



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**VARIACIÓN A LARGO PLAZO (1998-2019) DE LA CONCENTRACIÓN DE LA
CLOROFILA-a FITOPLANCTÓNICA TOTAL Y FRACCIONADA EN EL LAGO
ALCHICHICA, PUEBLA**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
(LIMNOLOGÍA)

PRESENTA:

SANDRA GUADARRAMA HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. JAVIER ALCOCER DURAND
FES IZTACALA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DR. ALFONSO LUGO VÁZQUEZ
FES IZTACALA, UNAM

DRA. MARGARITA CABALLERO MIRANDA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

DRA. GLORIA VILA CLARA FATJÓ
FES IZTACALA, UNAM

DR. BENJAMÍN QUIROZ MARTÍNEZ
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., ABRIL, 2023



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.



VARIACIÓN A LARGO PLAZO (1998-2019) DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CLOROFILA-a FITOPLANCTÓNICA TOTAL Y FRACCIONADA EN EL LAGO ALCHICHICA, PUEBLA

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
(LIMNOLOGÍA)

PRESENTA:
SANDRA GUADARRAMA HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. JAVIER ALCOCER DURAND
FES IZTACALA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DR. ALFONSO LUGO VÁZQUEZ
FES IZTACALA, UNAM

DRA. MARGARITA CABALLERO MIRANDA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

DRA. GLORIA VILA CLARA FATJÓ
FES IZTACALA, UNAM

DR. BENJAMÍN QUIROZ MARTÍNEZ
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., ABRIL, 2023

Agradecimientos Institucionales

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología (PCML), al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML), a la Facultad de Estudios Superiores Iztacala (FES-I), a la Unidad de Investigación Interdisciplinaria en Ciencias de la Salud y la Educación (UIICSE) por brindarme la infraestructura para continuar con mi desarrollo académico y social, que me ha permitido construir un criterio interdisciplinario y multicultural.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (P220CCOR880369, 0956-N9111, 25430-T, 34893-T, 41667, 49923, 103332, 224893, 52387, 79893, 131689), Dirección General de Asuntos del Personal Académico, PAPIIT (IN204597, IN210806-3, IN221009, IN215512, IN208502, IN207206, IN225517, IN219220, IN231820), FES Iztacala PAPCA (2002-03, 2006-07, 2007-08, 2009-10, 2013-14, 2014-15), Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM (PINCC 2020-2021), y Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial (SSAOT) de Puebla. Al CONACYT por la beca de posgrado otorgada.

A mi tutor de tesis, Dr. Javier Alcocer, por compartir sus conocimientos y permitirme explorar la Limnología mediante las peculiaridades del lago Alchichica.

A los miembros de mi Jurado; Dr. Alfonso Lugo, Dra. Margarita Caballero, Dra. Gloria Vilaclara y Dr. Benjamín Quiroz les agradezco los distintos enfoques que me han compartido, siempre es una grata experiencia escuchar todo aquello que tienen que decir, gracias por formar científicos con interés y curiosidad.

Dra. Vilma Ardiles, ¡GRACIAS! Por su apoyo y todas las lecciones que sigo aprendiendo de usted y con usted, gracias por las distintas perspectivas a través de todos estos años.

Dr. Luis Oseguera, le agradezco por compartir sus conocimientos tanto en el laboratorio como en campo. Dra. Rocío Fernández, estoy agradecida por que he aprendido de usted, por las vivencias y anécdotas que me ha compartido. Dra. Diana Torres, por las agradables coincidencias y experiencias que tenemos en común. M. en C. Daniel Cuevas, por su apoyo y orientación en este mundo de las bases de datos. M. en C. Montserrat Rivera, por su apoyo en el laboratorio y los aprendizajes en campo. A los Maestros, futuros Doctores, Doctores del equipo (Daniela, Ismael, Renato, Mariana, Erick) y todos aquellos que han sido parte de este. Ha sido enriquecedor observar, crecer y ser parte de este equipo.

A la Dra. Elva Escobar, por brindarme la oportunidad de conocer las maravillas del mar profundo y ampliar mis conocimientos en el Laboratorio de Biodiversidad y Macroecología y a todo el equipo. A la M. en C. Leticia Jiménez, la M. en C. Esmeralda Morales y la Dra. Adriana Gaytán.

A la Dra. María del Rosario Sánchez, al Dr. Miroslav Macek, la Biól. Cecilia López, la M. en C. Laura Peralta, al Dr. Jorge Ciro, a Omar Flores, la Dra. Elizabeth Ortega y a todos los integrantes del Grupo de Investigación en Limnología Tropical (GILT) por brindarme su apoyo, técnico, social, extender mis dudas y ampliar mi perspectiva ocupando distintos enfoques.

Agradecimientos

A mi familia, porque son inspiración, motivación y alegría. **¡MUCHAS GRACIAS!**

A mis abuelos ^(†) por sembrar curiosidad, comunicación, sonrisas y anécdotas.

A los Guadarrama, por su carisma, entrega y diversión

A los Hernández, por los encuentros, compañía y risas.

A los Paceños, por las novedades, aventuras e increíbles experiencias.

A mis amigos, todos ustedes que han generado momentos que acompañan mis suspiros y esas sonrisas que siempre traigo conmigo.

A mis profesores, quienes han impulsado mi curiosidad y han dejado huella con sus estrategias para guiar y transmitir cualquier idea.

A todas las personas que han estado en diferentes etapas de mi vida con sonrisas, aventuras y experiencias irremplazables. Todos ustedes son maravillosos y han sido parte importante para desarrollar y formar la persona que soy.

A cada una de las personas que han hecho posible la consolidación de esta tesis, estudiantes, compañeros, amigos, investigadores, que han formado desde 1998 la colecta, procesamiento y aportes científicos para poder generar una descripción a largo plazo.

A ti, que estás leyendo estas líneas, mantente curioso, optimista y abierto al diálogo. Busca respuestas y disfruta del camino, siempre existen diferentes enfoques y criterios, crea el tuyo y enriquecelo con todo lo que te rodea, de todo lo que puedas aprender y todo lo que puedas compartir.

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Dedicatoria

**A RAFAEL,
ADRIANA,
DANTE Y
NAOMI**

Tabla de contenido

RESUMEN	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN	15
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. ANTECEDENTES	20
4. OBJETIVO	22
5. METAS.....	22
6. HIPÓTESIS	23
7. ÁREA DE ESTUDIO	24
8. MATERIAL Y MÉTODOS.....	25
8.1 Trabajo de campo y laboratorio	25
8.2 Trabajo de gabinete.....	26
9. RESULTADOS.....	29
9.1 Parámetros meteorológicos.....	29
9.2 Parámetros limnológicos	35
9.2.1 Zona eufótica (Z_{EU})	35
9.2.2 Capa de mezcla (Z_{MIX})	37
9.2.3 Proporción $Z_{MIX} : Z_{EU}$	40
9.2.4 Temperatura.....	42
9.2.5 Oxígeno Disuelto (OD).....	47
9.2.6 Clorofila-a (Cl-a).....	51
9.2.7 Clorofila-a integrada (Cl-a-int)	59
9.3 Análisis de onduletas.....	66

9.3.1	Parámetros meteorológicos	66
9.3.2	Parámetros limnológicos.....	68
9.3.3	Clorofila-a integrada (Cl-a-int)	71
a)	Clorofila-a integrada total (Cl-a-int-T).....	71
b)	Clorofila-a integrada fracción grande (Cl-a-int-L).....	71
c)	Clorofila-a integrada fracción pequeña (Cl-a-int-S)	72
10.	DISCUSIÓN	75
11.	CONCLUSIONES.....	83
12.	REFERENCIAS.....	85
13.	ANEXOS	96

Índice de figuras

Fig. 1. Ubicación del lago Alchichica, Puebla, México (Modificado de Filonov <i>et al.</i> , 2008).	24
Fig. 2. Temperatura del aire (°C) representada por los puntos rojos y la precipitación (mm) en columnas azules, de un año tipo. Datos de la estación climatológica convencional (SMN-21052) Alchichica, Puebla, del Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA.	29
Fig. 3. Temperatura mensual del aire durante el periodo 1998-2019. La línea punteada en negro representa el valor promedio (13.7 °C). Datos obtenidos de la estación climatológica convencional (SMN-21052) Alchichica, Puebla, del Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA.	30
Fig. 4. Promedios anuales de temperatura del aire (°C) de la estación climatológica (SMN-21052) Alchichica, Puebla (SMN, 2020).	30
Fig. 5. Precipitación mensual durante el periodo 1998-2019. La línea punteada roja representa el valor promedio (382.2 mm). Datos obtenidos de la estación climatológica convencional (SMN-21052) Alchichica, Puebla, del Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA.	31
Fig. 6. Precipitación total anual (mm) de la estación climatológica (SMN-21052) Alchichica, Puebla (SMN, 2020).	31
Fig. 7. Anomalías mensuales de temperatura del aire del periodo 1998-2019.	32
Fig. 8. Anomalías mensuales de precipitación del periodo 1998-2019.	32
Fig. 9. Índice MEI bimensual del periodo de 1998 a 2019 (NOAA, 2020). MEI corresponde a las siglas en inglés del Índice Multivariado para ENOS (Multivariate ENSO Index). Las barras en color rojo coinciden con los años del evento ENOS positivo (Niño) y las barras en color azul coinciden con los años del evento ENOS negativo (Niña) registrados por el MEI para este estudio.	33
Fig. 10. Año tipo del promedio de los registros mensuales de la zona eufótica (Z_{EU} m) en toda la columna de agua del Lago Alchichica. La línea punteada indica el promedio general (30.7 m) de la Z_{EU} durante 1998 a 2019.	35

Fig. 11. Promedios anuales de la zona eufótica (Z_{EU} m) en toda la columna de agua del lago Alchichica, durante 1998 a 2019.	36
Fig. 12. Anomalías mensuales de la zona eufótica (Z_{EU} m) del lago Alchichica.	37
Fig. 13. Año tipo del promedio de los registros mensuales de la capa de mezcla (Z_{MIX} m) en toda la columna de agua del Lago Alchichica. La línea punteada indica el promedio general de la Z_{MIX} durante 1998 a 2019.	38
Fig. 14. Promedios anuales de la capa de mezcla (Z_{MIX} m) en toda la columna de agua del lago Alchichica.....	39
Fig. 15. Anomalías mensuales de la capa de mezcla (Z_{MIX} m) del lago Alchichica.....	40
Fig. 16. Año tipo de la capa de mezcla (Z_{MIX} m) y la zona eufótica (Z_{EU} m) del lago Alchichica durante 1998 a 2019. Al costado derecho se presentan los valores de la proporción de $Z_{MIX} : Z_{EU}$	41
Fig. 17. Proporción de la capa de mezcla y zona eufótica ($Z_{MIX} : Z_{EU}$) del lago Alchichica durante 1998 a 2019.	41
Fig. 18. Diagrama de isotermas ($^{\circ}C$) profundidad-tiempo del año tipo en el lago Alchichica durante el periodo de estudio (1998-2019).	42
Fig. 19. Año tipo de la temperatura promedio mensual (T $^{\circ}C$) de la columna de agua del Lago Alchichica. La línea punteada indica el promedio general (15.7 $^{\circ}C$) del periodo 1998 a 2019.	43
Fig. 20. Promedios anuales de la temperatura de la columna de agua del lago Alchichica. La línea roja muestra la tendencia de aumento estadísticamente significativa ($p < 0.05$) de los datos durante 1998 a 2019.	45
Fig. 21. Promedios anuales de la temperatura de fondo del lago Alchichica. La línea roja muestra la tendencia de aumento estadísticamente significativa ($p < 0.05$) de los datos durante 1998 a 2019.	46
Fig. 22. Evolución de la termoclina (promedios anuales de 1998-2019) en el lago Alchichica. Tc-t: Tope de la termoclina y Tc-b: Base de la termoclina. Las líneas punteadas son el promedio general de las Tc-i y Tc-t, respectivamente.....	46
Fig. 23. Anomalías mensuales de la temperatura ($^{\circ}C$) de la columna de agua del lago Alchichica.	47

Fig. 24. Año tipo de la concentración promedio mensual de oxígeno disuelto (OD mg L ⁻¹) en toda la columna de agua del lago Alchichica. La línea punteada indica en promedio del periodo 1998 a 2019.....	48
Fig. 25. Promedios anuales y desviación estándar del oxígeno disuelto (OD mg L ⁻¹) en toda la columna de agua del lago Alchichica.	49
Fig. 26. Diagrama de tiempo-profundidad de isopletras de oxígeno disuelto (mg L ⁻¹) del año tipo en el lago Alchichica durante el periodo de estudio (1998-2019).	50
Fig. 27. Año tipo de la concentración promedio mensual de la clorofila-a total (Cl-a-T µg L ⁻¹) en toda la columna de agua del lago Alchichica, durante el periodo de 1998 a 2019.	51
Fig. 28. Isolíneas del año tipo de la concentración de clorofila-a total (Cl-a-T µg L ⁻¹) del lago Alchichica, durante el periodo 1998 a 2019.....	52
Fig. 29. Año tipo de la concentración promedio mensual de clorofila-a fracción grande (Cl-a-L µg L ⁻¹) en toda la columna de agua del lago Alchichica durante el periodo de 1998 a 2019.	53
Fig. 30. Año tipo de la concentración promedio mensual de clorofila-a fracción pequeña (Cl-a-S µg L ⁻¹) en toda la columna de agua del lago Alchichica durante el periodo de 1998 a 2019.	54
Fig. 31. Concentración promedio anual de clorofila-a total (Cl-a-T µg L ⁻¹) en toda la columna de agua del lago Alchichica.	55
Fig. 32. Concentración de la clorofila-a total (Cl-a-T µg L ⁻¹) en función de la profundidad y el periodo de estudio en el lago Alchichica.....	56
Fig. 33. Concentración promedio anual de clorofila-a fracción grande (Cl-a-L µg L ⁻¹) en toda la columna de agua del lago Alchichica.	57
Fig. 34. Concentración promedio anual de clorofila-a pequeña (Cl-a-S µg L ⁻¹) en toda la columna de agua del lago Alchichica.	58
Fig. 35. Año tipo de las concentraciones promedio mensuales de clorofila-a integrada total (Cl-a-int-T mg m ⁻²) en toda la columna de agua del lago Alchichica, durante 1998 a 2019.	59
Fig. 36. Año tipo de las concentraciones promedio mensuales de clorofila-a integrada fracción grande (Cl-a-int-L mg m ⁻²) en toda la columna de agua del lago Alchichica, durante 1998 a 2019.	60

Fig. 37. Año tipo de las concentraciones promedio mensuales de clorofila-a integrada fracción pequeña (Cl-a-int-S mg m ⁻²) en toda la columna de agua del lago Alchichica, durante 1998 a 2019.	61
Fig. 38. Concentración promedio anual de clorofila-a integrada total (Cl-a-int-T mg m ⁻²) en toda la columna de agua del lago Alchichica.	62
Fig. 39. Concentración promedio anual de la clorofila-a integrada fracción grande (Cl-a-int-L mg m ⁻²) en toda la columna de agua del lago Alchichica.	63
Fig. 40. Concentración promedio anual de clorofila-a integrada fracción pequeña (Cl-a-int-S mg m ⁻²) en toda la columna de agua del lago Alchichica. La línea roja muestra la tendencia decreciente significativa (análisis de Mann-Kendall p < 0.05) de los datos durante el periodo de 1998 a 2019.	64
Fig. 41. Concentración promedio anual de clorofila-a integrada fracción grande y fracción pequeña (Cl-a-int-L y Cl-a-int-S mg m ⁻²) en un periodo de 22 años.	65
Fig. 42. Espectro de potencias de onduletas de a) temperatura del aire y b) precipitación para la serie de tiempo de 1998-2019. La barra de colores al costado derecho indica el poder del espectro. La línea convexa delimita el cono de confiabilidad.	67
Fig. 43. Espectro de potencias de onduletas para el Índice MEI bimensual del periodo de 1998 a 2019 (NOAA, 2020).	68
Fig. 44. Espectro de potencias de onduletas de (a) Temperatura y (b) Oxígeno disuelto (OD) del lago Alchichica para la serie de tiempo de 1998-2019.	69
Fig. 45. Espectro de potencias de onduletas de (a) zona eufótica (Z _{EU}) y (b) capa de mezcla (Z _{MIX}) promedio del lago Alchichica para la serie de tiempo de 1998-2019.	70
Fig. 46. Espectro de potencias de onduletas para la concentración de clorofila-a integrada total (Cl-a-int-T) durante el periodo 1998-2019 en el lago Alchichica.	71
Fig. 47. Espectro de onduletas para la concentración de clorofila-a integrada fracción grande (Cl-a-int-L) durante el periodo 1998-2019 en el lago Alchichica.	72
Fig. 48. Espectro de onduletas para la concentración de clorofila-a integrada fracción pequeña (Cl-a-int-S) durante el periodo 1998-2019 en el lago Alchichica.	73

Índice de Tablas

Tabla 1. Identificación de años Niño y años Niña de acuerdo con el MEI y anomalías relacionadas con la temperatura del aire (T_{ai}) y precipitación (Pp). Las celdas en color rojo coinciden con los años del evento ENOS positivo (Niño) y las celdas en color azul coinciden con los años del evento ENOS negativo (Niña) registrados por el MEI para este estudio.....	34
Tabla 2. Comparación de ciclos de las variables estudiadas en el lago Alchichica (1998-2019). Los datos en azul se corresponden con los años del evento ENOS negativo (Niña) y los de color rojo a los años del evento ENOS positivo (Niño). T_{ai} : Temperatura del aire, T_a : temperatura del agua, (-): no se presenta el ciclo.....	74

Índice de Anexos

Anexo 1. Parámetros comparativos de diferentes lagos, M: Monomítico cálido, ME: Meromítico D: Dimítico, O: Oligomítico, Z_{MAX} : profundidad máxima	96
Anexo 2. Temperatura y concentración de oxígeno disuelto en distintos lagos. T_{AX} : Temperatura promedio del agua. Los subíndices muestran las temperaturas promedio del agua; T_{AS} : superficial, T_{AM} : media, T_{AF} : de fondo. OD_X : oxígeno disuelto promedio. Los subíndices muestran los OD promedio; OD_S : superficial y OD_F : fondo.	98
Anexo 3. Concentraciones de Cl-a en distintos lagos. Los valores que se encuentran en paréntesis corresponden al intervalo reportado.	100

RESUMEN

El lago Alchichica es uno de los pocos sistemas acuáticos epicontinentales en México que cuentan con una amplia base de datos a largo plazo. Con el objetivo de reconocer los periodos de variación cíclicos característicos más importantes de las oscilaciones intra e interanuales de la concentración de clorofila-a (total y fraccionada), se empleó el análisis de la transformada de onduletas aplicada al periodo 1998-2019. Se analizaron los registros de concentración de clorofila-a total (Cl-a-T), de tamaño grande (Cl-a-L) y de tamaño pequeño (Cl-a-S) en función de la zona eufótica (Z_{EU}), la capa de mezcla (Z_{MIX}), la temperatura del agua y la concentración de oxígeno disuelto (OD). También se consideraron parámetros meteorológicos (temperatura del aire y precipitación) para poder relacionar los ciclos de la clorofila-a con los posibles agentes forzantes externos (p. ej., ENOS El Niño, La Niña). Los principales periodos de variación cíclicos característicos de la Cl-a-T y Cl-a-L fueron el anual y el bienal. Para la Cl-a-S, solo se registró la ciclicidad anual. Ambos ciclos, anual y bienal, se relacionaron con la hidrodinámica del lago, esto es, con su monomixis cálida. El ciclo anual fue consistente a lo largo de 22 años y está presente en todos los parámetros excepto en el MEI (Índice multivariado ENOS), debido a que éste es una serie que oscila en múltiples frecuencias, presentando más de dos periodos dominantes. Existe evidencia que sugiere que se está llevando a cabo cambio climático en la cual la temperatura del lago mostró un aumento general de 0.7 °C (1998 a 2019) con un aumento particularmente elevado en la temperatura de fondo de 1.1 °C. Sin embargo, las tendencias decrecientes en la Z_{EU} , la Z_{MIX} y la concentración del OD no son estadísticamente significativas (Mann-Kendall, $p > 0.05$). Las condiciones positivas del ENOS con un aumento de temperatura y disminución de precipitación, generaron termoclinas menos profundas y menor concentración de Cl-a-T. Por otro lado, las condiciones negativas del ENOS (La Niña), con una disminución de temperatura y aumento de precipitación, generaron termoclinas más profundas y aumento en la concentración de Cl-a-T.

ABSTRACT

Lake Alchichica is one of Mexico's few epicontinental aquatic systems with an extensive long-term database. To recognize the most critical characteristic cyclical variation periods of the intra- and interannual oscillations of the chlorophyll-a concentration (total and fractional), the wavelet transform analysis was applied to the period 1998-2019. Records of total chlorophyll-a concentration (Cl-a-T), large size (Cl-a-L), and small size (Cl-a-S) were analyzed as a function of the euphotic zone (Z_{EU}), the mixed layer (Z_{MIX}), water temperature and dissolved oxygen concentration (DO). Meteorological parameters (air temperature and precipitation) were also considered to relate the Cl-a concentration cycles to possible external forcing agents (e.g., ENSO, El Niño, La Niña). Cl-a-T and Cl-a-L's characteristic cyclical variation periods were mainly annual and biennial. For Cl-a-S, only annual cyclicity was recorded. Both annual and biennial cycles were related to the hydrodynamics of the lake, that is, with its warm monomixis thermal pattern. The annual cycle was consistent throughout 22 years and is present in all the parameters except in the MEI (Multivariate INSO Index) since this series oscillates in multiple frequencies, presenting more than two dominant periods. Evidence suggests a climate change is occurring in the lake, with the lake's temperature showing a general increase of 0.7 °C (1998-2019) and exceptionally high at the bottom with 1.1 °C. However, the negative trends in Z_{EU} , Z_{MIX} , and OD concentration dynamics were not statistically significant (Mann-Kendall, $p > 0.05$). The positive conditions of ENSO (El Niño), with an increase in temperature and decrease in precipitation, generated shallower thermoclines and a lower concentration of Cl-a-T. On the other hand, the negative conditions of ENSO (La Niña), with a decrease in temperature and increase in precipitation, generated deeper thermoclines and an increase in Cl-a-T concentration.

1. INTRODUCCIÓN

El fitoplancton es un conjunto de organismos fotosintetizadores que comparten niveles de organización y está conformado por diversas y numerosas especies de algas eucariotas y cianobacterias que se encuentran suspendidos dentro de la zona fótica de los cuerpos acuáticos (Margalef, 1983). Para facilitar su estudio y comprender la dinámica poblacional del fitoplancton en respuesta a su ambiente en aguas epicontinentales (Lafond *et al.*, 1990), es común recurrir a la clasificación de Sieburth y colaboradores (1978) quienes establecieron tres grupos en relación con el tamaño de los organismos que forman parte de éste: picoplancton (0.2-2 μm), nanoplancton (2-20 μm) y microplancton (20-200 μm).

La concentración de nutrientes que tiene un lago influye en la distribución por talla del fitoplancton que se desarrolla en el sistema. Se ha descrito que, en general, los lagos oligotróficos tienden a presentar comunidades de picofitoplancton, debido a que este grupo tiene altas tasas de crecimiento, mayor eficiencia para obtener los nutrientes en bajas concentraciones y su pérdida por sedimentación es reducida (Stockner y Antia, 1986). Por otro lado, cuando los nutrientes se encuentran disponibles en altas concentraciones, como en los sistemas eutróficos, la biomasa fitoplanctónica está dominada por los organismos de talla $>2 \mu\text{m}$ correspondientes al nanofitoplancton y microfitoplancton (Reynolds, 1984). Sin embargo, existen sistemas acuáticos, como el lago Alchichica, el cual es oligotrófico y donde la dinámica del fitoplancton ha mostrado que la biomasa fitoplanctónica está dominada por especies de talla grande, como la diatomea *Cyclotella alchichicana* y la cianobacteria *Nodularia aff. spumigena*. Además de los nutrientes, otros factores abióticos influyen de manera importante en la variabilidad temporal de los sistemas acuáticos; entre éstos destacan por su importancia la luz, que define la profundidad de zona eufótica (Z_{EU}), y la temperatura que establece la profundidad de la capa de mezcla (Z_{MIX}). Asimismo, factores bióticos tales como la herbivoría y la competencia influyen en la distribución vertical de la abundancia y concentración del fitoplancton (Reynolds, 1984; Callieri, 2007).

La composición fitoplanctónica también varía de acuerdo a la estacionalidad climática que, en los ambientes tropicales, está definida en la alternancia de las temporadas de secas y de lluvias. Los lagos tropicales, al tener temperaturas más elevadas, se estratifican con mayor facilidad que los lagos templados; sin embargo, la estabilidad de la estratificación es menor, ya que cambios pequeños de temperatura conllevan cambios grandes de densidad, por lo que con una ligera variación de temperatura se pueden perder las diferencias de densidad y, por ende, la estratificación (Lewis, 1996). Los lagos tropicales suficientemente profundos como para estratificarse tienen un patrón térmico de monomixis cálida. Presentan una temporada de mezcla asociada al invierno hemisférico, cuando la temperatura del agua superficial se asemeja a la temperatura del fondo y la intensidad del viento tiene suficiente energía para mezclar la columna del agua, generando una distribución más o menos homogénea de la temperatura, oxígeno disuelto y nutrientes a lo largo de la columna de agua (Lewis, 1996; Wetzel, 2001).

Las condiciones que se generan en las dos épocas hidrodinámicas predominantes, mezcla profunda en la temporada fría de secas y estratificación térmica durante la temporada cálida de lluvias, resultan en un aumento de la relación entre la profundidad de la capa de mezcla y la profundidad de la capa eufótica donde posiblemente por la limitación de la luz, las diatomeas son dominantes ya que prefieren intensidades lumínicas menores. En contraste, cuando existe una baja relación $Z_{MIX} : Z_{EU}$ el fitoplancton adaptado a la radiación solar de mayor intensidad tales como las cianobacterias, se ven favorecidas (Reynolds, 2006).

La evaluación de distintas características del fitoplancton se ha empleado en los lagos para la estimación de la productividad primaria anual y los análisis basados en pigmentos fotosintéticos han proporcionado un marco adecuado de esta relación (fotosíntesis-composición fitoplanctónica). Entre las diferentes técnicas para la evaluación de la biomasa fitoplanctónica resalta la medición de la concentración de la clorofila-a (Cl-a), pigmento presente en todos los organismos fotosintetizadores. Al ser una técnica analítica relativamente rápida y sencilla se ha empleado en gran medida en diferentes estudios para estimar las variaciones de la biomasa fitoplanctónica a lo largo de la columna de agua y a través del tiempo (Reynolds, 2006; Darchambeau *et al.*, 2014).

Sin embargo, la dinámica temporal a largo plazo de los cuerpos acuáticos se ve modificada por la variabilidad y el cambio climático. Diversos estudios (p.ej., Alcocer y Lugo, 2003; Caballero *et al.*, 2016) mencionan que estos sistemas acuáticos pueden ser excelentes “sensores” que responden a fenómenos climáticos (p.ej., El Niño-Oscilación del Sur, ENOS por sus siglas en español) debido a que el sistema presenta una dinámica lacustre regular y bien establecida, definida por su patrón térmico (monomixis cálida), determinado por el clima regional. De tal manera, los cambios meteorológicos (p.ej., temperatura, precipitación) se verían reflejados en el lago a través de anomalías en los procesos de su dinámica térmica y otras condiciones fisicoquímicas y biológicas, tanto a corto como a largo plazo.

Entre los fenómenos climáticos, el ENOS constituye las anomalías del sistema océano-atmósfera que se presentan en el sur del Océano Pacífico tropical, entre el este y oeste. Las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) están estrechamente relacionadas con las diferencias de presión atmosférica del Océano Pacífico tropical (Oscilación del Sur). Las oscilaciones de estos índices (ENOS) son irregulares y ocurren con una periodicidad aproximadamente de entre 2 y 7 años (i.e., fenómenos decadales). Este fenómeno climático denota tres fases: (1) El Niño (anomalías positivas), donde, debido al debilitamiento de los vientos del este (o alisios) en la celda convectiva de Hadley del hemisferio sur, se detiene la surgencia que lleva agua fría de las profundidades a la superficie del océano, (2) la fase neutra, caracterizada por no presentar valores extremos en temperatura y (3) La Niña (anomalías negativas), evento climatológico donde ocurre un enfriamiento anómalo del Pacífico oriental ecuatorial cercano a la costa sudamericana. Cabe destacar que no siempre se presenta uno después del otro (Cane, 2005).

Para evaluar los efectos de este fenómeno global, el ENOS, sobre el medio ambiente local, es necesario tener en cuenta los cambios meteorológicos locales como la temperatura y la precipitación. En México, debido a su ubicación geográfica, la respuesta al ENOS varía de región en región (Noroeste y Sur, generalmente), además, los efectos son distintos dependiendo de la temporada del año en la que se presente, ya sea fría y seca (noviembre-abril) o cálida y lluviosa (mayo-octubre). Por ejemplo, los cambios en la

circulación atmosférica generados por la fase El Niño de ENOS en México durante la temporada cálida (mayo-octubre) ocurren porque el segmento descendente de la célula Walker se desplaza hacia el este, provocando una subducción y un calentamiento del aire que inhibe la formación de nubes y las precipitaciones sobre una parte del Atlántico, el Golfo de México y el territorio mexicano. Este hecho está directamente asociado al debilitamiento de los vientos alisios y a la disminución de la entrada de aire húmedo al continente. También disminuye la cantidad de precipitación al sur del paralelo 22° N (en la mitad sur de México, excluyendo la Península de Yucatán, Magaña *et al.*, 2003; Bravo-Cabrera *et al.*, 2017). Para la región en la que se localiza el Lago de Alchichica, por ejemplo, la fase El Niño de ENOS provoca una reducción en la precipitación y temperaturas más cálidas; por el contrario, la fase La Niña conlleva años extremadamente lluviosos y fríos (Bravo *et al.*, 2010; De la Lanza-Espino, 2011).

Los cambios en las condiciones climáticas que generan estos eventos afectan la dinámica del patrón térmico (estratificación/mezcla) de los lagos. Por ejemplo, los efectos del ENOS (fase positiva y negativa) en lagos tropicales pueden provocar un hipolimnion más estrecho y frío, un gradiente térmico mayor en la termoclina, una termoclina más superficial, un epilimnion más cálido una capa hipolimnética delgada y anoxia hipolimnética tardía, así como una reducción en los florecimientos fitoplanctónicos (Alcocer y Lugo, 2003; Caballero *et al.*, 2003). Esta situación se presentó en el evento El Niño de 1998 en Alchichica, denotando valores mínimos del florecimiento de las cianobacterias. Por otro lado, aumenta la estabilidad de la estratificación, se reducen los periodos de mezcla, provocando una mayor limitación de nutrientes y dando paso a una nueva composición fitoplanctónica (De la Lanza-Espino, 2011; Caballero *et al.*, 2016).

Se conoce que existe una alta variabilidad de los patrones estacionales del fitoplancton. También se ha analizado la variabilidad interanual (estacionalidad) del fitoplancton y más recientemente, se cuenta con algunos estudios de fitoplancton a largo plazo. Sin embargo, pocos estudios abarcan conjuntos de datos de varios años o décadas. Para lagos tropicales es común la ausencia de datos de fitoplancton a largo plazo, así como la falta de continuidad en los registros (Talling, 1986; Plisnier *et al.*, 2018). De acuerdo

con Darchambeau *et al.* (2014) la biomasa fitoplanctónica de los lagos grandes varía a diferentes escalas temporales que van de estacionales a siglos.

