendo un aumento máximo después de los 60 m de profundidad, alcanzando los $205 \mu\text{S cm}^{-1}$. Por otro lado, el invierno presenta conductividades homogéneas y mayores a lo largo de toda la columna de agua (aproximadamente $5 \mu\text{S cm}^{-1}$ mayor del valor máximo presentado en primavera/verano).

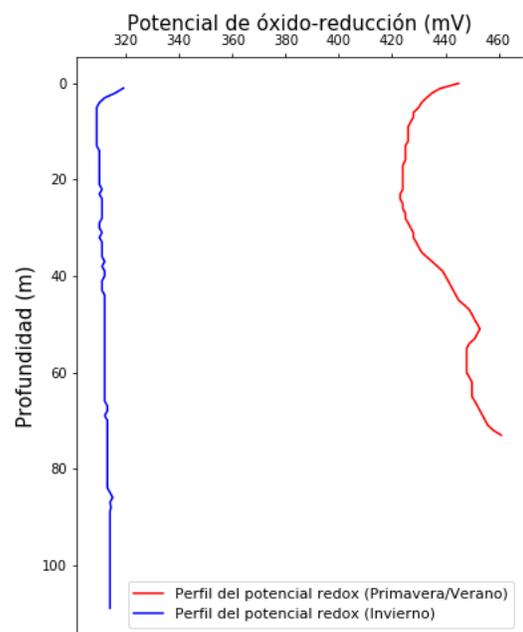
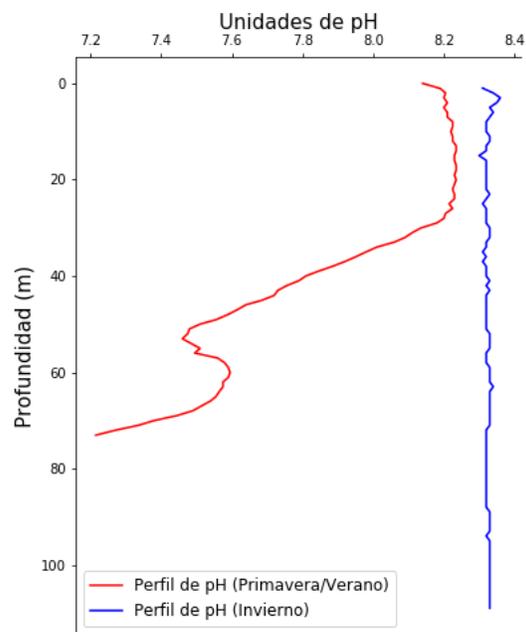
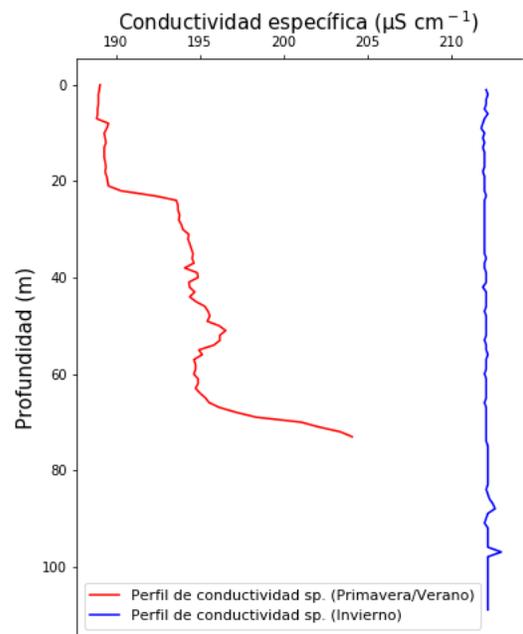
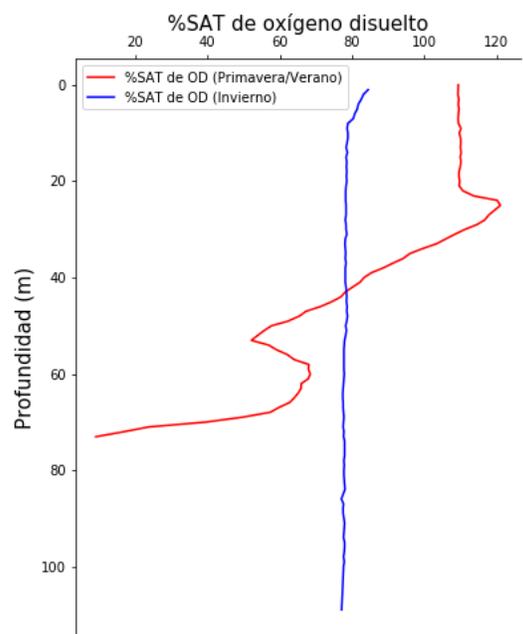
El pH, al igual que las otras variables durante la primavera/verano, presenta una aparente presencia de valores homogéneos a lo largo de los primeros 20 m de profundidad. Después de este punto se aprecia una drástica disminución, tendiendo hacia valores neutros. Aproximadamente a los 50 m se vuelve a presentar un aumento que dura pocos metros, para en seguida se continúe con su mismo patrón de decrecimiento conforme se aumenta la profundidad (disminuyendo hasta 7.2 unidades de pH). En cuanto al invierno, se presentan valores de pH homogéneos a lo largo de toda la columna de agua (varían entre 8.3 unidades de pH). En general, ambas temporadas únicamente se parecen en superficie, puesto que existe una diferencia de aproximadamente 0.2 unidades de pH entre ambos valores. Sin embargo, claramente es mayor el pH registrado durante el invierno a lo largo de toda la

columna de agua (valores básicos/alcalinos) que durante la primavera/verano (de valores básicos/alcalinos tiende a convertirse neutro conforme se aumenta la profundidad).

La turbidez durante la primavera/verano presenta una alternancia entre aumento-disminución de sus valores, pero con una clara tendencia a aumentar conforme se aumenta la profundidad. En el invierno se vuelve a presentar la homogeneidad de los datos a lo largo del perfil de agua, teniendo como valor general 0 NTU. En general, la turbidez presenta un valor mayor durante la primavera/verano, puesto que en invierno es nula.

A continuación se muestran los gráficos para el lago (Fig. 7):





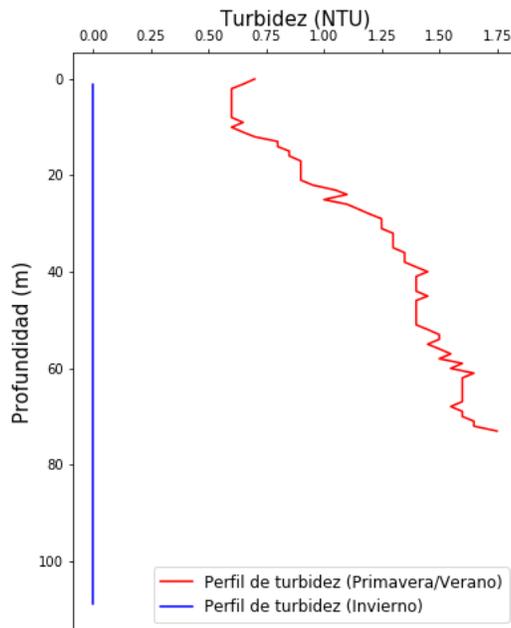


Fig. 7. Gráficas de los parámetros fisicoquímicos en el lago profundo no impactado Cinco Lagos.

7.10.2 PROFUNDO IMPACTADO (LA ENCANTADA)

Es el único lago que forma parte de esta categoría y sus perfiles se pueden apreciar en la Fig. 8.

Durante la primavera/verano se aprecia la presencia de termoclina, lo cual era de esperarse por su gran profundidad. Dicha termoclina se presenta aproximadamente en los 5 m. Entre la superficie y la termoclina se aprecia una diferencia de temperatura de aproximadamente 5 °C, después de esta, la temperatura varió aproximadamente 1°C en 60 metros. En cuanto al oxígeno disuelto, en la superficie se tienen concentraciones mayores que en el fondo. La oxiclina se presenta de igual manera aproximadamente en los 5 m y después de ese valor se tienen valores que tienden a la anoxia. El mismo comportamiento se presenta en el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto.

Por el contrario, durante la temporada de invierno se observa una temperatura homogénea a lo largo de la columna de agua (aproximadamente 18 °C), con temperaturas menores a la menor temperatura que se obtuvo en la primavera/verano (aproximadamente 18.5 °C). En cuanto al oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación, se tiene un comportamiento que no demuestra una clara tendencia. A lo largo de la columna de agua se presenta una alternancia con subidas y bajadas de los valores, pero con un constante decaimiento, llegando a 0 %_{SAT} hasta después de los 40 m de profundidad. Esto nos puede dar una idea de que, como es periodo de circulación, el oxígeno disuelto se está distribuyendo a lo largo de la columna de agua, pero dicha mezcla no es capaz de alcanzar el fondo.

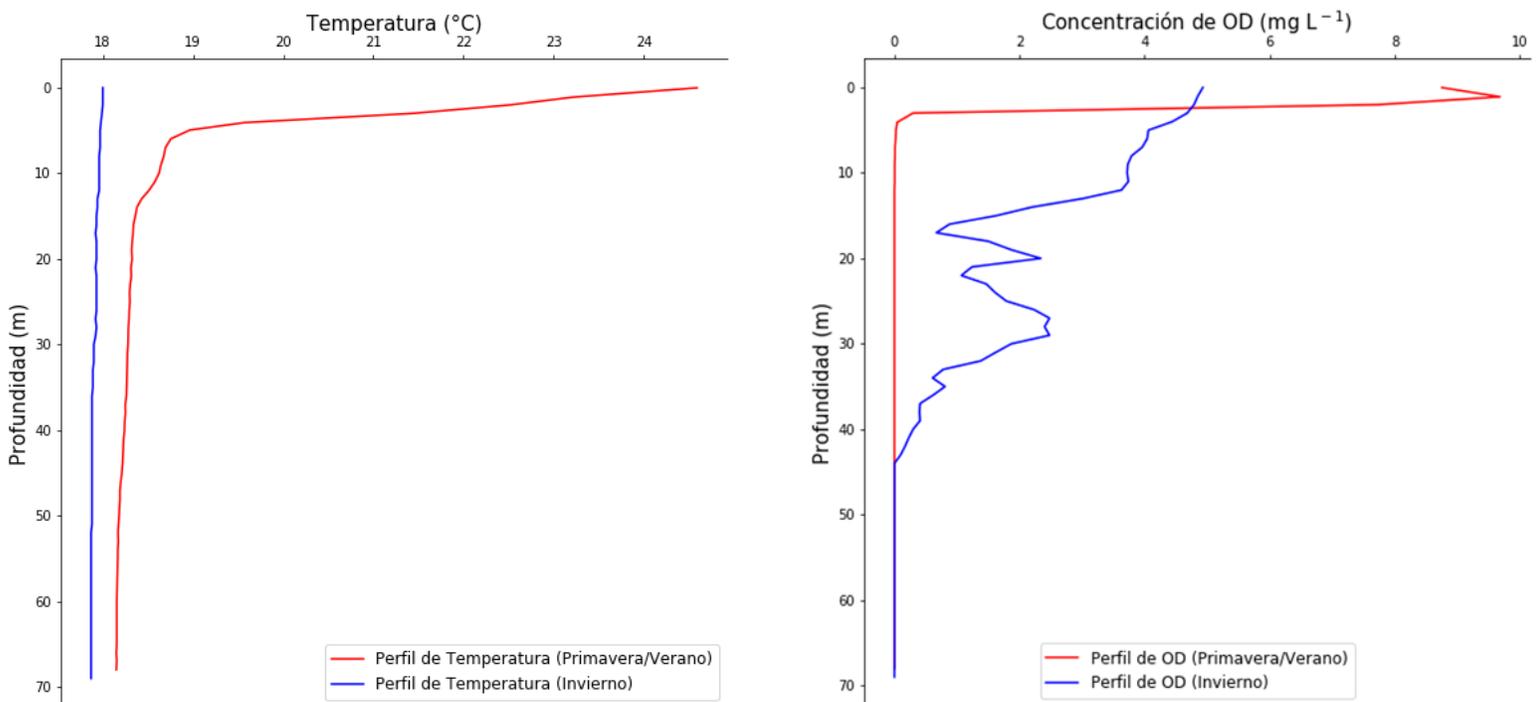
La conductividad específica sigue el mismo comportamiento en superficie que las anteriores variables en la primavera/verano. La diferencia está en que conforme se aumenta la profundidad, de igual manera se aumenta la conductividad. Lo mismo sucede en el invierno. No se nota un cambio drástico de conductividad en la columna de agua, pero sí se aprecia cómo se aumenta su valor conforme se incrementa la profundidad, alcanzando una aparente homogeneidad después de los 40 m.