2. JUSTIFICACIÓN

El lago Alchichica cuenta con registros continuos mensuales de variables ambientales (como temperatura, concentración de oxígeno disuelto -OD-, radiación fotosintéticamente activa -PAR-), así como de concentración de Cl-a total y fraccionada, integrando una base de datos desde 1998 y hasta el 2019. Pocos sistemas acuáticos epicontinentales en México cuentan con una base de datos similar a largo plazo que permita llevar a cabo estudios de cambios en las variables ambientales, así como la dinámica de la biomasa de fitoplancton, entre otros. Analizar secuencias de tiempo largas permitirá tener una perspectiva más amplia del funcionamiento del ecosistema (Alcocer y Bernal, 2009).

El estudio de la dinámica de la concentración de la Cl-a total y fraccionada en el lago Alchichica a lo largo de 22 años en conjunto con las principales variables ambientales permitirá reconocer no solo la tendencia a largo plazo de esta importante señal relacionada con la biomasa, sino también de las ciclicidades presentes (intra e interanuales), así como analizar algunos agentes asociados con las mismas.

3. ANTECEDENTES

Oliva y colaboradores (2001) describen la variación anual del ensamble fitoplanctónico en el lago Alchichica. Este incluye el primer listado de 19 especies, siendo las diatomeas el grupo mejor representado en cuanto a riqueza taxonómica. Numéricamente domina el picofitoplancton alternando con el nanofitoplancton (p.ej., *Monoraphidium minutum*, *Synechocystis aquatilis*, *Oocystis parva*) a lo largo de todo el año, siendo particularmente abundantes durante la mezcla. Con relación a la biomasa fitoplanctónica, se presentan tres picos: 1) un florecimiento en la columna de agua de diatomeas en la mezcla dominado por la especie de gran tamaño *Cyclotella alchichicana*, 2) un florecimiento en superficie de la cianobacteria de gran tamaño fijadora de nitrógeno *Nodularia* aff. *spumigena* en la estratificación temprana (abril y mayo) y 3) un máximo profundo de clorofila (DCM, por sus siglas en inglés) asociado con el metalimnion durante la mayor parte de la estratificación y dominado nuevamente por la diatomea *C. alchichicana*.

Adame y colaboradores (2008) analizaron la biomasa fitoplanctónica en el lago Alchichica durante un periodo de cuatro años (1999-2002). Reportan que el lago está dominado en biomasa por el nano y microfitoplancton (talla $>2 \mu\text{m}$, principalmente *Cyclotella alchichicana*, con tamaño $> 20 \mu\text{m}$ de diámetro) durante todo el año. También, denotan dos patrones temporales: uno anual y uno bienal. Asimismo, ratifica la distribución ya mencionada, de *C. alchichicana* en mezcla, *N. aff. spumigena* en la estratificación temprana y nuevamente *C. alchichicana* en el DCM durante la estratificación bien establecida.

El segundo ciclo presenta una periodicidad bienal, esto es, cada dos años, en donde las concentraciones de la Cl-a durante la época de mezcla y asociada al florecimiento invernal de diatomeas son mayores en los años pares (2000 y 2002) y menores en los nones (1999 y 2001). Esta ciclicidad se atribuyó a la disponibilidad de sílice y a la relación Si/N que se da en el hipolimnion antes del periodo de mezcla, como los factores que al parecer determinan la magnitud del florecimiento (Ardiles *et al.*, 2012; Pajares *et al.*, 2017).

Al analizar un periodo de 12 años (1999-2010) de la concentración de Cl-a registrada en este caso por métodos de fluorescencia natural *in vivo*, González y colaboradores (2015) describieron la ciclicidad anual recurrente y predecible asociada a la monomixis cálida, con la presencia de los tres picos (floreCIMIENTO invernal de diatomeas, florecimiento primaveral de *Nodularia* y DCM) registrados anteriormente. Sin embargo, esta metodología no detectó la presencia de un patrón bienal ni de ningún otro ciclo interanual o tendencia a largo plazo. Tampoco lo observaron Cuevas-Lara y colaboradores (2016), quienes emplearon la misma metodología de fluorescencia natural *in vivo*.

Sin embargo, los cambios en la distribución del fitoplancton que describen Alcocer y Lugo (2003) en un año Niño (1998) con referencia a los años “normales” podrían ratificarse en un estudio de largo plazo (aproximadamente 22 años) que analice la variación de la concentración de la Cl-a fitoplanctónica -total y fraccionada- extraída tal y como lo hicieron Adame y colaboradores (2008), aportando información para comprender mejor los patrones y tendencias a largo plazo en un caso representativo de ambientes tropicales, como respuesta a estas oscilaciones climáticas con periodos casi decadales.

4. OBJETIVO

El objetivo del presente estudio fue reconocer los periodos de variación cíclicos característicos más importantes de las oscilaciones intra e interanuales de la concentración de Cl-a total (Cl-a-T) y fraccionada [fracción grande = nano + microfitoplancton (Cl-a-L) y fracción pequeña = picofitoplancton (Cl-a-S)] en el lago Alchichica, Puebla, en el lapso 1998-2019, así como los agentes que pudieran ser identificados como causales de la ciclicidad.

5. METAS

- Describir la dinámica estacional e interanual de la zona eufótica (Z_{EU}), la capa de mezcla (Z_{MIX}), la temperatura (T) y la concentración de oxígeno disuelto (OD) del lago Alchichica de veintidós años (1998-2019).
- Analizar la variación en la concentración de Cl-a-T, Cl-a-L y Cl-a-S a lo largo de veintidós años.
- Establecer las relaciones entre los periodos de variación de la concentración de Cl-a-T, Cl-a-L y Cl-a-S con respecto a la Z_{EU} , Z_{MIX} , T y OD.
- Reconocer patrones y/o tendencias intra e interanuales de la concentración de Cl-a-T, Cl-a-L y Cl-a-S, asociados con posibles agentes externos forzantes (p. ej., El Niño, La Niña).

6. HIPÓTESIS

1. Los periodos de variación cíclicos característicos de la CI-a-T, CI-a-L y CI-a-S serán, principalmente, el anual y el bienal, relacionándose con la hidrodinámica del lago.
2. Se espera que exista evidencia de cambio climático en el cual la T del lago aumente, que esto se refleje en cambios en la dinámica de la Z_{EU} y Z_{MIX} a lo largo de 22 años (1998-2019), y que a su vez modificarán el patrón estacional (intra-anual) e interanual en las concentraciones de CI-a.
3. Como ha sido sugerido (Alcocer y Lugo, 2003; Caballero *et al.*, 2003), las condiciones positivas de ENOS (El Niño) con un aumento de temperatura y disminución de precipitación, generarán termoclinas menos profundas y consecuentemente reducirán la concentración de CI-a fitoplanctónica del lago de Alchichica. Por otro lado, se espera que las condiciones negativas de ENOS (La Niña) con una disminución de temperatura y aumento de precipitación, generarán termoclinas más profundas y consecuentemente aumentarán la concentración de CI-a fitoplanctónica del lago de Alchichica.
4. En los años El Niño, temperaturas más elevadas favorecen el aumento en la concentración de CI-a-S, ya que el pequeño tamaño de estas especies les facilita mantenerse en suspensión y tienen un menor requerimiento nutricional, mientras que en los años La Niña, la temperatura menor favorecerá el aumento en la concentración de CI-a-L, debido a una mezcla más duradera.

7. ÁREA DE ESTUDIO

El lago Alchichica se localiza en el extremo SE del Altiplano Mexicano ($19^{\circ} 24' N$, $97^{\circ} 24' W$), en la cuenca endorreica Oriental ($4,982 \text{ km}^2$) que abarca parte de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz (Fig. 1). Se encuentra en una latitud tropical, a una altitud de $2,340 \text{ m s.n.m.}$ El clima de la región es semi-árido, con un régimen de precipitación anual de menos de 500 mm y una evaporación anual de $1,690 \text{ mm}$ (Filonov *et al.*, 2006; Adame *et al.*, 2008).

Alchichica es el mayor de seis lagos cráter tipo “maar” que se localizan en la Cuenca Oriental (Alcocer y Hammer, 1998). Su profundidad máxima es de 60 m (promedio de 40.9 m), el pH fluctúa de 8.7 a 9.2 ; es un lago salino (8.5 g L^{-1}) con una composición química donde dominan el sodio, los cloruros y los bicarbonatos (Vilaclara *et al.*, 1993; Filonov *et al.*, 2006).

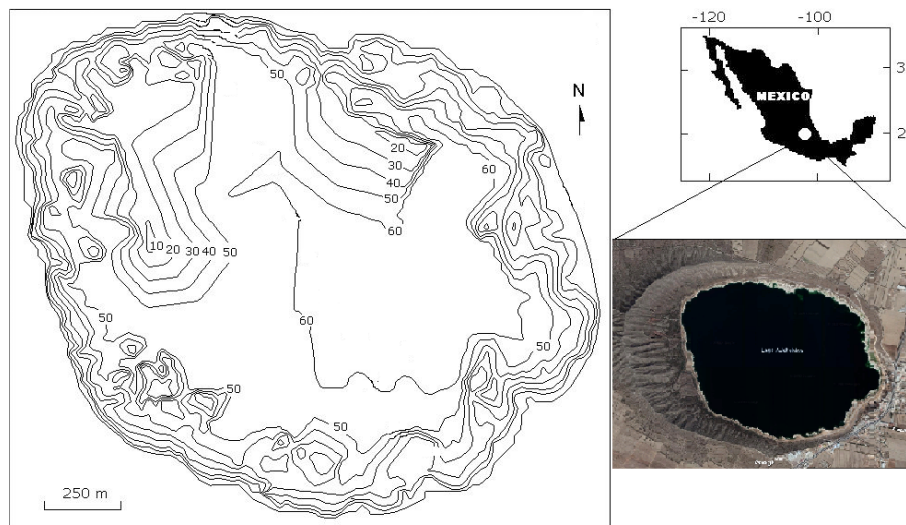


Fig. 1. Ubicación del lago Alchichica, Puebla, México (Modificado de Filonov *et al.*, 2008).

El lago presenta un régimen térmico anual monomítico cálido; la época de mezcla comprende desde finales de diciembre o inicios de enero hasta finales de marzo o

principios de abril, durante la estación fría y seca del año. La estratificación se subdivide en tres periodos: estratificación temprana (abril a junio aproximadamente); la estratificación bien establecida (julio a septiembre aproximadamente) y la estratificación tardía (octubre a diciembre aproximadamente) (Adame *et al.*, 2008).

Las concentraciones de Cl-a son generalmente bajas con un valor promedio en la capa de mezcla inferior a $5 \mu\text{g}$ de Cl-a L^{-1} (Oliva *et al.*, 2001) y de $<4 \mu\text{mol}$ L^{-1} de nutrientes (Ramírez-Olvera *et al.* 2009), por lo que de acuerdo con Margalef (1993) se considera un lago oligotrófico.

8. MATERIAL Y MÉTODOS

Se revisó, analizó e integró una base de datos de veintidós años (1998-2019), con muestreos aproximadamente mensuales de las siguientes variables:

- a. Temperatura del aire
- b. Precipitación
- c. Radiación fotosintéticamente activa (PAR)
- d. Temperatura del agua (T)
- e. Concentración de oxígeno disuelto (OD)
- f. Concentración de Clorofila-a Total (Cl-a-T)
- g. Concentración de Clorofila-a por tamaños (Cl-a-S y Cl-a-L)

8.1 Trabajo de campo y laboratorio

La estación de muestreo se ubica en la zona central y más profunda del lago. En cada muestreo se utilizaron sondas multiparamétrica marca Hydrolab DS3, DS4 o DS5, unidas a cajas controladoras modelos Surveyor SVR3 y SVR4, para los perfiles de T y OD, con una resolución vertical de un metro. Se registraron perfiles PAR a lo largo de toda la

columna de agua, mediante un perfilómetro de fluorescencia natural marca Biospherical modelo PNF-300.

Para el análisis de Cl-a se tomaron muestras de agua (500 ml) a diez profundidades diferentes en la columna de agua, seleccionadas para representar la heterogeneidad ambiental con base en los perfiles de PAR, temperatura y oxígeno disuelto, utilizando para ello una botella muestreadora de agua de 5 L de capacidad. Para su transporte al laboratorio las muestras se mantuvieron en oscuridad y a baja temperatura.

En el laboratorio las muestras de agua fueron filtradas utilizando para ello filtros de fibra de vidrio GF/F de 0.7 μm de poro nominal. Lo retenido en el filtro se consideró como la clorofila-a total, Cl-a-T. Otro volumen de agua similar se filtró a través de un filtro Isopore™ (película de policarbonato) tipo TTTP de 2 μm de poro y lo retenido se consideró la parte integrante del nanofitoplancton y microfitoplancton ($> 2 \mu\text{m}$, Cl-a-L “Large”), esto es, la fracción de talla grande; lo que pasó a través de este filtro y quedó retenido en un filtro GF/F de 0.7 μm se consideró como picofitoplancton o fracción pequeña ($< 2 \mu\text{m}$, Cl-a-S “Small”).

El análisis de la concentración de Cl-a se hizo en un fluorómetro digital Turner Designs TD-10AU de acuerdo con la técnica 445.0 de la EPA (Arar y Collins, 1997).

8.2 Trabajo de gabinete

Se emplearon los datos de T del aire ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación (mm) diaria entre 1998 y 2019 de la base de datos del “Proyecto de base de datos climatológicos” de la estación climatológica convencional Alchichica (clave 21052, $19^{\circ} 24' \text{ N}$, $97^{\circ} 23' \text{ W}$) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), para calcular las anomalías del promedio mensual y anual del periodo 1998 a 2019. La base de datos no cuenta con registros para los años 2002 y 2003, y algunos periodos constan de valores nulos, debido a que fueron eliminados durante el control de calidad.

Se obtuvo la base de datos del Índice MEI bimensual para El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). MEI corresponde a las siglas en inglés del Índice Multivariado para ENOS

(Multivariate ENSO Index, MEI.v2). Durante 1980 a 2019 (NOAA, 2020) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), de la cual se analizó el periodo de 1998 a 2019 para describir los eventos Niño (MEI positiva) y Niña (MEI negativa). De acuerdo con la NOAA (2020) se estandarizó el color rojo para hacer referencia a las condiciones cálidas de temperatura que se presentan en la fase positiva del ENOS (Niño). Por otro lado, se emplea el color azul por las temperaturas frías de la fase negativa del ENOS (Niña).

Las variables ambientales se arreglaron de forma tabular con relación a la profundidad y al tiempo. Se generaron gráficas de profundidad-tiempo para cada variable mediante el software Surfer 11. La Z_{MIX} se delimitó con base en las gráficas anteriores de temperatura y concentración de OD. Cuando el lago estuvo estratificado se delimitaron las zonas correspondientes al epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Se determinó la presencia de termoclina utilizando los perfiles de temperatura cuando se presentó un gradiente igual o mayor a $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura de fondo se calculó mediante el promedio mensual de los últimos 6 m (de 55 a 60 m). Se calculó la Z_{EU} como la zona limitada por la profundidad donde se alcanza el 0.1% de PAR superficial (SPAR).

Se realizó una integración de los valores de Cl-a a lo largo de la columna de agua, midiendo el área bajo la curva de distribución de Cl-a en profundidad para cada muestreo de acuerdo con el método propuesto por Lind (1979) mediante el Software Sigma Plot 12.0. De esta forma se obtuvo el valor de la concentración de Cl-a integrada (Cl-a-int) por metro cuadrado (mg m^{-2}). Este procedimiento se siguió para la clorofila-a integrada total (Cl-a-int-T), la clorofila-a fracción grande (Cl-a-int-L) y para la clorofila-a fracción pequeña (Cl-a-int-S).

Se aplicó el análisis T-student para identificar diferencias significativas de manera temporal a todas las variables, mediante el Software Sigma Plot 12.0. Se empleó la prueba no paramétrica Mann-Whitney para determinar las diferencias cuando la distribución no fue normal ($p > 0.05$). Las posibles asociaciones de los eventos ENOS con las concentraciones de Cl-a se determinaron mediante el coeficiente de correlación de Spearman. El análisis de tendencias de Mann-Kendall de la paquetería PAST v4.05

(Hammer *et al.*, 2001) se utilizó en los parámetros limnológicos para establecer la relevancia de las tendencias a largo plazo.

Se identificó la periodicidad de las diferentes ciclicidades presentes de los parámetros meteorológicos (T del aire y precipitación) y del lago (T, OD, Z_{EU}, Z_{MIX}) y la concentración de la clorofila-a total (Cl-a-T), fraccionada en talla grande (Cl-a-L) y talla pequeña (Cl-a-S) del lago Alchichica. Para ello se llevaron a cabo análisis de series de tiempo, aplicando un análisis de onduletas, con el fin de evidenciar las diferentes periodicidades presentes en el periodo de 1998 a 2019. La base de datos se transformó para contar con un espaciado temporal regular, empleando el método proximal, con espaciado de 1 m para la interpolación espacial y el método lineal, con espaciado de 30 días para la temporal.

Se analizaron las bases de datos de las diferentes variables empleando la transformada de onduletas ("wavelet analysis"). Este procedimiento realiza un análisis de tiempo-frecuencia de la señal, lo que permite la estimación de las características espectrales de la señal en función del tiempo (Mallat, 1998) y luego la identificación de diferentes componentes periódicos y su evolución temporal junto con las series de tiempo. Es una función matemática que permite trabajar con picos o discontinuidades por separado, presentes en una señal de sistemas no estacionarios, segmentando la señal en múltiples niveles de resolución más bajos, representadas en un espectro de una sola función base (onduleta madre). Son herramientas útiles para determinar las escalas de variación dominantes en series de tiempo y se utilizan para examinar las periodicidades en las comunidades de plancton (Cloern y Jassby, 2008).

Como la función base se seleccionó la onduleta continua de Morlet ya que, al ser una función simétrica compleja amortiguada con un componente real e imaginario de los coeficientes de onduleta, proporciona la capacidad para detectar la amplitud y las fluctuaciones cíclicas locales (en el tiempo) de las diferentes frecuencias exhibidas en la serie temporal, representándolo gráficamente con el poder del espectro (la fuerza de correlación al cuadrado con la función base escalonada, en una banda de colores) (Winder y Cloern, 2010; Zhang *et al.*, 2014). La transformación de los datos, así como el análisis de onduletas fueron realizadas con la paquetería PAST v4.05 (Hammer *et al.*, 2001).

9. RESULTADOS

9.1 Parámetros meteorológicos

9.1.1 Dinámica estacional (intra-anual)

La temperatura del aire y la precipitación, obtenida a través del cálculo de un año tipo demuestran la presencia de dos temporadas: 1) fría y seca, 2) cálida y de lluvias (Fig. 2).

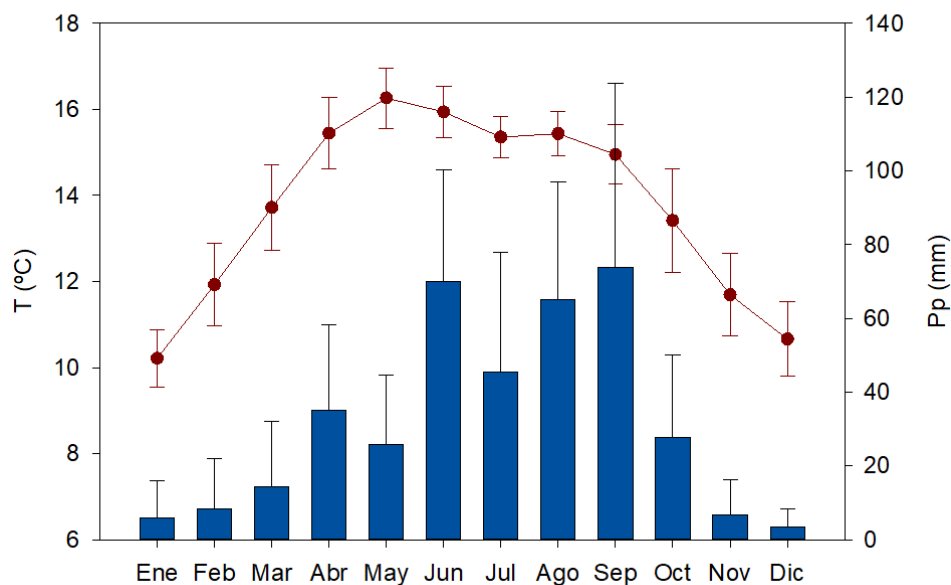


Fig. 2. Temperatura del aire (°C) representada por los puntos rojos y la precipitación (mm) en columnas azules, de un año tipo. Datos de la estación climatológica convencional (SMN-21052) Alchichica, Puebla, del Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA.

9.1.2 Dinámica interanual

La ciclicidad de la temperatura del aire se presenta en la Fig. 3. Las temperaturas extremas mensuales durante 22 años variaron entre 8.1 °C (diciembre 2010) y 17.8 °C (mayo 1998). Los promedios anuales se presentan en la Fig. 4. El valor menor promedio anual se registró en el 2012 (13.3 ± 2.0 °C) y el valor mayor en 1998 (14.4 ± 2.6 °C). No se encontró una tendencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

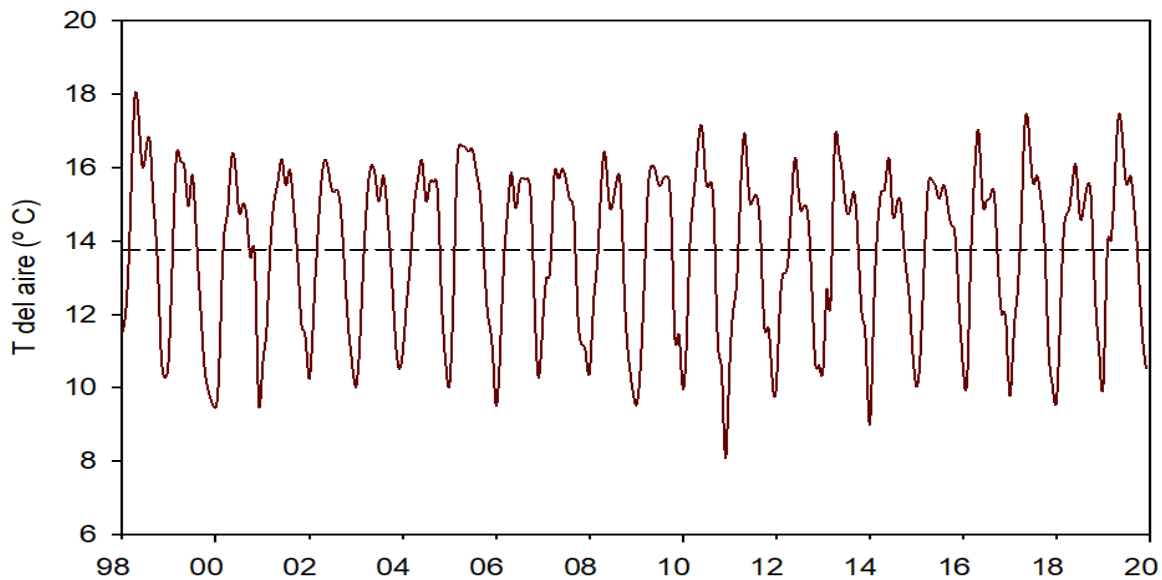


Fig. 3. Temperatura mensual del aire durante el periodo 1998-2019. La línea punteada en negro representa el valor promedio (13.7 °C). Datos obtenidos de la estación climatológica convencional (SMN-21052) Alchichica, Puebla, del Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA.

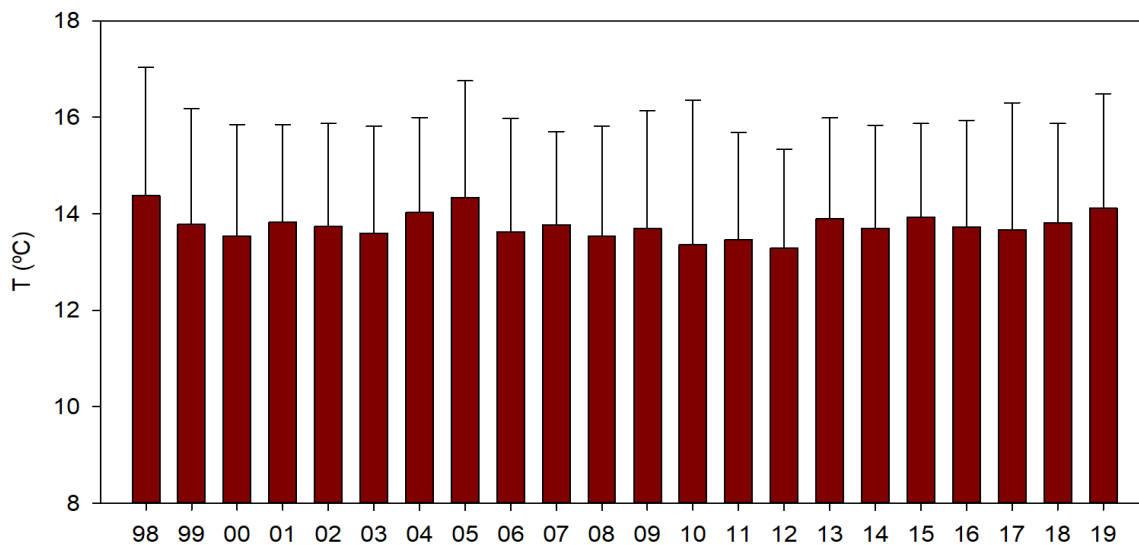


Fig. 4. Promedios anuales de temperatura del aire (°C) de la estación climatológica (SMN-21052) Alchichica, Puebla (SMN, 2020).

Los valores de precipitación mensual (Fig. 5) oscilaron entre 0 mm (todos los años en temporada de secas) y 191.3 mm (septiembre 2013). Las precipitaciones totales anuales se presentan en la Fig. 6. La menor precipitación total anual se registró en 1998 y 2019 (259.2 ± 27.6 mm) y el valor mayor en 2007 (528.1 ± 35.4 mm). No se observó una tendencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

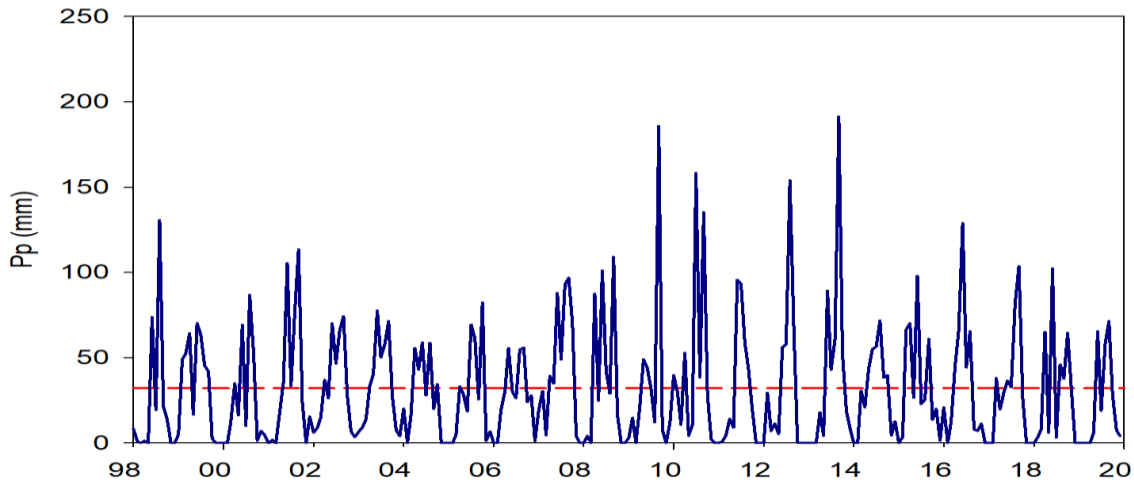


Fig. 5. Precipitación mensual durante el periodo 1998-2019. La línea punteada roja representa el valor promedio (382.2 mm). Datos obtenidos de la estación climatológica convencional (SMN-21052) Alchichica, Puebla, del Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA.

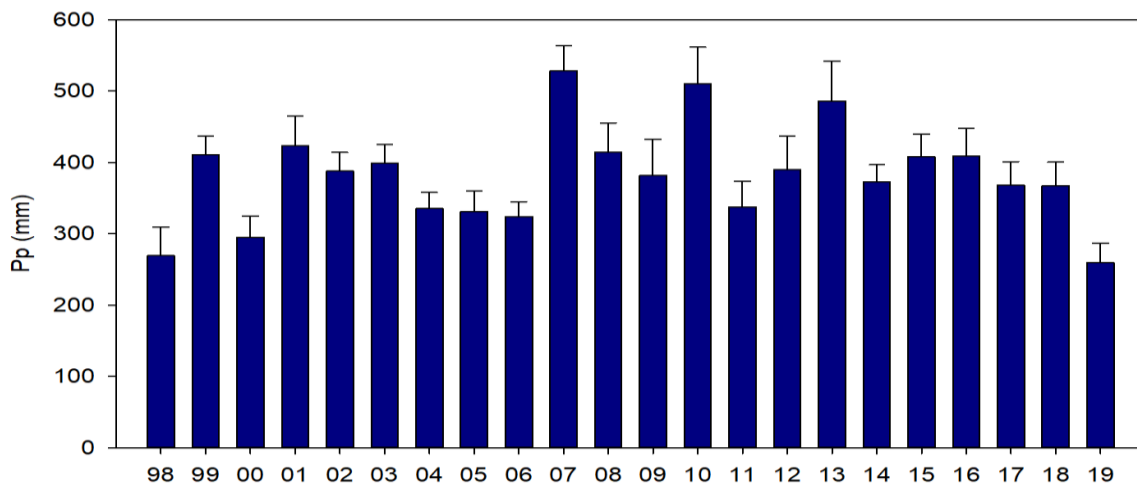


Fig. 6. Precipitación total anual (mm) de la estación climatológica (SMN-21052) Alchichica, Puebla (SMN, 2020).

9.1.3 Anomalías climáticas

Los datos meteorológicos del periodo de 1998 a 2019 muestran variaciones en las anomalías mensuales de temperatura, con una máxima positiva de +2.7 °C en marzo de 1999 y una máxima negativa -2.7 °C en octubre de 1999 (Fig. 7).

En el caso de las anomalías mensuales de precipitación (Fig. 8), en septiembre se presentaron las variaciones extremas. La máxima negativa fue en 2016 (-66 mm) y la máxima positiva fue en 2013 (+117.4 mm).

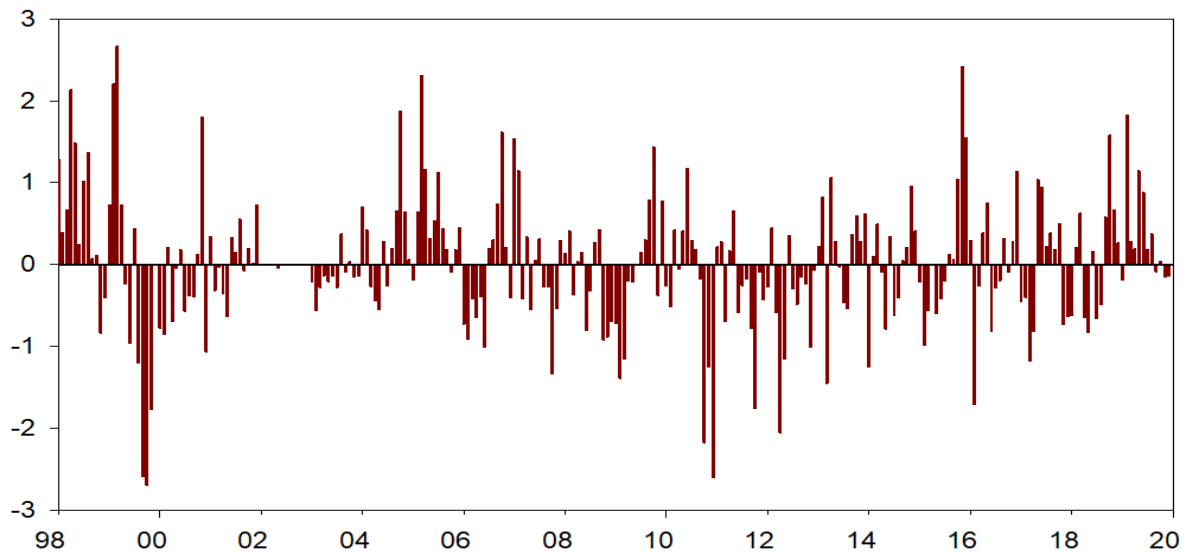


Fig. 7. Anomalías mensuales de temperatura del aire del periodo 1998-2019.