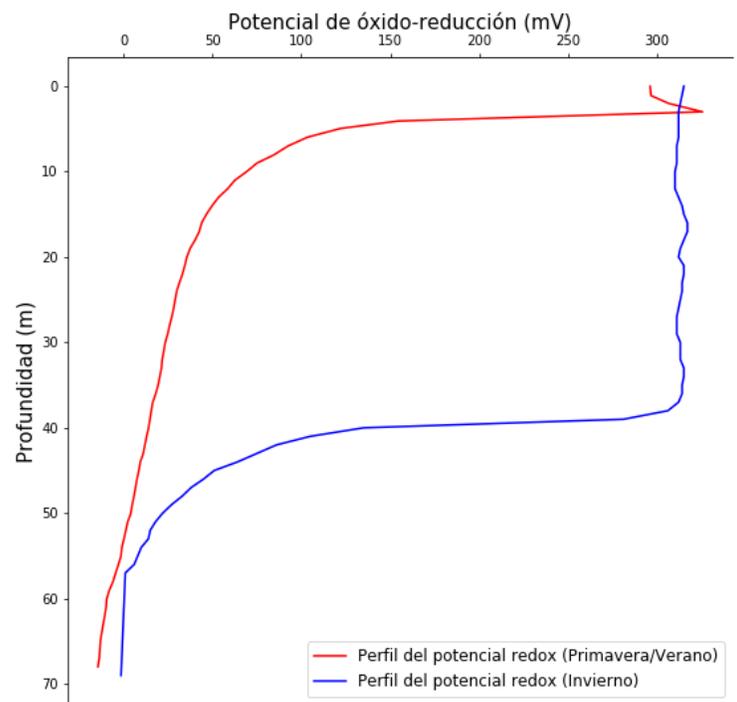
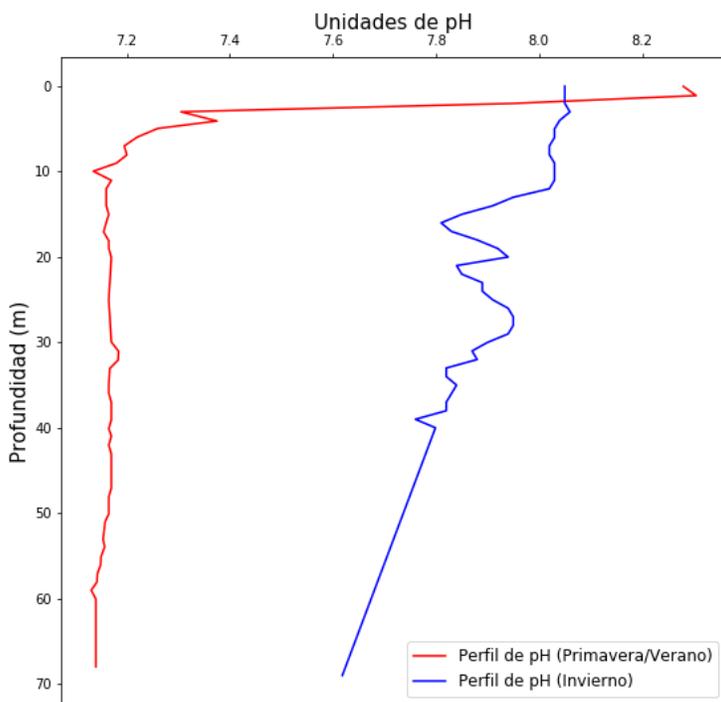
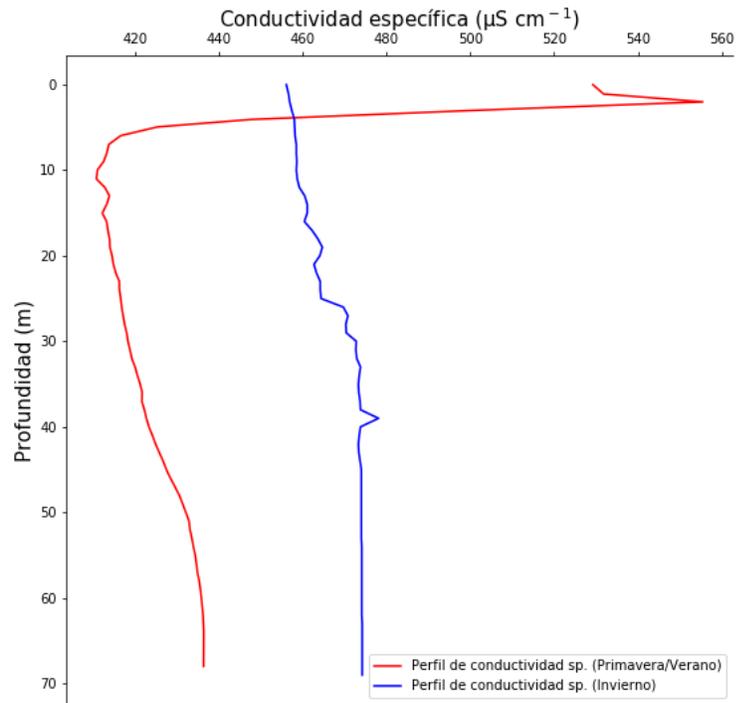
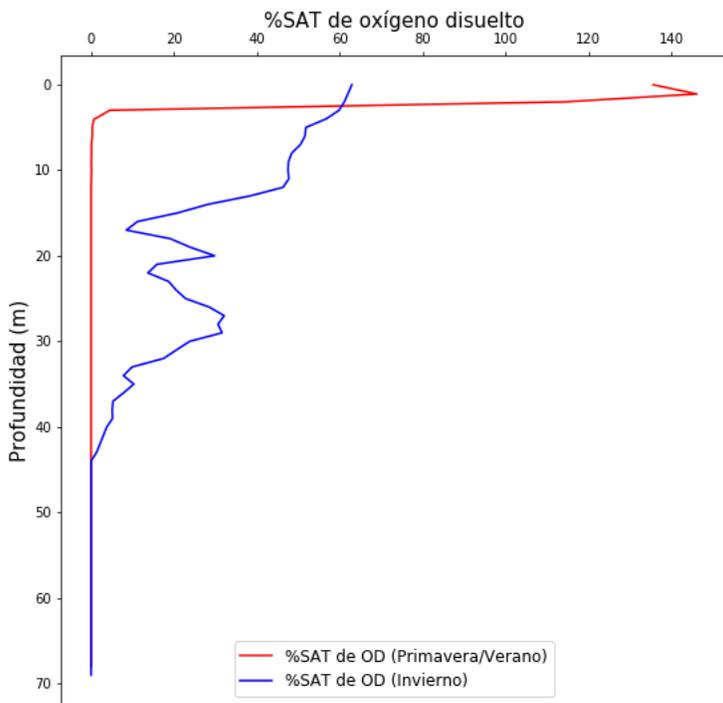
El pH en primavera/verano de igual manera presenta el mismo comportamiento que las anteriores variables (una disminución drástica en superficie y después de los 10 m comienza a alcanzar la homogeneidad, que en este caso se ve reflejada por valores cercanos a la neutralidad). En cuanto al invierno, el pH se parece comportar de manera similar que el oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación. Presenta alternancias entre valores bajos y altos, pero con la tendencia de seguir disminuyendo conforme se aumenta la profundidad (en este caso, de valores básicos se acerca a valores neutros).

Finalmente, la turbidez no es la excepción, puesto que presenta el mismo comportamiento que todas las demás variables en la primavera/verano. En cuanto al invierno, la turbidez se mantiene prácticamente homogénea a lo largo de toda la columna de agua.

Una característica particular de estos perfiles de primavera/verano es que todos, salvo la temperatura, presentan un aumento de sus valores durante los primeros 5 m de profundidad.

A continuación se observan los perfiles para este lago (Fig. 8):





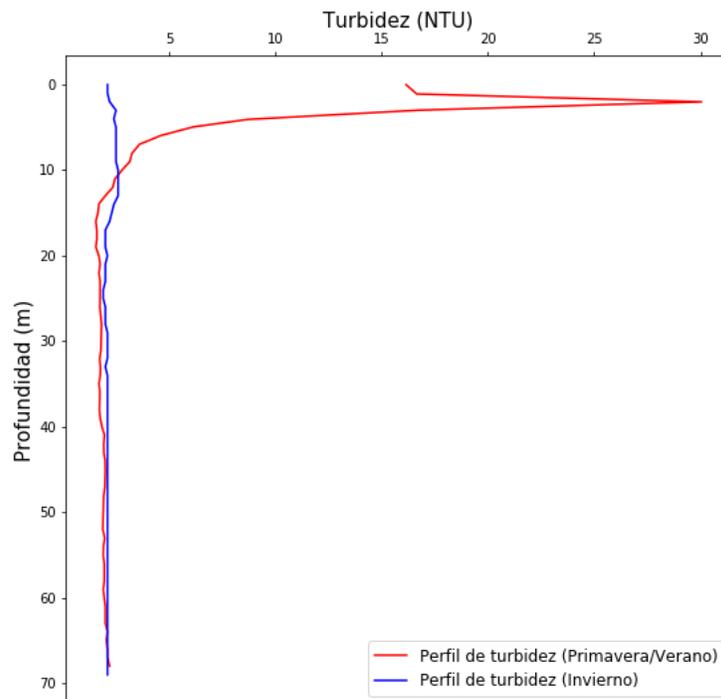


Fig. 8. Gráficas de los parámetros fisicoquímicos en el lago profundo impactado La Encantada.

7.10.3 SOMERO NO IMPACTADO (ESMERALDA)

Es el único lago que forma parte de esta categoría y sus perfiles se pueden apreciar en la Fig. 9.

Para la primavera/verano se alcanzó una profundidad de 5 m y durante el invierno únicamente se alcanzó una profundidad de 6 m, además de que el mínimo valor para el invierno se consideró a partir del primer metro de profundidad.

Esmeralda está clasificado como un lago somero (Alcocer *et al.*, 2016), razón por la cual no presenta termoclina. Para la primavera/verano se aprecia una pequeña disminución de la temperatura conforme se aumenta la profundidad (menos de 1 °C). El oxígeno disuelto y el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto presentan un mismo comportamiento, con una disminución de su valor conforme aumenta la profundidad. En cuanto al invierno, se puede

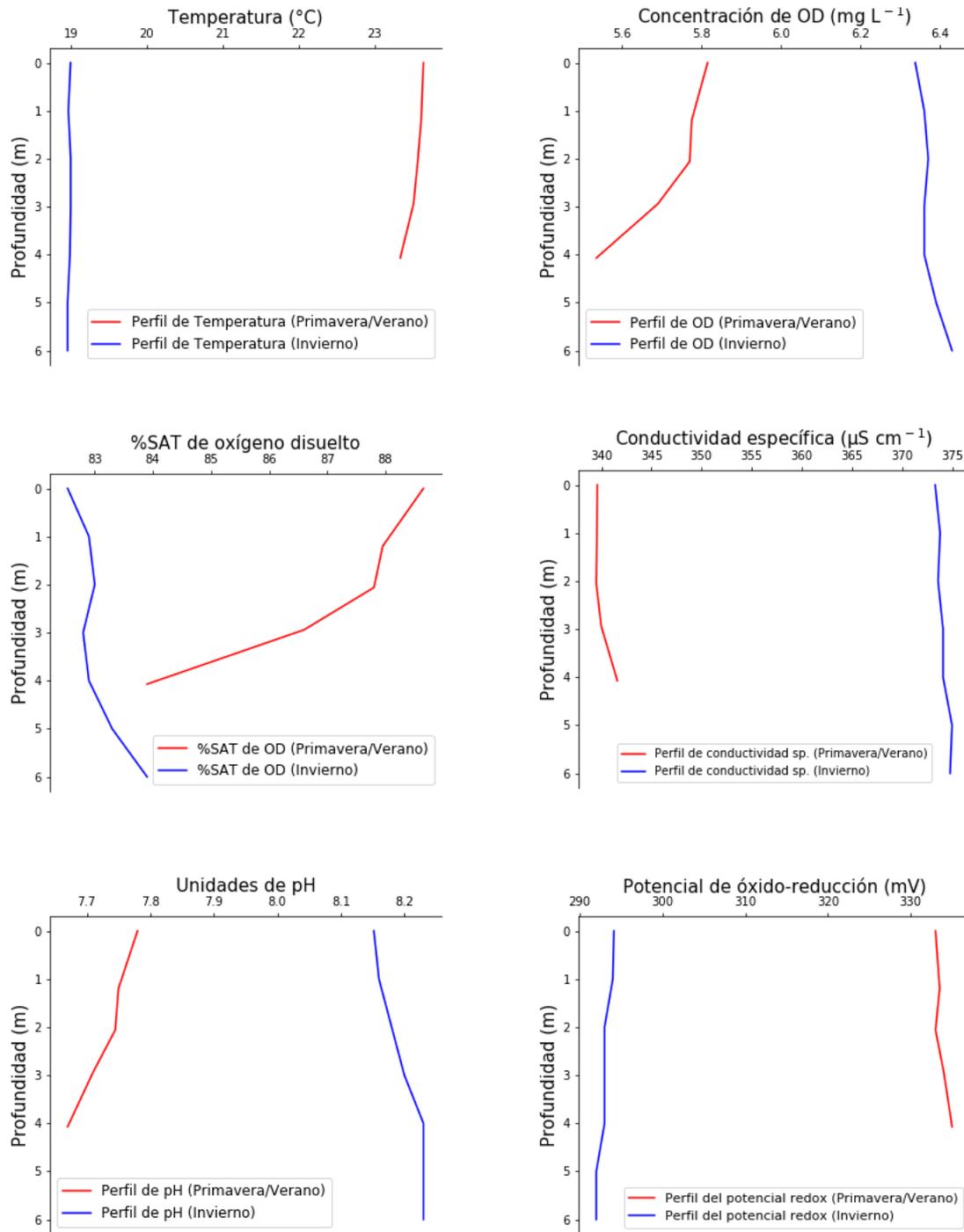
apreciar que la temperatura es homogénea a lo largo de la columna de agua, y presenta valores aproximadamente 4 °C menores que el máximo valor presentado en la primavera/verano. Por el contrario, el oxígeno disuelto en el invierno presenta valores mayores y homogéneos en comparación con la primavera/verano (aproximadamente 0.6 mg L⁻¹ más alto). La diferencia se presenta en el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto puesto que, a pesar de presentar el mismo comportamiento que la concentración de OD, sus valores en invierno son menores que los máximos registrados en primavera/verano.

La conductividad específica en ambas temporadas presenta un comportamiento casi homogéneo a lo largo de la columna de agua. Sin embargo, se tiene una mayor conductividad en invierno (aproximadamente 30 μS cm⁻¹ más alto que el mayor máximo registrado en primavera/verano).

El pH presenta un comportamiento diferente en ambas temporadas. En la primavera/verano se ve una clara tendencia de disminución conforme se aumenta la profundidad. Por el contrario, para el invierno se aprecia que durante los primeros metros hay un aumento (mínimo, pero perceptible) y a partir de los 4 m se estabiliza. De igual manera, durante la primavera/verano se tienen valores más próximos a la neutralidad en el fondo y en el invierno se presenta una clara tendencia hacia valores básicos/alcalinos.

Finalmente, en el perfil de turbidez se muestra que los valores del invierno fueron completamente homogéneos y los de la primavera/verano variaron aproximadamente 0.2 NTU.

A continuación se muestran los gráficos para este lago (Fig. 9):



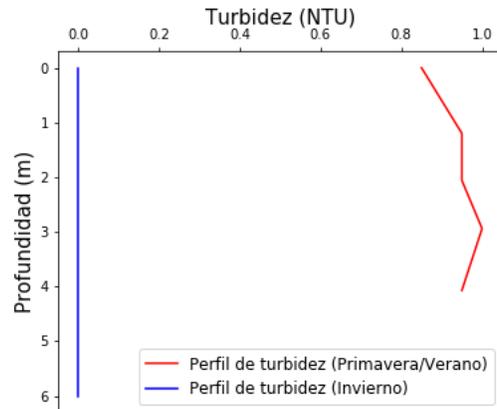


Fig. 9. Gráficas de los parámetros fisicoquímicos en el lago somero no impactado Esmeralda.

7.10.4 SOMERO IMPACTADO (BALANTETIC)

Se seleccionó este lago puesto que es el que cuenta con las mediciones similares en ambas temporadas. Sus perfiles se pueden apreciar en la Fig. 10.

Durante la temporada de primavera/verano se ve que el perfil de temperatura varía a lo largo de la columna de agua. A pesar de ser un lago somero (Alcocer *et al.*, 2016), se obtuvo una diferencia de aproximadamente 2 °C entre la superficie y el fondo, teniendo el máximo cambio de temperatura en el primer metro. En cuanto al oxígeno disuelto de igual manera se observa una concentración contrastante en la superficie y en el fondo, teniendo valores mayores en la superficie y presentando un mayor cambio después del primer metro. Se demuestra un perfil similar en estas dos variables, pero cuyo máximo cambio se presenta en diferentes profundidades.

Como era de esperarse, el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto sigue el mismo comportamiento que el oxígeno disuelto, puesto que el segundo depende del primero.

Por el contrario, para el invierno se demuestra que los perfiles de estas tres variables fisicoquímicas son prácticamente homogéneos a lo largo de la corta columna de agua. Sin embargo, para el oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación se presentan valores mayores (aproximadamente 2.5 veces mayores al valor máximo registrado en primavera/verano) y para la temperatura se demuestran valores menores en invierno (aproximadamente 3.5 °C menores al valor máximo registrado en primavera/verano).

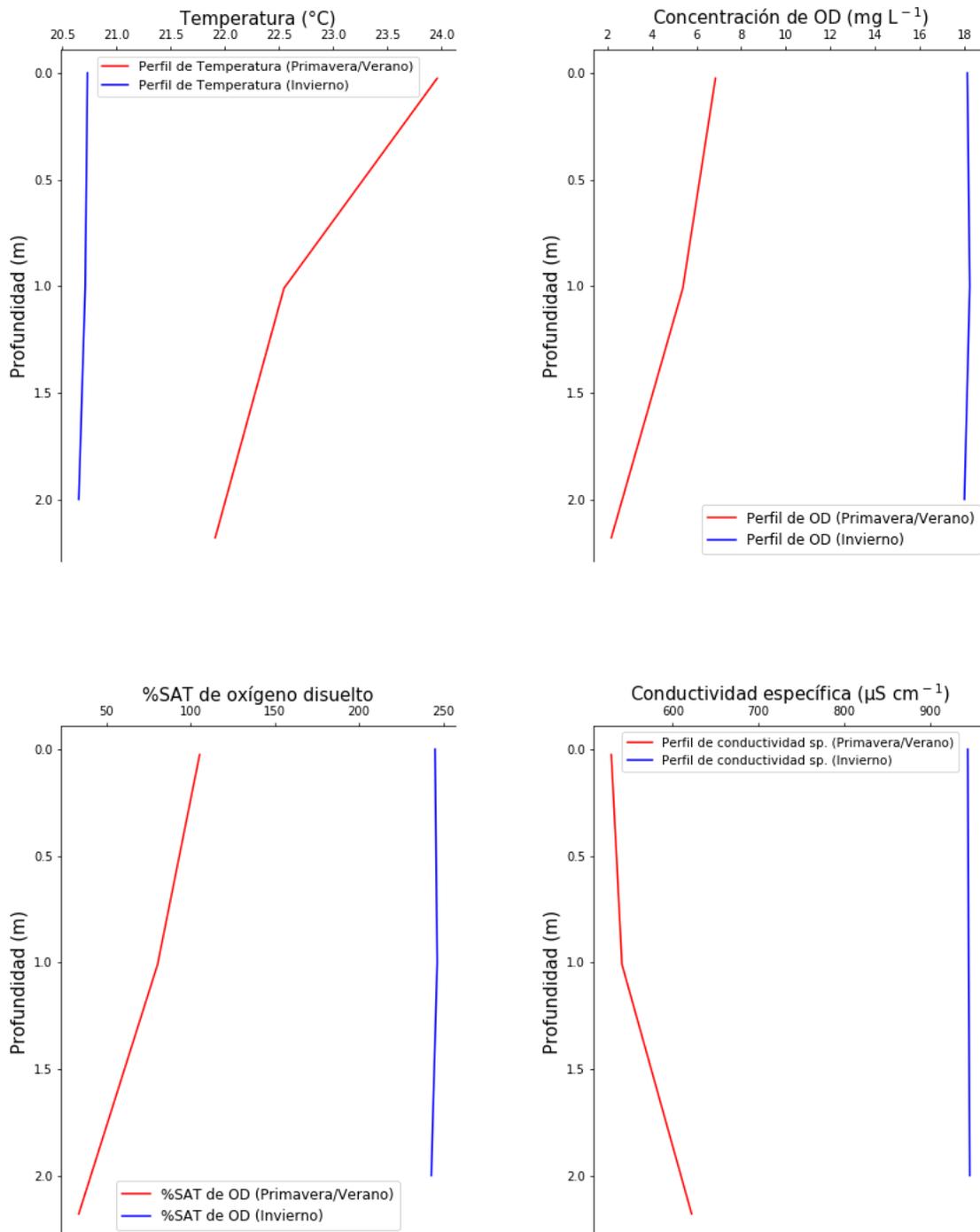
Pasando a la conductividad específica, durante la primavera/verano se demuestra que su valor aumenta conforme se acerca al fondo. De igual manera se nota un punto de quiebre después del primer metro, pero aumentando la conductividad (en contraste con las otras tres variables, las cuales disminuyen con la profundidad). Por el contrario, en invierno presenta el mismo comportamiento que el oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación, puesto que presenta valores mayores (aproximadamente 400 $\mu\text{S cm}^{-1}$ mayor al valor máximo registrado en primavera/verano).

El pH presenta un comportamiento aparentemente lineal en primavera/verano, disminuyendo su valor casi llegando a la neutralidad conforme se acerca al fondo. Por otro lado, en invierno se presenta el mismo comportamiento que con las anteriores variables, excepto la temperatura (un aumento de aproximadamente 1 unidad de pH con respecto al valor máximo de primavera/verano y un comportamiento homogéneo a lo largo de la columna de agua).

Finalmente, la turbidez aumenta su valor conforme se aumenta la profundidad (al igual que la conductividad específica en primavera/verano). Este aumento de turbidez se da después del primer metro. A diferencia de todas las demás variables fisicoquímicas, en la turbidez se aprecia un comportamiento similar durante ambas temporadas, presentando valores

mayores durante la primavera/verano (aproximadamente 20 NTU mayor en superficie y 100 NTU en el fondo).

A continuación se muestran los gráficos para este lago (Fig. 10):



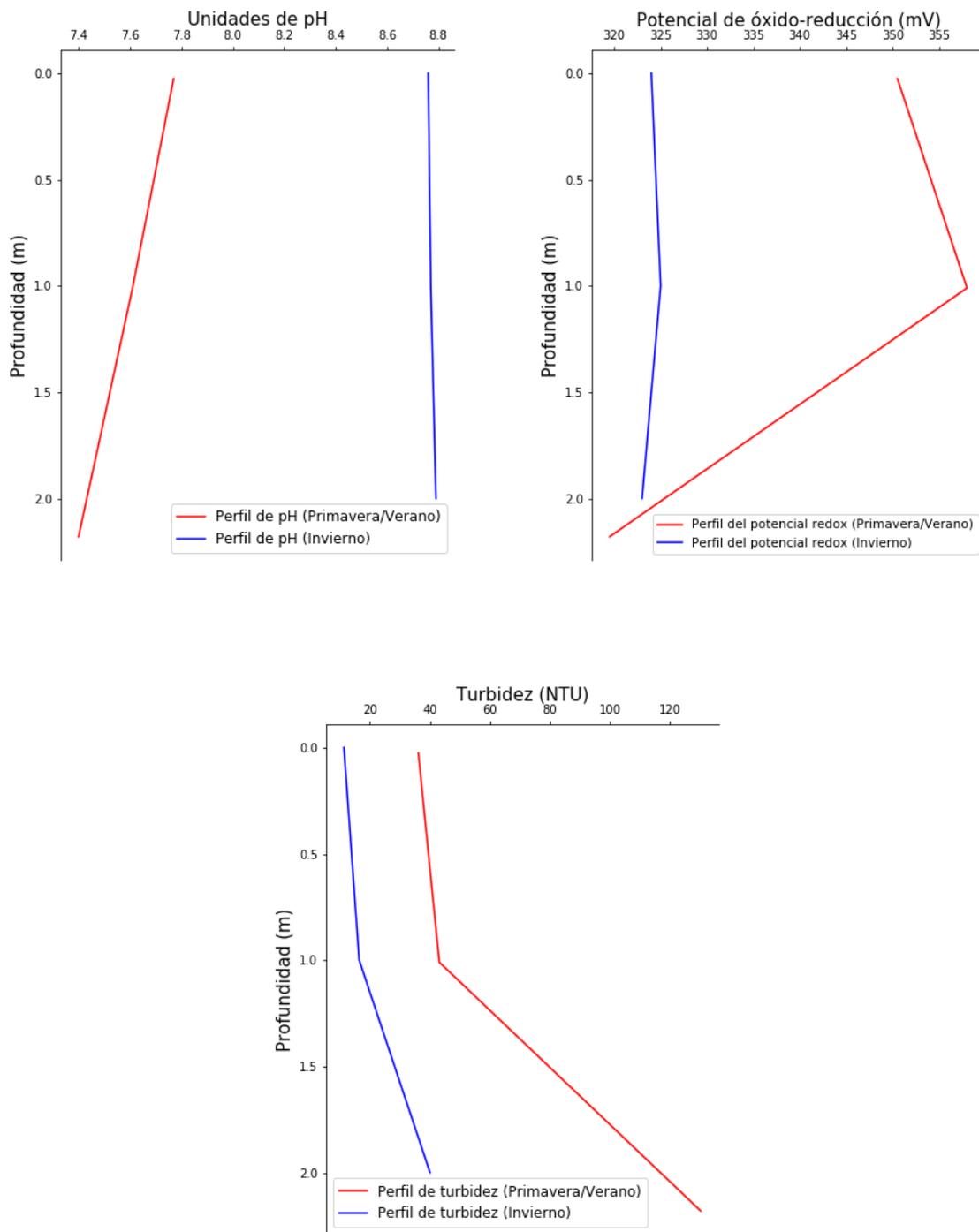


Fig. 10. Gráficas de los parámetros fisicoquímicos en el lago somero impactado Balantetic.

8. Discusión

Los lagos someros tropicales se consideran como polimícticos cálidos circulando frecuentemente a lo largo de todo el año. Por el contrario, los lagos profundos tropicales se catalogan como monomícticos cálidos con un solo periodo de circulación al año asociado al invierno hemisférico permaneciendo estratificados el resto del año (Lewis, 1983). Esto coincide bien con los lagos del presente estudio, en donde los profundos desarrollan una termoclina en la época de primavera/verano y un claro periodo de circulación en el invierno. Por otro lado, los lagos someros no presentaron termoclinas debido a su baja profundidad, razón por la cual aún en primavera/verano estuvieron en circulación.

En cuanto a la Z_{EU} , hay una clara distinción entre los lagos tomando como referencia su estado trófico/grado de impacto. El mejor ejemplo se muestra al comparar el lago impactado más profundo (La Encantada) con el lago no impactado más profundo (Cinco Lagos) y tomando en cuenta la Z_{med} (Alcocer *et al.*, 2016) donde se aprecia que la Z_{EU} en el primero es aproximadamente 9 veces menor que en el segundo.

La cantidad de luz que entra en los lagos no impactados es mucho mayor a la que entra en los lagos impactados. Tomando como referencia ambos grupos de lagos (impactados y no impactados) se aprecia una clara tendencia que indica que la turbidez es mayor durante la primavera/verano.

La turbidez está compuesta por dos elementos principales: los asociados a factores biológicos-autóctonos (biomasa fitoplanctónica) y los factores terrígenos-alóctonos (sedimentos). Roldán y Ramírez (2008) mencionan que los lagos tropicales están expuestos a presentar una alta turbidez asociada al arrastre pluvial y fluvial de diferentes tipos de

materiales alóctonos. De igual manera, se ve beneficiada la productividad primaria por la gran concentración de nutrientes a altas temperaturas durante todo el año.

El lago más próximo a la descarga del Río Grande de Comitán es Balantetic, el cual presenta la turbidez más elevada durante ambas temporadas (130 y 40 NTU, respectivamente en primavera/verano e invierno) asociada a la sobreproducción de biomasa fitoplanctónica (Vera *et al.*, 2015) por la alta descarga de nutrientes y muy probablemente por el aporte de terrígenos procedentes de la erosión de las áreas agrícolas circundantes. De igual manera, los lagos que se encuentran al NW son los más influenciados por el río y los elementos que trae disueltos y particulados, por lo que presentan mayor turbidez y están clasificados como impactados. Los lagos en la región SE son alimentados principalmente por aportes subterráneos, razón por la cual presentan aguas claras (Mora *et al.* 2017).

Las temperaturas más elevadas se presentaron en las superficies de los lagos impactados. Esto se debe a que, en los lagos eutrofizados, al tener mayor turbidez debido principalmente a la alta proliferación de materia orgánica, se impide la penetración de la luz solar, atenuándola en la capa superficial y transformándola en calor, generando una termoclina superficial y ocasionando que el máximo cambio de temperatura ocurra en los metros más próximos a la superficie, contribuyendo a la formación de un fondo anóxico con alta concentración de nutrientes. Señalando que los lagos La Encantada y San Lorenzo presentan termoclina superficiales, se puede intuir que este fenómeno es propio de los lagos eutrofizados profundos. Borrego y García (1994) en su estudio de La Coromina, una laguna que se encuentra en Banyoles, Girona, encontraron este mismo comportamiento con la temperatura durante la primavera/verano.

La temperatura influye directamente en la capacidad de difusión de los gases. En el caso de los lagos tropicales, como generalmente se presentan altas temperaturas, muestran una menor capacidad de almacenamiento del OD.

El OD se deriva tanto de la fotosíntesis como de la difusión atmosférica (Morata *et al.*, 2003; Roldan y Ramírez, 2008). Esto se confirma al ver la superficie de los lagos impactados, puesto que es donde se acumula fitoplancton y se produce la fotosíntesis, además de que es la zona en donde predomina la difusión de O₂ atmosférico, generando un medio muy oxigenado en la capa superficial, incluso por encima de la sobresaturación, lo que se ve reflejado en %_{SAT} mayores al 100% pero únicamente en los metros más superficiales.

Para ambos grupos de lagos se presentó una mayor cantidad de OD promedio en el invierno, debido a que la temperatura disminuye y aumenta la capacidad de disolución del gas, además de que la distribución a lo largo de la columna de agua es más parejo asociado con la circulación.