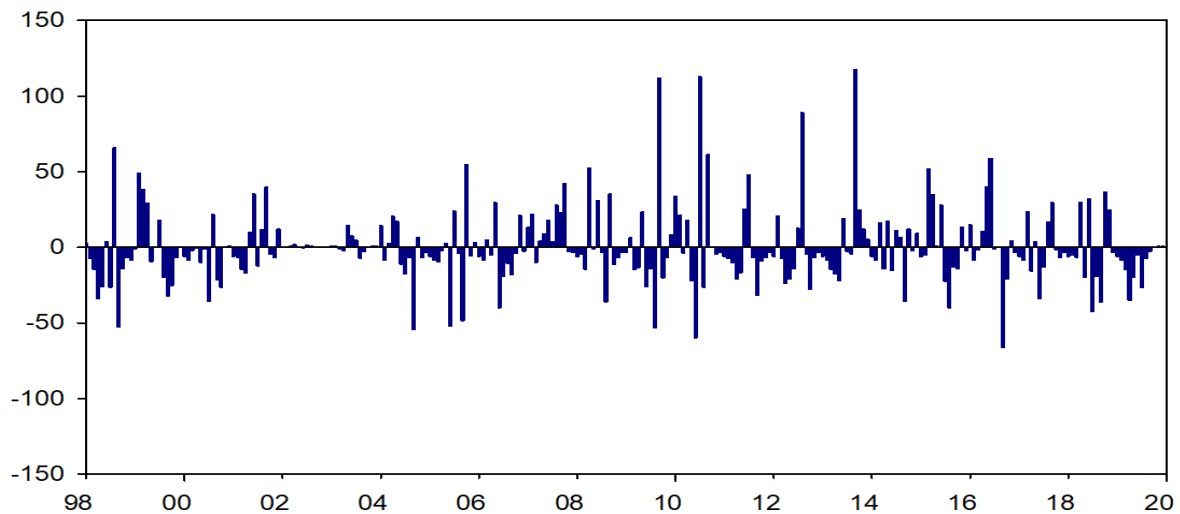


Fig. 8. Anomalías mensuales de precipitación del periodo 1998-2019.

9.1.4 Índice Multivariado para ENOS bimensual

Durante estos 22 años el evento ENOS positivo (Niño) se observó en varios años (1998, 2009-2010 y 2015-2016), siendo el más intenso 1998 marcado con un MEI mayor a 2 que duró aproximadamente 5 meses (enero a mayo) y en 2015 de 3 meses (septiembre y octubre). También se presentaron eventos ENOS negativo (Niña -mediados de 1998-2000, 2007-2008 y 2010-2011-), con el más intenso (MEI ≤ -2) para los años 2010-2011 y abarcando un periodo mayor a un año (desde julio de 2010 hasta diciembre del 2011) (Fig. 9).

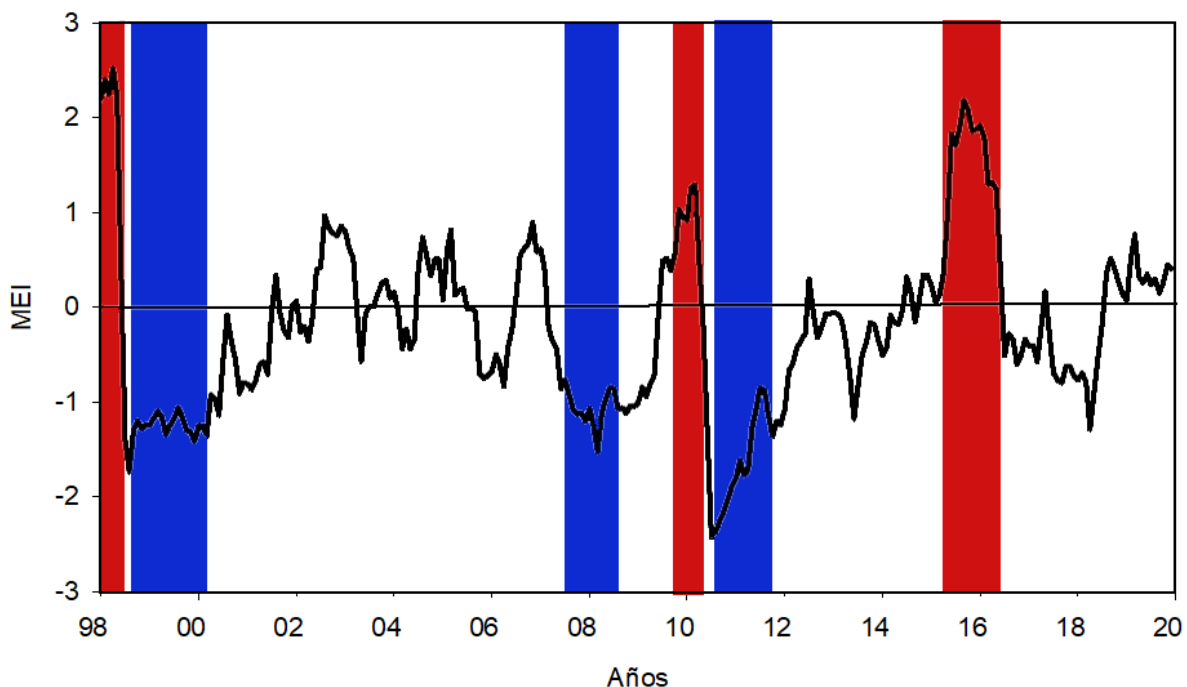


Fig. 9. Índice MEI bimensual del periodo de 1998 a 2019 (NOAA, 2020). MEI corresponde a las siglas en inglés del Índice Multivariado para ENOS (Multivariate ENSO Index). Las barras en color rojo coinciden con los años del evento ENOS positivo (Niño) y las barras en color azul coinciden con los años del evento ENOS negativo (Niña) registrados por el MEI para este estudio.

En cuanto a las anomalías mensuales de temperatura del aire el año 1999 presentó los valores extremos, coincidiendo con las menores temperaturas en marzo para el año Niña

de 1999. Por otro lado, con las temperaturas más altas solo noviembre del año 2015 coincide con el periodo Niño del mismo año.

Las anomalías mensuales de precipitación coinciden con registros de menores precipitaciones en dos años (septiembre 2016 y junio 2010) asociados con eventos Niño. Para los años Niña, caracterizados por presentar las mayores precipitaciones, coincide con julio del 2010; sin embargo, en septiembre del 2009, que se correspondería con un año Niño, se registró una mayor precipitación (Tabla 1).

Tabla 1. Identificación de años Niño y años Niña de acuerdo con el MEI y anomalías relacionadas con la temperatura del aire (T_{ai}) y precipitación (P_p). Las celdas en color rojo coinciden con los años del evento ENOS positivo (Niño) y las celdas en color azul coinciden con los años del evento ENOS negativo (Niña) registrados por el MEI para este estudio.

	NIÑO			NIÑA		
MEI	>2	2 - 1.5	1.5 - 1	≤ -2	-2 y -1.5	> -1.5 y ≤ -1
Año	1998	2015-2016	2009-2010	2010-2011	1998-1999-2000	2007-2008
Duración	ene-may	pico sep/2015	nov-mar	jul-dic	pico 08/1998	sep-dic
Anomalía T_{ai} (°C)	>2	>2	>2	> -2	> -2	> -2
Año	1999	2015	2005	1999	2010	2012
Duración	mar	nov	mar	oct	dic	abr
Anomalía P_p (mm)	> -55	> -55	> -55	> 100	> 100	> 100
Año	2016	2010	2004	2013	2010	2009
Duración	sep	jun	sep	sep	jul	sep

9.2 Parámetros limnológicos

9.2.1 Zona eufótica (Z_{EU})

a) Dinámica estacional (intra-anual)

Se elaboró un “año tipo” de Z_{EU} con el promedio de los registros mensuales del periodo de 1998 a 2019 (Fig. 10). Se observa una profundización de la Z_{EU} conforme transcurre el año. En los primeros meses (enero a marzo) se presenta una Z_{EU} reducida, con respecto al resto del año, registrándose en el mes de febrero la menor profundidad con 23.9 ± 3.5 m. En el resto del año, se presenta un incremento progresivo en los valores de Z_{EU} ; en octubre y noviembre se observa la Z_{EU} más profunda (36.3 ± 3.5 m y 36.1 ± 2.5 m, respectivamente). En diciembre la profundidad de la Z_{EU} comienza a disminuir (33.3 ± 4.3 m) mostrando una profundización de la capa de mezcla a medida que avanza la estratificación de temprana a tardía.

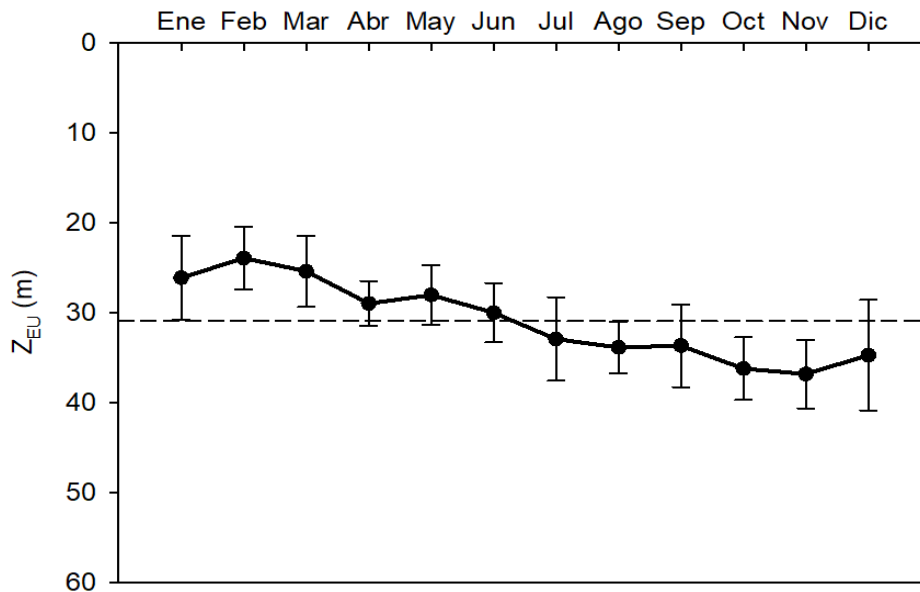


Fig. 10. Año tipo del promedio de los registros mensuales de la zona eufótica (Z_{EU} m) en toda la columna de agua del Lago Alchichica. La línea punteada indica el promedio general (30.7 m) de la Z_{EU} durante 1998 a 2019.

b) Dinámica interanual

Los promedios anuales se presentan en la Fig. 11. La Z_{EU} presentó un comportamiento cíclico, en el cual se reconoce una fase de aguas turbias (25.1 ± 4.3 m) durante el período de mezcla y una fase de aguas claras (32.8 ± 4.9 m) durante el período de estratificación.

Aunque se reconoce una tendencia gráfica a la reducción de la Z_{EU} , ésta no es estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

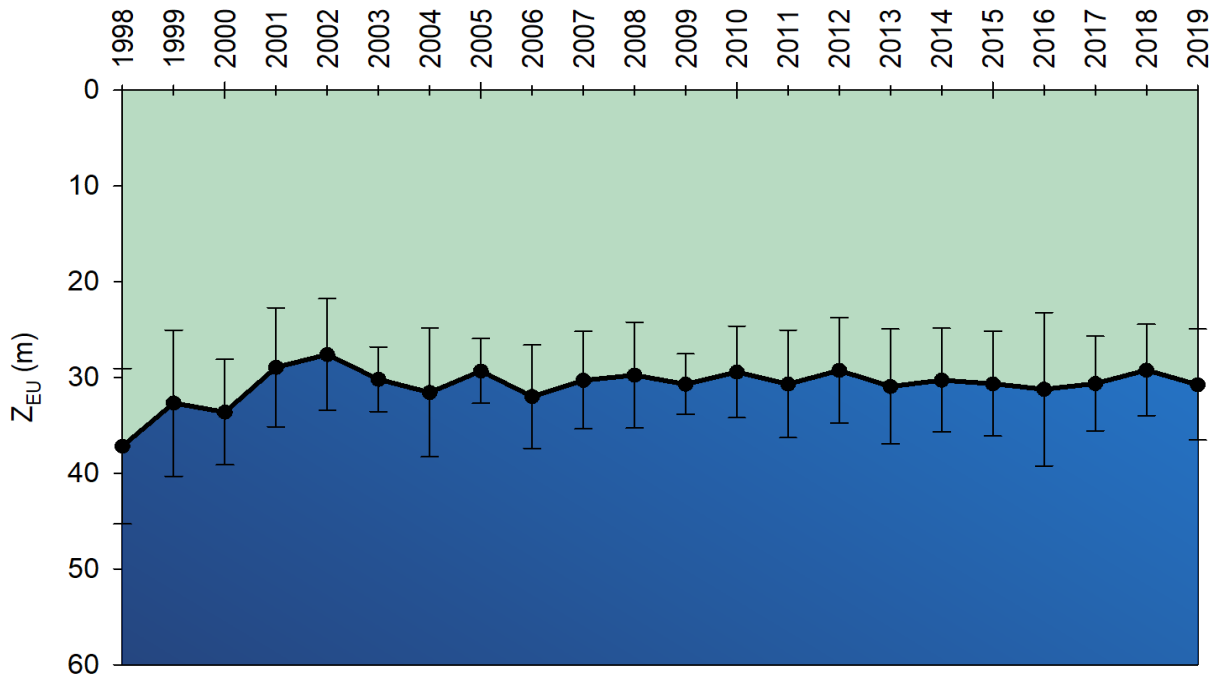


Fig. 11. Promedios anuales de la zona eufótica (Z_{EU} m) en toda la columna de agua del lago Alchichica, durante 1998 a 2019.

c) Anomalías

A lo largo de 22 años la Z_{EU} (m) presentó variaciones mensuales que corresponden con los periodos de mezcla y estratificación del lago (Fig. 12). La anomalía máxima mensual fue de +13.4 m en diciembre de 1998 y la máxima negativa en diciembre de 2008 (-10 m). Se observa que los valores mínimos son relativamente constantes, en tanto que los máximos han ido disminuyendo.

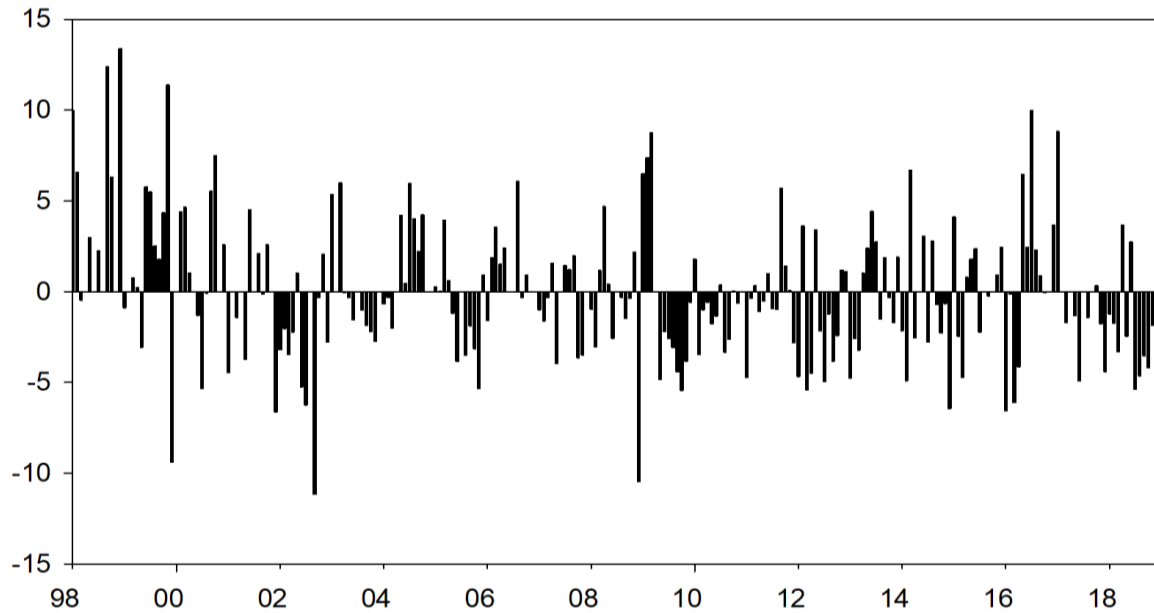


Fig. 12. Anomalías mensuales de la zona eufótica (Z_{EU} m) del lago Alchichica.

9.2.2 Capa de mezcla (Z_{MIX})

a) Dinámica estacional (intra-anual)

La hidrodinámica del lago se refleja en las variaciones de la zona de mezcla. El periodo de mezcla en el año tipo de la Z_{MIX} en el lago Alchichica se presenta durante enero y febrero, con una columna de agua completamente mezclada. En marzo se comienza a reducir la profundidad de la Z_{MIX} ya que inicia la estratificación (Fig. 13).

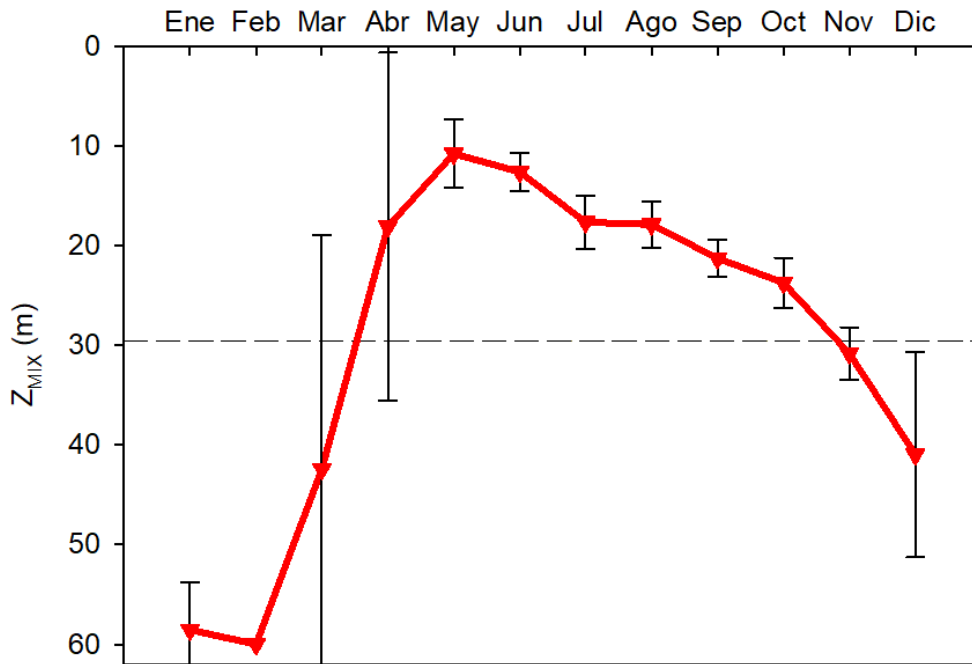


Fig. 13. Año tipo del promedio de los registros mensuales de la capa de mezcla (Z_{MIX} m) en toda la columna de agua del Lago Alchichica. La línea punteada indica el promedio general de la Z_{MIX} durante 1998 a 2019.

b) Dinámica interanual

Los promedios anuales se presentan en la Fig. 14. Durante la mezcla, Z_{MIX} abarcó toda la columna de agua. Al comenzar la estratificación, Z_{MIX} se reduce y va aumentando progresivamente. Esto ocurrió repetidamente hasta abarcar nuevamente toda la columna de agua, en correspondencia con el nuevo período de mezcla. Al comparar estadísticamente los años por período (mezcla y estratificación), no se encontraron diferencias significativas, así como no se encontró tendencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$) en la Z_{MIX} .

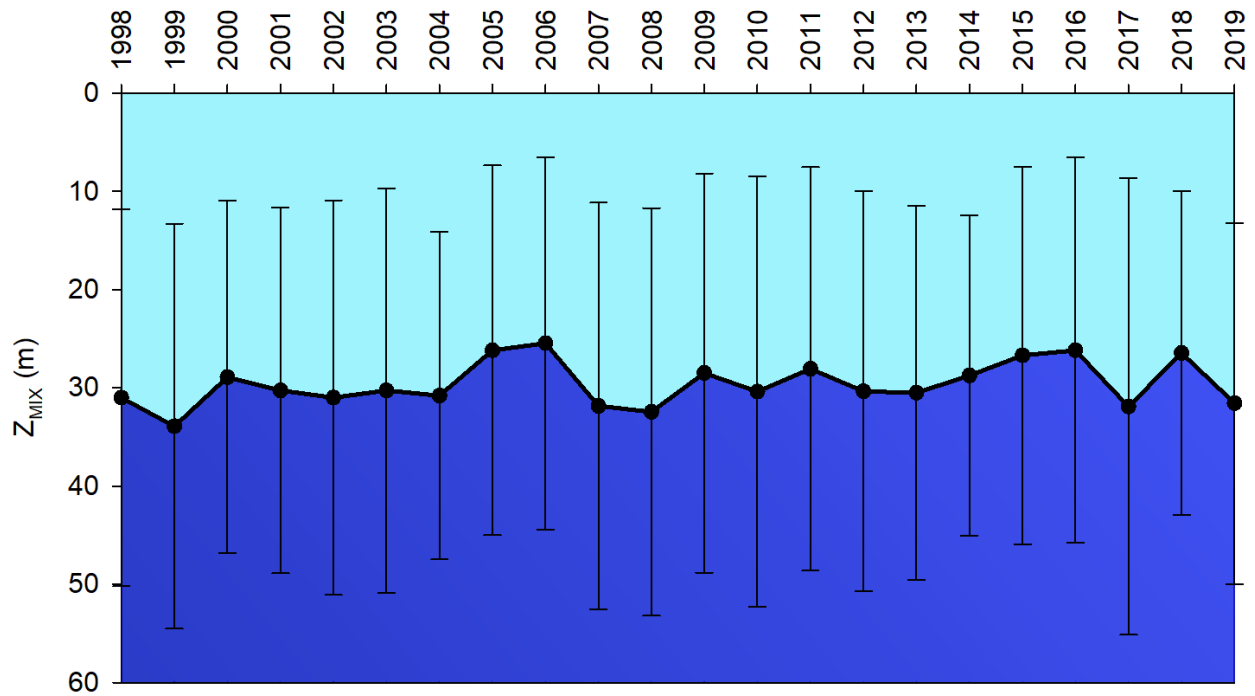


Fig. 14. Promedios anuales de la capa de mezcla (Z_{MIX} m) en toda la columna de agua del lago Alchichica.

c) Anomalías

Las anomalías de la Z_{MIX} fueron variables a lo largo del periodo de estudio. En el mes de abril de los años 2003, 2007 y 2019 se registró la máxima anomalía de la Z_{MIX} con +41.9 m, mientras que en marzo de los años 2015 y 2016 se observó el valor máximo de la anomalía negativa con -35.4 m (Fig. 15).

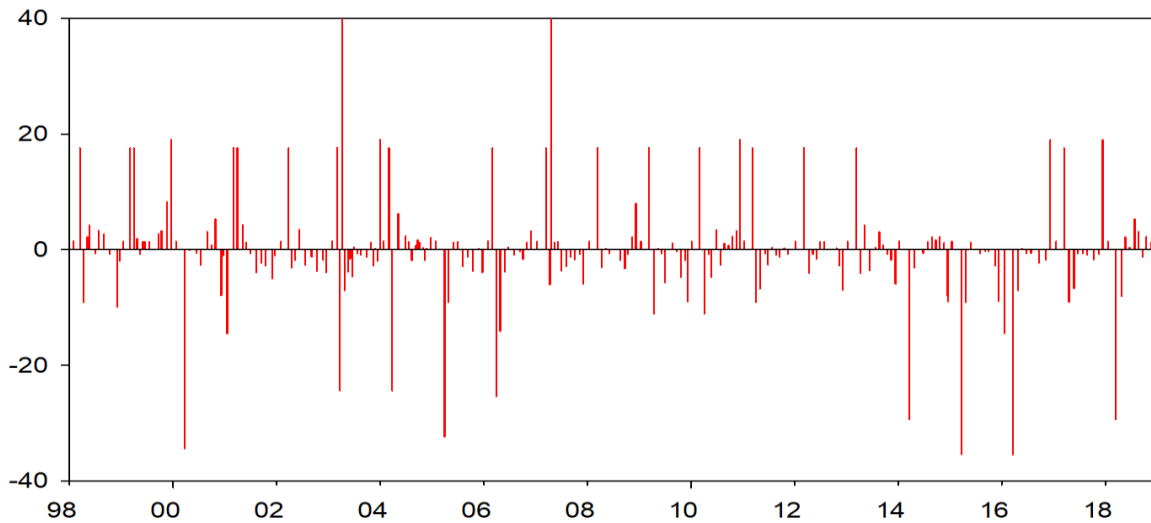


Fig. 15. Anomalías mensuales de la capa de mezcla (Z_{MIX} m) del lago Alchichica.

9.2.3 Proporción $Z_{MIX} : Z_{EU}$

De acuerdo a la proporción $Z_{MIX} : Z_{EU}$ los valores varían entre 0.4 ± 0.1 (mayo y junio) y 2.5 ± 0.4 (febrero). Se puede apreciar como en el periodo de mezcla del lago la Z_{MIX} es profunda, en cambio la Z_{EU} es reducida. El resto del año se presenta la situación contraria (Fig. 16).

Con respecto a la variación interanual (Fig. 17) se observa una regularidad en la proporción $Z_{MIX} : Z_{EU}$ característica del patrón de mezcla del lago. También se aprecia que el 2009 presentó las menores diferencias. La tendencia en la proporción $Z_{MIX} : Z_{EU}$ no es estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

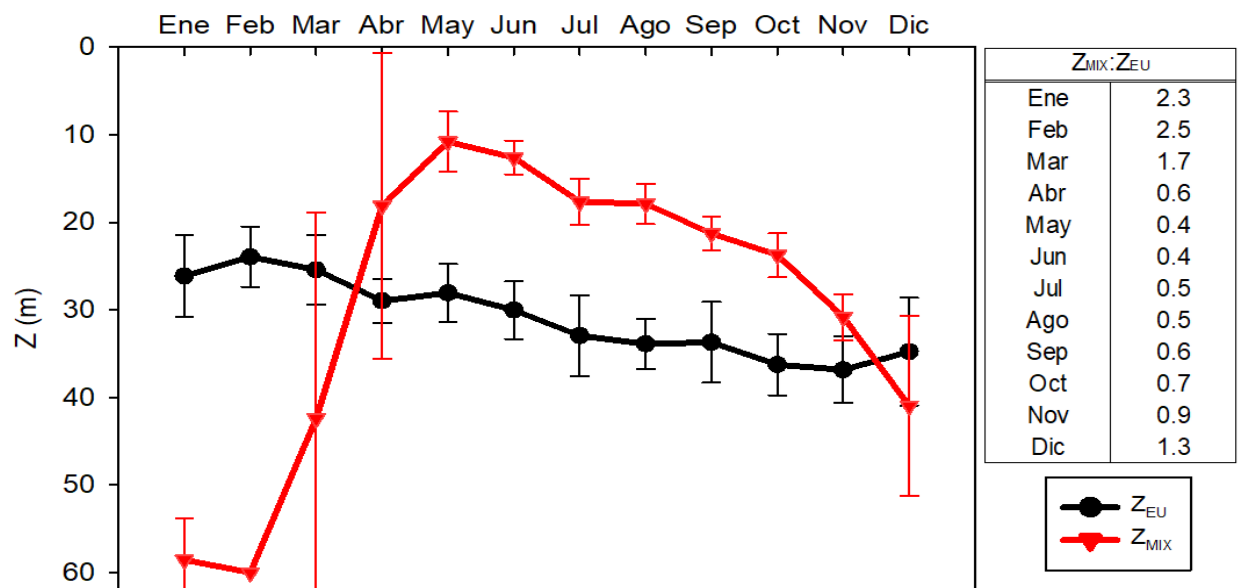


Fig. 16. Año tipo de la capa de mezcla (Z_{MIX} m) y la zona eufótica (Z_{EU} m) del lago Alchichica durante 1998 a 2019. Al costado derecho se presentan los valores de la proporción de $Z_{MIX} : Z_{EU}$.

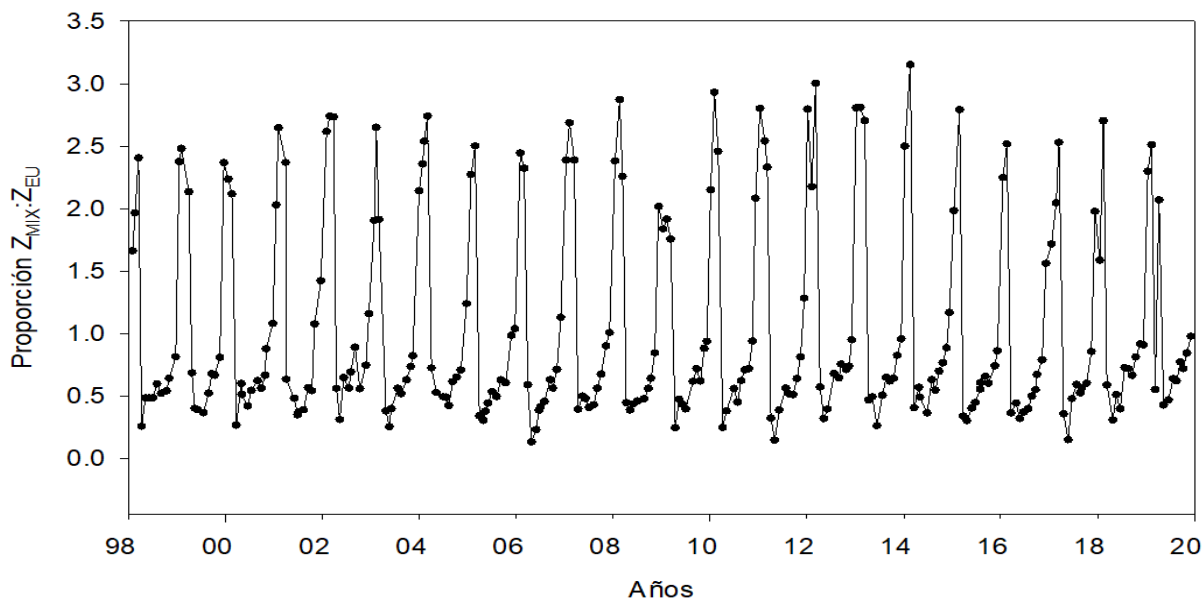


Fig. 17. Proporción de la capa de mezcla y zona eufótica ($Z_{MIX} : Z_{EU}$) del lago Alchichica durante 1998 a 2019.

9.2.4 Temperatura

a) Dinámica estacional (intra-anual)

A lo largo del periodo de estudio, se confirma la regularidad de la monomixis cálida (definida como el régimen térmico en el que la mezcla ocurre una vez al año, en coincidencia con el invierno hemisférico; Lewis, 1996) que se ha reportado con anterioridad para el lago Alchichica (Fig. 18).