Durante la estratificación, la presencia de la termoclina deriva en la generación de un hipolimnion anóxico en los lagos profundos, tanto impactados como no impactados (Morata *et al.*, 2003). La presencia de un hipolimnion anóxico independientemente del estado trófico del lago, solo se presenta en los lagos tropicales profundos debido a su mayor temperatura que, por un lado, permite que se almacene menor cantidad de OD y, por el otro, el aumento del metabolismo microbiano consume mayor cantidad de OD (Lewis, 1986).

Los lagos someros presentaron los valores mínimos mayores de OD debido a que, por presentar una corta columna de agua, la acción del viento es capaz de tenerlos mezclados,

favoreciendo la dilución de oxígeno atmosférico y distribuyéndolo bien en la vertical (Vera *et al.*, 2015).

En cuanto al OD de los lagos profundos, en la misma temporada de primavera/verano, los valores máximos y mínimos fueron registrados en los lagos impactados San Lorenzo y La Encantada. Lo que ocurre en este caso es que, al establecerse una termoclina superficial, el epilimnion se mantiene bien oxigenado -incluso sobresaturado- debido a la fotosíntesis y al intercambio con la atmósfera (Lewis, 1996). La mayor parte de la columna de agua profunda (hipolimnion) se torna anóxica (Tabla 6) debido a una alta tasa de descomposición, un metabolismo microbiano acelerado y a que la termoclina impide que esta agua se mezcle (Camps *et al.*, 1976; Morata *et al.*, 2003; Lewis, 1996).

Por el contrario, durante el invierno, el valor máximo se obtuvo de nueva cuenta en un lago impactado (Balantetic), y el mínimo persistió en los profundos impactados, además de Dos Lagos (profundo no impactado). Como lo menciona Lewis (1996), la reincorporación de nutrientes que se encuentran en el fondo de los lagos tropicales es más fácil que se dé cuando está ocurriendo la circulación. La elevada reincorporación de nutrientes que se encontraban en los sedimentos deriva en la generación de florecimientos invernales, por lo que se genera una sobresaturación de OD por el aumento de la tasa fotosintética. En los lagos no impactados, se pueden presentar florecimientos invernales (Alcocer *et al.*, 2008), pero de menor magnitud, comparándolo con los lagos impactados, debido a que la presencia de nutrientes asociada a la circulación es mínima.

Borrego y García (1994) mencionan que La Coromina (laguna hipereutrófica del sistema lacustre de Banyoles) no presenta una oxigenación completa en el periodo de circulación debido a la oxidación de la materia orgánica sedimentada en el fondo. Dicho lo anterior, se

puede entender el por qué los fondos de San Lorenzo y La Encantada se mantienen anóxicos aún en la temporada de circulación.

En el caso de Dos Lagos, se debe hablar de su carácter meromítico debido a la entrada de aguas subterráneas ricas en yeso (Alcocer, 2017) provocando una haloclina que hace imposible la mezcla completa del lago a lo largo de todo el año por su alta densidad, reflejado en un fondo anóxico, con dominancia de reacciones de reducción y un aumento en su conductividad (Cañedo y Rieradevall, 2009). Esto se observa en la gráfica de conductividad de Dos Lagos que se encuentra en el Anexo 1. El mismo fenómeno se reporta en el estudio de Camps *et al.* (1976), puesto que el lago de Montcortés, Lérida, España, de igual manera meromítico, cuenta con un estrato profundo sin oxígeno a lo largo de todo el año.

En general, para la concentración de OD se tuvieron concentraciones mayores durante el invierno con excepción de San Lorenzo. Este fenómeno puede estar asociado a que los muestreos se hicieron en dos sitios con profundidades diferentes del lago impactado, siendo la del invierno casi el doble de profunda que la de primavera/verano. Al existir una mayor profundidad, es más probable que existan valores de DLD, que se puede ver reflejado en una disminución promedio de su concentración de OD en San Lorenzo durante el invierno.

El pH expresa la condición ácida o básica de una solución. Roldán y Ramírez (2008) mencionan que el exceso de fotosíntesis en superficie sobresaeta de O₂ al epilimnion, provocando un agotamiento de CO₂ y un aumento de pH en el agua. Esto se debe a una combinación de una relativa no muy alta reserva alcalina, lo que no da suficiente capacidad amortiguadora del pH, y entonces una productividad elevada impacta el pH (basificándolo) a través de la fotosíntesis (que impacta el equilibrio carbónico-carbonatos, al retirar CO₂).

La respiración (y la fermentación ya en anoxia), hace lo mismo, pero a través de exceso de respiración (sin luz, y mucha materia orgánica): impacta el equilibrio carbónico-carbonatos al liberar mucho $C=2$, con lo que el pH se acidifica en los sistemas poco amortiguados, es decir, con relativamente menor reserva alcalina.

Lo anterior se confirma al comparar los perfiles de OD y pH de nuestros lagos estudiados, donde claramente se aprecia que actúan de la misma manera. Por ello, se puede decir que la actividad primaria, a través de la fotosíntesis-respiración, tiene un claro efecto sobre el pH del medio debido al desequilibrio que genera en el sistema carbonatado, provocado por la fijación fotosintética del CO_2 (Borrego y García, 1994). También se observó que no existe una clara diferencia de pH con respecto al estado trófico de cada lago lo cual era esperado considerando que el sustrato le confiere al agua una elevada capacidad amortiguadora.

Los lagos del PNLN entran dentro de la generalización que hicieron Roldán y Ramírez (2008), puesto que mencionaron que la mayoría de los lagos tropicales, que se encuentran en un ambiente con predominancia de sustrato carbonatado, presentan un pH dentro del rango de 6 y 9.

Como lo menciona Mtada (1986 citado por Lewis 1996), la estabilidad de las capas profundas en los reservorios con agua profunda se mantiene debido al ingreso continuo de un flujo de agua. En este caso, se puede considerar lo que dice González del Castillo (2003), puesto que menciona a los lagos del PNLN como influenciados por entradas superficiales (Río Grande de Comitán) y subterráneas (acuíferos).

Con lo anterior, se puede inferir que, en algunos de los casos, existe entrada de aguas subterráneas rica en iones, puesto que todos los lagos estudiados presentan una clara tendencia de aumentar su K_{25} conforme aumenta la profundidad. El mismo comportamiento

se aprecia en la Laguna del Tejo, España, puesto que conforme se aumenta la profundidad, de igual manera aumenta la conductividad (Morata *et al.*, 2003).

El caso de Dos Lagos es diferente, ya que la salinidad de sus aguas profundas (monimolimnion) es superior incluso a la de los lagos impactados. Por esta razón se genera una quimioclina (picnoclina) permanente, lo que le da su carácter meromítico. Este mismo comportamiento lo encuentran Cañedo y Rieradevall (2009) en el Delta del Llobregat, España, con la diferencia de que la alta conductividad es debida al aporte de agua marina. Alcocer (2017) pone énfasis en la profundidad, puesto que la meromixis es mayormente común en los lagos de grandes profundidades, además de que existe una entrada de agua ionizada subterránea, generando un monimolimnion estable.

Con base en las características anteriores se puede clasificar a los lagos en dos grandes grupos: por un lado, están los lagos ubicados en la región NW que corresponden a los impactados y eutróficos, influenciados principalmente por el aporte de agua superficial del río Grande de Comitán y seguramente por aguas residuales agrícolas (Mora *et al.*, 2017). El aporte de las aguas del río Grande de Comitán lleva a los lagos impactados una alta cantidad de nutrientes, obtenidos de forma natural mediante la erosión y de forma antropogénica por medio de descarga de aguas contaminadas con fertilizantes agrícolas a través de la lixiviación de los campos de cultivo adyacentes, de alcantarillado por medio de las poblaciones cercanas y un cambio en el uso de suelo de esa región (Borrego y García, 1994; Mota *et al.*, 2009). Y por el otro lado están los lagos ubicados en la región SE que corresponden a los no impactados y oligotróficos, alimentados principalmente por aportes subterráneos y lejos de actividades humanas (Alcocer *et al.*, 2016; Mora *et al.*, 2017).

Como lo menciona Mora *et al.* (2017), los lagos impactados presentan un aumento de conductividad asociado a la contaminación. Se cita el ejemplo de Balantetic, el primer lago en el que descarga el río Grande de Comitán, lo que se ve reflejado en un enriquecimiento de cloruros y sales que pueden estar asociados a la entrada de desechos humanos. De igual manera, se tiene un aumento en la cantidad de sedimentos aportados, lo que desencadena una reducción de la columna de agua, generando una mayor tasa de evaporación, ocasionando una alta salinidad (mayor conductividad).

Con ello se podría deducir que la descarga del río Grande de Comitán en los lagos del NW del PNLN, enriquecida en nutrientes asociados a los lixiviados de la actividad antropogénica, favorece la productividad primaria, propiciando que el fitoplancton tenga un aumento de su densidad y provocando todas las alteraciones anteriormente señaladas (i.e., eutrofización). Entre más cercano esté el cuerpo de agua de los desarrollos y actividades humanas, más probablemente será impactado y tenderá a un cambio de estado trófico al eutrófico. Por el contrario, los lagos ubicados al SE del PNLN, más alejados de los desarrollos y actividades humanas, se han mantenido prístinos y su estado trófico corresponde al oligotrófico.

9. Conclusiones

- Los lagos profundos impactados/eutróficos (al NW) se catalogan como monomíticos cálidos. Su alta turbidez dificulta el libre paso de la luz, atenuándola y transformándola en calor en los primeros metros de profundidad que, en conjunto con la transmisión directa de calor desde la atmósfera al lago, genera una termoclina superficial y delgada. A su vez, se tiene una alta tasa de fotosíntesis en superficie, razón por la cual se presentan capas superficiales sobresaturadas de OD y zonas

profundas anóxicas. Van a presentar una tendencia de aumento de la conductividad (a mayor profundidad, mayor conductividad) debido al aporte de aguas subterráneas ricas en iones. Además, estos lagos demuestran una mayor tendencia a presentar una conductividad elevada derivada de los aportes del río Grande de Comitán.

- Los lagos profundos no impactados/oligotróficos (al SE) se catalogan como monomíticos cálidos. Presentan una Z_{EU} mayor en comparación con el grupo anterior. La turbidez es escasa, razón por la cual la luz puede penetrar a mayor profundidad; sus termoclinas son más profundas y anchas. La presencia de una termoclina durante la primavera/verano genera un hipolimnion anóxico. Presentan un aumento de conductividad conforme se incrementa la profundidad, sin llegar a ser tan elevada como la de los lagos impactados.
- Dos Lagos es un caso particular puesto que es el único lago meromítico, razón por la cual cuenta con una mezcla incompleta de su columna de agua, teniendo un fondo anóxico en todo momento, por la capa de agua densa asociada al aporte de agua subterránea rica en sales. Considerando solo el mixolimnion, se comporta como un lago profundo no impactado/oligotrófico.
- Las actividades antrópicas en los alrededores de la cuenca del río Grande de Comitán han generado muchos problemas ambientales debido al cambio de uso de suelo, a la aplicación desmedida de fertilizantes e insecticidas en los sembradíos y a la descarga de sus aguas negras, que tienen como destino inmediato al río y de ahí los lagos más próximos a él.

10. Bibliografía

- Alcocer, J. (2017). Mexican meromictic lakes: What we know so far?. pp. 353-375. In: R. Gulati, A. Degermendzhy & E. Zadereev (eds.). Ecology of Meromictic Lakes. Springer International Publishing.
- Alcocer, J., Escobar, E. & Oseguera, L.A. (2008). Acoplamiento pelágico-bentónico: respuesta de la zona bentónica profunda a la sedimentación del florecimiento invernal de diatomeas en el lago oligotrófico Alchichica, Puebla, México. Hidrobiológica: [revista del Departamento de Hidrobiología], 18(1), 115-122.
- Alcocer, J., Oseguera, L.A. & Escobar, E. (2016). Contenido de carbono elemental en sedimentos lacustres de un conjunto de lagos tropicales con distinto estado trófico. En Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016(357-365). Estado de México, México: ISBN 978-607-96490-4-3.
- Alcocer, J., Merino, I.M., Oseguera L.A. & Escolero, O. (2018) Anthropogenic impacts on tropical karst lakes: “Lagunas de Montebello,” Chiapas. Ecohydrology. 2018;e2029.
- Arriaga, L., J.M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez & E. Loa. (2000). Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México.
- Barriga, D.E. (2017). Gobernanza del turismo sustentable en áreas naturales protegidas: el caso del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas, México (Título de maestría). El Colegio de la Frontera Sur, Villahermosa, Tabasco, México.
- Borrego, C. & L. García. (1994). Caracterización limnológica de La Coromina, una laguna hipereutrófica del sistema lacustre de Banyoles. Limnética 10 (1): 43-45 pp.
- Camps, J., I. Gonzalvo, J. Güell, P. López, A. Tejero, X. Toldra, F. Vallespinos & M. Vicens. (1976). El lago de Montcortés, descripción de un ciclo anual. Oecologia aquatica 2: 90-110 pp.
- Cañedo, M. & M. Rieradevall. (2009). Quantification of environment-driven changes in epiphytic macroinvertebrate communities associated to *Phragmites australis*. J. Limnol. 68 (2): 229-241 pp.
- CFE. (2012). Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas. Tomo 1: Hidrometeorología, México. 263 p.
- CNA. (1998). Cuencas hidrológicas, escala 1:250000. 23/07/2019, de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/cue250kgw>

- CONAGUA. (2007). Regiones Hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana. 23/07/2019, de CONAGUA Sitio Web: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rh250kgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xml&_indent=no
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del agua en México 2018. México: CONAGUA.
- CONANP. (2006). Subzonificación del Parque Nacional Lagunas de Montebello. 21/07/2019, de CONANP Sitio Web: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/sublmb06gw>
- CONANP. (2009). Programa de Manejo del Parque Nacional Lagunas de Montebello. 7/02/2019, de DOF Sitio web: https://simec.conanp.gob.mx/pdf_pcym/167_DOF.pdf
- CONANP. (2011). Estudio para monitorear los parámetros de calidad de agua de las lagunas comunicadas con el sistema lagunar Tepancoapan. Chiapas, México: CONANP.
- CONANP. (2019). Parque Nacional Lagunas de Montebello. 02/06/2020, de CONANP Sitio web: <https://www.gob.mx/conanp/documentos/parque-nacional-lagunas-de-montebello-209454>
- CONANP-SEMARNAT. (2007). Programa de conservación y manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello, México. 10/02/2019, de http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/Final_Montebello.pdf
- Fiedler, C.P. (2010). Comparison of objective descriptions of the thermocline. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8, 312-325.
- García, A.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.
- González del Castillo, E. (2003). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR), Parques Nacionales de Chiapas. 9 pp.
- Juárez, E. (2014). Análisis hidrogeoquímico de la cuenca del Río Grande de Comitán. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 12-93 pp.
- Lewis, W.M. (1983). A revised classification of lakes based on mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 40: 1779-1787 pp.
- Lewis, W.M. (1986). Phytoplankton succession in lake Valencia, Venezuela. *Hydrobiologia* 138: 189-203 pp.