La temperatura promedio de la columna de agua fue de 15.7 ± 1.6 °C en los 22 años (Fig. 19). El régimen térmico anual indica dos periodos, uno corto de mezcla y otro prolongado de estratificación. Los tres primeros meses del año el lago presenta temperaturas homogéneas, con un promedio de 14.9 ± 0.6 °C, indicando el periodo de mezcla. A finales de marzo y principios de abril aumenta la temperatura en la capa superficial, generando el inicio de la estratificación. De junio a octubre se establece una termoclina bien definida y a finales del año la termoclina empieza a hacerse más profunda (30 m) y la temperatura comienza a disminuir.

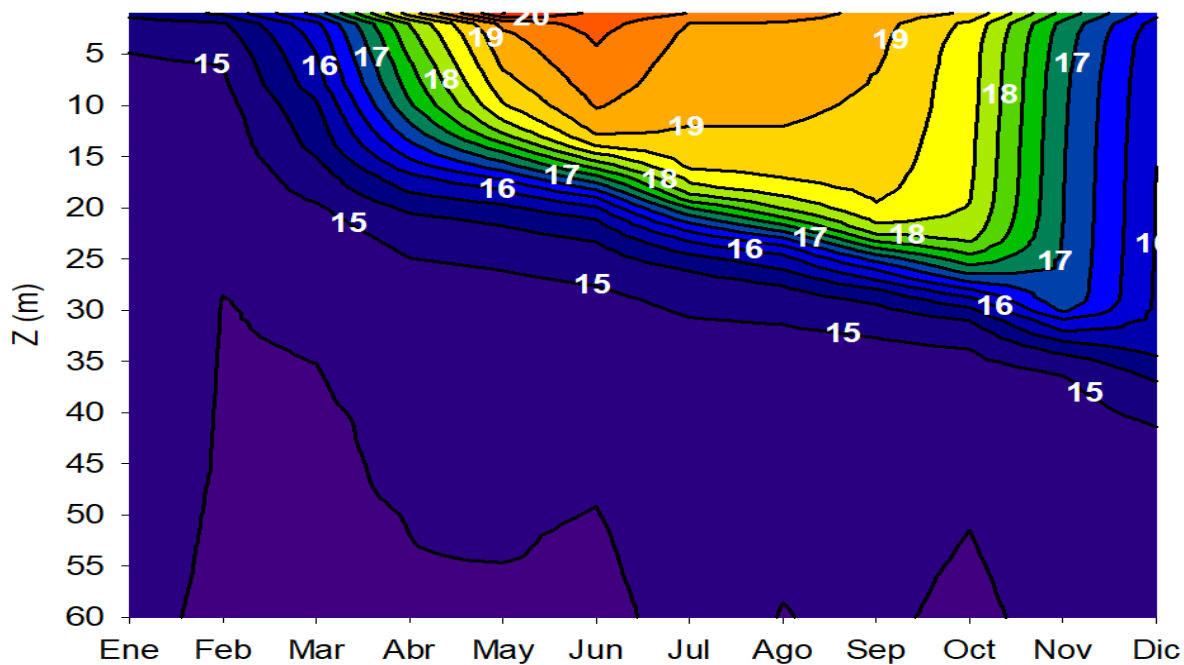


Fig. 18. Diagrama de isotermas (°C) profundidad-tiempo del año tipo en el lago Alchichica durante el periodo de estudio (1998-2019).

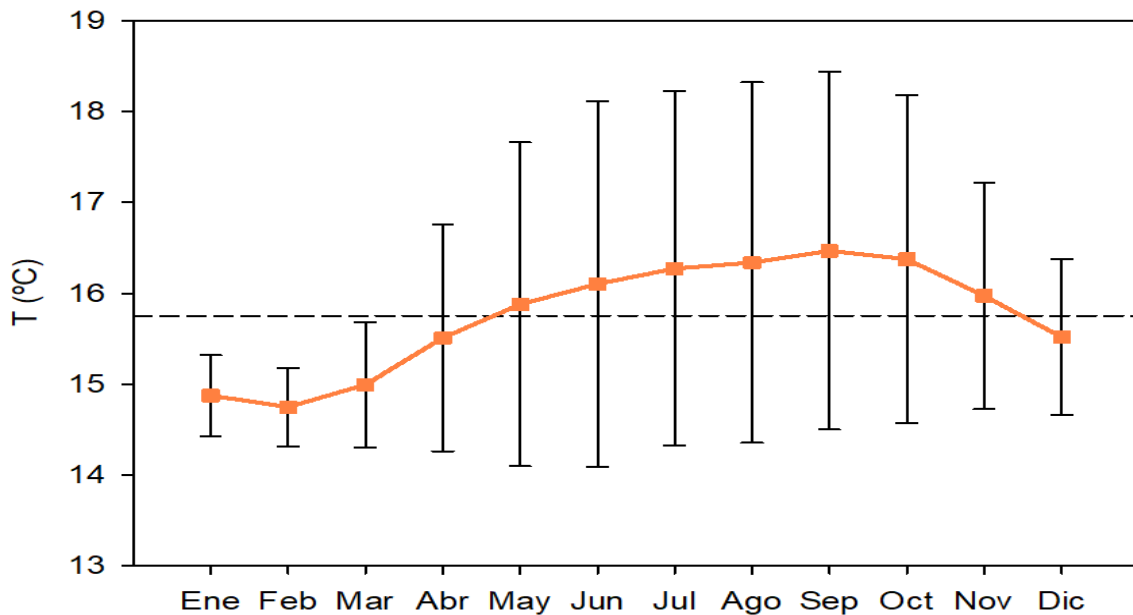


Fig. 19. Año tipo de la temperatura promedio mensual (T °C) de la columna de agua del Lago Alchichica. La línea punteada indica el promedio general (15.7 °C) del periodo 1998 a 2019.

b) Dinámica interanual

A lo largo del periodo de estudio la temperatura varió entre 14.1 °C en el hipolimnion del año 2000 y 24.5 °C en el epilimnion del año 2012. En cuanto a los promedios anuales estos variaron entre 15.2 ± 1.5 °C en el 2000 y 16.5 ± 1.6 °C en el 2019.

Se observó un patrón regular consistente en que, durante la mezcla, se registraron los menores valores de temperatura (14.9 ± 0.6 °C), mientras que en estratificación y en los primeros 5 m, se obtuvieron los valores más altos (18.5 ± 1.4 °C).

Existe una tendencia de aumento de la temperatura estadísticamente significativa (análisis de Mann-Kendall $p < 0.05$) a lo largo de todo el periodo (Fig. 20). Este aumento se refleja claramente en la temperatura de fondo y es de 1.1 °C (Fig. 21).

La temperatura promedio anual de fondo (55 a 60 m) varió de 14.2 °C en el 2000 hasta 15.3 °C en 2017, a pesar de que existe una tendencia de aumento estadísticamente

significativa ($p < 0.05$) durante el periodo, se puede observar (Fig. 21) un descenso de la temperatura (hasta $14.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) en 2011. En 1998 y 1999 los registros de la temperatura promedio mensual de fondo se observaron en el mes de enero ($14.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente). Del 2000 al 2008 coinciden en que diciembre era el mes con los registros cálidos de fondo (de $14.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $14.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente), sin embargo, para el 2009 hasta el 2011, estos registros se presentaron (de $14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 2011 a $14.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 2009) en enero, en 2012 ($14.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ julio) y 2013 ($15.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ noviembre) las temperaturas cálidas se registran en diferentes meses, en 2014 hasta 2018 vuelven a subir ($15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 2016 y $15.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 2017) y se presentan los registros de nuevo en el mes de enero. En 2019 la temperatura en enero es baja ($14.8\text{ }^{\circ}\text{C}$) y empieza a subir hasta mayo ($15.3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Cabe resaltar que las temperaturas de fondo (anual y mensual) siguen estando por debajo de la temperatura promedio de la columna de agua ($15.7 \pm 1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) para el periodo de 1998 a 2019.

La temperatura de fondo (últimos 6 m) de los años Niña fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$) entre sí. Sin embargo, los años 2011 y 2000, años con un MEI intenso (entre -1.5 y -2) para la fase negativa del ENOS (Niña) no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$).

De la misma manera, la temperatura de fondo (últimos 6 m) de los años Niño fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$) entre sí. Sin embargo, entre los años 1998 y 2016, así como entre los años 2016 y 2015, todos con un MEI intenso (mayor a 1.5) para la fase positiva del ENOS (Niño) no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$).

De tal manera, en cuanto a las temperaturas promedio mensuales de fondo (55 a 60 m) de los años Niño (1998 y 2015) con el MEI (> 2) más intenso se observan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) con todos los años Niña (2011-2010, 2008-2007 y 1998-1999-2000).

Las temperaturas promedio mensuales de fondo del año 2016 no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) con ningún año. De manera contraria con el año 2010, año donde se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) con todos los años (Niño y Niña), excepto con el año 2016. El año 2009 (considerado

año Niño) no presenta diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) con los años 2016 (Niño) y 2000 (Niña).

El gradiente promedio de la termoclina en el lago Alchichica fue de al menos $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por metro. Durante todo el periodo, la amplitud de la termoclina varió entre 1 m y 13 m, con un promedio de 4.6 ± 2.5 m (Fig. 22). No se registraron diferencias significativas en la temperatura de la termoclina entre los años Niño (4.7 ± 2.3 m) y años Niña (4.0 ± 2.2 m). De manera general las temperaturas promedio entre años Niño y años Niña fueron diferentes significativamente ($p < 0.05$). La temperatura invernal del agua en el lago Alchichica nunca fue inferior a $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se relaciona con la temperatura invernal del aire.

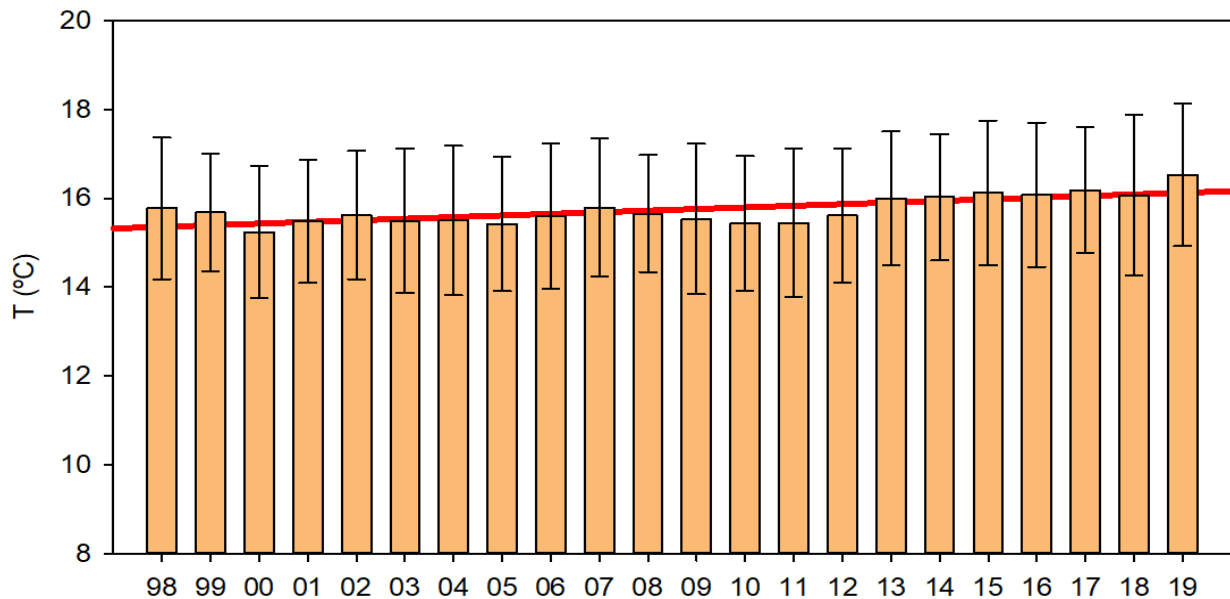


Fig. 20. Promedios anuales de la temperatura de la columna de agua del lago Alchichica. La línea roja muestra la tendencia de aumento estadísticamente significativa ($p < 0.05$) de los datos durante 1998 a 2019.

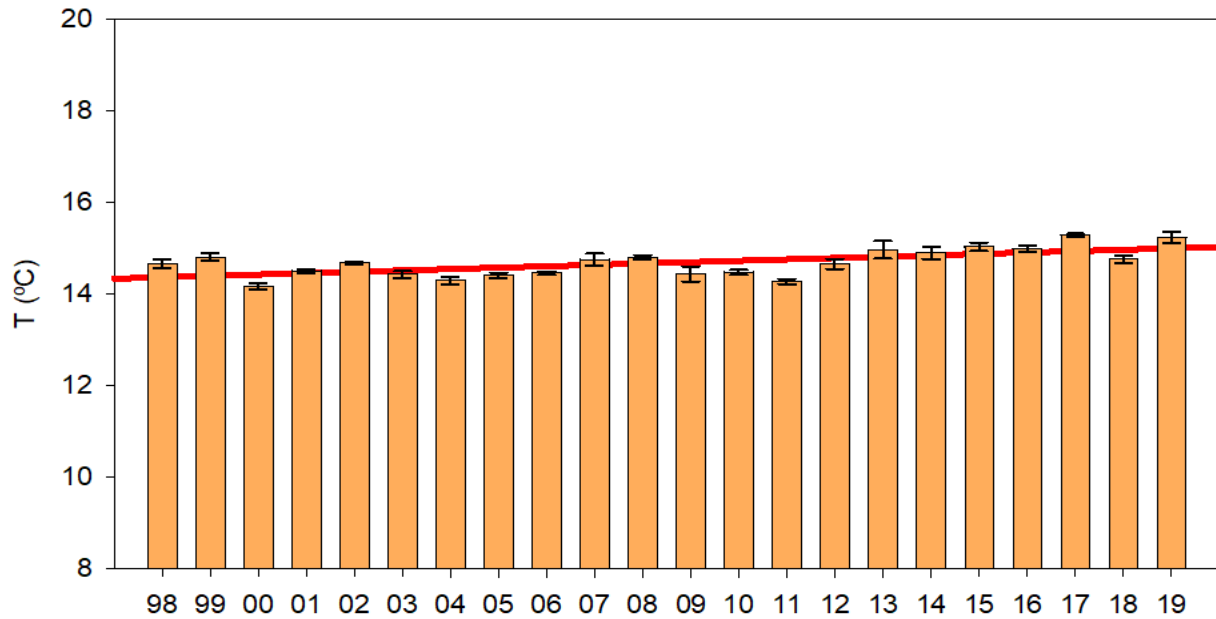


Fig. 21. Promedios anuales de la temperatura de fondo del lago Alchichica. La línea roja muestra la tendencia de aumento estadísticamente significativa ($p < 0.05$) de los datos durante 1998 a 2019.

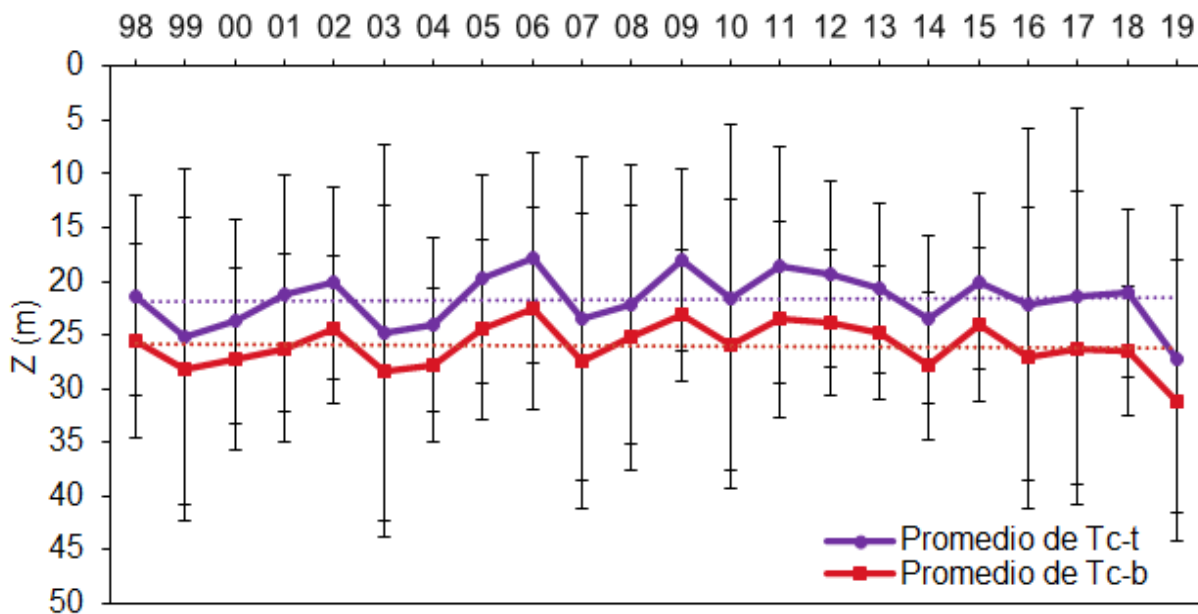


Fig. 22. Evolución de la termoclina (promedios anuales de 1998-2019) en el lago Alchichica. Tc-t: Tope de la termoclina y Tc-b: Base de la termoclina. Las líneas punteadas son el promedio general de las Tc-i y Tc-t, respectivamente.

c) Anomalías

Las anomalías mensuales de la temperatura de la columna de agua fueron variables a lo largo del periodo de estudio. Se registró la máxima anomalía de +1.2 °C en noviembre y diciembre del año 2019, mientras que el valor máximo de la anomalía negativa fue de -0.7 °C en diciembre de 1999, 2003, 2010 y enero de los años 2000 y 2004 (Fig. 23).

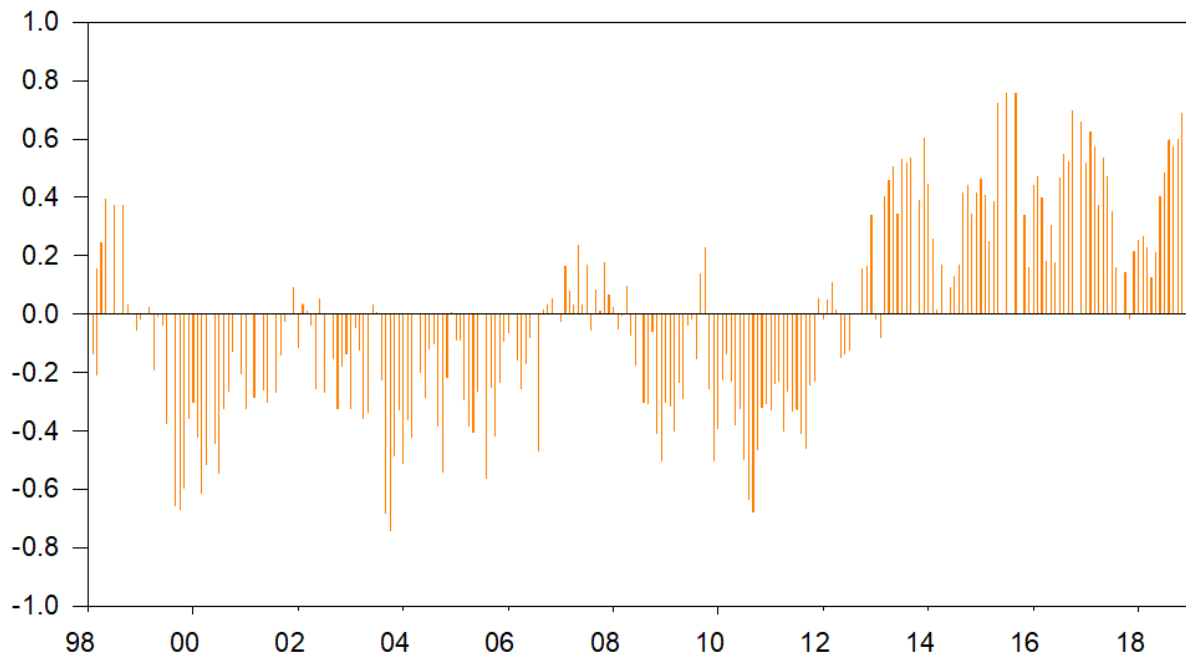


Fig. 23. Anomalías mensuales de la temperatura (°C) de la columna de agua del lago Alchichica.

9.2.5 Oxígeno Disuelto (OD)

a) Dinámica estacional (intra-anual)

La concentración promedio de OD en la columna de agua de un año tipo fluctuó desde $2.5 \pm 3.0 \text{ mg L}^{-1}$ (junio, julio y agosto) hasta $5.4 \pm 1.3 \text{ mg L}^{-1}$ (febrero) (Fig. 24).

El año tipo de OD presenta concentraciones elevadas y relativamente homogéneas durante la mezcla. Posteriormente, es posible observar una disminución de las concentraciones de OD correspondiéndose con el periodo de estratificación.

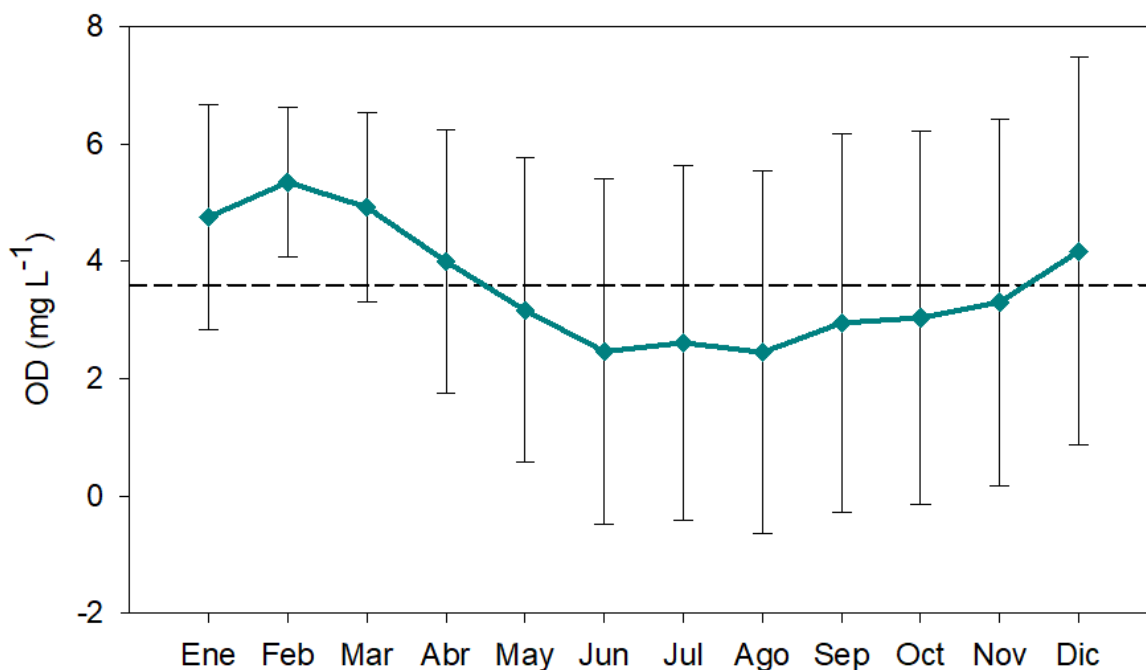


Fig. 24. Año tipo de la concentración promedio mensual de oxígeno disuelto (OD mg L⁻¹) en toda la columna de agua del lago Alchichica. La línea punteada indica en promedio del periodo 1998 a 2019.

b) Dinámica interanual

Durante el periodo de 1998 al 2019 la concentración de oxígeno disuelto (OD) en la columna de agua de Alchichica fluctuó desde condiciones anóxicas hasta 13.9 mg L⁻¹. Se registró una concentración promedio de OD (Fig. 25) entre 3.1 ± 2.8 mg L⁻¹ (2001) y 5.5 ± 2.9 mg L⁻¹ (1998). Durante el periodo de mezcla el promedio mínimo registrado fue de 3.8 ± 2.3 mg L⁻¹ (2019) y el promedio máximo fue de 6.4 ± 2.8 mg L⁻¹ (1999). En el periodo de estratificación el promedio mínimo fue de 2.5 ± 3.0 mg L⁻¹ (2001) y el promedio máximo fue de 5.7 ± 3.3 mg L⁻¹ (1998).

La oxiclina se formó desde mayo y se mantiene hasta el final del período de estratificación. Se calculó entre los 19 y los 39 m de profundidad. La concentración promedio de OD en el epilimnion (0 a 18 m) en toda la estratificación fue de 6.6 ± 1.1 mg L⁻¹ (máx. 7.6 mg L⁻¹ en 1998; mín. 5.6 mg L⁻¹ en 2009). En el hipolimnion (40 a 60 m) el promedio de OD fue de 0.6 ± 1.3 mg L⁻¹ (concentración máxima de 3.8 mg L⁻¹ en 1998 para todo el hipolimnion y anoxia en todos los años excepto en diciembre de 1998, 1999 y 2003 cuando se adelanta la temporada de mezcla).

Se registró anoxia en el hipolimnion del lago durante todos los años de estudio excepto en 1998. Los valores máximos de OD se registraron en la capa superficial durante los meses de febrero a junio, abarcando el periodo de mezcla y el principio de la estratificación. En el periodo de mezcla, toda la columna de agua se mantuvo oxigenada, siendo febrero el mes con mayor concentración de OD promedio (Fig. 26). Se observa una tendencia a la disminución de la concentración de OD a lo largo de todo el periodo, sin embargo, esta tendencia no logra ser estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

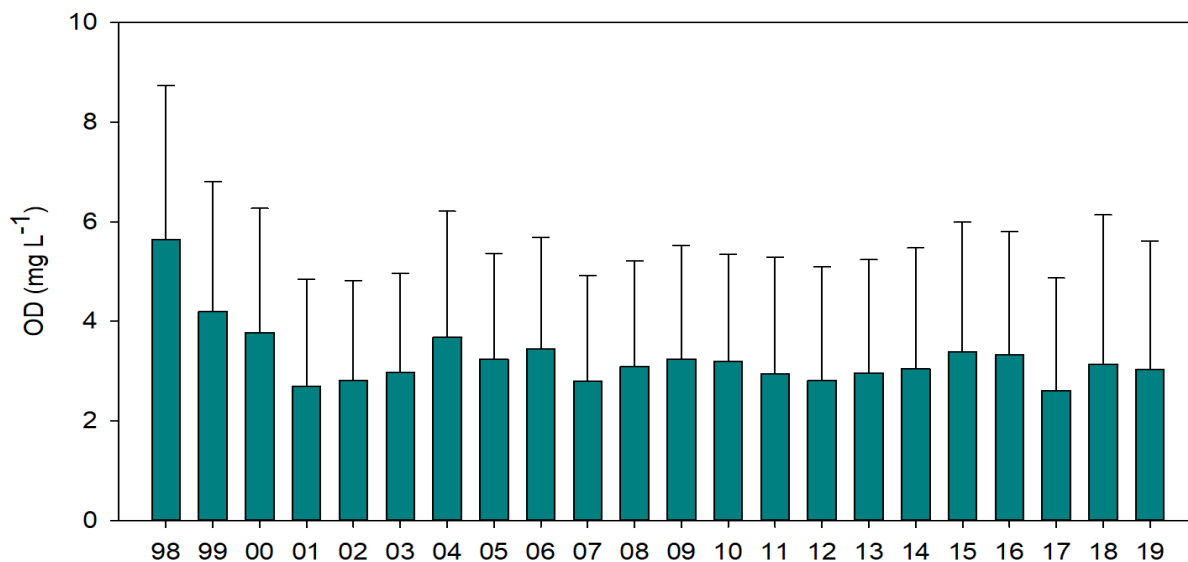


Fig. 25. Promedios anuales y desviación estándar del oxígeno disuelto (OD mg L⁻¹) en toda la columna de agua del lago Alchichica.

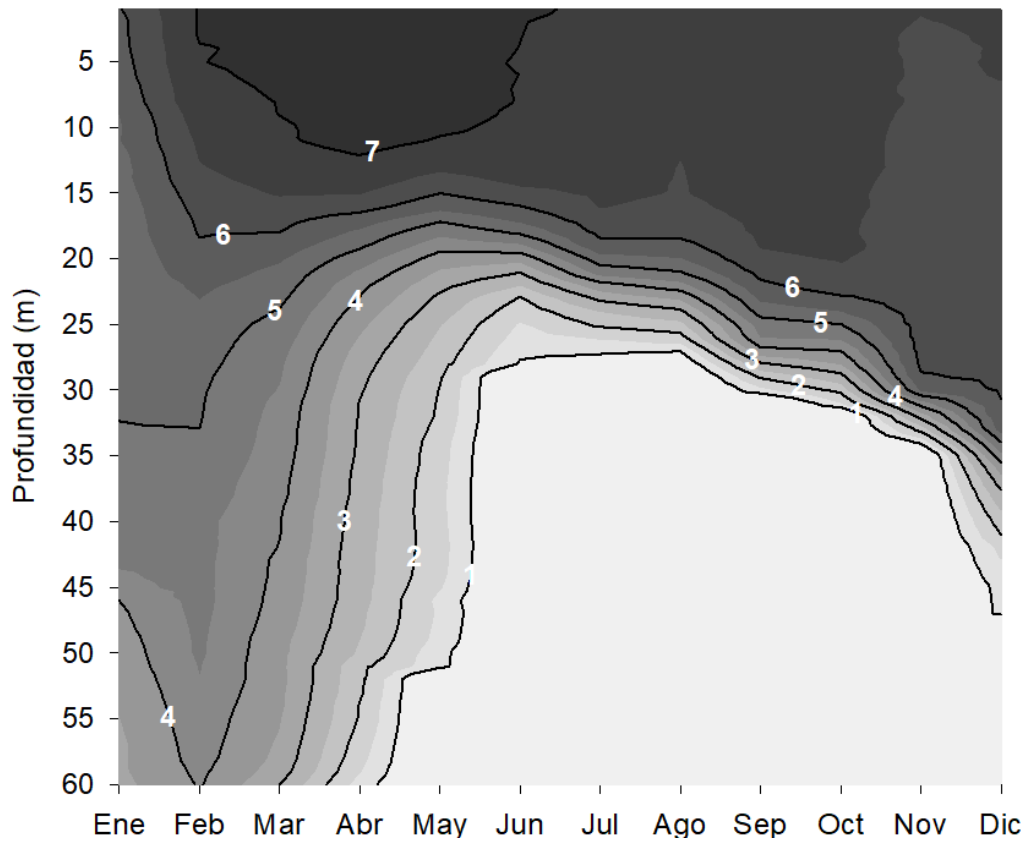


Fig. 26. Diagrama de tiempo-profundidad de isopletas de oxígeno disuelto (mg L^{-1}) del año tipo en el lago Alchichica durante el periodo de estudio (1998-2019).

9.2.6 Clorofila-a (Cl-a)

a) Dinámica estacional (intra-anual)

Clorofila-a total (Cl-a-T)

El año tipo indicó dos períodos bien diferenciados (Fig. 27): 1) Durante los meses de enero a marzo se presentan concentraciones altas de Cl-a-T, siendo enero el que presentó la concentración máxima ($8.4 \pm 5.3 \mu\text{g L}^{-1}$). 2) De abril a diciembre, en estratificación, se observó un descenso de la concentración. En mayo se observa un aumento ($3.2 \pm 3.2 \mu\text{g L}^{-1}$) correspondiente al florecimiento de *N. aff. Spumigena* para luego volver a descender y posteriormente volver a aumentar alcanzando valores altos en septiembre que es cuando se observa el DCM máximo

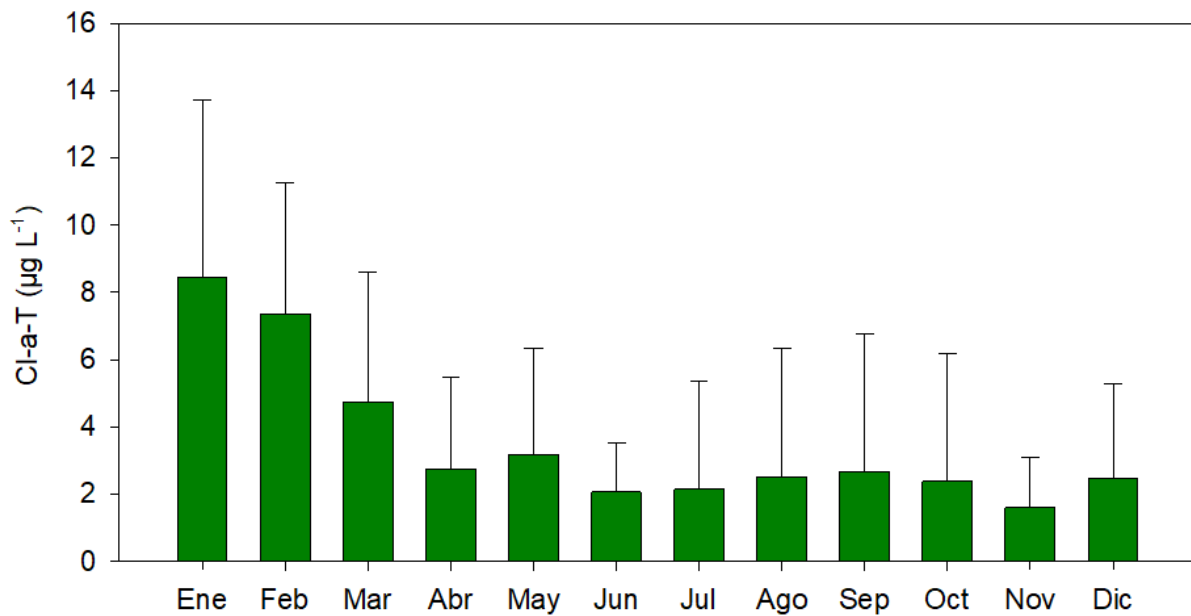


Fig. 27. Año tipo de la concentración promedio mensual de la clorofila-a total (Cl-a-T $\mu\text{g L}^{-1}$) en toda la columna de agua del lago Alchichica, durante el periodo de 1998 a 2019.

Al realizar la gráfica de isolíneas (Fig. 28) es posible observar la formación del máximo profundo de clorofila (DCM, por sus siglas en inglés) entre julio y octubre, entre los 25 m y los 35 m de profundidad.

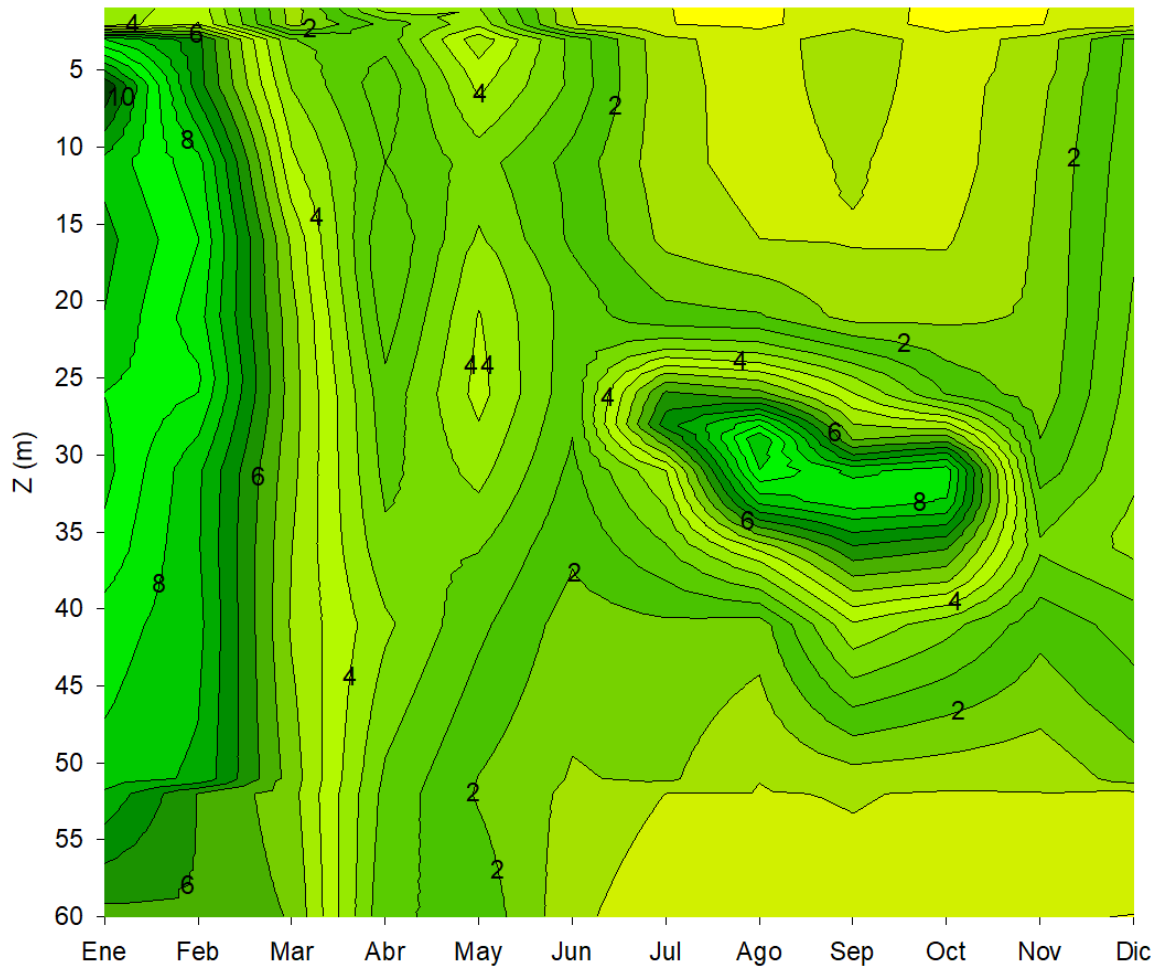


Fig. 28. Isolíneas del año tipo de la concentración de clorofila-a total (CI-a-T $\mu\text{g L}^{-1}$) del lago Alchichica, durante el periodo 1998 a 2019.

Las concentraciones de CI-a-T fueron, en general, bajas con un promedio mínimo de $0.6 \pm 0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ y un máximo de $14.1 \pm 4.0 \mu\text{g L}^{-1}$. Sin embargo, también se registraron valores altos, en forma puntual, relacionados con el periodo de mezcla del lago ($51.0 \mu\text{g L}^{-1}$ en enero del 2004) y con el desarrollo del DCM ($39.4 \mu\text{g L}^{-1}$ en julio del 2011). Aún con estos valores altos, Alchichica se sigue considerando oligotrófico, de acuerdo con el criterio utilizado y establecido por Margalef (1983) de $5 \mu\text{g L}^{-1}$, ya que el promedio general es de $3.5 \pm 3.5 \mu\text{g L}^{-1}$.

Clorofila-a fracción grande (Cl-a-L)

La concentración de Cl-a-L promedio a lo largo del año tipo fue de $2.7 \pm 3.7 \mu\text{g L}^{-1}$. Los valores máximos se presentan en enero con $6.7 \pm 5.0 \mu\text{g L}^{-1}$ y el promedio mínimo en noviembre con $1.1 \pm 1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ (Fig. 29).

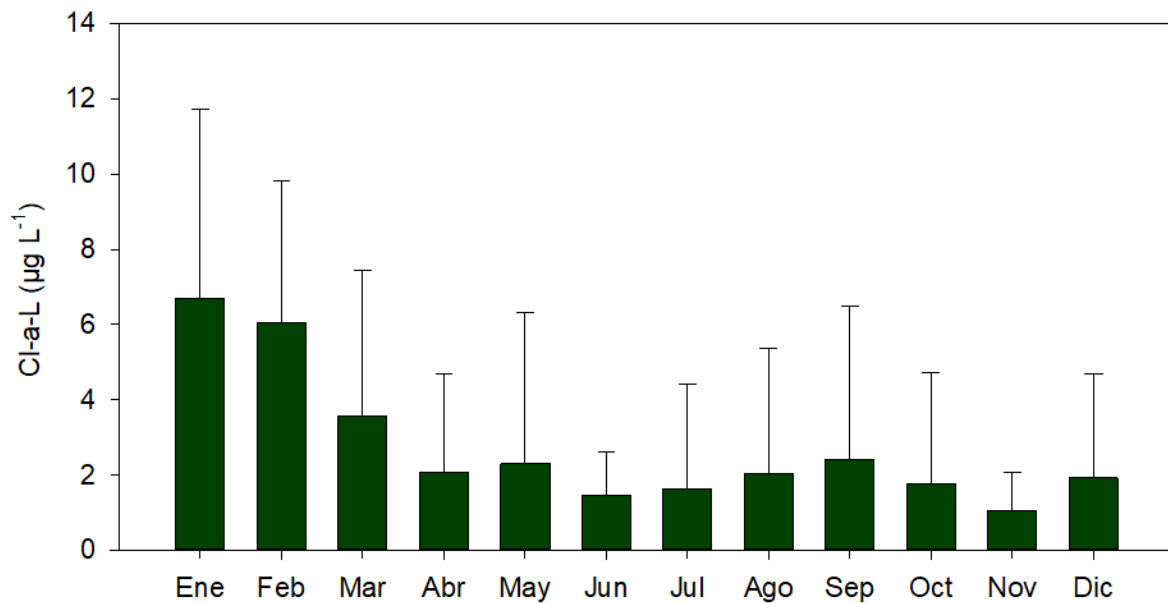


Fig. 29. Año tipo de la concentración promedio mensual de clorofila-a fracción grande (Cl-a-L $\mu\text{g L}^{-1}$) en toda la columna de agua del lago Alchichica durante el periodo de 1998 a 2019.

Clorofila-a fracción pequeña (Cl-a-S)

La concentración de Cl-a-S promedio a lo largo del año tipo fue de $0.6 \pm 0.7 \mu\text{g L}^{-1}$. Los valores máximos se presentan en febrero con $1.3 \pm 1.1 \mu\text{g L}^{-1}$ y el promedio mínimo en julio con $0.3 \pm 0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ (Fig. 30).

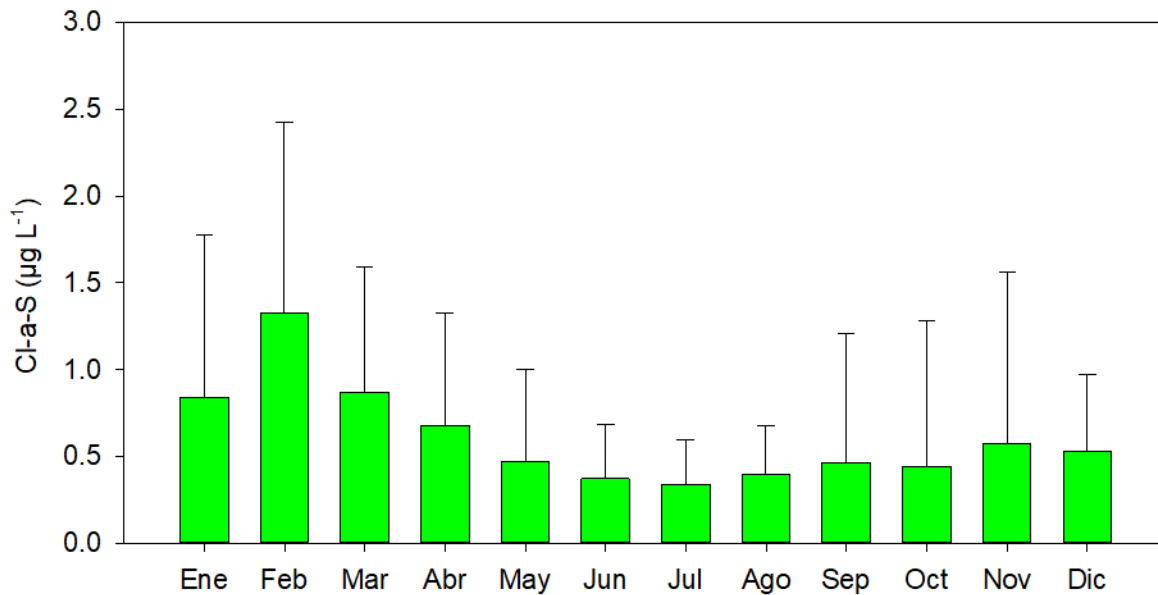


Fig. 30. Año tipo de la concentración promedio mensual de clorofila-a fracción pequeña (Cl-a-S $\mu\text{g L}^{-1}$) en toda la columna de agua del lago Alchichica durante el periodo de 1998 a 2019.

b) Dinámica interanual

Clorofila-a total (Cl-a-T)

Durante todo el período de estudio, la Cl-a-T manifestó un comportamiento regular. Cada año, en el período de mezcla, la concentración de Cl-a-T aumenta. En tanto, en la estratificación se observaron concentraciones mayores de Cl-a-T en el metalimnion, lo que se relaciona directamente con la presencia del máximo profundo de clorofila.

La concentración promedio anual de Cl-a-T a lo largo del periodo estudiado fue de $3.5 \pm 3.5 \mu\text{g L}^{-1}$. Los valores promedio mínimo y máximo fueron de $1.9 \pm 2.3 \mu\text{g L}^{-1}$ para 1998 y $5.1 \pm 4.9 \mu\text{g L}^{-1}$ para el 2000, respectivamente (Fig. 31).

Se registraron diferencias significativas ($p < 0.05$) interanuales, sin embargo, aplicando el análisis de Mann-Kendall no se encontró una tendencia estadística significativa ($p > 0.05$). Todos los años, a excepción de 2002, 2008 y 2012 presentaron valores de Cl-a inferiores a $0.5 \mu\text{g L}^{-1}$, como concentraciones mínimas.

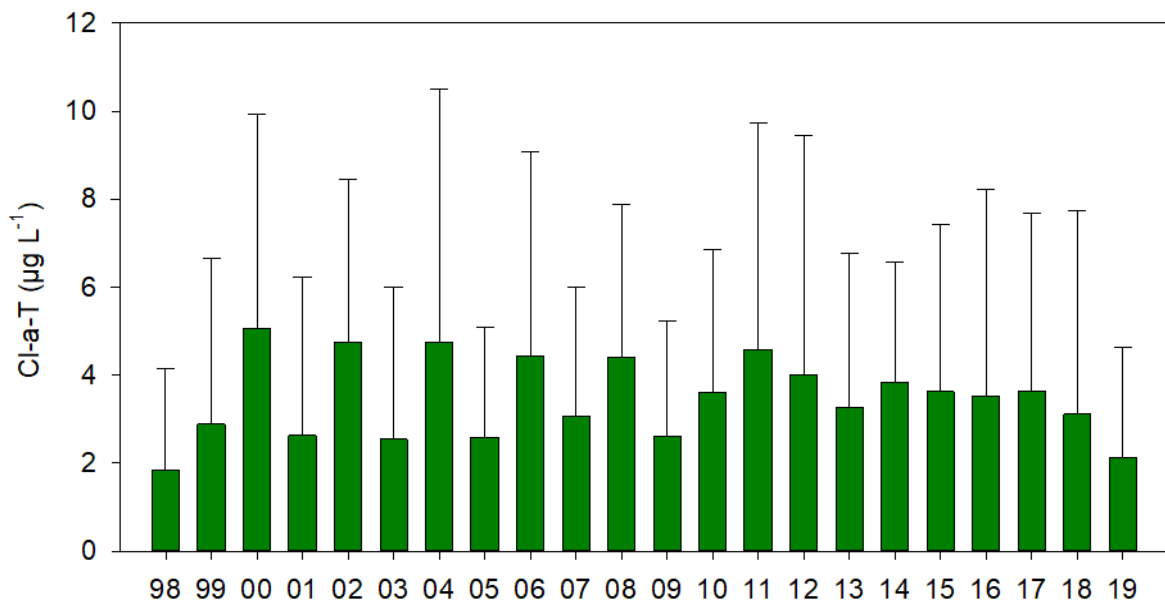


Fig. 31. Concentración promedio anual de clorofila-a total (Cl-a-T $\mu\text{g L}^{-1}$) en toda la columna de agua del lago Alchichica.

La gráfica de isóneas de la Cl-a-T (Fig. 32) muestra que cada año se forma el DCM, variando la intensidad de la concentración.

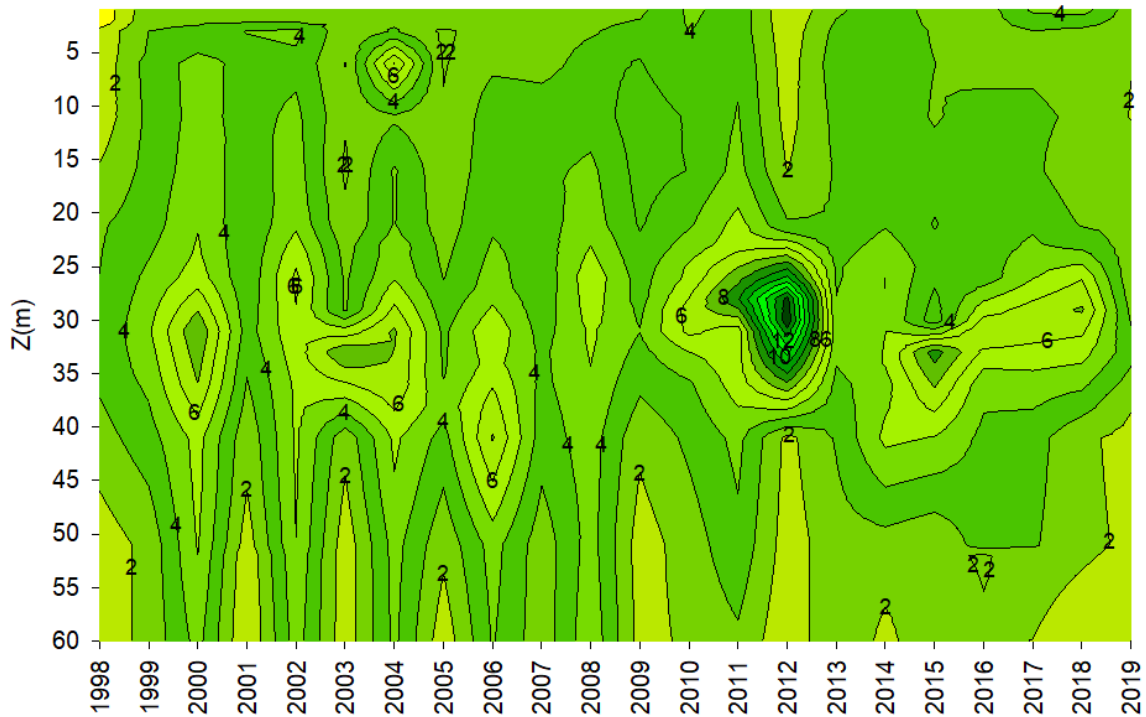


Fig. 32. Concentración de la clorofila-a total (CI-a-T $\mu\text{g L}^{-1}$) en función de la profundidad y el periodo de estudio en el lago Alchichica.

Clorofila-a fracción grande (CI-a-L)

Las variaciones de la CI-a-L se corresponden con las variaciones de la CI-a-T. La concentración promedio anual de CI-a-L a lo largo del periodo estudiado fue de $2.7 \pm 3.7 \mu\text{g L}^{-1}$. La concentración promedio mínima fue de $1.6 \pm 2.2 \mu\text{g L}^{-1}$ (1998) y la concentración promedio máxima fue de $4.2 \pm 4.5 \mu\text{g L}^{-1}$ y $4.1 \pm 4.7 \mu\text{g L}^{-1}$ para 2000 y 2006, respectivamente (Fig. 33).

Se registraron diferencias significativas ($p < 0.05$) interanuales, sin embargo, aplicando el análisis de Mann-Kendall no se encontró una tendencia estadística significativa ($p > 0.05$).

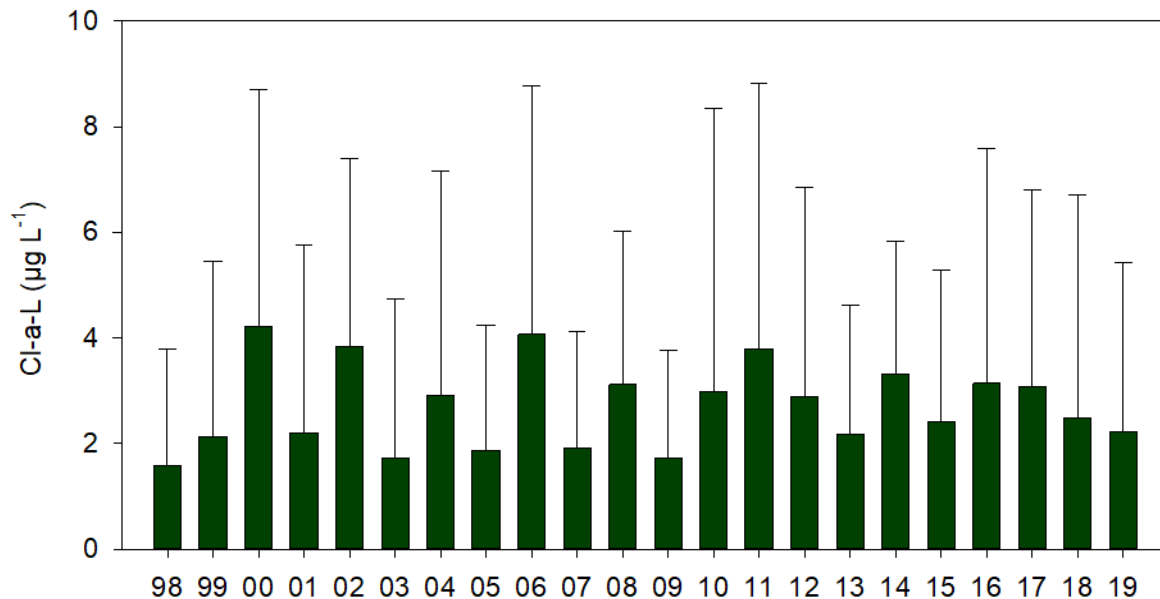


Fig. 33. Concentración promedio anual de clorofila-a fracción grande (Cl-a-L $\mu\text{g L}^{-1}$) en toda la columna de agua del lago Alchichica.

Clorofila-a fracción pequeña (Cl-a-S)

La concentración promedio anual de Cl-a-S fue de $0.6 \pm 0.7 \mu\text{g L}^{-1}$. La concentración promedio mínima fue de $0.3 \pm 0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ en los años 2012, 2018 y 2019. La concentración promedio máxima fue de $1.0 \pm 1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ para 2010 (Fig. 34).

No se registraron diferencias significativas ($p > 0.05$) interanuales. Se observa una tendencia a la reducción de la concentración promedio anual de Cl-a-S, sin embargo, aplicando el análisis de Mann-Kendall no se encontró una tendencia estadística significativa ($p > 0.05$).

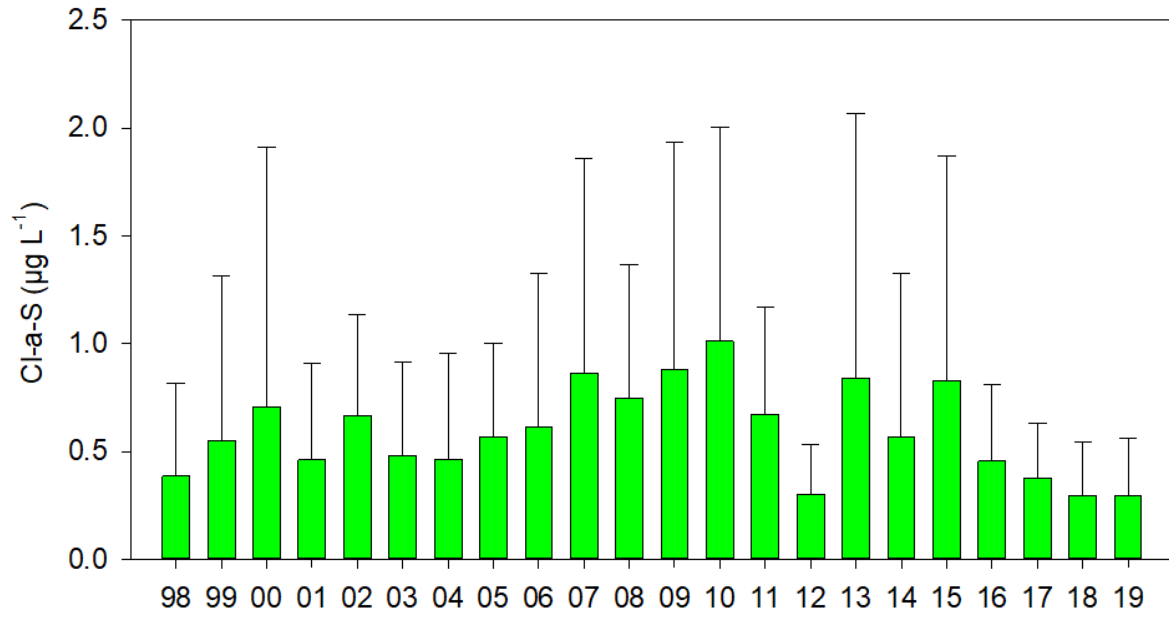


Fig. 34. Concentración promedio anual de clorofila-a pequeña (CI-a-S µg L⁻¹) en toda la columna de agua del lago Alchichica.

9.2.7 Clorofila-a integrada (Cl-a-int)

a) Dinámica estacional (intra-anual)

Clorofila-a integrada total (Cl-a-int-T)

El año tipo presentó un promedio general de $209.6 \pm 183.0 \text{ mg m}^{-2}$. Durante el periodo de mezcla se presentan las concentraciones mayores de Cl-a-int-T, siendo los promedios de $510.0 \pm 272.8 \text{ mg m}^{-2}$ (enero) y $444.8 \pm 192.7 \text{ mg m}^{-2}$ (febrero). En estratificación se registraron las concentraciones menores de Cl-a-int-T. El promedio menor se registró en noviembre con $96.2 \pm 41.6 \text{ mg m}^{-2}$ (Fig. 35).

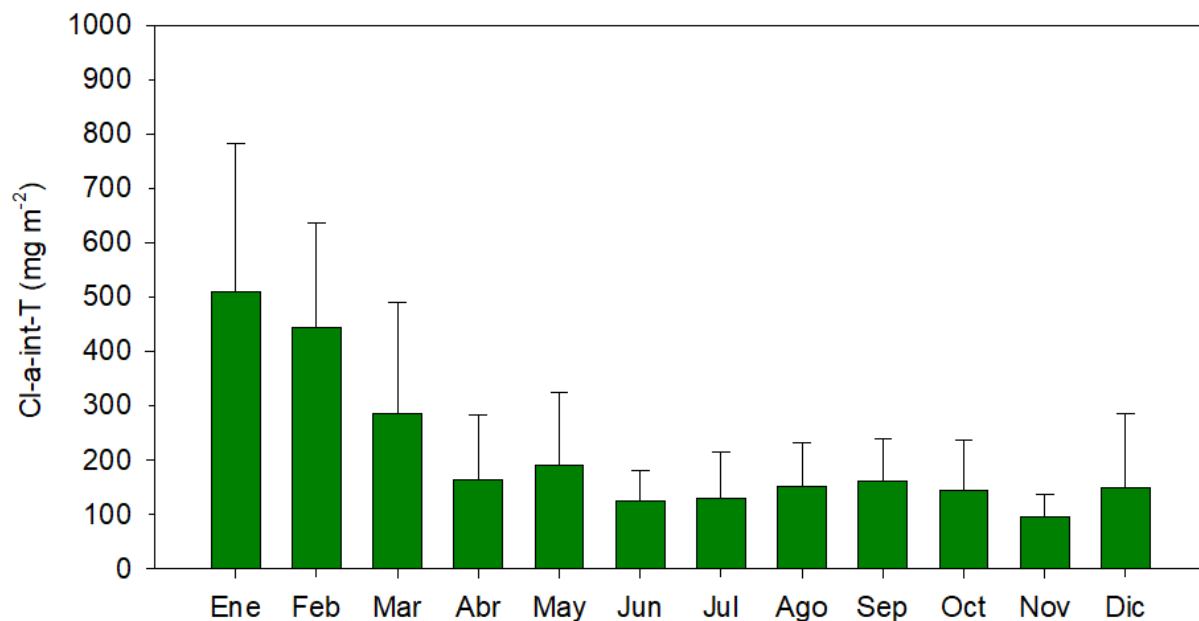


Fig. 35. Año tipo de las concentraciones promedio mensuales de clorofila-a integrada total (Cl-a-int-T mg m^{-2}) en toda la columna de agua del lago Alchichica, durante 1998 a 2019.

Clorofila-a integrada fracción grande (Cl-a-int-L)

El año tipo presentó un promedio general de $163.4 \pm 165.3 \text{ mg m}^{-2}$. Durante los meses de enero y febrero se presentan las concentraciones mayores de Cl-a-int-L, siendo los promedios de $404.6 \pm 264.4 \text{ mg m}^{-2}$ y $364.4 \pm 179.8 \text{ mg m}^{-2}$. El promedio menor se registró en noviembre con $63.8 \pm 24.5 \text{ mg m}^{-2}$ (Fig. 36).

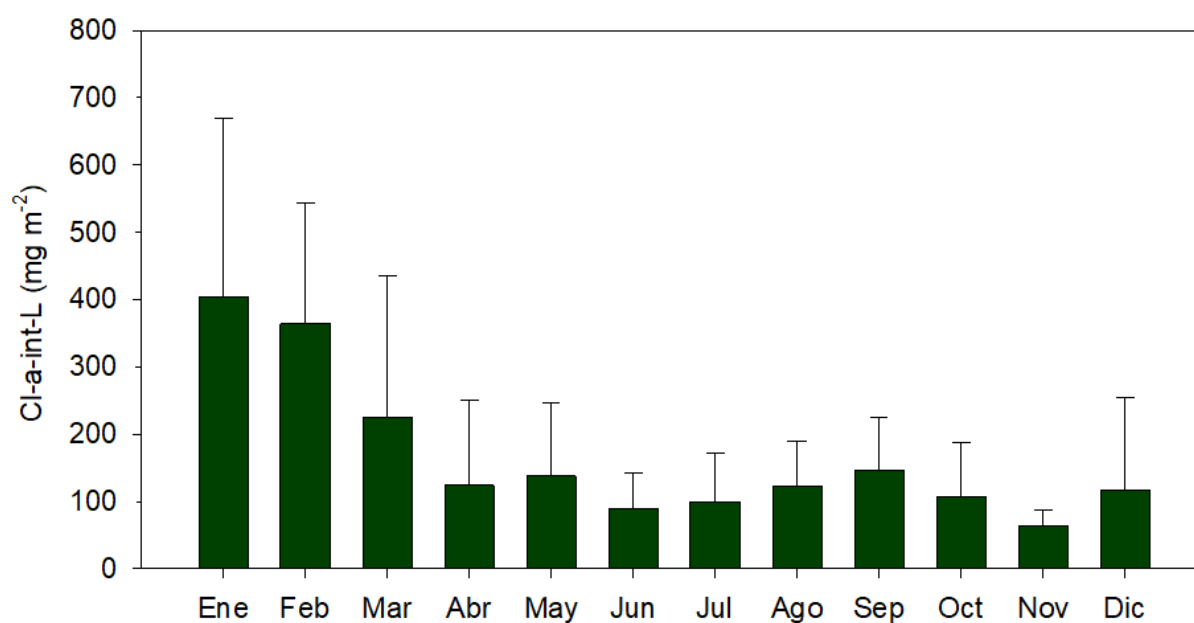


Fig. 36. Año tipo de las concentraciones promedio mensuales de clorofila-a integrada fracción grande (Cl-a-int-L mg m^{-2}) en toda la columna de agua del lago Alchichica, durante 1998 a 2019.