- Lewis, W.M. (1996). Tropical lakes: How latitude makes a difference. En: Schimer F. y K. Boland (eds). *Perspectives in Tropical Limnology*. Academic Publishing. 43-46 pp.
- Marín, G. R. (2003). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y Control de Calidad de Aguas*. Madrid, España: Díaz de Santos.
- Mora, P.L., Bonifaz, R. & López, M.R. (2006). 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.
- Mora, P.L., García, L.A., Ramos, Y.R., Bonifaz, R. & Escolero, O. (2017). Description of chemical changes in a large karstic system: Montebello, México. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 820-832 pp.
- Morata, S.M., A. Camacho, M.R. Miracle & E. Vicente. (2003). Asociaciones fitoplanctónicas y su periodicidad en un lago marcadamente estratificado. *Limnética* 22 (3-4): 35-52 pp.
- Oseguera, L.A. & Alcocer J. (2015). Concentración y distribución vertical del carbono particulado (total y orgánico) en los lagos de Montebello, Chiapas. En *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015*.(457 - 463). Texcoco, México: Programa Mexicano del Carbono A.C.
- Roldán, G. & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. 2da ed. s.l.:Universidad de Antioquía.
- Ruiz, L., Horváth, A., Martínez, R., Enríquez, P.R. & Rangel, J.L. (1998). Situación actual de la fauna silvestre en el Parque Nacional Lagos de Montebello: Curso-taller de orientación ecológica (Chis-RNA-056-96). Informe Final. ECOSUR-SIBEJ, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas.
- SECTUR. (2013). *Lagunas de Montebello*. 7/02/2019, de Gobierno de Chiapas. Sitio web: [http://www.turismochiapas.gob.mx/sectur/lagunas 91,928.78 -de-montebello](http://www.turismochiapas.gob.mx/sectur/lagunas%2091,928.78-de-montebello)
- SEGOB. (2018). ACUERDO por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas pertenecientes a la Región Hidrológica número 30 Grijalva-Usumacinta. 24/07/2019, de Diario Oficial de la Federación. Sitio web: http://diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5518766&fecha=10/04/2018
- Vallentyne, J.R. (1974). *The Algal Bowl: Lakes and Man*. Canadá, Ottawa: Dept of the Environment Fisheries and Marine Service.
- Vásquez, M.A. & 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. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México. 109 pp.

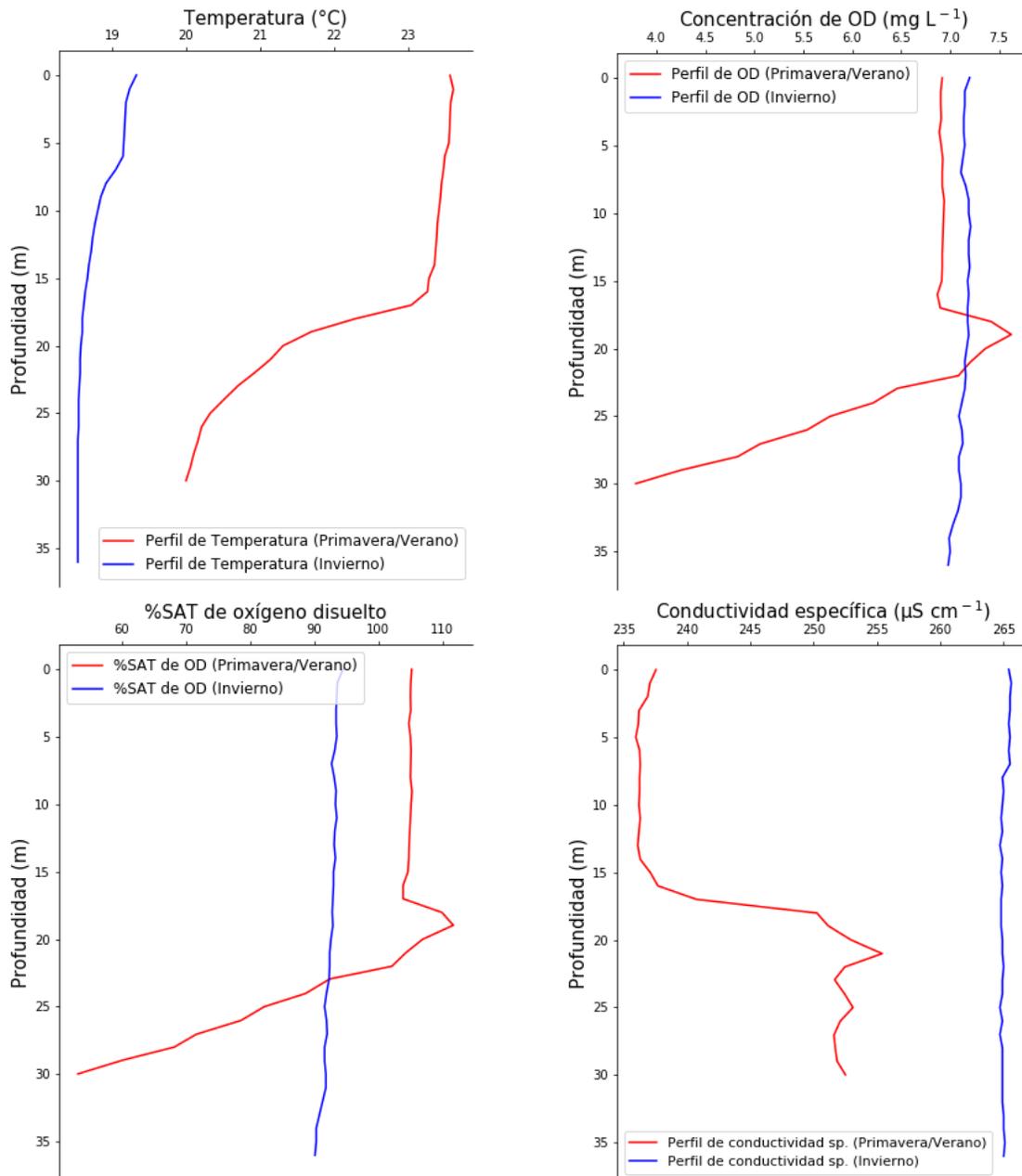
Vera, F.M., Hernández V.P., Alcocer, J., Ardiles, G.V. & Oseguera L.A. (2015). Concentración y distribución vertical de la clorofila-a fitoplanctónica en los lagos de Montebello, Chiapas. Tendencias de investigación en Limnología tropical: Perspectivas universitarias en Latinoamérica, Edición 1, 107-114.

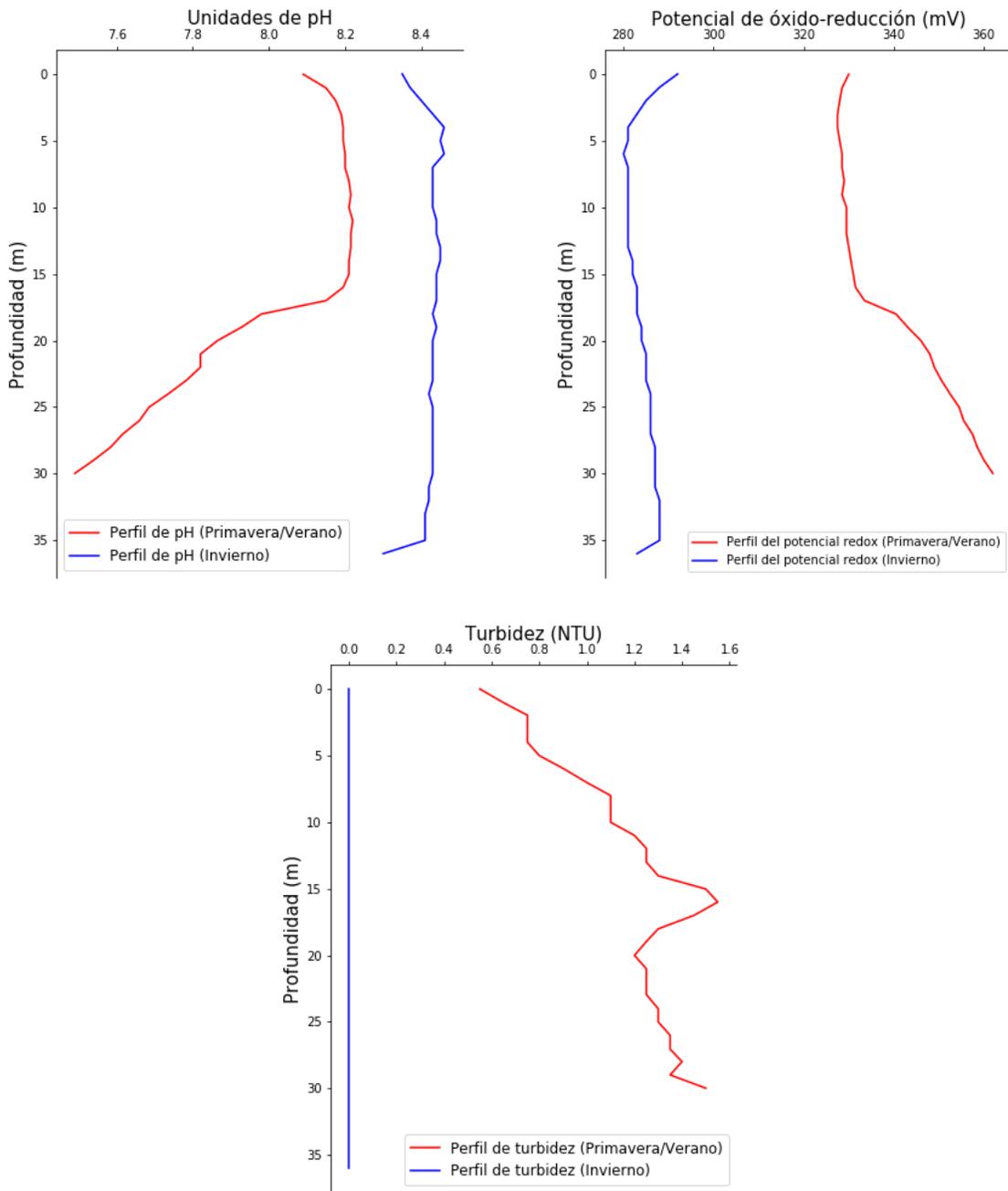
ANEXO 1

PROFUNDO NO IMPACTADO

- **Ensueño.**

Para el perfil de invierno se consiguieron datos un poco más profundos que para la primavera/verano.





Para la primavera/verano se aprecia una distribución de temperatura casi homogénea a lo largo de los primeros 15 m de profundidad; después de este valor se tiene una brusca disminución (por la presencia de termoclina) y alcanza temperaturas mínimas de aproximadamente 20 °C en el fondo. Lo mismo sucede con el oxígeno disuelto y el

porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, con la diferencia de que, aproximadamente en el metro 20 de profundidad, se tiene una elevación en los valores de estas variables, y después de ahí desciende drásticamente.

Por otro lado, para el invierno la temperatura presenta valores más homogéneos y menores (aproximadamente 4 °C menor que la temperatura máxima en primavera/verano), pero se aprecia una clara disminución paulatina desde la superficie hasta el fondo. Por el contrario, el oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación tienen valores más homogéneos, pero para el primero se tiene una mayor concentración en el invierno (excepto por la elevación drástica que se da por el metro 20) y para el segundo parámetro es mayor en la primavera/verano hasta los primeros 15 m. Después de esta profundidad, se tiene un menor porcentaje de saturación que en invierno.

La conductividad específica durante la primavera/verano presenta valores casi homogéneos durante los primeros 15 m, después de este valor se tiene un brusco aumento que llega hasta aproximadamente los 20 m y de ahí vuelve a presentar alternancias entre aumentos y disminuciones. Este es un comportamiento completamente diferente al que se tiene en el invierno, puesto que en el segundo se tienen valores prácticamente homogéneos a lo largo de toda la columna de agua y mayores (aproximadamente $10 \mu\text{S cm}^{-1}$ más altos que el valor máximo presentado en primavera/verano).