Clorofila-a integrada fracción pequeña (Cl-a-int-S)

El año tipo presentó un promedio general de $36.3 \pm 29.7 \text{ mg m}^{-2}$. Durante el mes de febrero se registró la mayor concentración de Cl-a-int-S, siendo de $80.0 \pm 47.9 \text{ mg m}^{-2}$. El promedio menor se registró en julio con $20.5 \pm 5.4 \text{ mg m}^{-2}$ (Fig. 37).

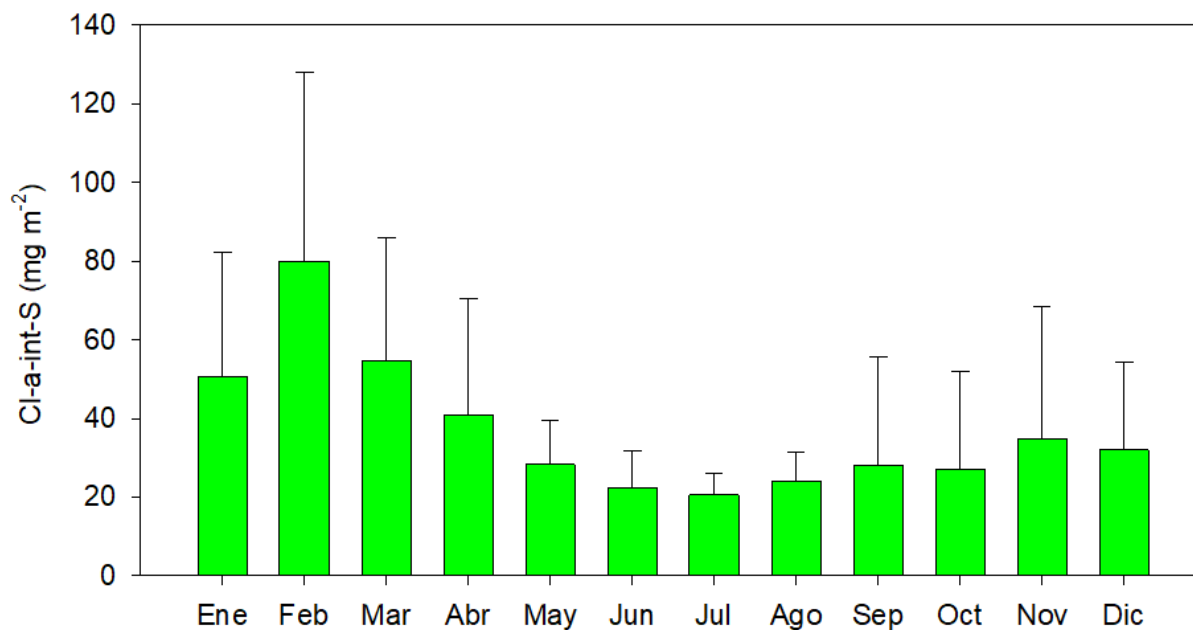


Fig. 37. Año tipo de las concentraciones promedio mensuales de clorofila-a integrada fracción pequeña (Cl-a-int-S mg m^{-2}) en toda la columna de agua del lago Alchichica, durante 1998 a 2019.

b) Dinámica interanual

Clorofila-a integrada total (Cl-a-int-T)

La concentración promedio anual de Cl-a-int-T varió entre $307.5 \pm 266.3 \text{ mg m}^{-2}$ en el año 2000 y $113.3 \pm 88.0 \text{ mg m}^{-2}$ para 1998 (Fig. 38). La concentración menor que se registró fue de 7.0 mg m^{-2} en enero de 2019. La concentración mayor de todo el periodo fue de 925.2 mg m^{-2} en enero del 2011. El análisis de Mann-Kendall mostró que no existe una tendencia significativa ($p > 0.05$) en los datos.

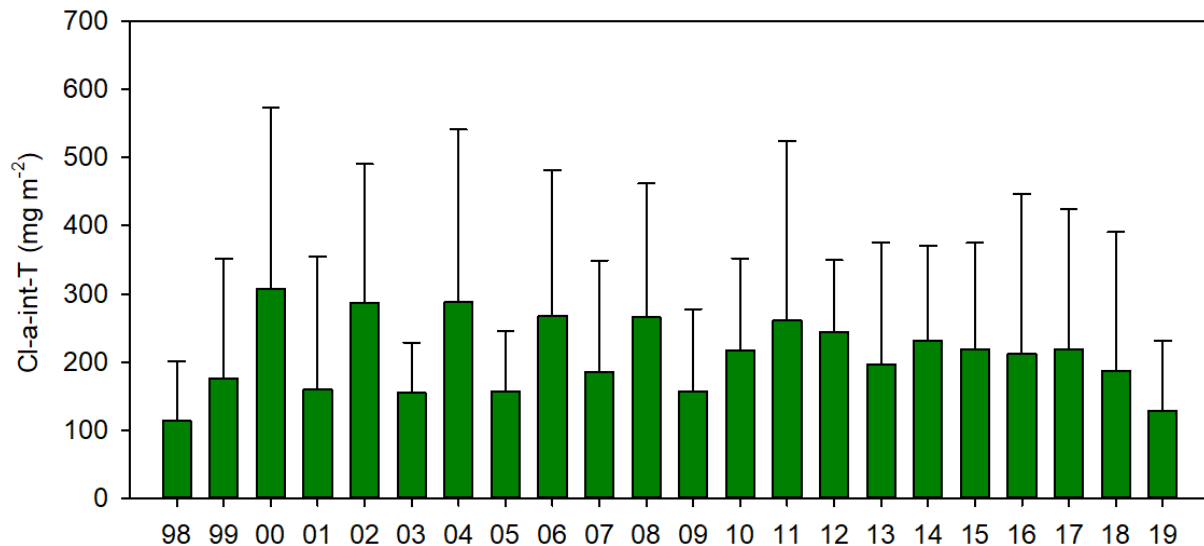


Fig. 38. Concentración promedio anual de clorofila-a integrada total (Cl-a-int-T mg m^{-2}) en toda la columna de agua del lago Alchichica.

Clorofila-a integrada fracción grande (Cl-a-int-L)

La concentración promedio anual de Cl-a-int-L varió entre $255.3 \pm 232.3 \text{ mg m}^{-2}$ en el año 2000 y $96.0 \pm 85.4 \text{ mg m}^{-2}$ para 1998 (Fig. 39). La concentración menor que se registró fue de 5.3 mg m^{-2} en mayo de 2018. La concentración mayor de todo el periodo fue de 999.4 mg m^{-2} en enero del 2011. El análisis de Mann-Kendall no encontró una tendencia significativa ($p > 0.05$) de los datos a lo largo del periodo estudiado.

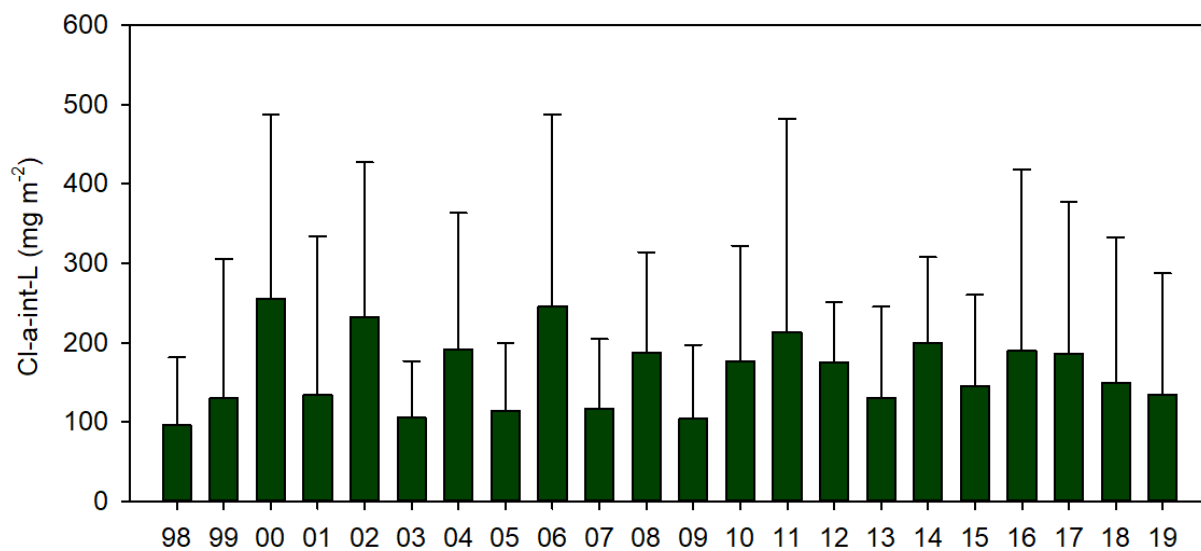


Fig. 39. Concentración promedio anual de la clorofila-a integrada fracción grande (Cl-a-int-L mg m⁻²) en toda la columna de agua del lago Alchichica.

Clorofila-a integrada fracción pequeña (Cl-a-int-S)

La concentración promedio anual de Cl-a-int-S varió entre $60.6 \pm 46.7 \text{ mg m}^{-2}$ en el año 2010 y $17.7 \pm 11.7 \text{ mg m}^{-2}$ para 2019 (Fig. 40). La concentración menor que se registró fue de 4.3 mg m^{-2} en enero de 2019. La concentración mayor de todo el periodo fue de 206.4 mg m^{-2} en febrero del 2007. A lo largo de 22 años se encontró una tendencia decreciente significativa (análisis de Mann-Kendall $p < 0.05$) de la concentración de la Cl-a-int-S.

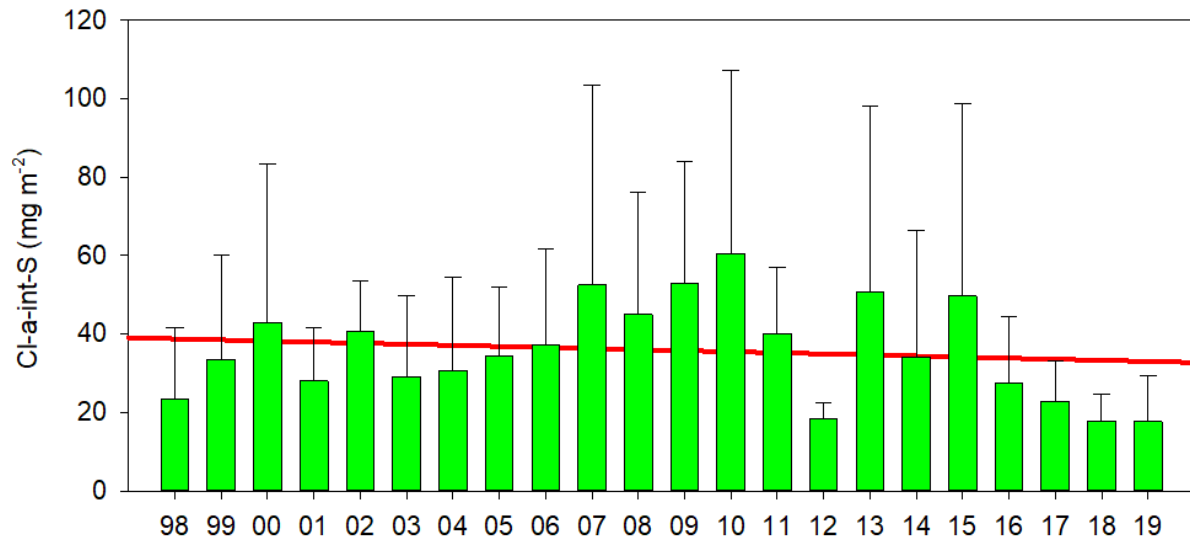


Fig. 40. Concentración promedio anual de clorofila-a integrada fracción pequeña (Cl-a-int-S mg m^{-2}) en toda la columna de agua del lago Alchichica. La línea roja muestra la tendencia decreciente significativa (análisis de Mann-Kendall $p < 0.05$) de los datos durante el periodo de 1998 a 2019.

En la Fig. 41 se presenta una comparación entre la Cl-a-int-L y la Cl-a-int-S. Se observa que la Cl-a-int-L es dominante siempre y que de manera general se alterna un año con alta concentración de Cl-a con otro año de baja concentración.

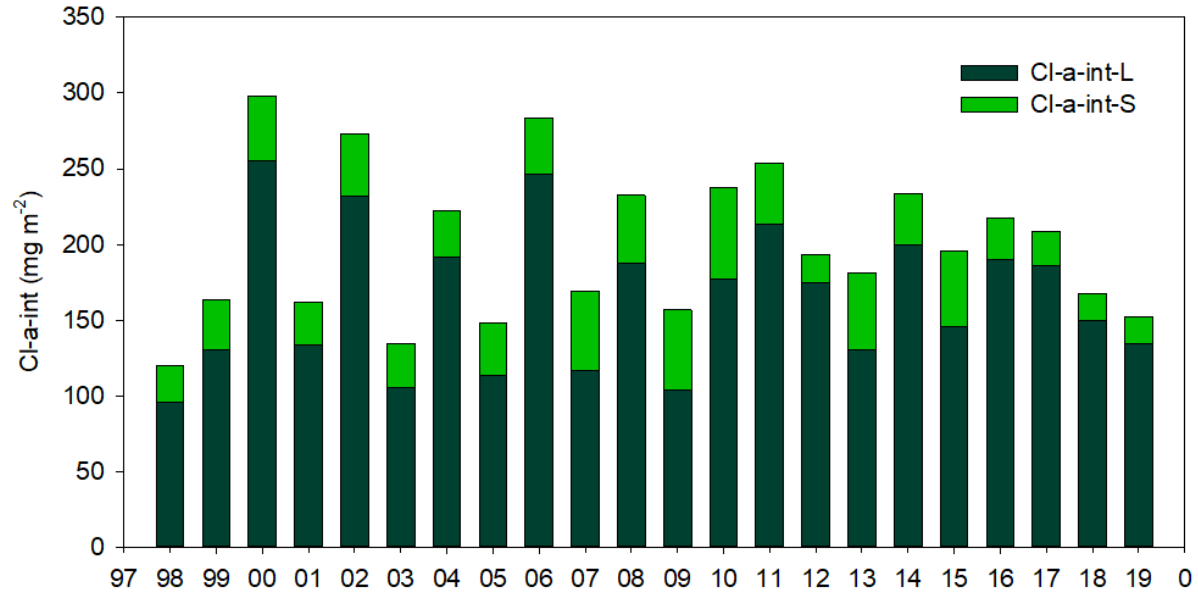


Fig. 41. Concentración promedio anual de clorofila-a integrada fracción grande y fracción pequeña (Cl-a-int-L y Cl-a-int-S mg m⁻²) en un periodo de 22 años.

9.3 Análisis de onduletas

El espectro de potencia de onduletas, representa los periodos que contribuyen más a la varianza de la serie temporal; el poder de espectro refleja (en una escala de colores) el periodo con la variación dominante (rojo). El cono de influencia es un borde generado artificialmente para aumentar la serie temporal, ya que esta trabaja con componentes armónicos de Fourier (Cazelles *et al.*, 2008; Winder y Cloern, 2010). La línea negra que rodea algunas áreas del poder de espectro, indica el nivel de significancia (prueba de chi cuadrado) correspondiente a $p=0.05$ (Torrence y Compo, 1998).

9.3.1 Parámetros meteorológicos

De acuerdo con la transformada de onduletas de la temperatura del aire y la precipitación, existe un comportamiento regular de los datos, mostrando un periodo dominante anual (zonas rojas en la Fig. 42). Para el análisis de la temperatura del aire es posible observar una ocurrencia cada seis meses (color amarillo), al no estar rodeado con una línea negra el color amarillo, este periodo exhibe un poder de espectro menor y no significativo estadísticamente ($p > 0.05$). En cuanto a la precipitación la señal del periodo de seis meses se intensifica a partir del 2010 hasta el 2014, aunque se vuelve estadísticamente significativo ($p < 0.05$) por lo menos de forma parcial en algunos momentos.

Los espectros de potencias se presentan en la Fig. 43. Es posible observar que los periodos para la presencia del ENOS van desde los 2 hasta los 8 años.

Los resultados que se encuentran fuera del cono de influencia, pero muy cerca de él, se deben de interpretar de forma discreta, ya que esta región está afectada por el borde de los datos, borde generado artificialmente para aumentar la serie temporal, como en este caso para los ciclos de 4 y 6 a 8 años.

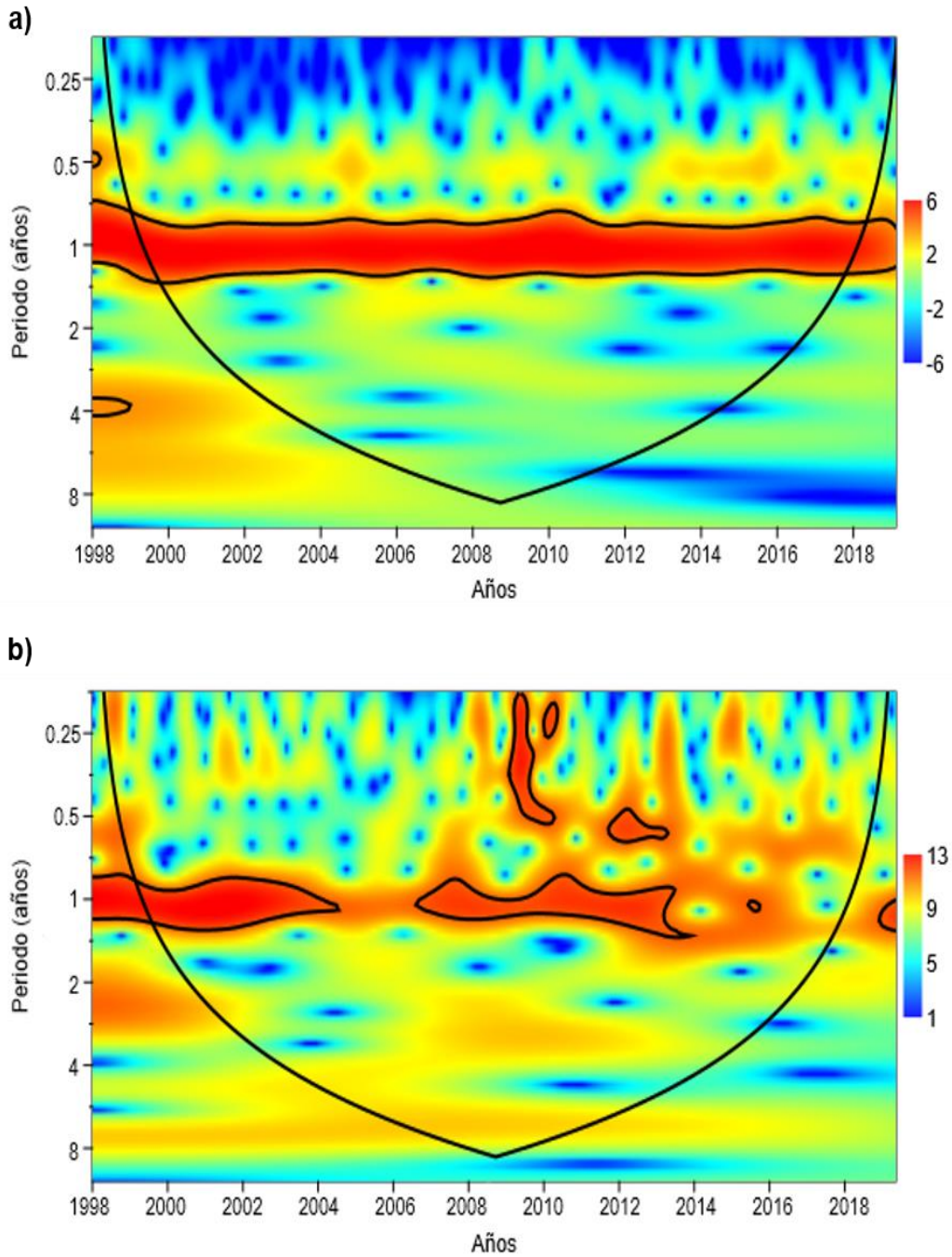


Fig. 42. Espectro de potencias de onduletas de a) temperatura del aire y b) precipitación para la serie de tiempo de 1998-2019. La barra de colores al costado derecho indica el poder del espectro. La línea convexa delimita el cono de confiabilidad.

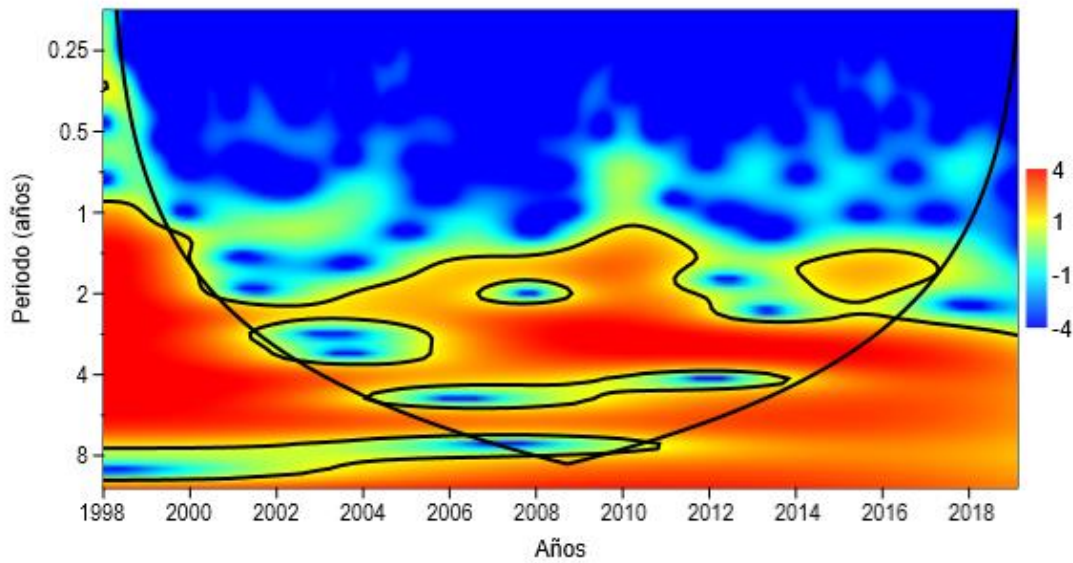


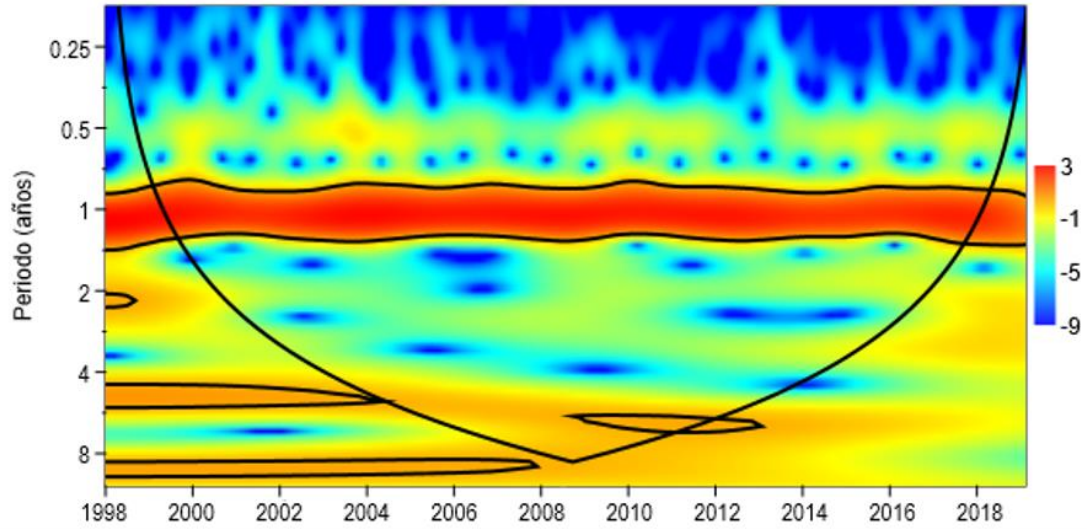
Fig. 43. Espectro de potencias de ondulitas para el Índice MEI bimensual del periodo de 1998 a 2019 (NOAA, 2020).

9.3.2 Parámetros limnológicos

La variación de la temperatura y el OD en el lago de acuerdo con el análisis de ondulitas confirmó un periodo anual, con un poder de espectro de 3 y 5 (Fig. 44). El análisis para la Z_{EU} y la Z_{MIX} (Fig. 45) también indicó la señal de un periodo anual. Sin embargo, para la Z_{EU} en 2009 momentáneamente la señal anual deja de ser estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

También se registran para el OD, la Z_{EU} y la Z_{MIX} periodos menores a un año, estadísticamente significativos ($p < 0.05$), aunque cortos (espacio naranja –círculos o manchas pequeñas- rodeados de una línea negra). Además, se observan periodos superiores a un año estadísticamente significativos ($p < 0.05$), como en la temperatura después del 2008, el OD antes del 2008 y la Z_{EU} durante el 2008 y 2009, dentro del cono de influencia.

a)



b)

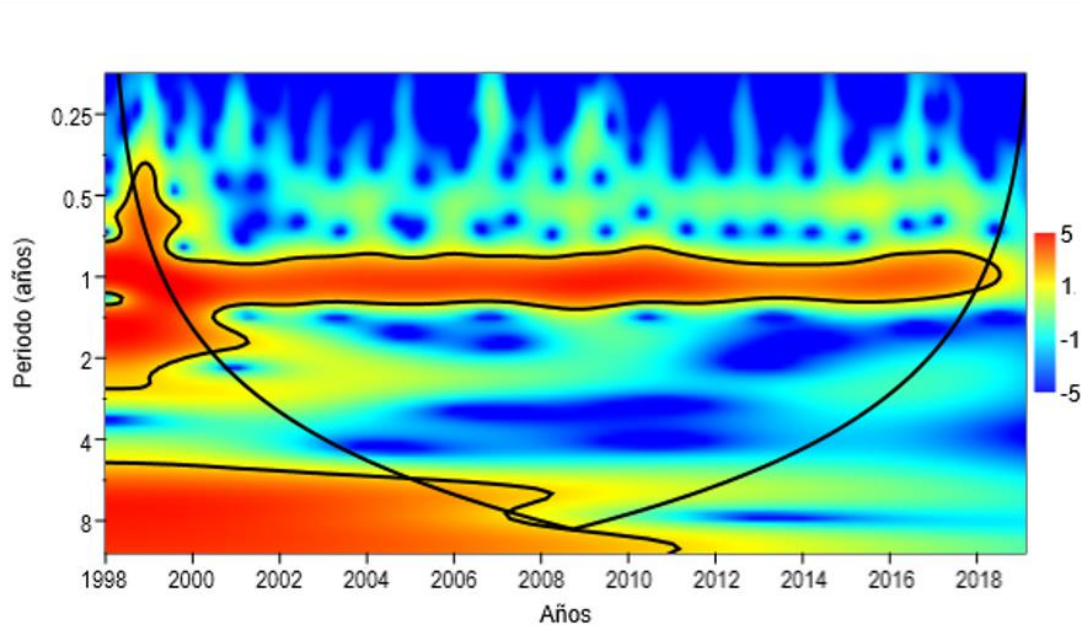


Fig. 44. Espectro de potencias de ondulitas de (a) Temperatura y (b) Oxígeno disuelto (OD) del lago Alchichica para la serie de tiempo de 1998-2019.

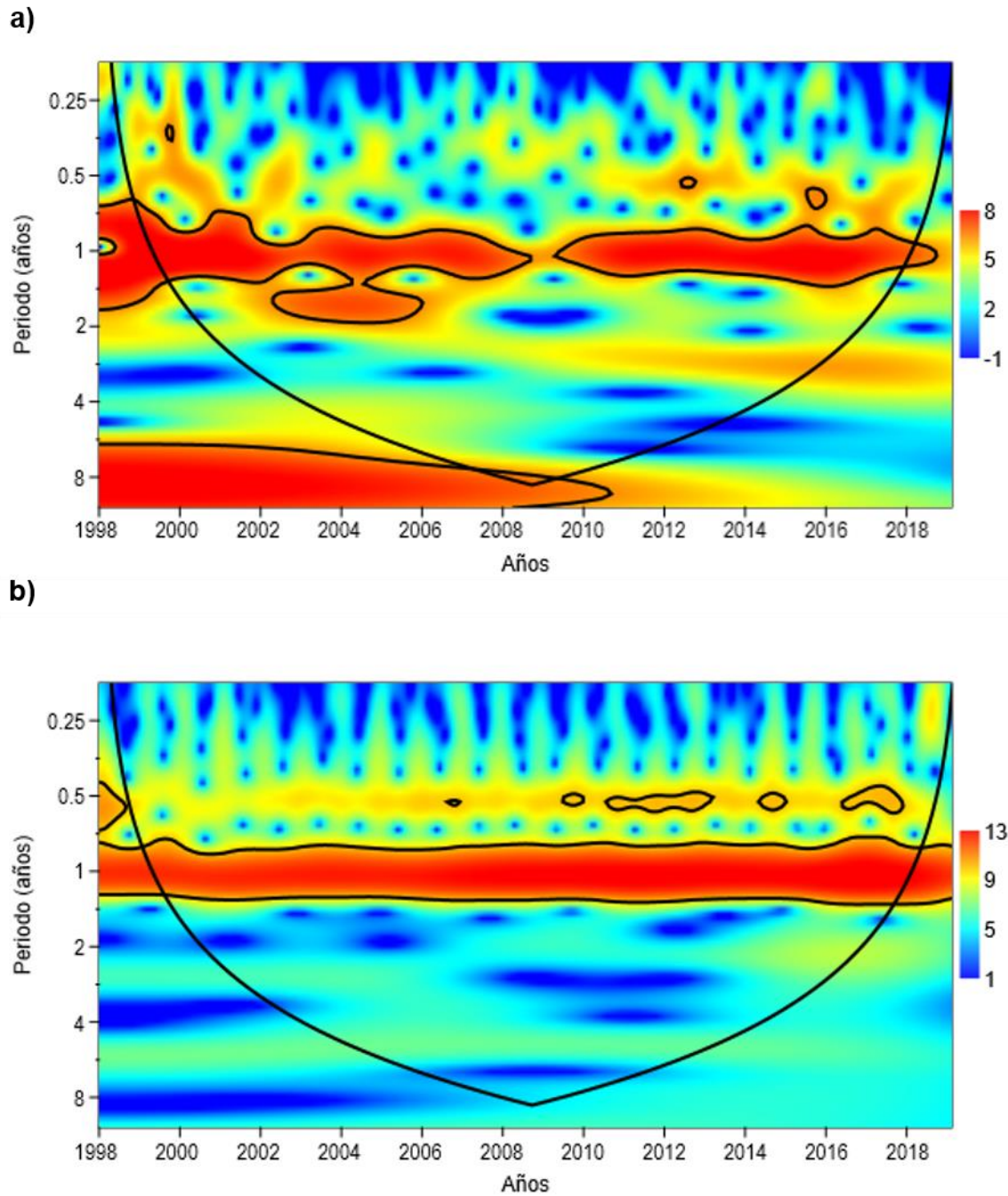


Fig. 45. Espectro de potencias de ondulitas de (a) zona eufótica (Z_{EU}) y (b) capa de mezcla (Z_{MIX}) promedio del lago Alchichica para la serie de tiempo de 1998-2019.