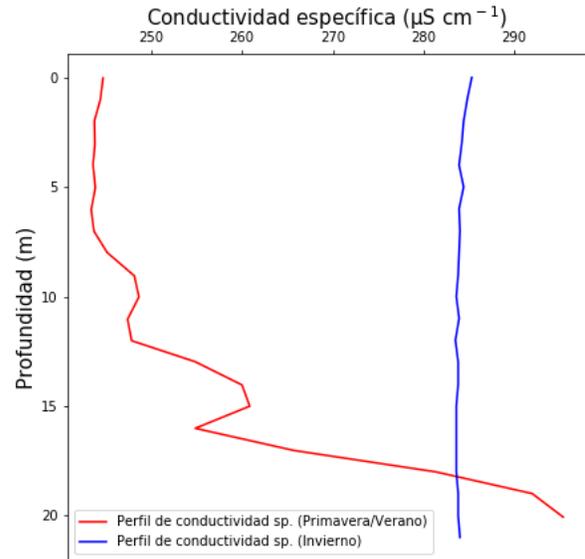
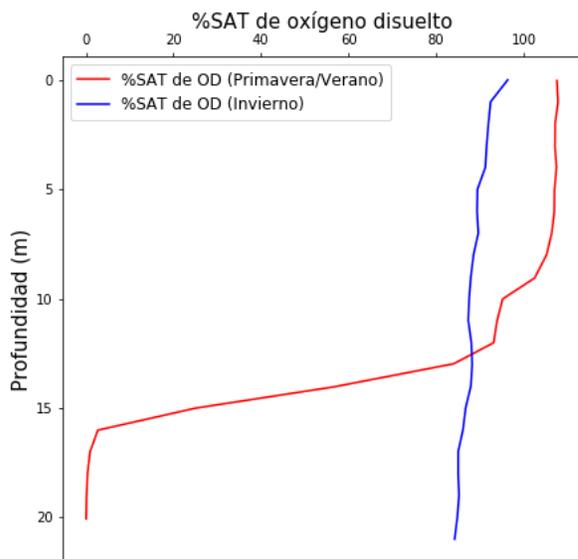
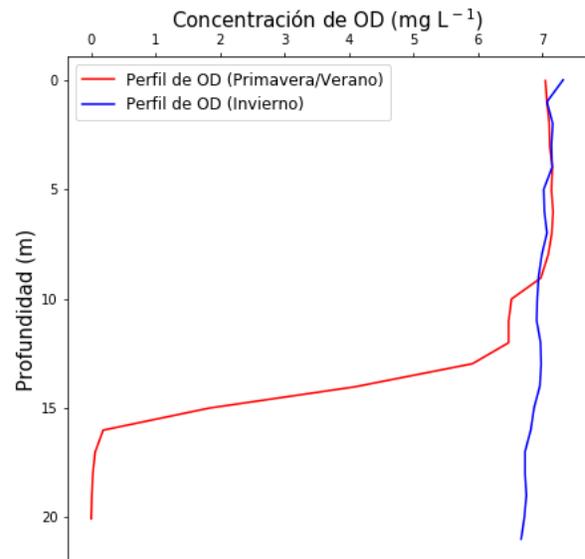
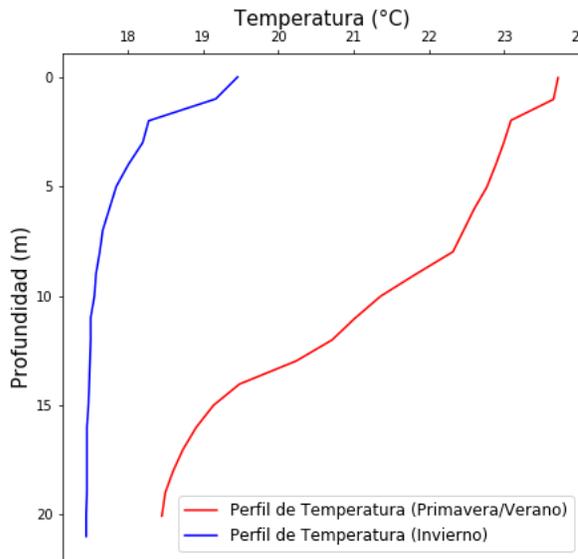
El pH presenta un aumento en su valor durante los primeros metros de la primavera/verano hasta que alcanza una estabilidad que llega aproximadamente hasta los 15 m de profundidad. Después de este valor se tiene un descenso en su valor que tiende a la neutralidad. En cuanto al invierno, se tiene el mismo comportamiento que la primavera/verano pero con valores mayores (aproximadamente 0.4 unidades de pH del

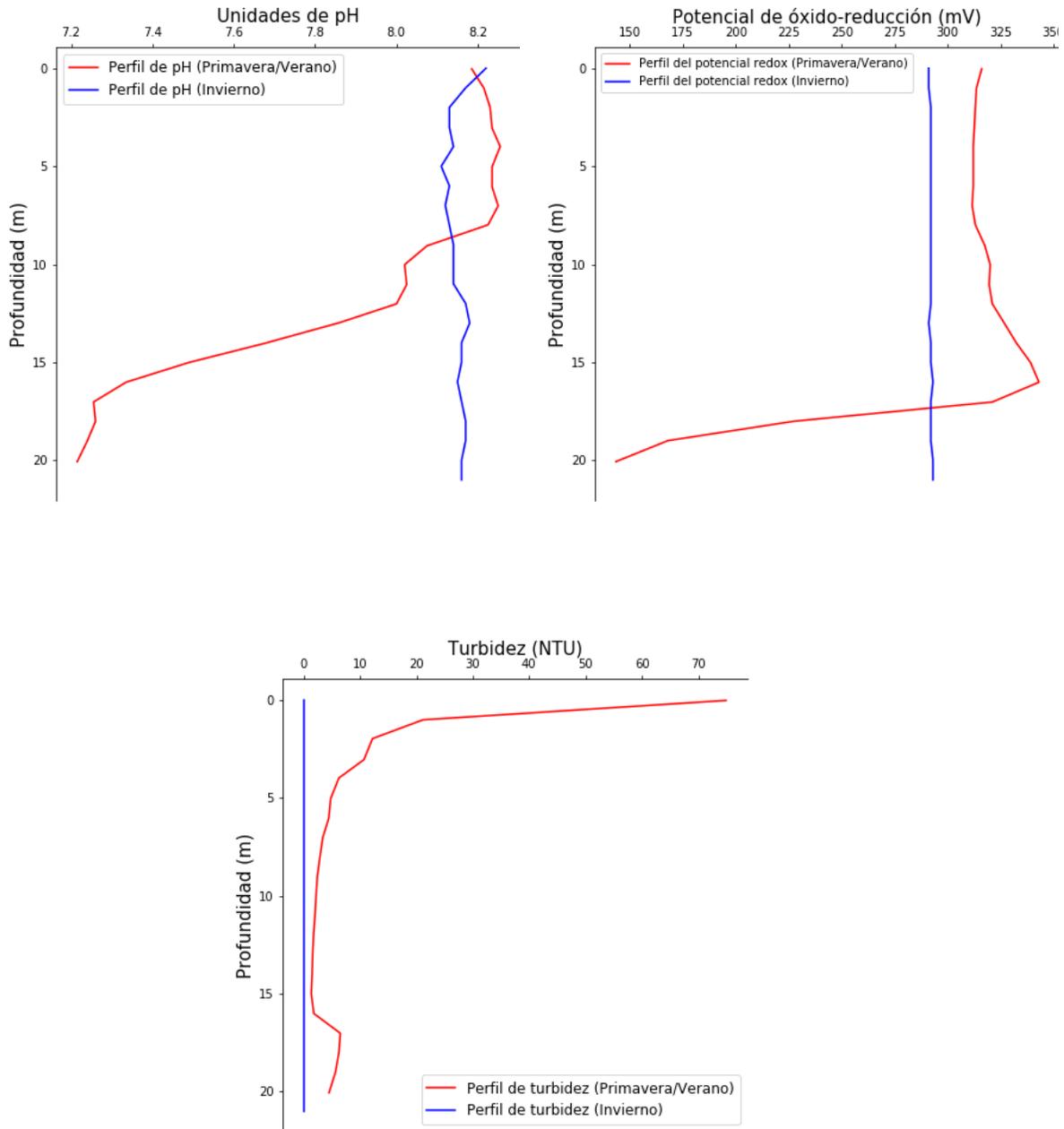
valor máximo registrado) hasta los 5 m. Después de esta profundidad, se mantiene un valor homogéneo a lo largo de la columna de agua. En la zona más profunda es donde se vuelve a apreciar una disminución en las unidades de pH y tiende hacia valores similares a los presentados en superficie (aproximadamente 8.3 unidades de pH). Durante la primavera/verano se tienen valores más neutros y en el invierno se presentan valores más básicos/alcalinos.

La turbidez para la temporada de primavera/verano presenta un aumento conforme incrementa la profundidad hasta el metro 15, donde se presenta una disminución de la turbidez. Después, aproximadamente en el metro 20, comienza a aumentarse de nueva cuenta la turbidez. Para el invierno la turbidez se presenta con el mismo valor a lo largo de toda la columna de agua, con concentraciones de 0 NTU. Por consiguiente, claramente se presenta una turbidez mayor a lo largo de toda la columna de agua para la primavera/verano.

- **Kichail**

Se registraron datos un poco más profundos para el invierno que para la primavera/verano.





La temperatura en la primavera/verano demuestra una tendencia a disminuir, teniendo una diferencia de aproximadamente 6 °C desde la superficie hasta el fondo. En cuanto al oxígeno disuelto y al porcentaje de saturación del oxígeno disuelto se aprecia que durante los primeros 10 m de profundidad se tienen valores relativamente homogéneos (aproximadamente 7 mg L⁻¹ y 105 %_{SAT}). Después de este valor se aprecia una clara

disminución y se vuelven a homogeneizar pasando los 15 m de profundidad (0 de mg L^{-1} y $\%_{\text{SAT}}$).

Por otro lado, en invierno se tiene de igual manera una disminución de la temperatura conforme se aumenta la profundidad y tendiendo a valores más homogéneos. Únicamente durante los metros superficiales es donde se tienen los mayores cambios de temperatura. En cuanto al oxígeno disuelto y su porcentaje de disolución, a lo largo de todo el perfil en el invierno, se presentan valores más homogéneos. El oxígeno disuelto presenta valores similares en ambas temporadas durante los primeros 10 m de profundidad (aproximadamente 7 mg L^{-1} , existiendo una diferencia únicamente en el fondo (en primavera/verano hay anoxia y en invierno se mantiene casi constante la concentración). En cuanto que el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en invierno es menor (aproximadamente 10 unidades menos que en primavera/verano). Conforme aumenta la profundidad este patrón cambia, puesto que ahora los valores mayores se aprecian en invierno (donde se tuvieron valores homogéneos a lo largo de la columna de agua) que en primavera/verano (donde los valores disminuyeron hasta 0).

La conductividad específica durante la primavera/verano se mantuvo prácticamente homogénea durante los primeros 7 m de profundidad. Después de este valor se aprecian alternancias entre aumentos y disminuciones de la conductividad, pero con la clara tendencia a aumentar conforme se incrementa la profundidad, donde se encuentra su valor máximo. En cuanto al invierno, se aprecia claramente que los datos se mantuvieron casi homogéneos a lo largo de toda la columna de agua (aproximadamente $270 \mu\text{S cm}^{-1}$). En general el invierno presenta conductividades más altas (aproximadamente $40 \mu\text{S cm}^{-1}$ mayor en superficie), pero en el fondo los patrones se invierten, puesto que en

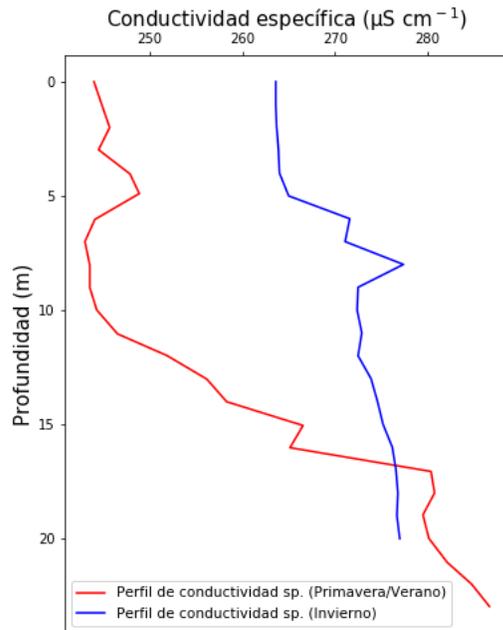
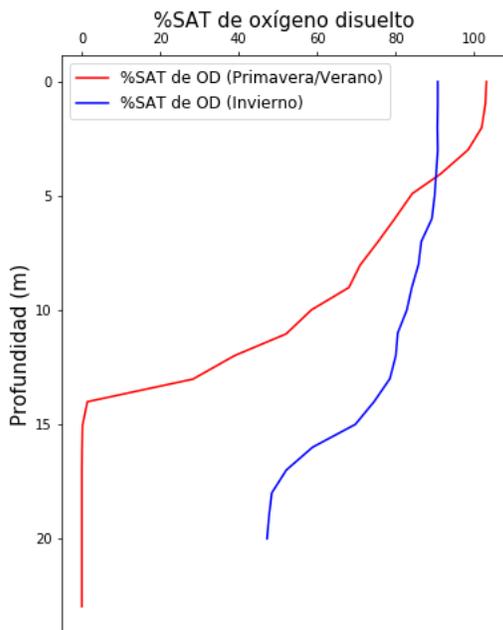
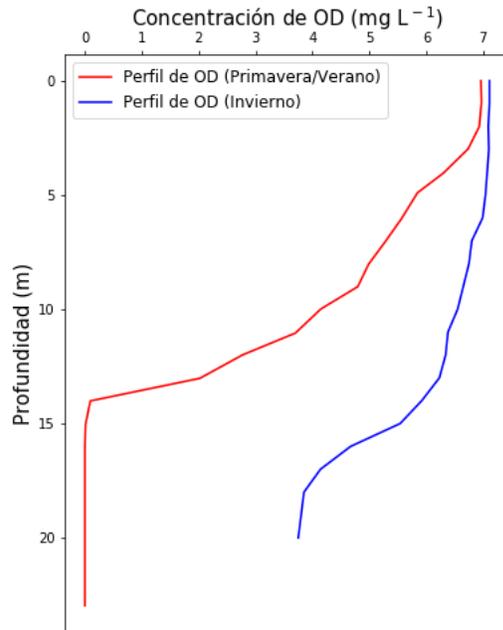
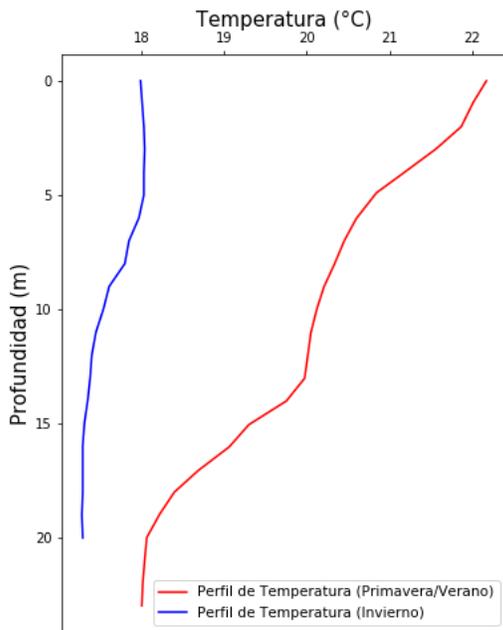
primavera/verano se aprecia la conductividad más alta de ambos periodos (aproximadamente $290 \mu\text{S cm}^{-1}$).

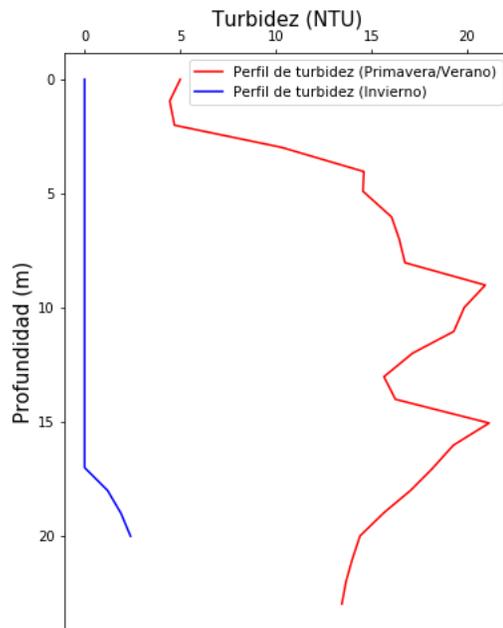
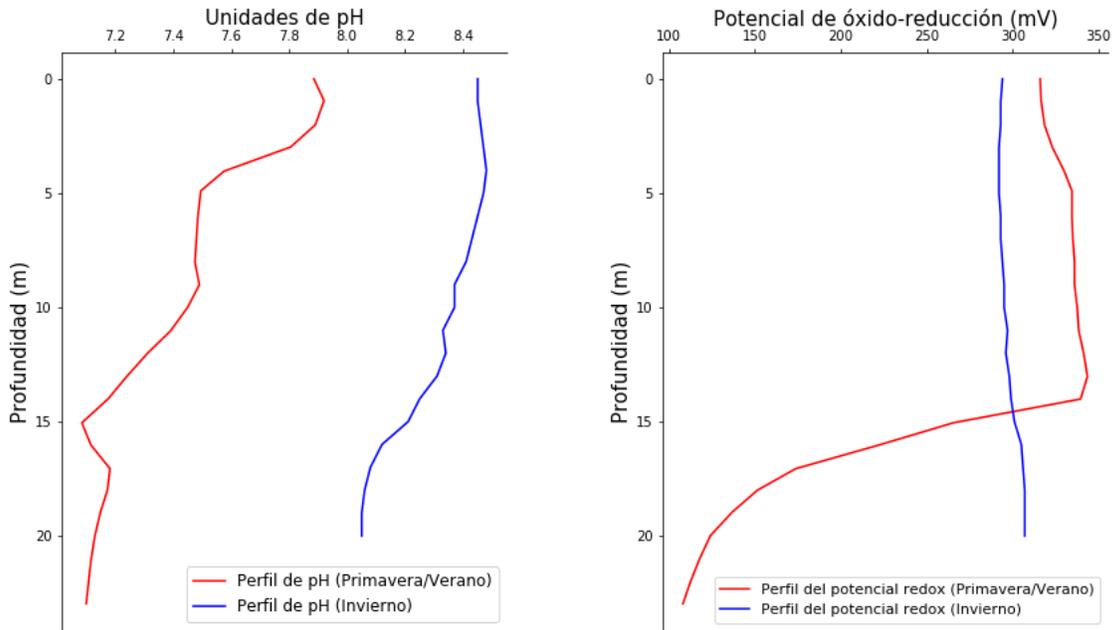
El pH presenta una ligera homogeneidad en sus datos durante los metros más superficiales de la primavera/verano. Después de los 7 m se aprecia una clara disminución del pH, con tendencia hacia la neutralidad, encontrándose la mayor disminución de pH entre los 10 y los 15 metros de profundidad. Por el contrario, a lo largo de toda la columna de agua en invierno se presentaron valores homogeneizados. Únicamente en los primeros 10 metros de profundidad es donde ambas temporadas tienen valores similares (con diferencias de aproximadamente (0.2 unidades de pH). De igual manera en la superficie, los valores de pH para la primavera/verano fueron más básicos/alcalinos que el invierno; patrón que se invierte conforme se aumenta la profundidad, donde el invierno mantiene los mismos valores y la primavera/verano cambia hacia un estado más neutro.

La turbidez presenta valores considerablemente mayores en la superficie de la primavera/verano (casi 7 veces mayor que en el fondo). Después de aproximadamente 3 m de profundidad estos valores tienden a homogeneizarse pero con una notable disminución (entre 10 y 2 NTU. Después de los 15 m es donde se aprecia un ligero aumento, pero posteriormente vuelve a reducirse la turbidez. Por el contrario, para el invierno el perfil está completamente libre de turbidez, puesto que a lo largo de la columna de agua se registraron valores de 0 NTU. Los valores de turbidez únicamente son similares dentro del intervalo de 10 a 15 m de profundidad, puesto que es donde casi se llega a la turbidez 0 en la primavera/verano y en invierno está muy cercana del 0, pero sin tocarlo.

- Patianú

Para la temporada de primavera/verano se obtuvieron perfiles un poco más profundos.





La temperatura durante la primavera/verano demuestra una clara tendencia a disminuir conforme se aumenta la profundidad. Únicamente se presenta un estado que tiende a la homogeneidad después del metro 20 de profundidad, donde de igual manera se presentan

los valores mínimos. El oxígeno disuelto y el porcentaje de saturación del oxígeno disuelto presentan el mismo patrón, con un máximo cambio entre los primeros 13 metros de profundidad (de 7 a 0 mg L⁻¹ y de 100 a 0 %_{SAT}). Posterior a ese punto se presentan valores de anoxia.

En cuanto al invierno, se notan unos perfiles más homogéneos a lo largo de la columna de agua. Para la temperatura, se aprecian dos temperaturas predominantes, pero menores en comparación con la primavera/verano: una por encima de los 7 m con un valor de aproximadamente 18 °C, y una segunda por debajo de los 7 m de profundidad que tiende hacia los 17 °C. Para el oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación se presentan de igual manera dos secciones, con la diferencia de que la primera llega hasta aproximadamente los 15 m segunda se encuentra por debajo de ese punto. Ambos perfiles de oxígeno se diferencian en que el primero siempre es mayor en invierno, encontrándose concentraciones similares únicamente en superficie (aproximadamente 7 mg L⁻¹) y el segundo únicamente en superficie es menor (aproximadamente 20 %_{SAT} menor que en primavera/verano), porque después de los 5 m de profundidad se vuelve a tener el mismo comportamiento que con el oxígeno disuelto.

La conductividad específica presenta un claro patrón de aumento en la primavera/verano conforme se aumenta la profundidad. Sin embargo, no existe una uniformidad en los descensos de conductividad, puesto que hay constantes aumentos y disminuciones en sus valores. La máxima conductividad se aprecia en el fondo (aproximadamente 285 μS cm⁻¹). Por otro lado el invierno presenta unos valores más uniformes en comparación con el invierno. En los primeros 5 m se aprecia una homogeneidad de los datos (aproximadamente 265 μS cm⁻¹). Después de ese valor, comienza a incrementarse la conductividad e incluso a los 7 m se aprecia un brusco aumento, seguido de una brusca disminución (de 270 a 280 μS

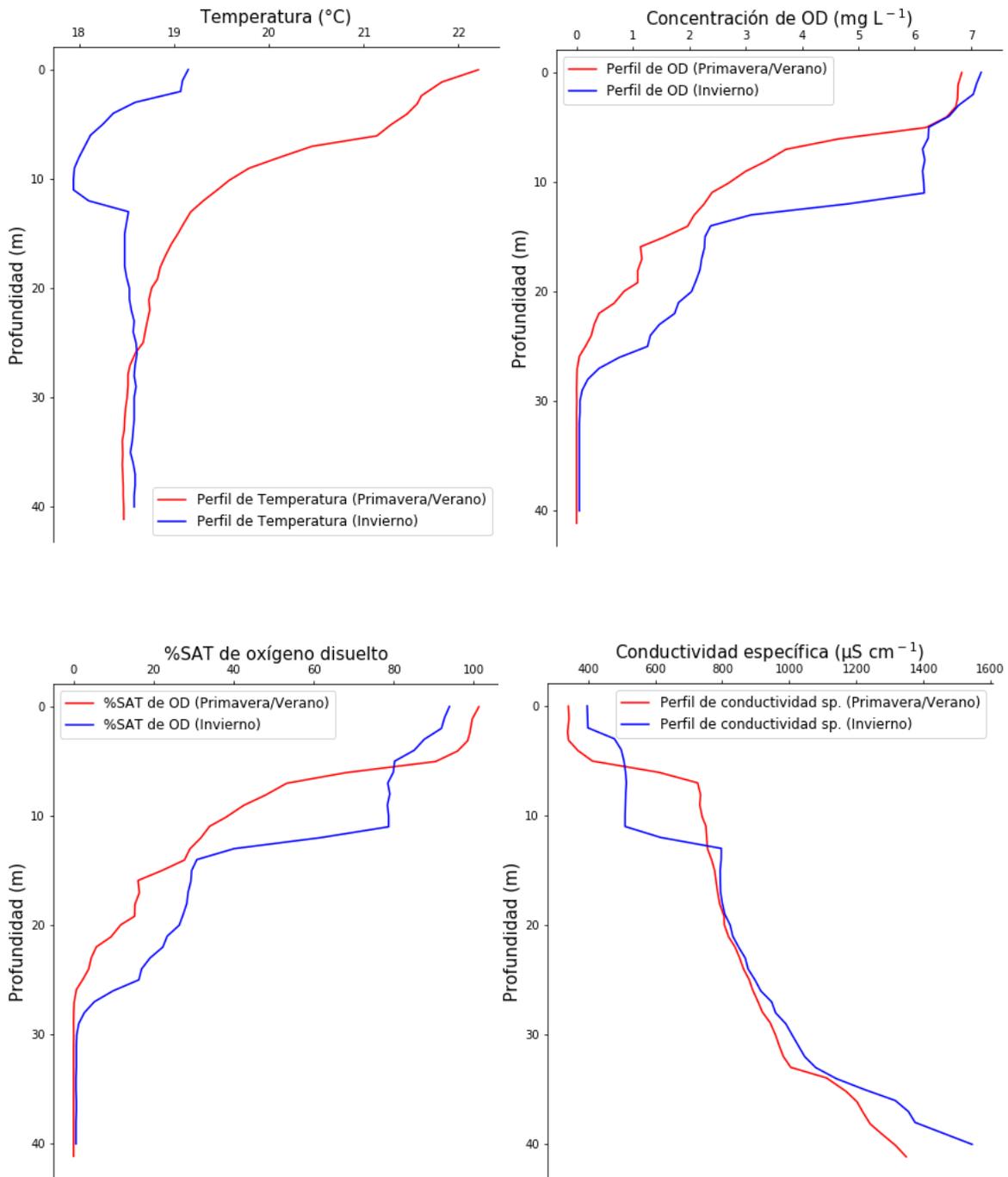
cm^{-1} , y de 280 a 270 $\mu\text{S cm}^{-1}$). Posteriormente continúa el aumento uniforme de la conductividad. En general, la conductividad obtenida durante el invierno es mayor hasta poco después de los 15 m de profundidad. Después de dicho punto, los valores mayores se presentan en la primavera/verano.

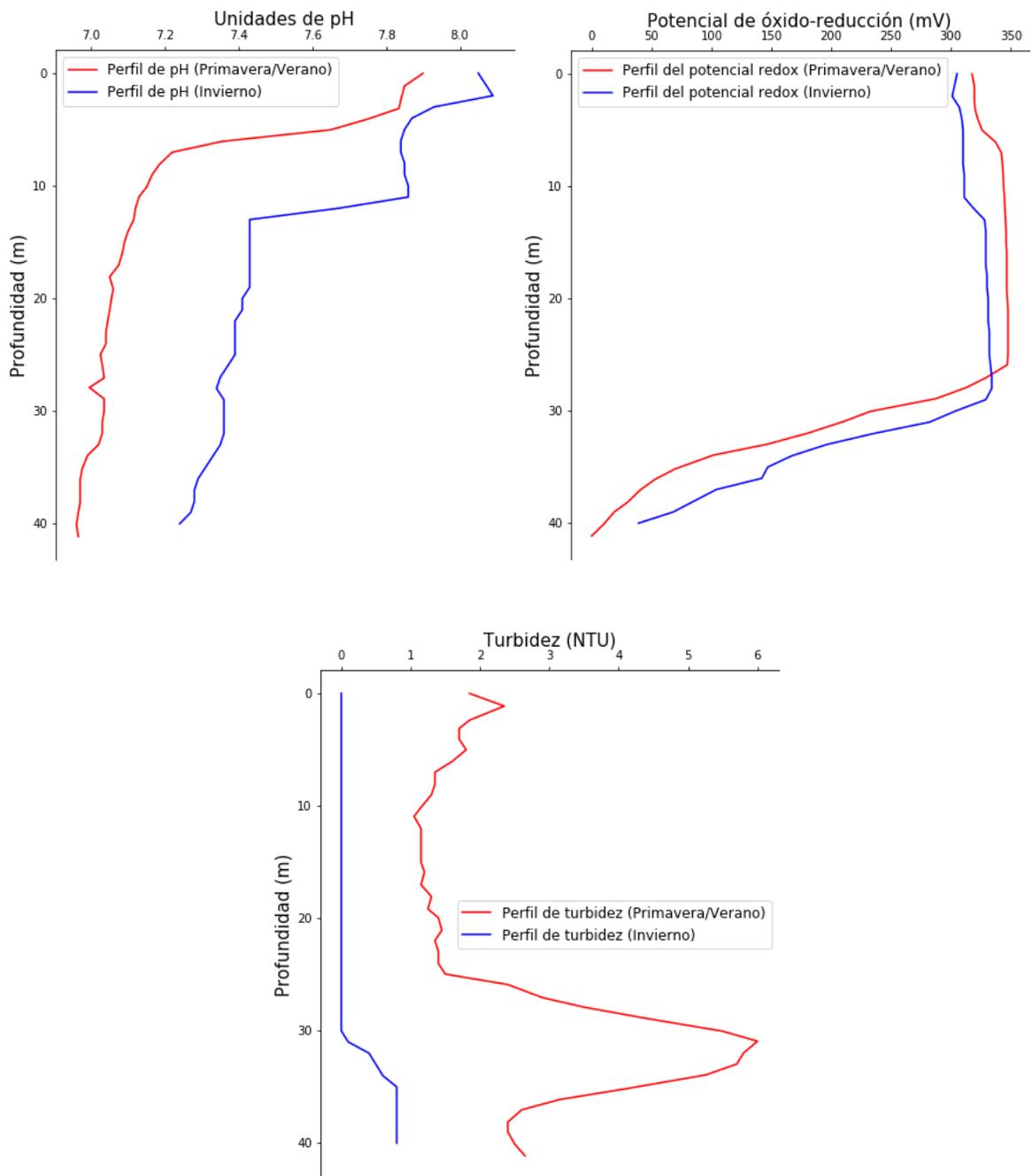
El pH durante la primavera/verano únicamente presenta valores homogéneos durante los 5 y 10 m de profundidad. A lo largo de todo el perfil se aprecia una tendencia a convertirse neutro conforme se aumenta la profundidad. En cuanto al invierno, se tienen unidades de pH mayores a lo largo de toda la columna de agua (aproximadamente 0.6 unidades de pH mayor del pH registrado en primavera/verano). Los datos se aprecian más homogéneos y básicos/alcalinos, pero después de los 15 m se aprecia que el pH presenta una máxima disminución, para después volver a volverse uniforme. En general, los valores más básicos se encuentran en la superficie y a lo largo de toda la columna de agua en el invierno. Únicamente en la zona más profunda de la primavera/verano es donde se presentan valores cercanos a la neutralidad.