9.3.3 Clorofila-a integrada (Cl-a-int)

a) Clorofila-a integrada total (Cl-a-int-T)

Se utilizó el análisis de onduletas para descomponer la variabilidad de Cl-a-int-T de 1998 a 2019 como función del período y del tiempo. La variabilidad alta está representada por el color rojo, mientras que el azul indica una variabilidad débil (Fig. 46). El análisis mostró que la Cl-a-int-T presentó dos señales: una periodicidad constante de un año y otra de dos años. En algunos años se refleja un periodo de seis meses, pero con menor variabilidad.

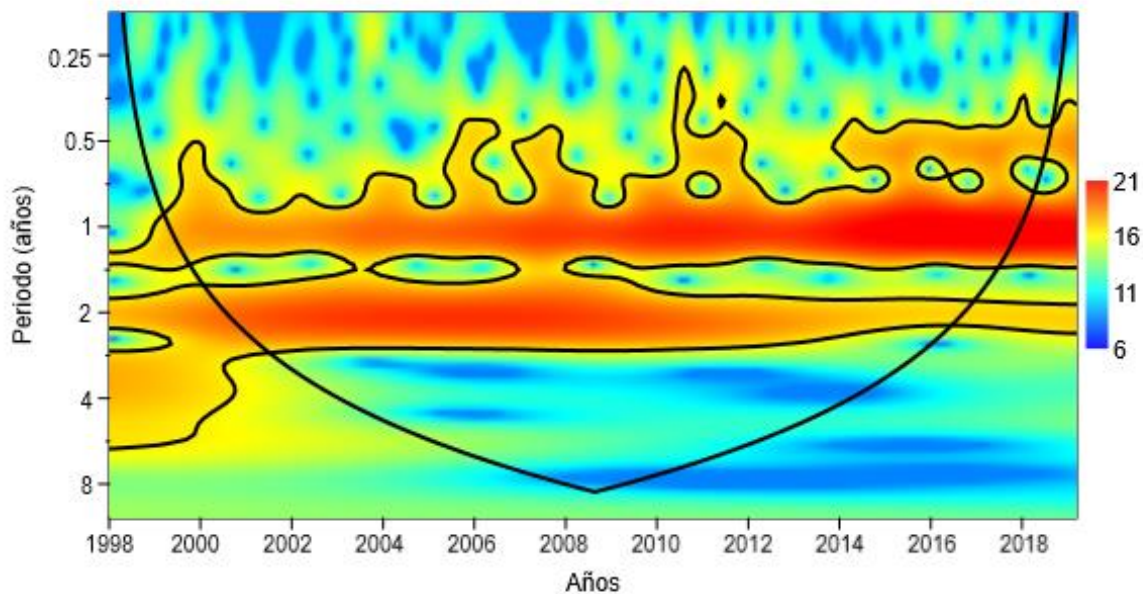


Fig. 46. Espectro de potencias de onduletas para la concentración de clorofila-a integrada total (Cl-a-int-T) durante el periodo 1998-2019 en el lago Alchichica.

b) Clorofila-a integrada fracción grande (Cl-a-int-L)

El análisis de onduletas para la concentración de la Cl-a-int-L coincidió con la Cl-a-int-T, mostrando dos periodos (Fig. 47), uno anual y el otro de dos años coincidiendo con la periodicidad bienal.

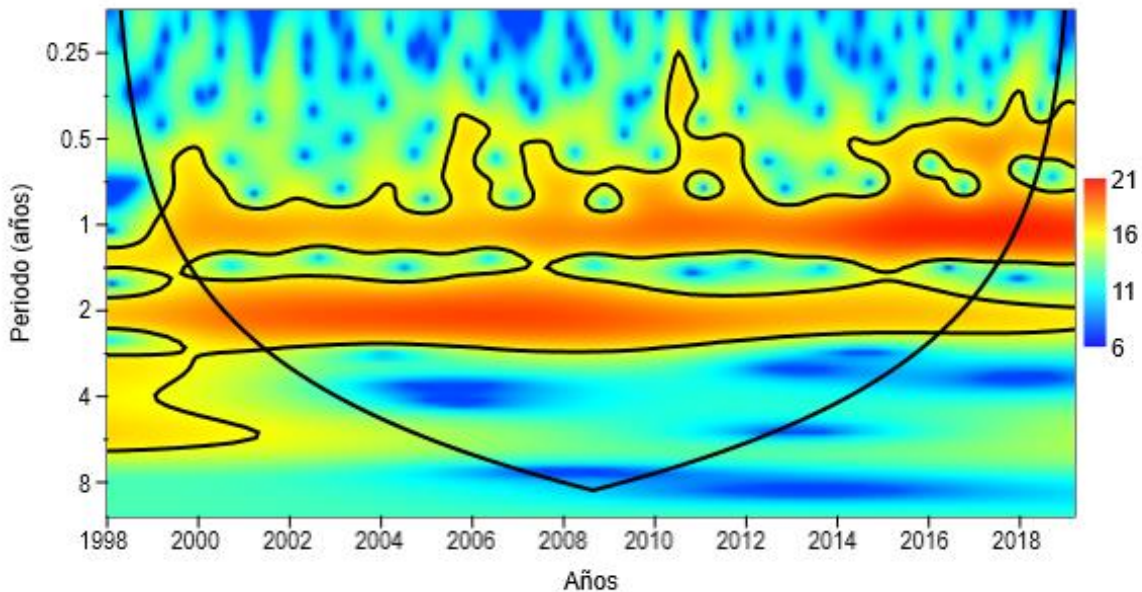


Fig. 47. Espectro de onduletas para la concentración de clorofila-a integrada fracción grande (CI-a-int-L) durante el periodo 1998-2019 en el lago Alchichica.

c) Clorofila-a integrada fracción pequeña (CI-a-int-S)

La variación de la concentración de la CI-a-int-S como una función del periodo y tiempo fue distinto, ya que presenta solo el periodo anual, aunque con un poder de espectro menor que el de la CI-a-int-T y la CI-a-int-L. Se presentan, además, un periodo bienal, uno de cuatro años y otro aproximadamente de ocho años (Fig. 48). Sin embargo, estos ciclos (dos y cuatro años) presentan un debilitamiento de la periodicidad a partir del 2015 y el de aproximadamente ocho años exhibe un poder de espectro menor y no significativo estadísticamente ($p > 0.05$). Los cambios en el tiempo del espectro de potencia de estos periodos sugieren un comportamiento no estacionario de la serie temporal.

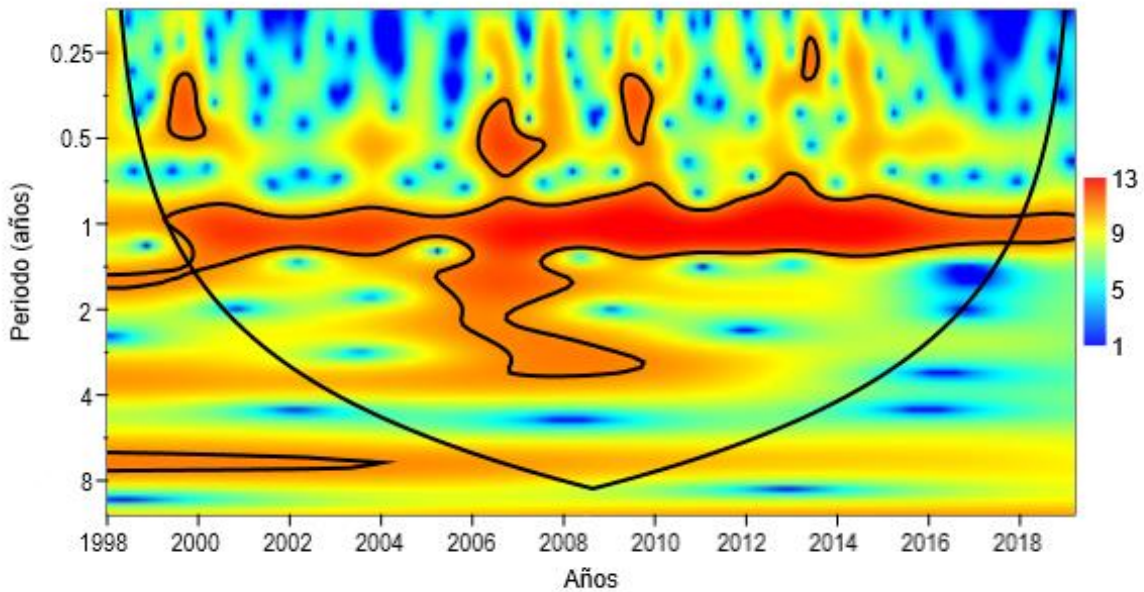


Fig. 48. Espectro de ondulitas para la concentración de clorofila-a integrada fracción pequeña (CI-a-int-S) durante el periodo 1998-2019 en el lago Alchichica.

Una serie que oscila a una frecuencia fija tendrá una gran proporción de su varianza explicada por esta frecuencia, es decir, el periodo dominante se observa claramente (una banda en rojo). En Alchichica podemos encontrar este comportamiento en el periodo anual de la temperatura del aire, la temperatura del agua y en la Z_{MIX} . En contraparte, una serie que oscila en múltiples frecuencias presenta más de dos periodos dominantes (mayor área en los distintos carriles de los periodos en rojo), como el comportamiento del MEI y la CI-a-int-T y la CI-a-int-L en este estudio (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de ciclos de las variables estudiadas en el lago Alchichica (1998-2019). Los datos en azul se corresponden con los años del evento ENOS negativo (Niña) y los de color rojo a los años del evento ENOS positivo (Niño). Tai: Temperatura del aire, Ta: temperatura del agua, (-): no se presenta el ciclo.

Ciclos	3 meses	6 meses	1 año	2 años	4 años	6 a 8 años
Cl-a-int-T	-	2006, 2007, 2010, 2011, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018	1998-2019	1998-2019	-	-
Cl-a-int-L	-	2005, 2006, 2010, 2011, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018	1998-2019	1998-2019	-	-
Cl-a-int-S	2013	2000, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010	1998-2019	2006, 2007	-	-
T _{ai}	-	-	1998-2019	-	-	-
Pp	2009, 2010	2009, 2010, 2012	1998-2019 (excepto 2014, 2017)	-	-	-
MEI	-	-	-	1998-2019 (excepto 2002, 2008, 2013, 2014)	1998-2019	1998-2019
T _a	-	-	1998-2019	-	-	2009, 2010, 2011
OD	-	1999, 2000	1998-2019	-	-	2007, 2008
Z _{EU}	-	2000, 2013, 2016	1998-2019 (excepto 2009)	-	-	2008, 2009
Z _{MIX}	-	2007, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017	1998-2019	-	-	-

10. DISCUSIÓN

Los datos de la estación climatológica de Alchichica definen claramente dos estaciones a lo largo del año, una cálida y lluviosa (de junio a septiembre) y otra fría y seca (de noviembre a marzo). Dentro de este esquema climático general, se observaron variaciones en la temperatura del aire y en las precipitaciones (Alcocer *et al.*, 2022a, b). Sin embargo, no se observó alguna tendencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$) en la temperatura del aire o la precipitación a lo largo de veintidós años.

Durante todo el periodo de estudio, la Z_{EU} presentó valores ascendentes y descendentes durante la estratificación. Esta variación puede ser resultado de la presencia del florecimiento de *Nodularia* aff. *spumigena* descrito en otros trabajos (p. ej. Oliva *et al.*, 2009; Ardiles, 2012) y que ocurre en algún momento durante la estratificación temprana, con relativamente corta duración, entre abril y junio y con diferente intensidad.

De forma interanual, en 1998 la Z_{EU} (48 m) presentó la mayor profundidad, coincidiendo con el año Niño más intenso del periodo, con altas temperaturas y baja biomasa fitoplanctónica. Variaciones similares se han registrado en otros lagos (Anexo 1), como en el Taupo y Tarawera, ambos en Nueva Zelanda, con una Z_{EU} de 40 m y 30 m, respectivamente (Hamilton *et al.*, 2010). Además, se ha visto que puede ocurrir variabilidad en la Z_{EU} en dos años consecutivos, como lo observado en el lago Tahoe, Estados Unidos, donde la profundidad de la Z_{EU} presentó en el mismo periodo una reducción mayor al 50% en un año, variando la Z_{EU} de 55 - 66 m en 2008 a 19.5 - 24.7 m en 2009 (Winder *et al.*, 2009). Los autores relacionan la variabilidad de la Z_{EU} a la intensidad del florecimiento de especies de *Cyclotella* de tamaño pequeño; es interesante observar que en Alchichica también se presenta una especie de *Cyclotella* de tamaño pequeño (*C. choctawhatcheeana*; Oliva *et al.*, 2001; Vilaclara *et al.*, 2022), pero cuya relación con la Z_{EU} no ha sido explorada.

La profundidad de la Z_{EU} depende de varios factores, uno de los cuales se corresponde con la presencia/ausencia de fitoplancton y el desarrollo de un máximo profundo de clorofila (DCM). En general y durante la estratificación, la falta de turbulencia favorece que el fitoplancton se sedimente pasivamente desde la zona eufótica hasta el metalimnion, donde el gradiente de densidad favorece la retención de los organismos. En Alchichica se forma un DCM compuesto principalmente por *C. alchichicana* ya que en el metalimnion encuentran estabilidad debido al cambio brusco de densidad - termoclina/picnoclina), además de que la presencia de ondas internas suministra nutrientes al metalimnion, y se encuentra en el límite de la Z_{EU} donde hay baja luminosidad, pero buena disponibilidad de nutrientes (González *et al.*, 2013). Esto se ha observado para otros lagos oligotróficos, tales como Atexcac, Puebla, México (Rojas, 2017), y Rotoma, Nueva Zelanda (Nelson, 1983). Así como también ha sido descrito en un lago eutrófico como la Alberca de Tacámbaro, Michoacán, México (Caballero y Vázquez, 2020).

Durante todo el periodo de estudio fue posible observar un aumento en la temperatura promedio del agua en Alchichica. Bajo un escenario de cambio climático, se prevé el aumento en la temperatura del aire y, consecuentemente, un aumento en la temperatura del agua, con afectación en la sucesión y distribución vertical del fitoplancton, ya que se espera que la estratificación sea más pronunciada y permanente, es decir, se formará una estratificación más estable, un epilimnion menos profundo y una mezcla vertical reducida (Winder y Cloern, 2010; Shimoda *et al.*, 2011) lo que contribuirá al desarrollo de un DCM más frecuente e intenso (Caballero y Vázquez, 2020).

Por ejemplo, el lago Burdur, monomítico y oligotrófico, con una temperatura del agua máxima de 20.6 °C en 1997 fue reportado con una Z_{MAX} de 100 m (Girgin *et al.*, 2004), y transcurrido 14 años presentó una temperatura del agua máxima de 29.0 °C, disminución de la profundidad, teniendo una Z_{MAX} de 80 m y cambiando su nivel trófico a eutrófico, con altas concentraciones de *Nodularia spumigena* y altas concentraciones de Cl-a (27.2 $\mu\text{g L}^{-1}$) (Kocasari *et al.*, 2015).

En el caso de Alchichica, en general, el florecimiento de *Nodularia aff. spumigena* se presenta cuando aumenta la temperatura de las capas de agua superficiales (Oliva *et*

al., 2001), es decir, se registra alrededor de mayo; sin embargo, en algunos años Niña (2000 y 2008), cuando existe un retraso en el calentamiento de las aguas superficiales, el pico de concentración de Cl-a-T se retrasa un mes, produciéndose en junio.

Con respecto al OD, durante el periodo de mezcla, temporada fría y seca, se encuentra distribuido a lo largo de la columna de agua. Durante la estratificación se presenta en mayores concentraciones en el epilimnion, lo que ha sido relacionado con el viento y con el florecimiento de cianobacterias. En cambio, las aguas profundas de los lagos experimentan una disminución, cuando no puede ser renovado ni por fotosíntesis ni por mezcla y se consume por respiración (Lewis, 1987). A este respecto, se observó que en algunos años Niña (diciembre de 1998, 1999 y 2003), se registró oxígeno en toda la columna de agua, por lo que el lago debe haber comenzado a circular a fines de diciembre. Situación contraria a lo que ocurre a partir del 2004 hasta el 2019, donde se observó que la estratificación fue más extensa, registrándose anoxia en el fondo incluso en el mes de enero. La presencia de un hipolimnion anóxico es una característica de los lagos eutróficos y también de los lagos tropicales profundos que se estratifican.

Al observar la Z_{MIX} de marzo (mes de transición del periodo de mezcla al de estratificación) de todos los años en Alchichica, se observó que en algunos años (2000, 2005, 2014-2016, 2018-2019) se adelantó el periodo de estratificación, además de presentar una tendencia hacia la reducción de la Z_{MIX} . Puntualmente, la reducción del periodo de mezcla del lago del 2015-2016 coincide con un evento Niño y con lo descrito en otras investigaciones (Alcocer y Lugo, 2003; De la Lanza-Espino, 2011; Caballero y Vázquez, 2020). Sin embargo, los años Niño de 1998 y 2009 no presentaron esa característica y el año 2000, que corresponde con un evento Niña (temperaturas frías), presentó una Z_{MIX} reducida.

En cuanto a la biomasa fitoplanctónica, expresada como clorofila, se observó que las variaciones en el tiempo de la Cl-a-L siguen el mismo patrón que la Cl-a-T, ya que constituye la fracción dominante, principalmente por *C. alchichicana*. En cuanto a la Cl-a-S siempre se presentó en bajas concentraciones, lo que también ha sido descrito para otros lagos monomícticos, como Biwa (mesotrófico), en Japón (Frenette *et al.*, 1996) y Kivu (oligotrófico), en África (Sarmiento *et al.*, 2008).

En relación con la CI-a-S, los valores indican que su aporte siempre fue bajo. Al ser de talla pequeña son consumidas por el zooplancton, factor que limita su acumulación en la columna de agua (Malone y Chervin, 1979). Al respecto Ortega-Mayagoitia *et al.* (2011) indican que el aporte nutricional no es idóneo para el zooplancton presente, debido a su tamaño y cantidad.

Los eventos climáticos a corto plazo podrían reflejarse como modificaciones en la composición de fitoplancton y en su patrón normal de floraciones anuales. Si el periodo de mezcla tiene una tendencia a reducirse por condiciones más cálidas en la superficie que permiten la formación de la diferencia de densidades entre las capas de agua, entonces es probable que ocurra un cambio en la composición de especies del fitoplancton. Este cambio favorecerá a las especies de menor tamaño, las cuales poseen la capacidad para permanecer suspendidas en la Z_{EU} (Huisman *et al.*, 2004), con una mayor eficiencia en la captación de nutrientes, una mayor tasa de reproducción y menor tasa de hundimiento (Stockner y Antia, 1986), apoyando la hipótesis de que los factores abióticos afectan la estructura y el tamaño de las comunidades fitoplanctónicas (Winder *et al.*, 2009). Sin embargo, Alcocer *et al.* (2022a) describen que la composición y estructura de la comunidad planctónica ha permanecido similar a lo largo de 20 años. Las clorofitas pequeñas, como *Monoraphidium minutum* dominan la abundancia del fitoplancton, mientras que las diatomeas grandes como *C. alchichicana* dominan la biomasa.

Una de las alteraciones que se genera por el calentamiento global o los eventos naturales como la fase positiva del ENOS (“Niño”) es el acortamiento de los periodos de mezcla en los lagos (Caballero *et al.*, 2016). En Alchichica, debido al aumento de temperatura de 1.1 °C en el fondo que se observó desde 1998 hasta el 2019 se esperaría que la Z_{MIX} se viera disminuida a lo largo de todo el periodo; sin embargo, los valores promedio de cada año oscilan cercanos al promedio general de todo el periodo. En contraste, en la Alberca de Tacámbaro se presenta una mezcla vertical disminuida causada por años con temperaturas más cálidas (desde el 2000), como cuando se presenta el fenómeno “El Niño”, además de presentar un aumento de temperatura en el hipolimnion de 2009 a

2015. Estos cambios correlacionan el calentamiento del hipolimnion con alteraciones en la diversidad y composición de las diatomeas (Caballero y Vázquez, 2020).

Además, la variabilidad climática interanual repercutirá en el calentamiento de las aguas profundas (Cardoso-Mohedano *et al.*, 2019). Por ejemplo, el lago Santa María del Oro, un lago con características similares al de Alchichica (origen, tamaño y profundidad, aunque a menor altura sobre el nivel del mar y por tanto temperaturas más altas en el agua), estaba clasificado como monomíctico (Armienta *et al.*, 2008; Caballero *et al.*, 2013), pero después de diez años, se determinó que el hipolimnion era estable y que la mezcla vertical no tenía la suficiente fuerza para alcanzar el fondo, por lo tanto, cambió su clasificación de mezcla a oligomíctico (Cardoso-Mohedano *et al.*, 2019); aunque algunos autores lo consideran monomíctico cálido, con las mezclas espaciadas (com. pers. Alcocer, 2022). Debido a las similitudes entre los lagos, Alchichica también podría presentar un calentamiento del agua de fondo.

El análisis de onduletas para la CI-a-T y la CI-a-L mostró dos ciclos principales: uno anual y uno bienal; también se registró un ciclo de 6 meses, aunque no de forma consistente. Para la CI-a-S se observó principalmente el ciclo anual y con una señal menos consistente se registró un ciclo de seis meses, coincidiendo con todos los eventos Niña registrados en este estudio.

El ciclo anual fue consistente a lo largo de 22 años y puede ser relacionado con la periodicidad del lago en cuanto a su hidrodinámica de mezcla-estratificación (Alcocer *et al.*, 2000). Está presente en todos los parámetros, excepto en el MEI, debido a que es una serie que oscila en múltiples frecuencias, presentando más de dos periodos dominantes.

Se han descrito distintas oscilaciones anuales para diversos cuerpos acuáticos, como el lago Valencia, Venezuela (Olivares, 2018), donde los autores señalan que las lluvias del ciclo anual constituyen el parámetro determinante en este ciclo. En el caso de Alchichica el factor preponderante es la variación estacional de la temperatura, asociada a la monomixis cálida que define la hidrodinámica del lago (Alcocer *et al.*, 2022b).

Por otro lado, en el ciclo de 2 años, los años pares presentan una mayor concentración de Cl-a-T en comparación con los años nones, como se había reportado anteriormente (Adame *et al.*, 2008; Ardiles *et al.*, 2012). Esta ciclicidad puede estar relacionada con la variabilidad climática de los eventos de El Niño-La Niña, ya que -aun cuando el Niño se ha reportado solamente presente en el Pacífico tropical- sus efectos se sienten indirectamente en otras partes del mundo (fenómeno conocido como teleconexión), como en las variaciones de precipitación (Glantz, 2000). Por ejemplo, en 1999 la persistencia y profundidad de la termoclina fueron mayores a otros años, lo que pudo corresponderse al evento intenso del Niño 1998-1999. Durante los años 2002-2003, el evento El Niño fue moderado y se reflejó en una termoclina poco profunda, pero de mayor duración, un patrón similar al de los años 2005, 2007 y 2009 (Fig. 9). Esta variación puede ser observada en la Cl-a-T y Cl-a-L. La variabilidad climática puede estar determinando la intensidad de la mezcla que a su vez pone a disponibilidad los nutrientes atrapados en el hipolimnion, en particular la sílice como sugirieren Adame *et al.* (2008), ya que el florecimiento invernal está integrado por diatomeas, y el nitrógeno se ha reportado que limita el crecimiento fitoplanctónico a fin e inicio de año, diciembre y enero, justo cuando da inicio el florecimiento de diatomeas (Ramírez-Olvera *et al.* 2009).

En cuanto al ciclo de tres meses se presentó para la Cl-a-S y la Pp. Estos ciclos son difíciles de asociar a otros procesos. Torrence y Compo (1998) describen que en el análisis se pueden producir espectros de potencia distorsionados al subestimar los ciclos de periodos cortos (< 4 meses). Sin embargo, las interpretaciones de estos periodos se han atribuido a distintas causas, tales como la variabilidad dominada por eventos de floración irregulares y de corta duración del fitoplancton y a la complejidad de modelar un sistema natural (Grinsted *et al.*, 2004; Winder y Cloern, 2010).

La ciclicidad de seis meses en las Cl-a-T, Cl-a-L y Cl-a-S, en Pp, OD, Z_{EU} y Z_{MIX} puede ser asociada a la variabilidad climática y a las dos temporadas contrastantes (fría de secas y cálida de lluvias). Además, pueden relacionarse con los cambios abruptos que ocurren en algunos años, en la transición de un año Niño a un año Niña, o viceversa. Por ejemplo, en 1998 se presentó un cambio del MEI a mediados del año (de Niño a Niña),

en 1999, las anomalías de la temperatura del aire fueron extremas y a mediados del 2010 se presentaron las anomalías menores y mayores de la precipitación (Tabla 1).

Los ciclos de seis meses, también se relacionan a cambios estacionales en la intensidad de la mezcla, la disponibilidad de nutrientes y al pastoreo (Winder y Cloern, 2010). Ciclos de menor duración, como el de tres meses, son difíciles de explicar debido a la variabilidad de los distintos parámetros involucrados.

En un análisis de 20 años en el lago cráter tropical Nkuruba, Uganda, se demostró que el aumento de la temperatura del aire y los cambios estacionales e intensidad de la precipitación pueden provocar cambios en la dinámica del lago (Saulnier-Talbot *et al.*, 2014), siendo uno de ellos la reducción de la profundidad de la zona fótica. En Alchichica ocurrió en 2009 (un año Niño) una anomalía positiva en la precipitación, lo que generó un cambio en las temperaturas ambientales que en otras regiones del país se reportaron altas (Caballero y Vázquez, 2019) y correlacionadas con las condiciones de un año Niño. Además, fue posible observar una tendencia a la reducción de la Z_{EU} , aunque no fue estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

Estos cambios ambientales pueden verse reflejados con el análisis de onduletas, ya que en ese año (2009) se presentó un ciclo de seis meses en la precipitación, lo que provocó una discontinuidad en el ciclo anual de la Z_{EU} (Fig. 44a) y que se reflejó en el ciclo semestral para la CI-a-S. Alcocer *et al.* (2022b) mencionan que las variabilidades climáticas que generan temperaturas frías favorecen la mezcla completa de la columna de agua y la re-oxigenación, estableciendo condiciones adecuadas para el fitoplancton en la Z_{EU} .

Con respecto a los ciclos largos y como lo reportan otras investigaciones, las ciclicidades mayores a un año pueden estar relacionadas con los eventos climáticos del ENOS, ya que los resultados de onduletas del MEI corresponden a ciclicidades de dos a ocho años (Winder y Cloern, 2010; Alcocer *et al.*, 2022b). Algunas investigaciones (Hsieh *et al.*, 2010; Winder y Cloern, 2010; Darchambeau *et al.*, 2014, Alcocer *et al.*, 2022b) señalan que la variabilidad de los ciclos (cortos y largos) de la CI-a-S, que se corroboró en este estudio a través de los análisis de onduletas, parecen indicar que el comportamiento del

picofitoplancton responde de manera más rápida ante las perturbaciones climáticas como los eventos del ENOS.

En resumen, se acepta la H1 con relación a que los periodos de variación cíclicos característicos de la CI-a-T, CI-a-L y CI-a-S, son, principalmente, el anual y el bienal, relacionándose con la hidrodinámica del lago, para la CI-a-T y CI-a-L y solo para la ciclicidad anual para la CI-a-S.

Se acepta la H2 con respecto a que existe evidencia de cambio climático en el cual la temperatura del lago aumentó. Sin embargo, este calentamiento no se ha visto reflejado en una tendencia de cambio estadísticamente significativa ($p > 0.05$) a largo plazo para el periodo de 22 años (1998-2019) de la zona eufótica ni de la capa de mezcla, por lo que tampoco se han observado modificaciones en el patrón estacional (intra-anual) e interanual en las concentraciones de CI-a.

Se rechaza la H3 ya que las condiciones de ENOS (El Niño y La Niña) no se reflejaron en un cambio significativo en la profundidad ni anchura de la termoclina, ni en la concentración de CI-a fitoplanctónica.

Se rechaza la H4 ya que la CI-a-L y la CI-a-S no presentaron diferencias significativas durante las condiciones de ENOS (El Niño y La Niña). La CI-a-S presentó siempre concentraciones bajas independientemente de la presencia de condiciones de ENOS. Sin embargo, se encontró una tendencia decreciente significativa (análisis de Mann-Kendall $p < 0.05$) de la concentración de la CI-a-int-S en el periodo de 22 años (1998-2019).

11. CONCLUSIONES

1. La temperatura del aire y la precipitación muestran la presencia de dos temporadas: 1) fría y seca, 2) cálida y de lluvias. Los años correspondientes al evento Niño presentaron mayores temperaturas y menores precipitaciones, y los años Niña presentaron menores temperaturas y mayores precipitaciones.
2. No se encontraron diferencias significativas a lo largo del periodo estudiado en la Z_{MIX} , ni tampoco se observa una tendencia de cambio significativa ($p > 0.05$) a lo largo de todo el periodo.
3. Los cambios generales de la Z_{EU} presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre algunos años a lo largo del periodo 1998-2019; la tendencia gráfica decreciente de la Z_{EU} no resultó estadísticamente significativa ($p > 0.05$) de acuerdo con el análisis de Mann-Kendall. Los valores máximos de Z_{EU} han ido disminuyendo y se relacionan con años más cálidos. Los valores mínimos de Z_{EU} son relativamente constantes.
4. La temperatura de la columna de agua promedio anual mostró un aumento general de $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura de fondo del periodo de 1998 a 2019. En los años correspondientes al evento Niño se presentaron mayores temperaturas promedio del agua y en los años Niña menores, los cuales fueron estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).
5. No se encontraron diferencias significativas en la concentración de OD, ni tampoco se observa una tendencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$) de la OD a lo largo del periodo 1998-2019.

6. Las concentraciones de Cl-a-T y Cl-a-L no fueron significativamente diferentes ($p > 0.05$) en los años Niño en comparación con los años Niña. La concentración de Cl-a-S presentó concentraciones bajas y no se correlacionó ni con años Niño ni con años Niña. Sin embargo, se encontró una tendencia decreciente significativa (análisis de Mann-Kendall $p < 0.05$) de la concentración de la Cl-a-int-S en el periodo de 22 años (1998-2019).
7. El análisis de onduletas mostró dos ciclos dominantes: uno anual y uno bienal. El ciclo anual se registró en todas las variables, excepto en el MEI. La T, OD, Z_{EU}, Z_{MIX}, Cl-a-T, Cl-a-L y Cl-a-S se asocian con la monomixis cálida del lago. El ciclo bienal se registró para la Cl-a-T, Cl-a-L y MEI. Se registraron dos ciclos más cortos (3 y 6 meses) y dos ciclos más largos (4 y 6-8 años). Los ciclos cortos son difíciles de explicar debido a la variabilidad de los distintos parámetros involucrados. Los ciclos largos están relacionados con los eventos climáticos del ENOS.