La turbidez para la primavera/verano no presenta un claro patrón a lo largo de toda la columna de agua; está gobernado por constantes altas y bajas a lo largo del perfil. En cuanto al invierno, prácticamente todo el perfil presenta una turbidez de 0 NTU, salvo en el fondo, donde los valores muestran un ligero aumento. Esto puede deberse a alguna perturbación en la superficie del sedimento ocasionando su resuspensión por el sensor al momento de estar cerca del fondo. En general, para la primavera/verano se tiene una turbidez mayor a lo largo de todo el perfil.

- **Dos Lagos**

Para la primavera/verano se obtuvieron perfiles un poco más profundos que para el invierno.





La temperatura presenta una clara tendencia a disminuir conforme se aumenta su profundidad en la primavera/verano. Existe una diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo de aproximadamente 4 °C. En cuanto al oxígeno disuelto y el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto se presenta una zona de condiciones similares

durante los primeros 5 m de profundidad, después de este punto se aprecia una clara tendencia a disminuir conforme se aumenta la profundidad, presentando la máxima disminución de la concentración poco antes de los 10 m de profundidad. Se presentan valores de anoxia aproximadamente los 27 m de profundidad.

Por otro lado, en el invierno ocurre un fenómeno diferente, puesto que se demuestra la misma tendencia a disminuir de la temperatura durante los primeros 10 m (de 19 a 18 °C), pero pasando ese punto se aprecia un aumento de temperatura (de 18 a 18.5 °C). Después de ese aumento se aprecia que conforme aumenta la profundidad de igual manera la temperatura comienza a presentar valores más homogéneos, con una ligera tendencia a aumentar. El oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación demuestran la misma tendencia a disminuir conforme se aumenta la profundidad durante los metros más superficiales pero, después del metro 10, se aprecia una drástica disminución de ambas (de 6 mg L⁻¹ a 2 mg L⁻¹ y de 80 a 30 %_{SAT}). Posterior a ese punto se vuelve a apreciar otra disminución progresiva, hasta que llegan a la homogeneidad después del metro 30 (anoxia).

En general se aprecia que la temperatura durante la primavera/verano es mayor únicamente en los primeros 25 m de profundidad, después de ese punto la temperatura del invierno se vuelve ligeramente mayor (diferencia < 1 °C entre ambas épocas). La concentración de oxígeno disuelto es mayor durante el invierno. En cuanto al %_{SAT} únicamente en superficie los valores son mayores en primavera/verano que en invierno.

La conductividad específica, para ambas temporadas, aumenta conforme se incrementa la profundidad, fenómeno que únicamente ocurre en este lago. Para los primeros 5 m más superficiales se aprecia una ligera homogeneidad en la primavera/verano. Después de este punto aumenta bruscamente la conductividad (de 400 a 800 μS cm⁻¹) y después de 10 m de

profundidad comienza un incremento progresivo. Después del metro 35 se vuelve a apreciar otro aumento mayor a los que se venían presentando (de aproximadamente 820 a 1000 $\mu\text{S cm}^{-1}$) y de ahí sigue incrementando progresivamente hasta el fondo (superando los 1200 $\mu\text{S cm}^{-1}$). En cuanto al invierno, los perfiles más homogéneos se encuentran en los primeros 10 m de profundidad. Después de ese punto se tiene un aumento brusco (como sucedió en primavera/verano, de aproximadamente 450 a 500 $\mu\text{S cm}^{-1}$) y posteriormente comienza a darse un incremento progresivo hasta el fondo. En general, a lo largo de todo el perfil, se presentan conductividades ligeramente mayores en el invierno, salvo entre el metro 5 y 10, donde se nota un desfase en el aumento brusco de conductividad (en la primavera/verano ocurre aproximadamente en el metro 5 y en el invierno en el metro 10).

El pH presenta los cambios más grandes en los primeros 10 m de profundidad durante la primavera/verano (aproximadamente 0.6 unidades de pH), donde posteriormente se comienza a tener una tendencia hacia la neutralidad de manera más paulatina y alcanzándola en el metro 30. En cuanto al invierno, hay alternancias entre disminuciones bruscas (aproximadamente en el quinto y décimo metro) y disminuciones paulatinas (aproximadamente del metro 5 al 10 y del metro 15 al 40). Comparando ambas temporadas, se aprecia que los valores del invierno son mayores a los de la primavera/verano a lo largo de toda la columna de agua (aproximadamente 0.2 unidades de pH de diferencia comparando los valores más altos para ambos perfiles).

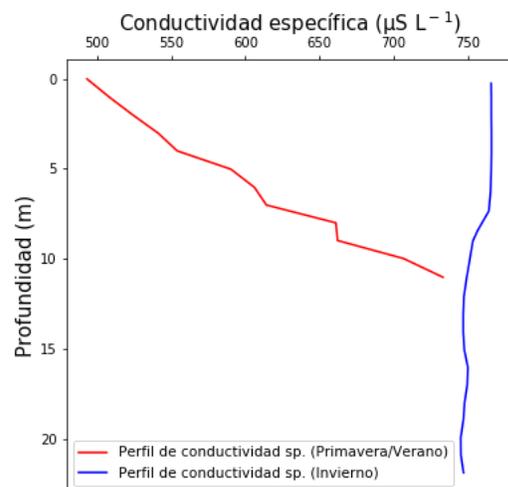
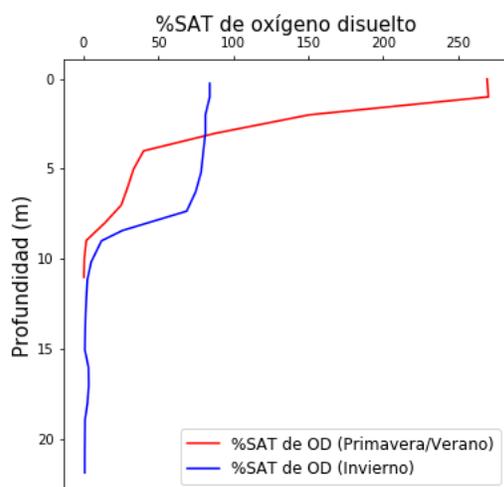
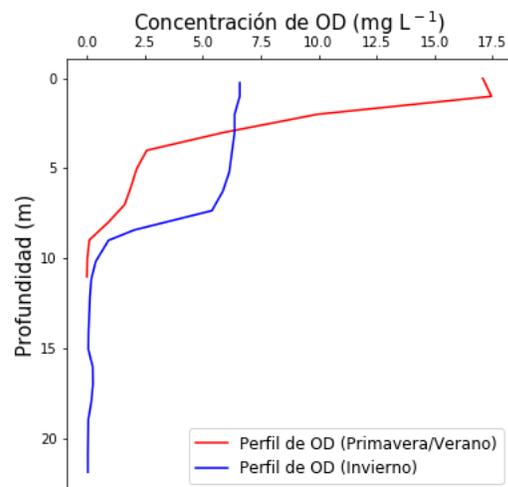
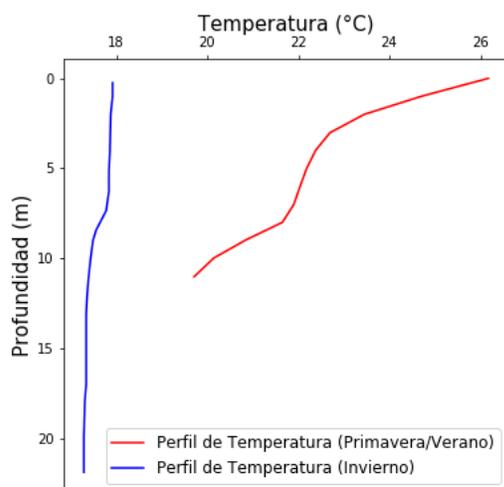
La turbidez durante los metros más superficiales de la primavera/verano presenta valores prácticamente homogéneos (entre 1 y 2.5 NTU), salvo en los 30 m de profundidad, donde se aprecia un aumento de turbidez (de 1.5 a 6 NTU). En cuanto al invierno, el perfil de temperatura presenta un perfil homogéneo (de 0 NTU) durante casi toda la columna de agua, salvo en el fondo. De igual manera se puede deber a alteraciones que provoca el

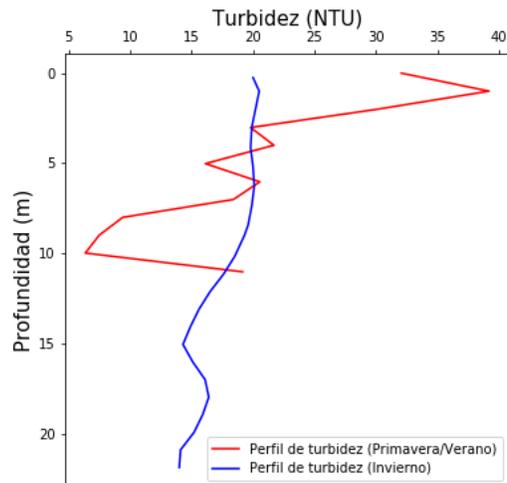
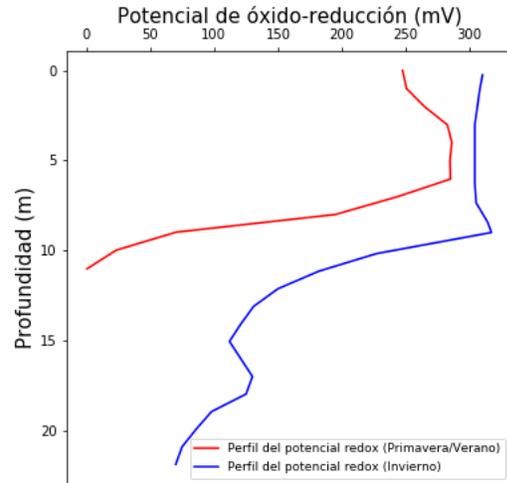
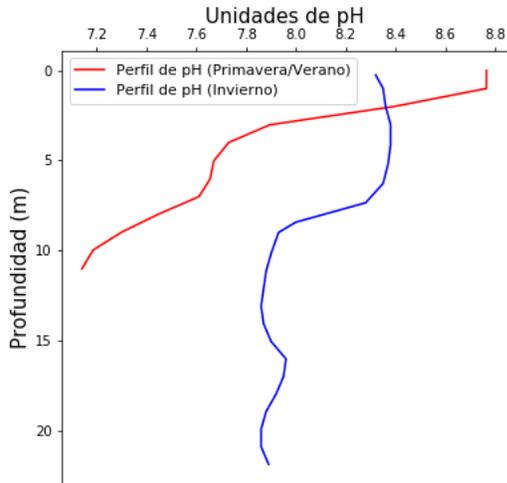
sensor al momento de que llega a las zonas más profundas, resuspendiendo el sedimento, y con ello afectando de esta manera a la turbidez medida. En general, la primavera/verano presenta una turbidez mayor a lo largo de todo el perfil.

PROFUNDO IMPACTADO

- San Lorenzo

En estos perfiles hubo muestreos en profundidades diferentes por cuestiones de logística.





Durante la temporada de primavera/verano se aprecia un brusco descenso de la temperatura de superficie a fondo (aproximadamente 6 °C de diferencia). El máximo cambio se da en los primeros 5 m de profundidad. En cuanto al oxígeno disuelto y el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, de forma similar a la temperatura durante la primavera/verano, presentan una gran variación de los valores entre la superficie y el fondo (aproximadamente una diferencia de 17.5 mg L⁻¹ y 250 %_{SAT}), presentando el máximo cambio durante los primeros 5 m de profundidad.

Por otro lado, durante el invierno, la temperatura presenta una columna con temperaturas prácticamente homogéneas, con una ligera disminución visible a partir de aproximadamente el metro 7 de profundidad. En cuanto al oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación, la diferencia entre superficie y profundidad se reduce (aproximadamente 7 mg L⁻² y 90 %_{SAT} de diferencia).

En general, estos tres parámetros fisicoquímicos presentan valores mucho mayores durante la temporada de primavera/verano y en superficie. Para ambas temporadas, en las zonas más profundas, se presentan valores similares de oxígeno disuelto y de su porcentaje de saturación, cosa que no ocurre con la temperatura, puesto que el valor mínimo presentado en la primavera/verano sigue siendo mayor que el valor máximo presentado en el invierno (aproximadamente 2 °C mayor).

La conductividad específica durante la primavera/verano presenta un claro comportamiento de correlación donde conforme se incrementa la profundidad, de igual manera se incrementa la conductividad específica. En cuanto al invierno, se tiene un perfil más homogéneo de los valores que se mantiene entre los 750 μS cm⁻¹. En general, se aprecia visiblemente que el valor mínimo detectado en el invierno sigue siendo mayor al valor máximo detectado en la primavera/verano (aproximadamente 10 μS cm⁻¹). La diferencia radica en que durante la primavera/verano se tiene un aumento conforme se aumenta la profundidad y durante el invierno se invierte este patrón (se tiene una disminución de la conductividad específica conforme se aumenta la profundidad).

El pH durante la primavera/verano presenta los valores más básicos en su superficie, tendiendo a la neutralidad conforme se aumenta la profundidad. Durante el quinto metro es donde se presenta la mínima disminución, puesto que antes y después de este valor se

presentan disminuciones bruscas en las unidades de pH. En cuanto al invierno, se aprecia una tendencia de valores homogéneos y básicos durante los primeros 5 m de profundidad. Después de este punto, el pH reduce sus valores. Posterior a esta brusca disminución, se vuelve a tener una tendencia a presentar valores similares, ya más cercanos a la neutralidad. En general, ambas temporadas presentan una correlación donde conforme se aumenta la profundidad, disminuyen las unidades de pH. Únicamente en superficie se presentan valores más altos en la primavera/verano que en el invierno (aproximadamente 0.2 unidades de pH), puesto que después de los 5 m de profundidad, se aprecia que los valores del invierno son mayores (aproximadamente 0.8 unidades de pH de diferencia en las zonas más profundas de cada temporada).

La turbidez en la primavera/verano no presenta un claro comportamiento uniforme a lo largo de la columna de agua. Se presentan constantes subidas y bajadas de sus valores. En cuanto al invierno, sí presenta un claro comportamiento donde la turbidez se mantiene uniforme a lo largo de casi toda la columna de agua, con valores que rondan entre los 15 y 20 NTU. En general, ambas temporadas presentan comportamientos completamente diferentes. La primavera/verano presenta valores mayores al invierno únicamente en superficie; en el fondo los valores obtenidos son menores a los que se obtuvieron en el invierno.