12. REFERENCIAS

- Abbott, M. R., K. L. Denman, T. M. Powell, P. J. Richerson, R. C. Richards y C. R. Goldman. 1984. Mixing and the dynamics of the deep chlorophyll maximum in Lake Tahoe. *Limnology and Oceanography* 29(4): 862-878
- Adame, M. F., J. Alcocer y E. Escobar. 2008. Size-fractionated phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake. *Freshwater Biology* 53: 22-31
- Alcocer, J. y A. Lugo. 2003. Effects of El Niño on the dynamics of Lake Alchichica, central Mexico. *Geofísica Internacional* 42(3): 523-528
- Alcocer, J. y F. Bernal. 2009. Investigación ecológica a largo plazo en cuerpos acuáticos epicontinentales. *Revista Digital Universitaria*
<http://www.revista.unam.mx/vol.10/num87art52/int52-1.htm>
- Alcocer, J. y U. T. Hammer. 1998. Saline Lake ecosystems of Mexico. *Aquatic Ecosystem Health Manage* 1: 291–315
- Alcocer, J., A. Lugo, E. Escobar, M. R. Sánchez y G. Vilaclara. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic lake Alchichica, Puebla, Mexico. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 27(5): 3166-3169
- Alcocer, J., A. Lugo, R. Fernández, G. Vilaclara, M. G. Oliva, L. A. Oseguera, R. A. Silva-Aguilera y Ó. Escolero. 2022a. 20 Years of Global Change on the Limnology and Plankton of a Tropical, High-Altitude Lake. *Diversity* 14(3):190.
<https://doi.org/10.3390/d14030190>
- Alcocer, J., B. Quiroz-Martínez, M. Merino-Ibarra, L.A. Oseguera y M. Macek. 2022b. Using Wavelet Analysis to Examine Long-Term Variability of Phytoplankton

- Biomass in the Tropical, Saline Lake Alchichica, Mexico. *Water* 14(19): 1346. <https://doi.org/10.3390/w14091346>
- Arar, E. J. y G. B. Collins. 1997. Method 445.0. In vitro determination of chlorophyll a and pheophytin a in marine and freshwater algae by fluorescence. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, 22 p.
- Ardiles, V., J. Alcocer, G. Vilaclara, L. A. Oseguera y L. Velasco. 2012. Diatom fluxes in a tropical, oligotrophic lake dominated by large-sized phytoplankton. *Hydrobiologia* 679: 77-90. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0853-7>
- Armienta, M. A., G. Vilaclara, S. De la Cruz-Reyna, S. Ramos, N. Cenicerros, O. Cruz, A. Aguayo y F. Arcega-Cabrera. 2008. Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 178(2): 249-258
- Bernard, C., A. Escalas, N. Villeriot, H. Agogu e, M. Hugoni, C. Duval, C. Carr e, P. Got, G. Sarazin, D. J ez eque, C. Leboulanger, V. Grossi, M. Ader y M. Troussellier. 2019. Very low phytoplankton diversity in a tropical saline-alkaline lake, with co-dominance of *Arthrospira fusiformis* (Cyanobacteria) and *Picocystis salinarum* (Chlorophyta). *Microbial ecology* 78(3): 603-617
- Beutel, M. W., A. J. Horne, J. C. Roth y N. J. Barratt. 2001. Limnological effects of anthropogenic desiccation of a large, saline lake, Walker Lake, Nevada. *Hydrobiologia* 466: 91-105
- Bravo, J. L., E. Azpra, V., Zarraluqui, C. Gay y F. Estrada. 2010. Significance tests for the relationship between "El Ni o" phenomenon and precipitation in Mexico. *Geof sica internacional* 49(4): 245-261
- Bravo-Cabrera, J. L., E. Azpra-Romero, V. Zarraluqui-Such y C. Gay-Garc a. 2017. Effects of El Ni o in Mexico during rainy and dry seasons: an extended treatment. *Atm sfera* 30(3): 221-232
- Caballero, M. y G. V zquez. 2020. Mixing patterns and deep chlorophyll a maxima in an eutrophic tropical lake in western Mexico. *Hydrobiologia* 847(20): 4161-4176

- Caballero, M., A. Rodríguez, G. Vilaclara, B. Ortega, P. Roy y S. Lozano-García. 2013. Hydrochemistry, ostracods and diatoms in a deep, tropical, crater lake in Western Mexico. *Journal of Limnology* 72(3): 512-523
- Caballero, M., G. Vázquez, B. Ortega, M. E. Favila, y S. Lozano-García. 2016. Responses to a warming trend and “El Niño” events in a tropical lake in western México. *Aquatic Sciences* 78(3): 591-604
- Caballero, M., G. Vilaclara, A. Rodríguez y D. Juárez. 2003. Short-term climatic change in lake sediments from lake Alchichica, Oriental, Mexico. *Geofísica Internacional* 42(3): 529-537
- Callieri, C. 2007. Picophytoplankton in freshwater ecosystems: the importance of small-sized phototrophs. *Freshwater reviews* 1(1): 1-29
- Cane, M. 2005. The evolution of the El Niño, past and future. *Earth Planetary Science Letters* 230:227-240
- Cárcamo, J. R. 2017. Evaluación de la productividad primaria y la concentración de la clorofila a en los lagos cráter La Preciosa y Atexcac, Puebla. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. 110 p.
- Cardoso-Mohedano, J. G., J. A. Sanchez-Cabeza, A. C. Ruiz-Fernández, L. H. Pérez-Bernal, J. Lima-Rego y S. Giralt. 2019. Fast deep water warming of a subtropical crater lake. *Science of The Total Environment* 691: 1353-1361
- Casallas, J., y G. Gunkel. 2001. Algunos aspectos limnológicos de un lago altoandino: el lago San Pablo, Ecuador. *Limnetica* 20(2): 215-232
- Cazelles, B., M. Chavez, D. Berteaux, F. Ménard, J. O. Vik, S. Jenouvrier y N. C. Stenseth. 2008. Wavelet analysis of ecological time series. *Oecologia* 156: 287-304
- Chacon-Torres, A. y C. Rosas-Monge. 1998. Water quality characteristics of a high altitude oligotrophic Mexican lake. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 1(3-4): 237-243

- Chapman, L. J., C. A. Chapman, T. L. Crisman y F. G. Nordlie. 1998. Dissolved oxygen and thermal regimes of a Ugandan crater lake. *Hydrobiologia* 385(1): 201-211
- Cloern, J. E. y A. D. Jassby. 2008. Complex seasonal patterns of primary producers at the land–sea interface. *Ecology Letters* 11: 1294-1303
- Cooper, J. J., y D. L. Koch. 1984. Limnology of a desertic terminal lake, Walker Lake, Nevada, USA. *Hydrobiologia* 118(3): 275-292
- Cuevas-Lara J.D., J. Alcocer, L.A. Oseguera y B. Quiroz-Martínez. 2016. Dinámica largo plazo (1999-2014) de la productividad primaria fitoplanctónica en el Lago Alchichica, Puebla. pp. 280-286. En: F. Paz Pellat, J. Wong González y R. Torres Alamilla (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Texcoco, Estado de México, México. 732 pp. ISBN 978-607-96490-4-3
- Darchambeau F., H. Sarmiento y J. P. Descy. 2014. Primary production in a tropical large lake: The role of phytoplankton composition. *Science of the Total Environment* 473-474: 178-188
- De la Lanza-Espino G., G. Gómez-Rodríguez, A. Islas, V. Richards y S. Pulido. 2011. Analysis of the effect of El Niño and La Niña on Tecocomulco Lake, central basin, Mexico. *Hidrobiologica* 21:249-259
- Felip, M., y J. Catalan. 2000. The relationship between phytoplankton biovolume and chlorophyll in a deep oligotrophic lake: decoupling in their spatial and temporal maxima. *Journal of Plankton Research* 22(1): 91-105
- Filonov, A., I. Tereshchenko y J. Alcocer, 2006. Dynamic response to mountain breeze circulation in Alchichica, a crater lake in Mexico. *Geophysical Research Letters* 33: L07404. doi:10.1029/2006GL025901

- Frenette, J. J., W. F. Vincent, L. Legendre y T. Nagata. 1996. Size-dependent phytoplankton responses to atmospheric forcing in Lake Biwa. *Journal of Plankton Research* 18(3): 371-391
- Galat, D. L., E. L. Lider, S. Vigg y S. R. Robertson. 1981. Limnology of a large, deep, North American terminal lake, Pyramid Lake, Nevada, U. S. A. *Hydrobiologia* 82: 281-317
- Girgin, S., N. Kazancı y M. Dügel. 2004. On the limnology of deep and saline Lake Burdur in Turkey. *Acta hydrochimica et hydrobiologica* 32(3): 189-200
- Glantz M.H., 2000. Currents of change impacts of El Niño and La Niña on climate and society, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge 268 p.
- González, G. C. 2013. Variación a largo plazo de la concentración y distribución vertical de la clorofila a fitoplanctónica en el lago Alchichica Puebla. Tesis de maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. 61 p.
- González-Contreras C. G., J. Alcocer y L. A. Oseguera. 2015. Clorofila a fitoplanctónica en el lago tropical profundo Alchichica: un registro de largo plazo (1999-2010). *Hidrobiológica* 25(3): 347-356
- Grinsted, A., Moore, J. C. y Jevrejeva, S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes Geophysics* 11:561-566. doi:10.5194/npg-11-561-2004
- Hambright, K. D., M. Gophen y S. Serruya. 1994. Influence of long-term climatic changes on the stratification of a subtropical, warm monomictic lake. *Limnology and Oceanography* 39(5): 1233-1242
- Hamilton, D. P., K. R. O'Brien, M. A. Burford, J. D. Brookes y C. G. McBride. 2010. Vertical distributions of chlorophyll in deep, warm monomictic lakes. *Aquatic Sciences* 72(3): 295-307

- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontología Electrónica* 4(1): 9
http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Hampton, S. E., L. R. Izmet'eva, M. V. Moore, S. L. Katz, B. Dennis y E. A. Silow. 2008. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake -Lake Baikal, Siberia. *Global Change Biology* 14(8): 1947-1958
- Hsieh, C. H., Ishikawa, K., Sakai, Y., Ishikawa, T., Ichise, S., Yamamoto, Y., Kuo, T. C., Park, H. D., Yamamura, N. y M. Kumagai. 2010. Phytoplankton community reorganization driven by eutrophication and warming in Lake Biwa. *Aquatic Sciences* 72(4): 467-483
- Huang, Q., N. Li y Y. Li. 2021. Long-term trend of heat waves and potential effects on phytoplankton blooms in Lake Qiandaohu, a key drinking water reservoir. *Environmental Science and Pollution Research* 28(48): 68448-68459
- Huisman, J., J. Sharples, J. M., Stroom, P. M. Visser, W. E. A. Kardinaal, J. M. Verspagen, y B. Sommeijer. 2004. Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species. *Ecology* 85(11): 2960-2970
- Infante, A. G. 1997. Primary production of phytoplankton in Lake Valencia (Venezuela). *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* 82(4): 469-477
- Izmet'eva, L. R., E. A. Silow y E. Litchman. 2011. Long-term dynamics of Lake Baikal pelagic phytoplankton under climate change. *Inland Water Biology* 4(3): 301-307
- Khodzher, T. V., V. M. Domysheva, L. M. Sorokovikova, M. V. Sakirko y I. V. Tomberg. 2017. Current chemical composition of Lake Baikal water. *Inland Waters* 7(3): 250-258
- Kocasari, F. S., I. Gulle, S. Kocasari, S. Pekkaya y F. Mor. 2015. The occurrence and levels of cyanotoxin nodularin from *Nodularia spumigena* in the alkaline and salty Lake Burdur, Turkey. *Journal of Limnology* 74(3): 530-536

- Lafond, M., B. Pinel-Alloul y P. Ross. 1990. Biomass and photosynthesis of size-fractionated phytoplankton in Canadian Shield lakes. *Hidrobiologia* 196: 25-38
- Lau, K. M. y H. Weng. 1995. Climatic signal detection using wavelet transform: how to make a time series sing. *Bulletin of the American Meteorological Society* 76: 2391-2402
- Lewis, W. M. 1973. The thermal regime of Lake Lanao (Philippines) and its theoretical implications for Tropical Lakes 1. *Limnology and Oceanography* 18(2): 200-217
- Lewis, W. M. 1978a. A compositional, phytogeographical and elementary structural analysis of the phytoplankton in a tropical lake: Lake Lanao, Philippines. *The Journal of Ecology* 66(1): 213-226
- Lewis, W. M. 1978b. Dynamics and succession of the phytoplankton in a tropical lake: Lake Lanao, Philippines. *The Journal of Ecology* 66(3): 849-880
- Lewis, W. M. 1983. Temperature, heat, and mixing in Lake Valencia, Venezuela 1. *Limnology and oceanography* 28(2): 273-286
- Lewis, W. M. 1996. Tropical lakes: how latitude makes a difference, pp. 43-64. In: Schiemer F. y K. Boland (eds.). *Perspectives in Tropical Limnology*. Academic Publishing.
- Lind, O.T. 1979. *Handbook of common methods in Limnology*. 2nd Edition. 199 p.
- Maeda, H., A. Kawai y M. M. Tilzer. 1992. The water bloom of cyanobacterial picoplankton in Lake Biwa, Japan. *Hydrobiologia* 248(2): 93-103
- Magaña V. O., J. L. Vázquez, J. L. Pérez y J. B. Pérez, 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*. 42(3): 313-330
- Mallat, S. 1998. *A Wavelet Tout of Signal Processing*. Academic Press: San Diego, CA, USA, 832 p.
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Ediciones Omega. Barcelona. 951 p.

- Margaritora, F. G., M. Bazzanti, O. Ferrara, L. Mastrantuono, M. Seminara y D. Vagaggini. 2003. Classification of the ecological status of volcanic lakes in Central Italy. *Journal of Limnology* 62(1): 49-59
- Mudakikwa, E. R., W. Thiery, A. Latli, B. Leporcq, E. Rugema y J. P. Descy. 2021. Phytoplankton pigment analysis as a tool for monitoring a tropical great lake, Lake Kivu (East Africa). *Inland Waters* 11(2): 223-233
- Nelson, C. S. 1983. Bottom sediments of Lake Rotoma. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 17(2): 185-204 DOI: 10.1080/00288330.1983.9515996
- NOAA, 2020. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2). Physical Sciences Laboratory (PSL), United States of America (USA). (en línea): <https://psl.noaa.gov/enso/mei/> (Enero, 2020).
- Oliva, M. G., A. Lugo, J. Alcocer, L. Peralta y M. R. Sánchez. 2001. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hidrobiologia* 466: 299-306
- Oliva, M. G., A. Lugo, J. Alcocer, L. Peralta y L.A. Oseguera. 2009. Planktonic Bloom-Forming *Nodularia* in the Saline Lake Alchichica, Mexico. *Natural Resources and Environmental* 15 (22): 121-126
- Pajares, S., M. Merino-Ibarra, M. Macek y J. Alcocer. 2017. Vertical and seasonal distribution of picoplankton and functional nitrogen genes in a high-altitude warm-monomictic tropical lake. *Freshwater Biology* 62: 1180-1193 <https://doi.org/10.1111/fwb.12935>
- Plisnier, P.-D., Nshombo, M., Mgana, H. y Ntakimazi, G. 2018. Monitoring climate change and anthropogenic pressure at Lake Tanganyika. *Journal of Great Lakes Research* 44: 1194-1208
- Raffoul, M. H., E. M. Enanga, O. E. Senar, I. F. Creed y C. G. Trick. 2020. Assessing the potential health risk of cyanobacteria and cyanotoxins in Lake Naivasha, Kenya. *Hidrobiologia* 847(4): 1041-1056

- Ramírez-Olvera, M. A., Alcocer, J., Merino-Ibarra, M. y Lugo, A. 2009. Nutrient limitation in a tropical saline lake: a microcosm experiment. *Hydrobiologia* 626: 5-15
- Reynolds, C. S. 1984. *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press. Segunda Edición. Gran Bretaña. 384 p.
- Reynolds, C. S. 2006. *Ecology of phytoplankton*. Cambridge University Press. 535 p.
- Rojas, C. 2017. Evaluación anual de la productividad primaria y del contenido de clorofila “a” en el lago cráter, Atexcac, Puebla. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. 102 p.
- Saavedra-Gastélum, V., T. Fernández-Harmony, T. Harmony-Baillet, y V. M. Castaño-Meneses. 2006. Ondeletas en ingeniería: Principios y aplicaciones. *Ingeniería, investigación y tecnología* 7(3): 185-190
- Sarmiento, H. 2012. New paradigms in tropical limnology: The importance of the microbial food web. *Hydrobiologia* 686: 1-14
- Sarmiento, H., F. Unrein, M. Isumbisho, S. Stenuite, J. M. Gasol y J. P. Descy, 2008. Abundance and distribution of picoplankton in tropical, oligotrophic Lake Kivu, eastern Africa. *Freshwater Biology* 53: 756-771
- Saulnier-Talbot, É., I. Gregory-Eaves, K. G. Simpson, J. Efitre, T. E. Nowlan, Z. E. Taranu y L. J. Chapman. 2014. Small changes in climate can profoundly alter the dynamics and ecosystem services of tropical crater lakes. *PloS one* 9(1): e86561
- Saulnier-Talbot, É., L. J. Chapman, J. Efitre, K. G. Simpson y I. Gregory-Eaves. 2018. Long-term hydrologic fluctuations and dynamics of primary producers in a tropical crater lake. *Frontiers in Ecology and Evolution* (6): 223
- Sekino, T., M. Genkai-Kato, Z. I. Kawabata, N. G. Melnik, N. P. Logacheva, O. I. Belykh, L. A. Obolkina, N. A. Bondarenko, T. V. Khodzher, L. A. Gorbunova, A. I. Tanichev, T. Yoshida, M. Kagami, T. B. Gurung, J. Urabe, M. Higashi y M. Nakanishi. 2007. Role of phytoplankton size distribution in lake ecosystems

revealed by a comparison of whole plankton community structure between Lake Baikal and Lake Biwa. *Limnology* 8(3): 227-232

Sieburth, M^c N., V. Smetacek y J. Lenz. 1978. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology and Oceanography* 23: 1256-1263

SMN, 2020. Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Normales Climatológica por estado. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México. (en línea): <https://smn.conagua.gob.mx/> (Enero, 2020).

Sommer, U., Z. M. Gliwicz, W. Lampert y A. Duncan. 1986. The PEG- model of seasonal successions of planktonic events in fresh waters. *Archives of Hydrobiology* 104(4): 422-471

Stockner, J. G. y N. J. Antia. 1986. Algal Picoplankton from Marine and Freshwater Ecosystems: A Multidisciplinary Perspective. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 43(12); 2472-2503. doi:10.1139/f86-307

Talling, J. F. 1986. The seasonality of phytoplankton in African lakes. *Hydrobiologia* 138: 138-160

Tavera, R. y V. Martínez-Almeida. 2005. Atelomixis as a possible driving force in the phytoplankton composition of Zirahuén, a warm-monomictic tropical lake. *Hydrobiologia* 533(1): 199-208

Torrence, C. y G. P. Compo. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(1): 61-78

Vilaclara, G., M. Chávez, A. Lugo, H. González y M. Gaytán. 1993. Comparative description of crater-lakes basic chemistry in Puebla state, Mexico. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 25: 435-440.

Vilaclara, G., M.G., Oliva-Martínez, M., Macek, E., Ortega-Mayagoitia, R.J., Alcántara-Hernández y C. López-Vázquez. 2022. Phytoplankton of Alchichica: A Unique

Community for an Oligotrophic Lake. In: Alcocer, J. (eds) Lake Alchichica Limnology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79096-7_12

Wetzel, R. G. 2001. Limnology. Lake and River Ecosystem. Academic Press, San Diego. 1006 p.

Winder, M. y J. E. Cloern. 2010. The annual cycles of phytoplankton biomass. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 365(1555): 3215-3226

Winder, M. y D. A. Hunter. 2008. Temporal organization of phytoplankton communities linked to chemical and physical forcing. Oecologia 156(1): 179-192

Winder, M., J. E. Reuter y S. G. Schladow. 2009. Lake warming favours small-sized planktonic diatom species. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 276(1656): 427-435

Zhang, Y., Z. Wu, M. Liu, J. He, K. Shi, Y. Zhou, M. Wang y X. Liu. 2015. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China). Water Research 75: 249-258

13. ANEXOS

Anexo 1. Parámetros comparativos de diferentes lagos, M: Monomíctico cálido, ME: Meromíctico D: Dimíctico, O: Oligomíctico, Z_{MAX}: profundidad máxima

Lago	Tipo de mezcla	País	Años de muestreo	Z _{MAX} (m)	Estado trófico	Latitud (templada o tropical)	Altitud (m s.n.m.)	Z _{EU} (m)	Z _{MIX} (m)	Autor
Alchichica	M	México	1998 - 2019	60	Oligo	Tropical (19° 24' N)	2320	30.7 ± 5.8	29.7 ± 18.9	Presente estudio
Lanao	M	Filipinas	1970 - 1971	112	Eu	Tropical (8° 00' N)	720	15	12	Lewis, 1973; 1978a, b
Valencia	M	Venezuela	1977 - 1978; 1989 - 1990	40	Meso	Tropical (10° 10' N)	420	3.5	17	Lewis, 1983; Infante, 1997
Zirahuén	M	México	1989 - 1994	40	Meso	Tropical (19° 21' N)	2100	15	35	Tavera y Martínez-Almeida, 2005; Armienta <i>et al.</i> , 2008
Atexcac	M	México	2013 - 2014	39	Oligo	Tropical (19° 20' N)	2340	13.5 - 25	19	Armienta <i>et al.</i> , 2008; Rojas, 2017
Atexcac	M	México	2014	39	Oligo	Tropical (19° 20' N)	2340	8.5 - 16.7	20	Armienta <i>et al.</i> , 2008; Cárcamo, 2017
San Pablo	M	Ecuador	1998 - 1999	35	Meso	Tropical (00° 13' N)	2660	3	10	Casallas y Gunkel, 2001
Alberca de Tacámbaro	M	México	2015 - 2019	27	Eu	Tropical (19° 13' N)	1460	8.9 ± 4.5	15	Caballero y Vázquez, 2020
Dziani Dzaha	M	India	2014-2015	18	Hipereu	Tropical (12° 46' S)	0	1.5	-	Bernard <i>et al.</i> , 2019
Nkuruba	O	Uganda	1992 - 1993	38	Meso	Tropical (00° 32' N)	1520	2.5 ± 0.7	15	Chapman <i>et al.</i> , 1998; Saulnier-Talbot <i>et al.</i> , 2014, 2018
Kivu	Me	África	2002-2009; 2018-2019	489	Oligo	Tropical (02° 33' S)	1463	15.3 - 18.2	25-60	Sarmiento <i>et al.</i> , 2008; Mudakikwa <i>et al.</i> , 2021

Continuación del Anexo 1.

Biwa	M	Japón	ago-sep 1993	104	Meso	Templado (35° N)	-	1.2 - 5	-	Maeda <i>et al.</i> , 1992; Frenette <i>et al.</i> , 1996; Sekino <i>et al.</i> , 2007
Qiandaohu	M	China	2010 - 2014	100	Oligo	Templado (29° N)	-	0 - 10	30	Zhang <i>et al.</i> , 2015
Burdur	M	Turquía	2011	61	Oligo	Templado (37° N)	-	1.63	-	Kocasari <i>et al.</i> , 2015
Burdur	M	Turquía	(4 meses) 1997	100	Oligo	Templado (37° N)	-	1 a 5	10 a 16	Girgin <i>et al.</i> , 2004
Tahoe	Mf	Estados Unidos	1982 - 2006	501	Oligo	Templado (39° N)	1898	19.5 - 24.7	-	Winder y Hunter 2008; Winder <i>et al.</i> , 2009
Taupo	M	Nueva Zelanda	2003 - 2006	164	-	Templado (38° N)	-	40 - 50	-	Hamilton <i>et al.</i> , 2010
Rotoiti	M	Nueva Zelanda	2003 - 2006	124	-	Templado (38° N)	-	10-20	-	Hamilton <i>et al.</i> , 2010
Piramide	M	Estados Unidos	1976 - 1977	103	Oligo	Templado (40° N)	1157	11	30	Galat <i>et al.</i> , 1981
Tarawera	M	Nueva Zelanda	2003 - 2006	88	-	Templado (38° N)	-	20 - 30	-	Hamilton <i>et al.</i> , 2010
Rotoma	M	Nueva Zelanda	1975	83	Oligo	Templado (39° N)	315	13.7	24	Nelson, 1983
Walker	M	Estados Unidos	1975 - 1977	35	-	Templado (38° N)	1234	1 - 10.2	15	Cooper y Koch, 1984
Kinneret	M	Israel	1969 - 1990	44	Meso	Templado (32° N)	-	2.5 - 4.5	10	Hambright <i>et al.</i> , 1994
Baikal	D	Rusia	1999 - 2000	1741	Oligo	Templado (53° N)	-	5 a 20	-	Sekino <i>et al.</i> , 2007; Hampton, 2008; Khodzher <i>et al.</i> , 2017
Martignano	-	Italia	20 años	60	Oligome	Templado (42° N)	207	7 a 11	-	Margaritora <i>et al.</i> , 2003

Anexo 2. Temperatura y concentración de oxígeno disuelto en distintos lagos. T_{AX}: Temperatura promedio del agua. Los subíndices muestran las temperaturas promedio del agua; T_{AS}: superficial, T_{AM}: media, T_{AF}: de fondo. OD_X: oxígeno disuelto promedio. Los subíndices muestran los OD promedio; OD_S: superficial y OD_F: fondo.

Lago	T _{AX} (°C)	T _{AS} (°C)	T _{AM} (°C)	T _{AF} (°C)	OD (%)	OD _X (mg L ⁻¹)	OD _S (mg L ⁻¹)	OD _F (mg L ⁻¹)	Autor
Alchichica	15.7 ± 1.6	17.6 ± 1.8	15.7 ± 1.4	14.7 ± 0.3	-	2.5 ± 3.0	-	-	Presente estudio
Lanao	24.5 - 26.2	24 - 25	-	-	-	4 - 9	-	-	Lewis, 1973; 1978 a,b
Valencia	25.5 - 29	25.5 - 29	25.5 - 28.0	25.0 - 27.0	-	-	-	-	Lewis, 1983; Infante, 1997
Zirahuén	16.6 - 22	16 - 22	19.9 ± 2.1	16.7 ± 0.5	93	0.5 - 8.0	8.0 ± 1.0	2.1 ± 2.1	Tavera y Martínez-Almeida, 2005; Armienta <i>et al.</i> , 2008
Atexcac	15.4 - 20.2	16 - 20.2	15.6 - 19.6	15.4 - 16.4	0 - 60	0 - 7.5	7	0 - 6.5	Armienta <i>et al.</i> , 2008; Rojas, 2017
Atexcac	18.9 ± 0.63	16.4 - 21.4	15.4 - 19.4	15.4 - 17.4	-	0.3 - 10.5	5.5 - 10.5	0 - 7	Armienta <i>et al.</i> , 2008; Cárcamo, 2017
San Pablo	16.5 - 21	17.6 - 19.6	17.6 - 18	16.8 - 17.6	0 - 150	6.4	-	-	Casallas y Gunkel, 2001
Alberca de Tacámbaro	19.3 ± 2.1	21.5 ± 2.6	19.8 ± 2.0	18.0 ± 0.2	-	2.6 ± 3.3	6.8 ± 2.7	Anoxia	Caballero y Vázquez, 2020
Dziani Dzaha	29.5 - 33	30 - 33	30 - 30.5	25.5 - 30.5	15 - 400	-	-	Anoxia	Bernard <i>et al.</i> , 2019
Nkuruba	22 - 24.7	23.3 ± 0.7	-	21.5 - 22	-	6.6 ± 1.3	-	Anoxia	Chapman <i>et al.</i> , 1998; Saulnier-Talbot <i>et al.</i> , 2014, 2018
Kivu	-	23.1-24.2	-	-	-	-	-	-	Sarmiento <i>et al.</i> , 2008

Continuación del Anexo 2.

Biwa	5 - 21	3 - 27	-	6 a 8	-	-	-	-	Maeda <i>et al.</i> , 1992; Frenette <i>et al.</i> , 1996; Sekino <i>et al.</i> , 2007
Qiandaohu	5 - 33	10 - 33	10 - 20	10 - 12	-	2 - 12	3 - 10	2 - 10	Zhang <i>et al.</i> , 2015
Burdur	21.6 ± 4.6	-	-	-	-	7.6 ± 1.4	-	-	Kocasari <i>et al.</i> , 2015
Burdur	3.2 - 20.6	7 a 28	-	7 a 13	60 - 70	6.2 - 7.7	-	-	Girgin <i>et al.</i> , 2004
Tahoe	5.0 - 9.5	7.0 - 9.5	5.0 - 7.0	5	-	-	-	-	Abbott <i>et al.</i> , 1984
Taupo	-	11.1 - 20.6	-	10.6 - 11.1	-	-	-	-	Hamilton <i>et al.</i> , 2010
Rotoiti	-	11.1 - 22.0	-	10.7 - 13.5	-	-	-	-	Hamilton <i>et al.</i> , 2010
Piramide	4 a 24	21.4 - 23.1	-	-	-	>2 - 11.8	8.1 - 11.8	> 2	Galat <i>et al.</i> , 1981
Tarawera	-	11.0 - 21.7	-	10.9 - 11.7	-	-	-	-	Hamilton <i>et al.</i> , 2010
Rotoma	10 a 14	16.2	-	11	69 - 100	-	-	-	Nelson, 1983
Walker	6 - 24	6 - 24	-	10 a 12	-	0.1 - 14.7	8 a 12	-	Cooper y Koch, 1984; Beutel <i>et al.</i> , 2001
Kinneret	14 - 28	-	-	-	-	-	-	Anoxia	Hambright <i>et al.</i> , 1994
Baikal	7.6 ± 0.2	-	-	-	110 - 150	9.5 - 14.5	-	-	Sekino <i>et al.</i> , 2007; Hampton, 2008; Izmet'seva <i>et al.</i> , 2011; Khodzher <i>et al.</i> , 2017
Martignano	-	-	-	-	-	-	-	0.7	Margaritora <i>et al.</i> 2003

Anexo 3. Concentraciones de Cl-a en distintos lagos. Los valores que se encuentran en paréntesis corresponden al intervalo reportado.

Lago	Cl-a-T ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Cl-a-L ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Cl-a-S ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Autor
Alchichica	3.5 \pm 4.0	2.7 \pm 3.7	0.6 \pm 0.8	Presente estudio
Valencia	37.7 \pm 15	-	-	Infante, 1997
Zirahuén	3.8	-	-	Chacón-Torres y Rosas-Monge, 1998
Atexcac	2.5 (0.5 - 13.5)	-	-	Rojas, 2017
Atexcac	0.3 - 9.9	-	-	Cárcamo, 2017
San Pablo	9.3	-	-	Casallas y Gunkel, 2001
Alberca de Tacámbaro	18.4 \pm 27.4	-	-	Caballero y Vázquez, 2020
Dziani Dzaha	652 \pm 179	-	-	Bernard <i>et al.</i> , 2019
Nkuruba	4 a 12	-	-	Chapman <i>et al.</i> , 1998
Kivu	2.2 - 5.3	-	0.6 - 1.5	Sarmiento <i>et al.</i> , 2008
Biwa	40.4 - 316.0	7.4 - 163.7	-	Sekino <i>et al.</i> , 2007
Qiandaohu	7.5 \pm 4.9 - 19.0 \pm 1.0	-	-	Huang <i>et al.</i> , 2021
Burdur	14.3 (0.3 - 4.8)	-	-	Kocasari <i>et al.</i> , 2015
Burdur	1.2 - 14.8	-	-	Girgin <i>et al.</i> , 2004
Tahoe	0.2 - 0.8	-	-	Abbott <i>et al.</i> , 1984
Taupo	0.8	-	-	Hamilton <i>et al.</i> , 2010
Rotoiti	8.7	-	-	Hamilton <i>et al.</i> , 2010
Piramide	3.3	-	-	Galat <i>et al.</i> , 1981
Tarawera	1.3	-	-	Hamilton <i>et al.</i> , 2010
Rotoma	0.9	-	-	Hamilton <i>et al.</i> , 2010
Walker	3.4	-	-	Beutel <i>et al.</i> , 2001
Baikal	3.2 - 19.2	1.1 - 9.6	-	Sekino <i>et al.</i> , 2007
Naivasha	27 - 350	-	-	Raffoul <i>et al.</i> , 2020
Redó	1.54 \pm 1.09	-	-	Felip y Catalan, 2000